

# **La metallurgia delle ghise**

**Volume II  
ghise  
grigie**



**ASSOFOND**  
**Associazione Nazionale delle Fonderie**

**20149 Milano**  
**Piazza G. Amendola, 3**

GLI EDITORI  
COMPIUTI I DOVERI  
SI RISERVANO I DIRITTI  
SANCITI DALLE LEGGI

**La  
metallurgia  
delle  
ghise**



**Volume II  
ghise  
grigie**



## Presentazione

*Un nuovo e significativo traguardo viene raggiunto con la pubblicazione del volume Ghise grigie, il secondo della serie La Metallurgia delle ghise.*

*L'Associazione, in considerazione dell'interesse dimostrato nei confronti del precedente volume pubblicato nel 1975, ha subito dopo incaricato la Commissione Tecnica — presieduta dall'ing. Luciano Oltrasi prima e dal dr. Mario Stefano Remondino dopo — di predisporre la stesura del secondo volume da presentare al XIV Congresso di Fonderia che l'Assofond organizza quest'anno in Emilia-Romagna.*

*I vari collaboratori delle precedenti edizioni possono essere profondamente orgogliosi di avere contribuito all'ammodernamento, allo sviluppo ed alla nuova impostazione che il settore industriale ha dato alla propria attività.*

*In questi ultimi trent'anni, pur attraverso inevitabili difficoltà, le Fonderie hanno progredito sulla strada della qualità e della quantità, facilitando in modo abbastanza sensibile lo sviluppo dei settori utilizzatori e raggiungendo traguardi più che lusinghieri.*

*È doveroso porgere il nostro più sentito ringraziamento ai membri della Commissione Tecnica, ma principalmente alle loro Aziende che hanno voluto autorizzare il lavoro dei propri collaboratori per la stesura del volume.*

*Cito nell'ordine:*

*Aspera S.p.A. - Borgaro Torinese (Torino)  
Beloit Italia S.p.A. - Pinerolo (Torino)  
Centro Sperimentale Metallurgico S.p.A. (CSM) - Roma  
Società Nazionale Cogne S.p.A. - Aosta  
Elettrometallurgica Calamari & C. S.p.A. - Trezzano s/Naviglio (Milano)  
FIMET S.p.A. - Brà (Cuneo)  
Fonderia Fumagalli Pio - Benna (Vercelli)  
Ideal Standard S.p.A. - Brescia  
Italsider S.p.A. - Stabilimenti di Savona e Trieste  
Laboratorio per la Lavorazione dei Metalli (L.A.M.E.) - Orbassano (Torino)  
Peraro F.O.R. S.p.A. - Stabilimenti di Padova e Rovigo  
S.C.M. S.p.A. (Società Costruzioni Macchine) - Rimini (Forlì)  
SIRMA S.p.A. - Malcontenta (Venezia)  
Tecnomasio Italiano Brown Boveri - Milano  
TEKSID S.p.A. - Gruppo Fonderie - Divisione Getti in Ghisa e Alluminio - Torino*

*nonché le altre numerose Aziende che, comunque, hanno contribuito alla realizzazione del volume.*

*Già in precedenti occasioni è stata messa in rilievo l'importanza del lavoro collegiale svolto, con entusiasmo e competenza, dai membri della Commissione Tecnica. La passione dei redattori, la viva attenzione dei coordinatori e lo scrupolo dei revisori dei singoli capitoli, costituiscono certamente una garanzia di serietà e di alta qualificazione del ponderoso lavoro che ho l'onore di proporre all'attenzione dei produttori e degli utilizzatori dei getti fusi.*

*L'unica ricompensa avuta da questi nostri magnifici volontari consiste nell'ottima accoglienza che i loro colleghi hanno riservato alle pubblicazioni dell'Assofond: sono certo che la stessa accoglienza verrà data anche a questo volume.*

Ing. Vincenzo Zagnoli  
Presidente dell'Assofond



## Introduzione

*La pubblicazione di questo secondo volume de La Metallurgia delle ghise fa avanzare la realizzazione del disegno dell'Associazione di fornire alle Fonderie italiane un'opera di consultazione aggiornata, accessibile e di pratica utilità.*

*Il primo volume ha aperto la strada e tra i suoi meriti desidero ricordarne soprattutto uno: quello di avere contribuito a cancellare il vecchio pregiudizio della esistenza di una teoria e di una pratica contrapposte.*

*Tutti hanno potuto vedere e toccare con mano che certi diagrammi e certe formule considerate moderni geroglifici non sono poi tanto impenetrabili, ma rappresentano un comodo e razionale modo di radunare in poco spazio un numero elevato di fatti sperimentali e di dati inoppugnabili.*

*Così la aborrita teoria non è altro che una pratica più attenta e più rigorosa che vuole ripetersi con sicurezza, indipendentemente dalle circostanze occasionali e dalle persone implicate.*

*Non dovrebbero più esistere una fonderia del laboratorio ed una fonderia dei reparti di lavoro, ma una sola fonderia che utilizza le osservazioni ed il contributo di tutti gli uomini presenti, le segnalazioni di tutti gli strumenti disponibili e l'apporto di tutte le scienze e tecnologie per svolgere i propri compiti.*

*Il disegno dell'opera prevede di trattare la materia in tre volumi e precisamente nel primo volume la metallurgia generale, nel secondo la ghisa grigia con grafite lamellare e nel terzo le ghise speciali (sferoidali, malleabili e legate).*

*Il secondo volume è stato scritto da un nutrito gruppo di Autori che possono vantare una lunga presenza in fonderia ed una perfetta familiarità con gli argomenti trattati.*

*Essi hanno svolto il proprio compito con appassionato fervore e con alto spirito di collaborazione: per fare ciò, essi hanno aggiunto un nuovo impegno a quello del normale lavoro, sottraendo tempo alle famiglie, allo svago, al loro giusto riposo.*

*Adempio, quindi, un giusto dovere, ringraziando calorosamente, a nome dell'Assofond, i Signori:*

*Berardo Abignente  
Erminio Astori  
Giorgio Bonicelli  
Ernesto Borghigiani  
Alfonso Bruno  
Antonio Calabrò  
Elio Calamari  
Giuseppe Cesti  
Ruggero Chiara  
Giorgio Cola  
Carlo Dalmazio  
Pio Fumagalli  
Carlo Alberto Gorla  
Giovanni Magistrali  
Alistico Marani  
Luciano Oltrasi  
Franco Pilaastro*

Aldo Regè  
Giovanni Riccio  
Valentino Riva  
Marino Selli  
Alfonso Vercelli  
Giulio Zanotti

Un ringraziamento particolare rivolgo al dr. Giovanni Riccio che, con abilità e pazienza, ha svolto il non lieve compito di armonizzare tra loro i vari capitoli, al fine di evitare omissioni e di eliminare sovrapposizioni e ripetizioni.

Altresì vanno ricordati i contributi fondamentali che — alla definizione del taglio dell'opera, così come della natura dei capitoli ed infine nella revisione critica — hanno dato il dr. Eugenio Mortara e l'ing. Luciano Oltrasi. Essi, che alcuni anni fa tennero a battesimo, nella loro qualità rispettivamente di Presidente dell'Assofond e di Presidente della Commissione Tecnica, la nascita della serie di volumi su La Metallurgia delle ghise, hanno così ancora dato un contributo di preziosa esperienza per migliorare il presente volume.

Ma detto questo e reso a ciascuno il suo, rimane il fatto del secondo volume de La Metallurgia delle ghise che affronta, ora, il giudizio delle Fonderie italiane e di tutto il pubblico dei lettori interessati alle fortune della Fonderia.

Sulla ghisa grigia a grafite lamellare invece di un volume di 300-400 pagine sarebbe stata necessaria una serie di volumi per un numero di pagine dieci volte maggiore.

È facile, quindi, trovare che nel secondo volume de La Metallurgia delle ghise mancano certi argomenti che in determinati casi possono essere ritenuti più importanti di altri.

La scelta degli argomenti è stata fatta seguendo il criterio di fornire ai lettori una visione essenziale del materiale ghisa grigia a grafite lamellare, la sua posizione nel campo dei materiali di costruzione, i processi di elaborazione, le proprietà e le applicazioni.

Il discorso è stato fatto per un lettore medio che, per avere fatto le scuole o per avere appreso dalla pratica della vita, conosce un poco di fisica, chimica, meccanica, elettrotecnica, organizzazione del lavoro, economia, politica, psicologia, ecc., insomma per un lettore moderno, sveglio, cautamente ottimista ed appassionato della fonderia.

In sostanza si è seguita la linea del primo volume.

Come si addice al tipo di materiale considerato — la ghisa grigia, che ha solide tradizioni secolari ed un futuro ragionevolmente favorevole — la trattazione dei diversi argomenti negli undici capitoli è stata impostata, dando il giusto riconoscimento alle idee ed ai processi ben stabiliti nel passato, ma senza rinunciare a prendere nella dovuta considerazione le possibilità offerte dai tentativi, dalle sperimentazioni e dalle realizzazioni proiettate in avanti.

Si dice che ogni fonderia fa caso a sé e, quindi, ogni soluzione è possibile in un particolare contesto. Questo è vero, ma entro certi limiti fissati dalle condizioni generali della tecnologia, dell'economia e dei mercati.

Così nel secondo volume si sono dovuti affrontare problemi di grande rilievo riguardanti la scelta di impianti, di processi e di materiali.

Gli Autori, pur considerando le numerose possibilità derivanti dai casi particolari, non hanno rinunciato ad indicare ai lettori quelle che possono essere considerate delle vie maestre.

*Il fattore economico è preponderante in questi tempi di crisi profonda e mi riferisco alle materie prime, all'energia ed al costo della mano d'opera.*

*Così i tecnici potrebbero essere spinti a sognare impossibili ritorni al tempo dei mulini a vento.*

*Non si è ceduto a questa tentazione e si è continuato a prospettare per ogni problema le soluzioni del progresso.*

*Le possibilità di tenuta e di sviluppo eventuale della produzione di getti di ghisa grigia a grafite lamellare sono state illustrate nel capitolo delle applicazioni.*

*A questo capitolo hanno collaborato diverse e qualificate Fonderie italiane che qui ringrazio. Colgo l'occasione per rivolgere lo stesso invito a collaborare al terzo volume de La Metallurgia delle ghise, quando si deciderà l'inizio della stesura, a tutte le Fonderie italiane interessate.*

*Ora che il secondo volume de La Metallurgia delle ghise è uscito all'aperto e si trova esposto a tutte le intemperie, vorrei raccomandarlo a fonditori ed utilizzatori di getti, tecnici ed amministratori, commerciali, studenti e curiosi.*

*Tutti questi possibili lettori sono sollecitati a sfogliare il volume, a saggiarlo sugli argomenti più congeniali e, infine, a leggerlo tutto da capo a fondo.*

*Le critiche, anche feroci, saranno le benvenute, perché contribuiranno ad arricchire il patrimonio di conoscenze sulla Fonderia che rimarrà a disposizione di tutti.*

Dr. Mario Stefano Remondino  
Presidente  
Commissione Tecnica



## Ghise grigie

- CAPITOLO I - CLASSIFICAZIONE E NORME
- CAPITOLO II - MATERIALI DI CARICA E CORRETTIVI
- CAPITOLO III - LA FUSIONE DELLA GHISA
- CAPITOLO IV - PROPRIETA' FISICHE
- CAPITOLO V - PROPRIETA' MECCANICHE E TECNOLOGICHE
- CAPITOLO VI - COMPORTAMENTO ALLE ALTE E ALLE BASSE TEMPERATURE
- CAPITOLO VII - RESISTENZA ALLA CORROSIONE
- CAPITOLO VIII - SALDATURA, BRASATURA E TAGLIO TERMICO
- CAPITOLO IX - LAVORAZIONE ALLE MACCHINE UTENSILI
- CAPITOLO X - RIVESTIMENTI METALLICI
- CAPITOLO XI - APPLICAZIONI



**Volume II: Ghise grigie**

**Capitolo I**

## **Classificazione e norme**

- DEFINIZIONE
- UN PASSO INDIETRO
- LA STRUTTURA
- LE PROPRIETA' SPECIFICHE
- CLASSIFICAZIONE DELLA GHISA GRIGIA
- LA NORMAZIONE DELLA GHISA GRIGIA
- BIBLIOGRAFIA

A cura di: Berardo Abignente  
Gualtiero Corelli  
Giovanni Riccio  
Valentino Riva



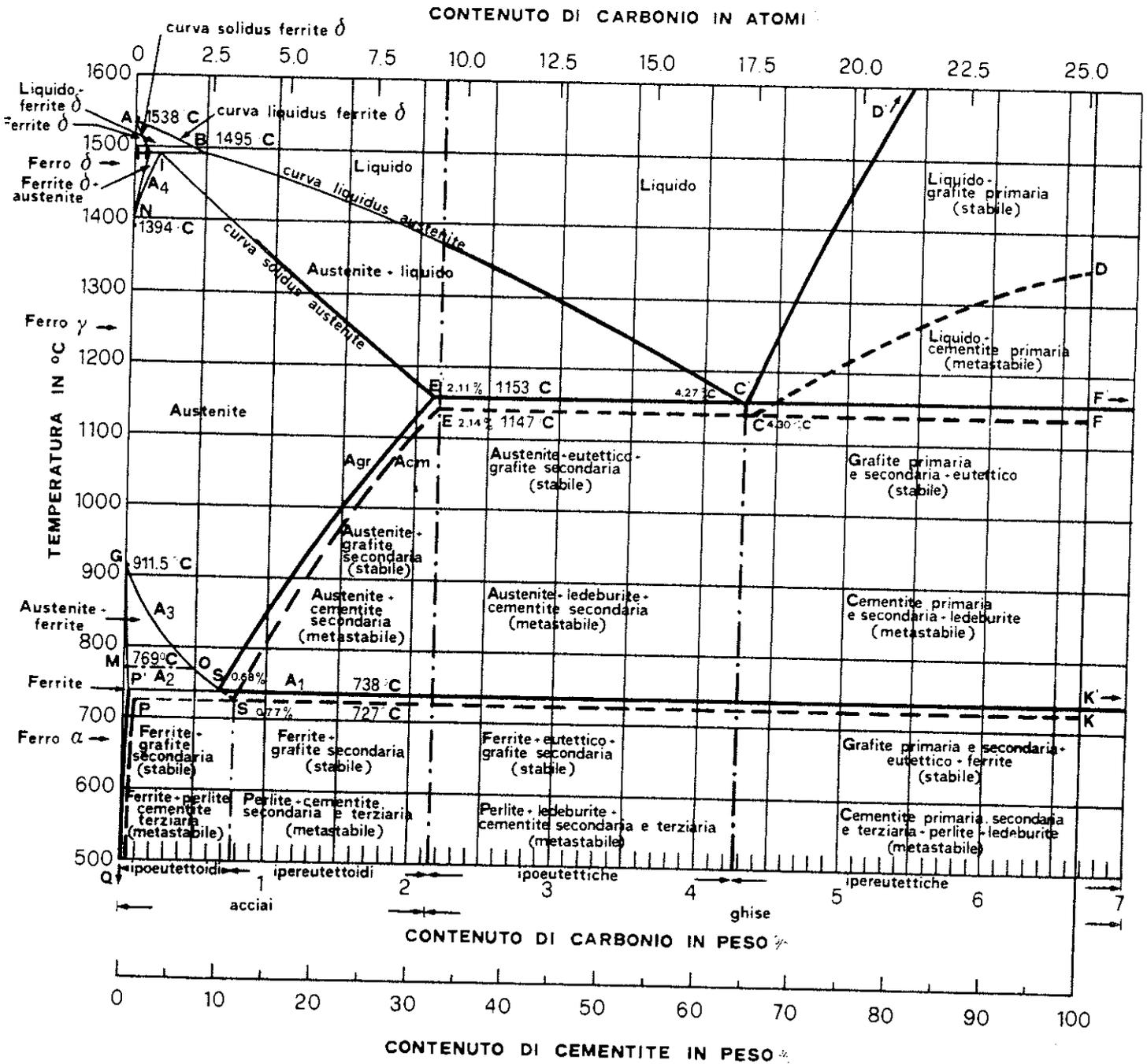
## DEFINIZIONE

La ghisa è una lega ferro-carbonio in cui il contenuto di carbonio è compreso, nella maggior parte dei casi, tra 2,1% e 3,6%. Nella ghisa grigia il carbonio si separa sotto forma di grafite nella misura dall'1,5% al 2,5% e conferisce alla frattura della lega un colore dal grigio chiaro al nero.

Oltre al carbonio la ghisa non legata contiene ancora il 3 ÷ 6% di altri costituenti normali come il silicio, il manganese, il fosforo e lo zolfo. Molti tipi di ghisa,

in base alla loro composizione chimica, hanno una struttura prossima all'eutettico; cioè l'intervallo di solidificazione è piccolo, la dimensione dei grani uniforme e la tendenza alla segregazione molto ridotta.

La struttura eutettica, o quasi eutettica, è vantaggiosa dal punto di vista delle caratteristiche meccaniche e della resistenza alla corrosione e spiega le proprietà specifiche di questo materiale (fig. 1) e la sua colabilità.



## UN PASSO INDIETRO

Per comprendere il posto che la ghisa grigia occupa nell'industria moderna, occorre rendersi conto dei vantaggi che presenta in confronto con altri materiali, vantaggi che assegnano a questo materiale un ruolo ben preciso e sovente insostituibile.

Oltre alla modicità del costo di produzione occorre tenere presente la semplicità della sua metallurgia, la grande facilità della sua messa in opera per colata e per lavorazione meccanica, la possibilità di ottenere le proprietà più diverse in una gamma molto estesa per adattarla il più esattamente possibile alle sollecitazioni che si incontrano nella pratica.

Per molto tempo si è considerata la ghisa una lega di qualità inferiore, fragile, irregolare, piena di difetti interni, quasi come un parente povero dell'acciaio.

Si è anche diffusa l'opinione che fosse illusorio cercare di conoscere meglio la ghisa per migliorarla, e questa opinione ha avuto corso non solo presso costruttori in seguito ad inconvenienti che potevano benissimo essere evitati, ma anche presso certi fonditori.

Per un tempo lunghissimo, che parte dal Medio Evo ed arriva ad epoche recenti, la ghisa grigia è stata il rifugio

dell'empirismo che regnava sovrano e si opponeva ad ogni spirito di ricerca scientifica e ad ogni desiderio di progresso.

I vecchi fonditori erano convinti di essere depositari di segreti di una vera e propria arte, ed ancora oggi si parla con tutta serietà dell'arte della fonderia.

I pionieri dello spirito scientifico, che hanno cercato di capire meglio la ghisa grigia, hanno stabilito che essa è una lega interessante e complessa, dotata di proprietà molto diverse, suscettibili di variare entro larghi limiti e di essere notevolmente migliorate. I risultati di tutto questo lavoro di ricerca sono stati ampiamente illustrati nel Volume I della *Metallurgia delle ghise* in cui gli autori sono riusciti a superare la difficoltà dei concetti e le astrusità delle teorie con una esposizione semplice e con esempi sempre calzanti e talvolta divertenti con richiami alla vita familiare, allo sport e alla politica. Nel rimandare il lettore desideroso di maggiori dettagli al Volume I, ci si limita qui a richiamare brevemente i concetti fondamentali sulla struttura delle ghise grigie, utili per comprenderne le proprietà.

## LA STRUTTURA

Quando ci si occupa di ghisa grigia, si deve tenere conto di alcuni fatti essenziali che determinano la sua produzione, la sua messa in opera ed il suo adattamento alle condizioni di impiego.

La struttura è essenzialmente eterogenea, in quanto è costituita da lamelle di grafite distribuite ed orientate in una matrice acciaiata contenente tenori elevati di silicio e quasi sempre fosforo (fig. 2).

Le lamelle di grafite, viste nello spazio, presentano forme incurvate che sembrano ripartite in modo completamente casuale.

È stato dimostrato, senza possibilità di equivoco, che si tratta di un insieme di cristalli elementari di carbonio

di dimensioni molto ridotte, il cui reticolo ha tutte le caratteristiche di un sistema cristallino.

Le dimensioni, la forma e la ripartizione di queste inclusioni di grafite sono notevolmente influenzate dalla velocità di raffreddamento nel caso della solidificazione eutettica, cioè dalla temperatura di colata, dal peso e dalle dimensioni del getto; questi fenomeni sono ancora complicati da una sovrapposizione più o meno pronunciata.

Diversamente da quello che avviene in altre leghe di struttura policristallina, dotate di una struttura primaria di colata, la struttura primaria che si osserva nella ghisa grigia non è più suscettibile di essere sensibilmente modificata da un trattamento termico al di sotto del punto di fusione.

L'eutettico, che si è formato durante la solidificazione, comprende, oltre alla grafite, cristalli misti  $\gamma$  il cui tenore di carbonio disciolto dipende dalla presenza di elementi che l'accompagnano, in particolare del silicio e del fosforo; durante il raffreddamento ulteriore si arriva al punto di trasformazione eutettoide in cui, a seconda della velocità di passaggio, i cristalli misti  $\gamma$  si decompongono in ferrite e cementite.

Questi ultimi costituenti formano le strutture secondarie le più diverse che vanno dalla perlite grossolana, sovente accompagnata dalla ferrite, alla perlite fine, alla sorbite, alla bainite od anche alla martensite.

Una anisotropia secondaria (la primaria riguarda la comparsa delle lamelle di grafite eutettica) è caratterizzata dalla durezza Brinell che varia con il tenore di carbonio combinato e con la distanza interlamellare degli



Nital

x 500

Fig. 2 - Struttura della ghisa grigia con grafite lamellare.

elementi costitutivi della struttura secondaria che corrisponde a quella di un acciaio contenente silicio, manganese, nichel, molibdeno, zolfo ed a volte cromo.

Come succede in tutti gli acciai, le proprietà della struttura secondaria possono essere profondamente modificate da un riscaldamento ad una temperatura superiore a quella di trasformazione, seguito da un raffreddamento più o meno rapido che può arrivare fino alla tempra martensitica.

L'originalità della ghisa risiede nel fatto che un trattamento termico a temperatura adeguata può servire sia

ad eliminare le tensioni interne risultanti da un raffreddamento irregolare nella forma più o meno rigida, sia a decomporre la cementite per permettere una trasformazione più o meno completa della perlite in ferrite pura e grafite, sia a provocare la comparsa delle più diverse strutture di tempra.

La possibilità della ferritizzazione è tecnicamente interessante, in quanto permette, senza modificazione della struttura primaria, di conferire alla struttura secondaria caratteristiche di duttilità e di tenacità di grande interesse per l'applicazione pratica.

## LE PROPRIETÀ SPECIFICHE

La ghisa grigia di composizione chimica normale, oltre alla notevole colabilità, presenta il vantaggio di un piccolo ritiro durante la solidificazione, ha una scarsa tendenza al risucchio ed alla formazione di screpolature, presenta notevoli proprietà chimico-fisiche che hanno consentito, dal suo apparire in Europa nel XIV secolo, le più svariate applicazioni. In queste la ghisa ha presentato esempi di lunghissime durate nonostante l'azione corrosiva degli agenti atmosferici e di altro tipo.

Nello sviluppo della ghisa fino ai nostri giorni si possono distinguere alcuni periodi caratteristici:

- Dall'inizio fino alla metà del XIX secolo l'aspetto esterno e quello della frattura sono stati alla base di ogni valutazione. La resistenza alla trazione era in media di  $80 \text{ N/mm}^2$  ( $8 \text{ kgf/mm}^2$ ).
- Nella seconda metà del XIX secolo con l'introduzione della chimica nella fonderia si diffuse il controllo della resistenza minima a trazione che salì oltre  $120 \text{ N/mm}^2$  ( $12 \text{ kgf/mm}^2$ ).
- Dall'inizio del nostro secolo fino alla prima guerra mondiale si sviluppò ulteriormente la chimica appli-

cata alla fonderia, si cominciò a controllare la struttura e si stabilirono delle Norme che prevedevano resistenza a trazione fino a  $240 \text{ N/mm}^2$  ( $24 \text{ kgf/mm}^2$ ).

- Negli anni 1920 ÷ 1930 ebbe larga diffusione la scienza metallurgica con i controlli analitici, l'uso del diagramma di stato della ghisa, l'impiego di rottami di acciaio nella carica del cubilotto ed il surriscaldamento del metallo. Si stabiliscono rigorose Norme che fissano le diverse classi della ghisa grigia.
- Intorno agli anni 1930 si punta decisamente verso tipi di ghisa ad alta resistenza fino a  $340 \div 390 \text{ N/mm}^2$  ( $35 \div 40 \text{ kgf/mm}^2$ ) con l'impiego di una elevata percentuale di rottami di acciaio in carica e l'uso di inoculanti per ottenere la frattura grigia (esempio Meehanite).
- Dopo gli anni 1930 la ghisa grigia è stata sottoposta a studi sempre più intensi, tenendo presenti differenti punti di vista e cioè l'aumento della resistenza, gli indirizzi della nuova scienza delle costruzioni, lo sviluppo delle costruzioni leggere con impiego della saldatura e la concorrenza degli altri materiali.

## CLASSIFICAZIONE DELLA GHISA GRIGIA

La ghisa grigia si presenta in diversi tipi con notevoli differenze per valori di resistenza meccanica e di altre caratteristiche, in modo che si può parlare di un gruppo di materiali più che di un materiale unico.

Il numero notevole di tipi di ghisa grigia corrisponde al desiderio dei fonditori di soddisfare, con sicurezza ed in maniera economica, le esigenze dei progettisti che designano i getti e fissano delle condizioni di utilizzazione sempre più definite e sovente severe. Le tabb. I e II danno una composizione di carattere indicativo per le varie categorie di getti.

Anche se talvolta si classificano le ghise grigie in base alle caratteristiche microstrutturali della matrice (esempio: ghise perlitiche, ferritiche, austenitiche, ecc.), è più comune la loro classificazione in base all'impiego. Si ri-

corda, a titolo indicativo, la classificazione CIFOM (Centre d'Information des Fontes Moulées).

Per quanto si riferisce alla ghisa grigia, si citano i tipi di getti prodotti con tale materiale:

- Getti di ghisa con pareti sottili per l'edilizia (per esempio: radiatori, vasche da bagno, tubi, raccordi, ecc.).

Si tratta in genere di getti di forma piana e di grande superficie, di bell'aspetto e buona rigidità, in grado di ricevere rivestimenti funzionali e decorativi.

- Getti di ghisa comune, per la meccanica generale, di tutti gli spessori e le dimensioni, con resistenza meccanica relativamente poco elevata, ma buona lavorabilità.

Tabella I - Composizioni medie indicative per getti di ghisa commerciali.

Getti da produrre	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %
Cilindri di ghisa normale per autoveicoli	3,25	2,25	0,65	0,15	0,10	—	—	—
Cilindri di ghisa legata al Ni-Cr per autoveicoli	3,25	2,25	0,65	0,15	0,10	0,30	0,75	—
Cilindri di ghisa legata al Ni-Cr per autoveicoli	3,25	1,90	0,65	0,15	0,10	0,45	1,75	—
Cilindri di ghisa legata al solo Ni per autoveicoli	3,25	1,80	0,65	0,15	0,10	—	1,25	—
Pistoni di ghisa normale per autoveicoli	3,35	2,25	0,65	0,15	0,10	—	—	—
Pistoni di ghisa legata al Mo per autoveicoli	3,35	2,25	0,65	0,15	0,10	—	—	0,50
Particolari di ghisa normale per autoveicoli	3,40	2,60	0,65	0,30	0,10	—	—	—
Segmenti per pistoni (colati separatamente)	3,50	2,90	0,65	0,50	0,06	—	—	—
Tamburi freno di ghisa legata al Ni-Cr	3,30	1,90	0,65	0,15	0,08	0,50	1,25	—
Tamburi freno di ghisa legata al Mo	2,75	2,25	0,70	0,15	0,08	—	—	0,50
Alberi a gomito	3,10	1,50	0,65	0,15	0,10	0,60	2,00	—
Getti con spessori sottili per meccanica varia	3,25	2,25	0,50	0,35	0,10	—	—	—
Getti con spessori medi per meccanica varia	3,25	1,75	0,50	0,35	0,10	—	—	—
Getti con spessori grossi per meccanica varia	3,25	1,25	0,50	0,35	0,10	—	—	—
Tubi colati in sabbia, piccoli e medi	3,60	1,75	0,50	0,80	0,80	—	—	—
Tubi colati in sabbia, grossi	3,40	1,40	0,50	0,80	0,08	—	—	—
Getti di ghisa normale ad alta resistenza	2,75	2,25	0,80	0,10	0,09	—	—	—
Getti di ghisa legata al Ni ad alta resistenza	2,75	2,25	0,80	0,10	0,09	—	1,00	—
Getti di ghisa legata al Mo ad alta resistenza	2,75	2,25	0,80	0,10	0,09	—	—	0,35
Getti resistenti al calore (pentole e recipienti)	3,50	1,15	0,80	0,10	0,07	—	—	—
Getti resistenti al calore (per acidi caustici)	3,30	0,70	0,50	0,10	0,08	0,60	1,50	—
Lingottiere per acciaierie	3,50	1,00	0,90	0,20	0,07	—	—	—
Ruote per veicoli	3,35	0,65	0,60	0,35	0,12	—	—	—
Cilindri per compressori medi	3,25	1,25	0,65	0,20	0,10	—	—	—
Cilindri per compressori pesanti	3,00	1,10	0,80	0,20	0,10	—	2,00	—
Cilindri per compressori leggeri	3,30	2,10	0,55	0,25	0,10	0,45	1,25	—
Stampi leggeri di ghisa al Ni-Cr per forgia	3,30	1,50	0,60	0,20	0,10	0,60	2,00	—
Stampi pesanti di ghisa al Ni-Cr per forgia	3,00	1,25	0,60	0,20	0,10	0,80	2,75	—
Stampi leggeri di ghisa al Mo per forgia	3,30	2,00	0,60	0,20	0,10	—	—	1,00
Stampi pesanti di ghisa al Mo per forgia	3,10	1,50	0,60	0,20	0,08	—	—	1,00
Valvolame e raccordi	3,30	2,00	0,50	0,35	0,10	—	—	—

- Getti di ghisa per autoveicoli, il più delle volte cavi, con una eccellente lavorabilità, una buona rigidità ed, eventualmente, una certa resistenza all'usura per attrito.
- Getti di ghisa di qualsiasi spessore e dimensione, con caratteristiche meccaniche specificate, con resistenza meccanica media e buona resistenza all'usura per attrito.
- Getti di ghisa per impieghi termici, esempio lingottiere, a forte spessore con buona tenuta all'urto termico ed elevata conducibilità termica.
- Getti di ghisa perlitica con qualità di resistenza meccanica, resistenza all'usura per attrito, a tenuta stagna o per resistenza al calore od alla corrosione.

## LA NORMAZIONE DELLA GHISA GRIGIA

Le prime normazioni comparse in Europa riguardavano l'acciaio. La classificazione dell'acciaio aveva come base la prova di trazione su una provetta standardizzata. Questo era perfettamente logico per prodotti laminati o forgiati con o senza trattamento termico, in quanto non vi era il problema dell'anisotropia del materiale. Ciò valeva anche per l'acciaio in getti, il quale, normalmente sottoposto a ricottura, subisce una ricristallizzazione che elimina ogni traccia della struttura primaria della colata.

L'utilizzazione della prova di trazione per individuare le proprietà di un tipo di acciaio è, quindi, perfettamente giustificata, in quanto le caratteristiche rilevate sulle provette colate in appendice al getto permettono previsioni sul comportamento del medesimo in servizio.

La stessa cosa non vale per la ghisa, dove la prova di trazione fornisce solamente il valore di resistenza a rottura non del getto, ma di una provetta ricavata da un saggio colato a parte in condizioni standard. Ciò nonostante, per analogia con l'acciaio, anche le ghise furono

classificate in base alla loro resistenza a trazione, determinata su una provetta di 20 mm di diametro ricavata dal saggio di 30 mm di diametro colato a parte.

Si deve notare che la classificazione in base alla resistenza a trazione non significa una superiorità dei tipi di ghisa con valori più alti su quelli con valori più bassi. In molti casi la resistenza a trazione non è il criterio più importante per la scelta di un tipo di ghisa.

Per esempio, in particolari come i tamburi freno in cui è importante anche la resistenza al calore, i tipi con resistenza a trazione inferiore hanno un migliore comportamento. E così nei particolari che devono resistere all'urto termico, come le lingottiere per acciaieria o le conchiglie per panottatrici, i tipi con elevata resistenza a trazione andrebbero rapidamente fuori uso. Anche nei particolari soggetti a vibrazione, le migliori caratteristiche di smorzamento dei tipi con resistenza a trazione inferiore possono rappresentare un vantaggio.

Le Norme, attualmente in vigore nei principali Paesi industriali, offrono al fonditore solo la resistenza a trazione, una caratteristica facile da definire e controllare sulla provetta standard.

Per valutare in maniera approssimativa le proprietà attese nel getto, tenendo conto della sua forma e delle sue dimensioni, il fonditore è posto di fronte alle necessità di fare due considerazioni:

— Quale sarà, a partire dalla resistenza a trazione determinata sulla provetta standard, la resistenza a trazione in un punto qualunque del getto?

— Se, in base ad una lunga esperienza o a considerazioni tecniche, questa resistenza a trazione può essere valutata abbastanza esattamente, quale sarà il valore delle altre caratteristiche determinanti per assicurare la migliore corrispondenza del getto alle condizioni di impiego?

Tabella II - Composizioni medie indicative per getti di ghisa commerciali.

Getti da produrre	Spessori mm	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %
Getti per fumisteria varia	5÷8	3,50	2,50	0,55	0,80	0,08	—	—	—
Particolari per stufe e cucine	3÷5	3,50	2,80	0,60	1,20	0,09	—	—	—
Elementi di radiatori	3÷5	3,40	2,60	0,65	1,10	0,09	—	—	—
Elementi per caldaie	5÷10	3,50	2,30	0,70	0,60	0,09	—	—	—
Getti ornamentali	2÷4	3,30	3,20	0,60	1,30	0,08	—	—	—
Getti ornamentali	4÷6	3,40	2,90	0,65	1,20	0,08	—	—	—
Getti da smaltare (sanitari)	3÷5	3,50	2,80	0,60	1,20	0,09	—	—	—
Getti da smaltare (sanitari)	5÷8	3,60	2,50	0,60	1,00	0,09	—	—	—
Vasche da bagno	3÷5	3,40	2,80	0,60	1,00	0,09	—	—	—
Vasche da bagno	5÷8	3,45	2,60	0,70	0,90	0,10	—	—	—
Barrotti-griglie	10÷15	3,20	1,50	0,40	0,40	0,08	—	—	—
Barrotti-griglie	15÷20	3,20	1,30	0,45	0,30	0,08	—	—	—
Ceppi freno (zoccoli)	—	3,20	1,50	0,80	0,60	0,15	—	—	—
Getti per macchine utensili	20÷30	3,30	1,60	0,90	0,40	0,08	—	—	0,60
Getti per macchine utensili	30÷40	3,30	1,40	0,95	0,35	0,08	—	—	0,60
Getti per macchine utensili	30÷40	3,35	1,40	0,95	0,35	0,08	0,25	1,00	—
Ingranaggi	20÷30	3,35	1,80	0,80	0,45	0,08	—	—	0,60
Ingranaggi	30÷40	3,35	1,50	0,85	0,40	0,08	—	—	0,60
Volani	30÷50	3,30	1,50	0,70	0,40	0,08	—	—	—
Volani	60÷80	3,30	1,00	0,80	0,35	0,08	—	—	—
Cilindri per autoveicoli	5÷8	3,40	2,20	0,65	0,55	0,07	—	0,80	—
Cilindri per autoveicoli	8÷12	3,40	2,00	0,70	0,50	0,07	—	0,80	—
Cilindri per locomotive	15÷20	3,30	1,80	0,90	0,25	0,08	—	—	0,60
Cilindri per locomotive	20÷25	3,30	1,60	0,90	0,25	0,08	—	—	0,60
Cilindri per compressori	8÷12	3,40	2,10	0,80	0,35	0,08	—	—	—
Cilindri per compressori	12÷15	3,30	1,90	0,85	0,30	0,08	—	—	—
Cilindri per motori Diesel	15÷20	3,25	1,65	0,90	0,40	0,08	—	—	0,60
Cilindri per motori Diesel	18÷30	3,15	1,50	1,00	0,30	0,08	—	—	—
Cilindri per cartiere (essiccatoi)	18÷25	3,20	1,60	0,80	0,35	0,08	—	—	—
Cilindri per cartiere (essiccatoi)	25÷35	3,20	1,40	0,90	0,35	0,08	—	—	—
Cilindri per cartiere (essiccatoi)	25÷35	3,20	1,40	1,00	0,30	0,08	—	0,80	0,60
Segmenti per pistoni	1,5÷3	3,60	3,20	0,40	0,45	0,06	—	—	—
Segmenti per pistoni	3÷5	3,60	2,90	0,55	0,40	0,06	—	—	—
Segmenti per pistoni	5÷8	3,60	2,70	0,70	0,40	0,06	—	—	—
Segmenti per motori Diesel	10÷15	3,20	2,00	0,60	0,40	0,09	—	—	0,60
Segmenti per motori Diesel	18÷25	3,25	1,70	0,70	0,40	0,09	—	—	0,60
Ruote per veicoli	—	3,50	0,80	0,80	0,35	0,10	—	—	—
Getti resistenti al fuoco	15÷20	3,30	1,80	0,40	0,30	0,07	—	—	—
Getti resistenti al fuoco	20÷30	3,30	1,60	0,40	0,25	0,07	—	—	—
Getti resistenti al fuoco	30÷40	3,40	1,45	0,40	0,25	0,07	—	—	—
Getti resistenti al fuoco ed agli acidi	12÷20	3,30	1,70	0,70	0,30	0,08	—	—	—
Getti resistenti al fuoco ed agli acidi	20÷30	3,30	1,40	0,80	0,25	0,08	—	—	—
Getti resistenti agli alcali	20÷30	3,60	1,60	0,80	0,40	0,08	0,50	1,50	—
Getti resistenti agli alcali	30÷50	3,60	1,40	0,90	0,30	0,08	0,50	1,50	—
Recipienti per soda	20÷30	3,60	1,60	0,80	0,40	0,08	—	1,50	—
Recipienti per soda	30÷50	3,60	1,40	0,90	0,30	0,08	—	1,50	—
Lingottiere per alluminio	20÷30	3,50	1,60	0,70	0,25	0,08	—	—	0,60
Lingottiere per alluminio	20÷30	3,50	1,90	0,60	0,25	0,08	—	0,60	—
Lingottiere per acciaierie	—	3,80	1,20	0,70	0,10	0,06	—	—	—
Lingottiere per acciaierie	—	3,70	1,55	0,60	0,10	0,09	—	—	0,60
Stampi per vetreria	30÷40	3,00	1,50	0,50	0,30	0,08	0,25	0,75	—
Suole per forni	3÷5	3,40	2,55	0,55	0,75	0,08	—	—	—
Suole per forni	5÷8	3,45	2,30	0,60	0,60	0,08	—	—	—
Getti per turbine a vapore	12÷20	3,30	1,70	0,80	0,35	0,08	0,25	1,00	—
Getti per turbine a vapore	18÷30	3,15	1,50	1,00	0,25	0,08	0,25	1,00	—
Carcasse per motori elettrici	4÷8	3,50	2,60	0,70	0,80	0,08	—	—	—
Carcasse per motori elettrici	8÷15	3,55	2,30	0,80	0,70	0,08	—	—	—
Getti per macchine da cucire	5÷8	3,50	2,60	0,65	0,90	0,09	—	—	—
Getti per macchine da scrivere	3÷5	3,50	2,80	0,65	1,00	0,09	—	—	—
Telai per pianoforte	5÷8	3,50	2,50	0,60	0,25	0,08	—	—	—
Telai per pianoforte	7÷10	3,50	2,30	0,70	0,25	0,08	—	—	—
Piastre per molazze	30÷40	3,50	1,00	1,00	0,30	0,10	—	—	—
Particolari per frantoi	—	3,50	1,00	1,30	0,30	0,10	—	—	—
Corazze per mulini	—	3,50	1,00	1,30	0,30	0,10	—	—	—
Rulli per macinazione di laterizi	40÷50	3,60	0,95	1,10	0,40	0,10	—	—	—

Tabella IV - Correlazione tra le caratteristiche e le dimensioni dei getti in funzione dei tipi di ghisa, secondo la Norma UNI 5007.

Categoria	Tipi di ghisa													
	Dimensioni		G 10		G 15		G 20		G 25		G 30		G 35	
	Diametro per getti prevalentemente cilindrici mm	Spessore di parete mm	Carico unitario di rottura a trazione R N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	Durezza Brinell * HB/10/3.000/30	Carico unitario di rottura a trazione R N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	Durezza Brinell * HB/10/3.000/30	Carico unitario di rottura a trazione R N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	Durezza Brinell * HB/10/3.000/30	Carico unitario di rottura a trazione R N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	Durezza Brinell * HB/10/3.000/30	Carico unitario di rottura a trazione R N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	Durezza Brinell * HB/10/3.000/30	Carico unitario di rottura a trazione R N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	Durezza Brinell * HB/10/3.000/30
Getti leggeri	15	3,5 ÷ 7,5	160 (16)	215	210 (21)	225	260 (26)	300 (31)	250	290 (30)	235	340 (35)	**	
Getti medi	30	> 7,5 ÷ 15	100 (10)	175	150 (15)	205	200 (20)	250 (25)	220	290 (30)	205	340 (35)	255	
Getti pesanti	60	> 15 ÷ 30	**	**	130 (13)	165	150 (15)	210 (21)	195	260 (27)	175	310 (32)	235	
Getti molto pesanti	90	> 30 ÷ 50	**	**	**	120 (12)	160 (16)	160 (16)	170	210 (21)	190	260 (27)	210	

\* Il carico unitario di rottura a trazione è garantito come valore minimo solo sul saggio di 30 mm di diametro, colato a parte. Per le varie categorie dei getti, variabili nello spessore, sui valori del carico unitario di rottura a trazione e della durezza Brinell, indicati in tabella, è ammessa una tolleranza di  $\pm 10\%$ .

\*\* L'impiego di questi tipi di ghisa e per questi spessori richiede particolari accorgimenti da parte del fonditore.

Tabella III - Classificazione della ghisa grigia, secondo la Norma UNI 5007.

Tipo *	Prova di trazione	
	Carico unitario di rottura a trazione R min. N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	
G 10 UNI 5007-69	100 (10)	
G 15 UNI 5007-69	150 (15)	
G 20 UNI 5007-69	200 (20)	
G 25 UNI 5007-69	250 (25)	
G 30 UNI 5007-69	290 (30)	
G 35 UNI 5007-69	340 (35)	

\* Oltre ai tipi riportati nel prospetto si indica con G 00 UNI 5007 una ghisa grigia per getti per i quali non si richiede un determinato carico di rottura a trazione.

### Le norme italiane

In Italia la produzione e l'accettazione dei getti di ghisa grigia è regolata da Norme UNI che riguardano specificatamente la ghisa ed i getti.

La Norma UNI 5007 (*Ghisa grigia per getti - Qualità, prescrizioni e prove*) — II edizione, pubblicata nel luglio 1969 — classifica 6 tipi di ghise che sono definiti in funzione del carico unitario di rottura a trazione. Questo è determinato su una provetta standard colata a parte contemporaneamente ai getti cui si riferisce e con la ghisa proveniente dalla stessa spillata.

La classificazione fornita dalla predetta Norma è utilizzabile solamente come classificazione del tipo di ghisa impiegato nei getti (tab. III).

Come è noto, le caratteristiche del getto dipendono poi, oltre che dal tipo di ghisa utilizzato, dalla velocità di raffreddamento cui il getto è sottoposto — che varia notevolmente a seconda del tipo di formatura, della temperatura di colata — dal rapporto volume/superficie della forma, dalla massa del getto e dallo spessore delle pareti del medesimo.

Le caratteristiche meccaniche dei getti possono essere ragionevolmente previste, consultando un prospetto fornito dalla stessa Norma UNI 5007, in cui sono indicati i carichi unitari di rottura e le durezze Brinell in funzione delle dimensioni dei getti per tutti i tipi di ghisa unificati, suddividendoli in 4 categorie a seconda della massività (tab. IV).

La massività è riferita a getti in barre aventi diametri diversi e, per getti non cilindrici, a getti con un intervallo di spessore tale per cui la velocità di raffreddamento è paragonabile a quella dei getti in barre.

Naturalmente non è possibile, data la notevole diversità di forma dei getti, determinare con buona precisione la velocità di raffreddamento e perciò la Norma UNI 5007 sottolinea che i valori indicati sono forniti solo a titolo orientativo per la progettazione dei getti e non sono validi ai fini dell'accettazione degli stessi.

Nella stessa Norma sono definite le altre caratteristiche meccaniche e fisiche delle ghise grigie (tab. V).

La Norma UNI 5330 (*Ghisa grigia non legata per getti colati in sabbia per impieghi automobilistici - Qualità, prescrizioni e prove*) — II edizione pubblicata nel luglio 1969 — tratta i getti impiegati nell'industria automobilistica colati in terra a verde od a secco, in sabbia

Tabella V - Caratteristiche meccaniche e fisiche delle ghise grigie, secondo la Norma UNI 5007.

Resistenza alla flessione	$= 2 \quad R$
Resistenza alla compressione	$3 \div 4 \quad R$
Resistenza al taglio	$1 \div 1,6 \quad R$
Modulo di elasticità	$= \frac{R}{10,3 \times 10^{-6} \text{ HB}}$
Densità	$7 \div 7,4 \text{ kg/mm}^3$
Calore specifico a 373 K (100 °C)	$585,9 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \left( 0,14 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{°C}} \right)$
Calore specifico a 873 K (600 °C)	$878,85 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \left( 0,21 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{°C}} \right)$
Coefficiente di dilatazione lineare a 273 ÷ 373 K (0 ÷ 100 °C)	$\approx 10,5 \cdot 10^{-6} \text{ x K}^{-1} (\approx 10,5 \cdot 10^{-6} \text{ x } \text{°C}^{-1})$
Coefficiente di dilatazione lineare a 373 ÷ 773 K (100 ÷ 500 °C)	$\approx 13 \times 10^{-6} \text{ x K}^{-1} (\approx 13 \times 10^{-6} \text{ x } \text{°C}^{-1})$
Conducibilità termica a 373 ÷ 673 K (100 ÷ 400 °C)	$\approx 180 \frac{\text{kW}}{\text{m} \cdot \text{K}} \left( \approx 43 \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{°C}} \right)$
Resistività elettrica	$0,8 \div 1 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$
Coefficiente di temperatura	$0,0012 \text{ K}^{-1} (0,0012 \text{ °C}^{-1})$
I valori sono riferiti alla temperatura di 293 K (20 °C)	

agglomerata, ecc. con esclusione dei getti colati in conchiglia o centrifugati.

I getti sono distribuiti in 5 classi in base alla durezza Brinell, la quale, come la resistenza a trazione, è fortemente influenzata dalla velocità di raffreddamento del getto (tab. VI).

In questa Norma è inserito un grafico che fornisce il carico unitario di rottura a trazione e il modulo di elasticità ottenibili nel getto in funzione della durezza Brinell. Analogamente a quanto visto nella Norma UNI 5007 i getti sono suddivisi in 4 categorie a seconda della loro massività (tab. VII).

I valori riportati nel grafico non sono impegnativi, ma sono unicamente orientativi al fine della scelta dei getti.

La Norma UNI 7068 (*Getti di ghisa grigia non legata colati in sabbie - Scostamenti per quote senza indicazione di tolleranza*) — pubblicata nel luglio 1972 — riguarda le tolleranze dei getti di ghisa grigia, salvo diverse indicazioni a disegno. In questa Norma si fa riferimento alla Norma UNI 5007 per la classificazione dei getti. Sono considerate 3 classi di tolleranze per le dimensioni rela-

tive alla lunghezza, larghezza ed altezza e 3 classi per gli spessori di parete dei getti.

Le 3 classi di tolleranza (A = tolleranza ampia; B = tolleranza media; C = tolleranza ristretta) sono definite in relazione al tipo di formatura adottato, al numero di getti da eseguire con lo stesso modello, al grado di difficoltà di esecuzione del getto, al concetto di costruzione del modello ed al grado di finitura, precisione e stato di conservazione delle attrezzature (tabb. VIII e IX).

Le tolleranze riportate devono essere suddivise in scostamenti asimmetrici del valore della tolleranza nel seguente modo:

- per le quote riferite alle superfici esterne:  $+ 60\%$   
 $- 40\%$
- per le quote riferite alle superfici interne:  $+ 40\%$   
 $- 60\%$

La Norma UNI 3775 (*Esame microscopico dei materiali ferrosi - Classificazione della grafite nelle ghise*) concorda sostanzialmente con i lavori svolti dal Comitato Tecnico 25 Ghisa nell'Organizzazione Internazionale di Normalizzazione ISO (Raccomandazione ISO/R 945).

La Norma riguarda le modalità di classificazione degli elementi di grafite lamellare e sferoidale, visibili nelle provette di ghisa sottoposte all'esame microscopico, secondo forma ed aspetti tipici ed in relazione alle loro dimensioni.

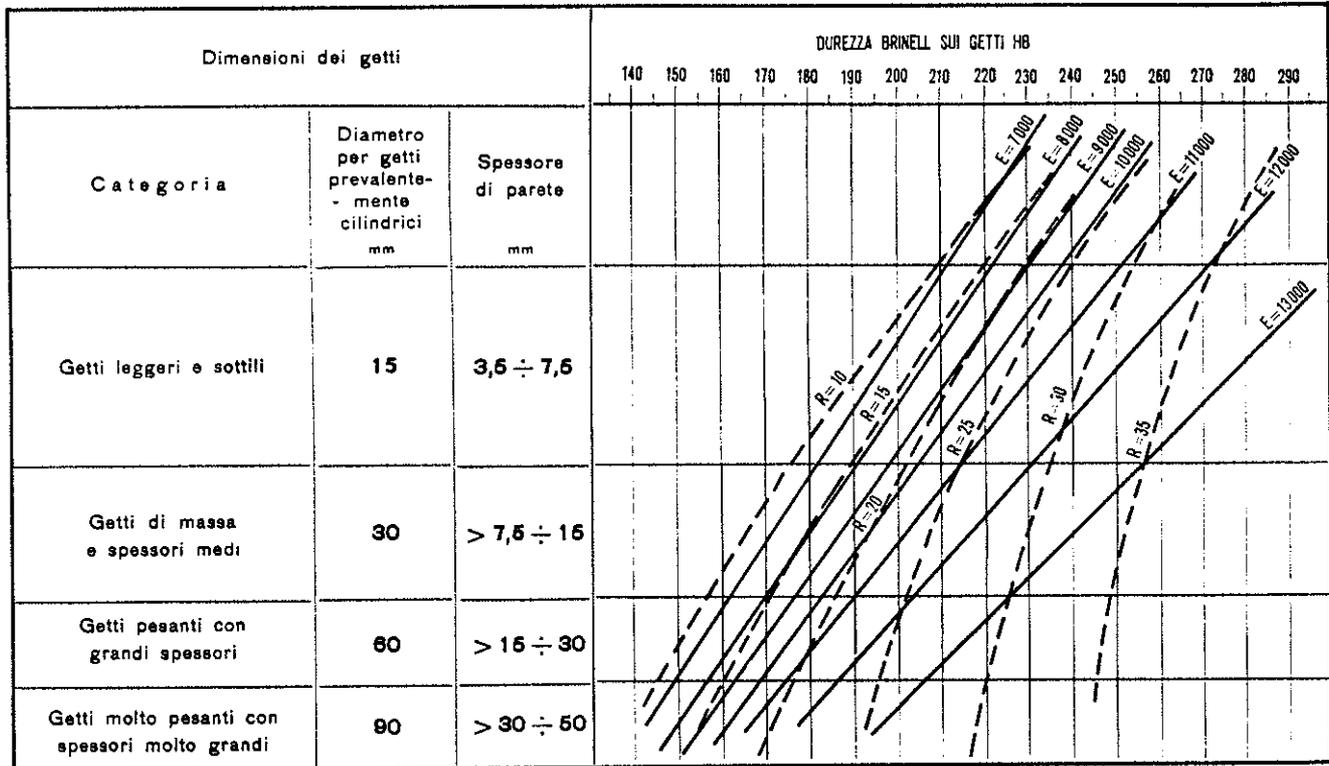
La valutazione microstrutturale è effettuata in base alla forma, alla distribuzione ed alla dimensione degli elementi di grafite. A tale scopo nella Norma sono impiegate nell'ordine le figure tipo di riferimento.

Vi è, poi, la Norma UNI 3354 (*Trattamenti termici dei materiali ferrosi - Tipi, scopi e definizioni*) che concorda sostanzialmente con i risultati dei lavori svolti dalla

Tabella VI - Classificazione della ghisa grigia per impieghi automobilistici, secondo la Norma UNI 5330.

Designazione convenzionale	Durezza Brinell HB
Gh 130 UNI 5330-69	130 ÷ 180
Gh 170 UNI 5330-69	170 ÷ 220
Gh 190 UNI 5330-69	190 ÷ 240
Gh 210 UNI 5330-69	210 ÷ 260
Gh 230 UNI 5330-69	230 ÷ 280

Tabella VII - Valori del carico unitario di rottura a trazione R (linee tratteggiate) e del modulo di elasticità E (linee continue) dei getti grezzi in funzione delle dimensioni e della durezza Brinell, secondo la Norma UNI 5330 (diagramma di A. Collaud).



Commissione di Coordinamento della nomenclatura dei prodotti siderurgici della Comunità Europea del Carbone e dell'Acciaio CECA (EURONORM 52-67).

La Norma ha lo scopo di precisare e di definire i termini tecnici e scientifici relativi ai trattamenti termici dei materiali ferrosi.

Certi termini, impiegati da soli, hanno un significato troppo vasto. In relazione a ciò la Norma distingue l'uno dall'altro i trattamenti che rientrano in uno stesso vocabolo, molto generale se impiegato da solo. A tal fine si raccomanda, per evitare qualsiasi ambiguità, di usare sempre la denominazione completa dei trattamenti termici.

Nella Norma sono riportati alcuni schemi esplicativi, le cui figure indicano le curve di trasformazione al variare del tempo e della temperatura. Se si riferiscono a trasformazioni isoterme, le curve sono indicate con l'abbreviazione curve TTT o curve a S; se riguardano trasformazioni non isoterme, sono chiamate curve a raffreddamento continuo (non interrotto) o curve CCC. Le curve riportate nelle 6 figure della Norma sono generiche e su di esse sono state sovrapposte le curve tipiche di raffreddamento corrispondenti ai trattamenti considerati negli schemi esplicativi.

### Le norme straniere

Le Norme in vigore nei principali Paesi industriali si possono dividere in 2 grandi gruppi.

Uno classifica la ghisa grigia secondo valori di resistenza a trazione, collegati con lo spessore del getto da produrre. Si parla in questo caso di *classi di proprietà*,

intendendo con questo termine che i valori di resistenza a trazione stabiliti hanno uno stretto riferimento con i getti prodotti. Un esempio è quello delle Norme vigenti in Francia.

L'altro classifica le ghise secondo valori di resistenza a trazione non collegati con lo spessore del getto da produrre. In questo secondo caso si tratta di *classi di materiali*, e cioè i valori di resistenza a trazione si riferiscono unicamente alla provetta standard colata con la stessa ghisa del getto. Un esempio è quello delle Norme vigenti nel Regno Unito.

Quest'ultimo sistema di normativa delle ghise grigie ha il vantaggio di costringere il progettista a porre attenzione alla relazione esistente tra lo spessore del getto e la resistenza della ghisa e, quindi, anche a rendersi conto delle difficoltà che crea al fonditore quando per un determinato getto richiede una resistenza superiore a quella necessaria nelle condizioni di impiego.

D'altra parte, con il sistema di collegare la resistenza a trazione allo spessore del getto, il fonditore può ottenere un giusto sovrapprezzo quando si richiede un'eguale resistenza per getti con spessore maggiore, in quanto ottenere un'eguale resistenza con questo spessore comporta notevoli difficoltà dal punto di vista metallurgico ed un elevato costo dal punto di vista tecnico-organizzativo.

Un panorama delle Norme internazionali in confronto a quelle italiane è dato dalle tabb. X e XI.

Di grande interesse per unificare le Norme dei diversi Paesi è il lavoro svolto dall'ISO (International Standard Organisation).

Tabella VIII - Tolleranze relative alla lunghezza, larghezza ed altezza dei getti di ghisa, secondo la Norma UNI 7068.

Classe di tolleranza	Dimensione nominale mm	Dimensione massima del getto grezzo mm									
		fino a 100	oltre 100 fino a 160	oltre 160 fino a 250	oltre 250 fino a 400	oltre 400 fino a 630	oltre 630 fino a 1 000	oltre 1 000 fino a 1 600	oltre 1 600 fino a 2 500	oltre 2 500 fino a 4 000	oltre 4 000 fino a 6 300
		Tolleranza mm									
A	fino a 25	2	2	2	2,5	3	3	4	5	6	8
	oltre 25 fino a 40	3	3	3	3,5	3,5	4	4,5	6	8	11
	oltre 40 fino a 63	4	4	4	4	5	5,5	6	8	10	13
	oltre 63 fino a 100	5	5	5	5,5	6	6	7	9	11	15
	oltre 100 fino a 160	—	6	6	6	7	7	8	10	13	17
	oltre 160 fino a 250	—	—	7	7	8	8	10	12	15	20
	oltre 250 fino a 400	—	—	—	8	9	10	11	13	17	22
	oltre 400 fino a 630	—	—	—	—	10	11	12	14	18	25
	oltre 630 fino a 1 000	—	—	—	—	—	12	14	17	20	28
	oltre 1 000 fino a 1 600	—	—	—	—	—	—	18	20	23	32
	oltre 1 600 fino a 2 500	—	—	—	—	—	—	—	24	26	35
oltre 2 500 fino a 4 000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	40	
oltre 4 000 fino a 6 300	—	—	—	—	—	—	—	—	—	45	
B	fino a 25	1,5	1,5	1,5	2	2	2	3	4	—	—
	oltre 25 fino a 40	2	2	2	2,5	2,5	3	3,5	5	—	—
	oltre 40 fino a 63	3	3	3	3	3,5	4	4,5	6	—	—
	oltre 63 fino a 100	4	4	4	4,5	5	5	6	7	—	—
	oltre 100 fino a 160	—	5	5	5	6	6	7	8	—	—
	oltre 160 fino a 250	—	—	6	6	7	7	8	10	—	—
	oltre 250 fino a 400	—	—	—	6,5	7	8	9	11	—	—
	oltre 400 fino a 630	—	—	—	—	8	9	10	12	—	—
	oltre 630 fino a 1 000	—	—	—	—	—	10	12	15	—	—
	oltre 1 000 fino a 1 600	—	—	—	—	—	—	15	17	—	—
	oltre 1 600 fino a 2 500	—	—	—	—	—	—	—	20	—	—
C	fino a 25	1	1	1	1	1	1	1,5	—	—	—
	oltre 25 fino a 40	1	1	1	1	1,5	1,5	1,5	—	—	—
	oltre 40 fino a 63	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2	2	—	—	—
	oltre 63 fino a 100	2	2	2	2	2	2,5	3	—	—	—
	oltre 100 fino a 160	—	2	2	2	2,5	3	3,5	—	—	—
	oltre 160 fino a 250	—	—	3	3	3	3,5	4	—	—	—
	oltre 250 fino a 400	—	—	—	4	4	4,5	5	—	—	—
	oltre 400 fino a 630	—	—	—	—	4,5	5	6	—	—	—
	oltre 630 fino a 1 000	—	—	—	—	—	6,5	7	—	—	—
	oltre 1 000 fino a 1 600	—	—	—	—	—	—	8	—	—	—

Tabella IX - Tolleranze relative agli spessori di parete dei getti di ghisa, secondo la Norma UNI 7068.

Classe di tolleranza	Dimensione nominale mm	Dimensione massima del getto grezzo mm									
		fino a 100	oltre 100 fino a 160	oltre 160 fino a 250	oltre 250 fino a 400	oltre 400 fino a 630	oltre 630 fino a 1 000	oltre 1 000 fino a 1 600	oltre 1 600 fino a 2 500	oltre 2 500 fino a 4 000	oltre 4 000 fino a 6 300
		Scostamenti limite mm									
A	fino a 6	±1,5	±1,5	±1,5	±2	±2	±2	—	—	—	—
	oltre 6 fino a 10	±1,5	±1,5	±2	±2	±2,5	±2,5	—	—	—	—
	oltre 10 fino a 16	±2	±2	±2	±2,5	±2,5	±2,5	±3	—	—	—
	oltre 16 fino a 25	±2	±2,5	±2,5	±2,5	±2,5	±3	±3	±3,5	±4	±4
	oltre 25 fino a 40	±2,5	±2,5	±3	±3,5	±3,5	±4	±4	±4	±4,5	±4,5
	oltre 40 fino a 60	±2,5	±2,5	±3	±3,5	±4	±4	±4	±4,5	±4,5	±4,5
B	fino a 6	±1	±1	±1	±1,5	±1,5	±1,5	—	—	—	—
	oltre 6 fino a 10	±1	±1	±1,5	±1,5	±2	±2	—	—	—	—
	oltre 10 fino a 16	±1,5	±1,5	±1,5	±2	±2	±2	±2,5	—	—	—
	oltre 16 fino a 25	±1,5	±2	±2	±2	±2	±2,5	±2,5	±3	±3	±3
	oltre 25 fino a 40	±2	±2	±2,5	±2,5	±2,5	±3	±3	±3	±3,5	±3,5
	oltre 40 fino a 60	±2	±2	±2,5	±2,5	±3	±3	±3	±3,5	±3,5	±3,5
C	fino a 6	±0,5	±0,5	±0,5	±1	±1	±1	—	—	—	—
	oltre 6 fino a 10	±0,5	±1	±1	±1	±1,5	±1,5	—	—	—	—
	oltre 10 fino a 16	±1	±1	±1	±1,5	±1,5	±1,5	±2	—	—	—
	oltre 16 fino a 25	±1	±1	±1,5	±1,5	±1,5	±2	±2	±2,5	±2,5	±2,5
	oltre 25 fino a 40	±1,5	±1,5	±1,5	±2	±2	±2,5	±2,5	±2,5	±3	±3
	oltre 40 fino a 60	±1,5	±1,5	±2	±2	±2,5	±2,5	±2,5	±3	±3	±3

Tabella X - Raffronto delle caratteristiche meccaniche dei tipi di ghise grigie unificate in alcuni Paesi.

Nazione	Norma	Corrispondenza fra i simboli delle Norme																					
		G 10	G 15	G 20	G 25	G 30	G 35	G 40	G 50	G 60	G 70												
Italia	UNI 5007 — diametro della provetta mm — carico unitario di rottura R: N/mm <sup>2</sup> — carico unitario di rottura R: kgf/mm <sup>2</sup>	G 20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20		
		G 15	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	
		G 10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
Francia	NF A32 - 101 — diametro della provetta mm — carico unitario di rottura R: N/mm <sup>2</sup> — carico unitario di rottura R: kgf/mm <sup>2</sup>	Ft 20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
		Ft 15	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
		Ft 10	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2
Germania	DIN 1691 — diametro della provetta mm — carico unitario di rottura R: N/mm <sup>2</sup> — carico unitario di rottura R: kgf/mm <sup>2</sup>	GG 20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
		GG 15	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
		GG 10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Gran Bretagna	BS 1452 - 1977 — diametro della provetta mm — carico unitario di rottura R: N/mm <sup>2</sup> — carico unitario di rottura R: kgf/mm <sup>2</sup>	Grado 180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
		Grado 150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
		Grado 120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
U.S.A.	ASTM A48 — diametro della provetta mm — carico unitario di rottura R: N/mm <sup>2</sup> — carico unitario di rottura R: kgf/mm <sup>2</sup>	Grado 25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
		Grado 20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
		Grado 15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	ISO R 185 — diametro della provetta mm — carico unitario di rottura R: N/mm <sup>2</sup> — carico unitario di rottura R: kgf/mm <sup>2</sup>	Grado 20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
		Grado 15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
		Grado 10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Tabella XI - Confronto tra i simboli della Norma italiana con quelle estere.

Nazione	Norma	Corrispondenza approssimativa fra i simboli delle Norme									
				G 10	G 15		G 20	G 25	G 30	G 35	
Italia	UNI 5007			G 10	G 15		G 20	G 25	G 30	G 35	
Austria	O NORM M3191 (1971)			GG 10	GG 15		GG 20	GG 25	GG 30	GG 35	
Cecoslovacchia	CNS 422410 bis CNS 421241 (1964)			422410	422415		422420	422425	422430	422435	
Finlandia	H-11-51 (1966)	GRS 00	GRS 10	GRS 15		GRS 20	GRS 25	GRS 30	GRS 35	GRS 40	
Francia	NF A32-101 (1964)			Ft 10	Ft 15		Ft 20	Ft 25	Ft 30	Ft 35	Ft 40
Germania	DIN 1691 (1964)			GG 10	GG 15		GG 20	GG 25	GG 30	GG 35	GG 40
Gran Bretagna	BS 1452 (1977)				grado 150	grado 180	grado 220	grado 260	grado 300	grado 350	grado 400
Jugoslavia	JUS G-J2-020 (1958)	SL 00		SL 14	SL 18		SL 22	SL 26	SL 30		
Norvegia	NS 722 (1963)	SJG 00		SJG 15		SJG 20	SJG 25	SJG 30	SJG 35	SJG 40	
Olanda	NEN 6002A (1966)				GG 15		GG 20	GG 25	GG 30	GG 35	
Polonia	PN H-83101 (1963)	ZI X	ZI 10	ZI 15		ZI 20	ZI 25		ZI 30	ZI 35	ZI 40
Romania	STAS 568-61 (1963)		Fc 10	Fc 15		Fc 20	Fc 25		Fc 30	Fc 35	Fc 40
Spagna	UNE 36111 (1961)		F.1.0.10	F.1.0.15		F.1.0.20	F.1.0.25		F.1.0.30	F.1.0.35	F.1.0.40
Svezia	SIS 1401 (1971)	01 10-00	01 15-00			01 20-00	01 25-00		01 30-00	01 35-00	01 40-00
Svizzera	VSM 10691 (1959)		GE/ft 10	GE/ft 15		GE/ft 20	GE/ft 25		GE/ft 30		
USA	ASTM A48-64 (1964) ASTM A159-70 (1970)			20	25	30	35	40	45	50	55-60
Giappone	JIS G5501 (1956)		Fc 10	Fc 15		Fc 20	Fc 25		Fc 30	Fc 35	
India	IS 210 (1970)			15		20	25		30	35	40
Russia	GOST 1412 (1954)	Sch 00	Sch12-28	Sch15-32	Sch18-36	Sch21-40	Sch24-44	Sch28-48	Sch32-52	Sch35-56	Sch38-60
ISO	R 185 (1961)		10	15		20	25		30	35	40
Australia	AS 48 (1969)			10	12	14	15,5	17	20	23	26

Nel documento, presentato all'esame delle Associazioni professionali dei vari Paesi in data marzo 1977, sono previste 3 parti.

La prima parte comprende la classificazione delle ghise secondo la resistenza a trazione determinata su provette colate separatamente. Questa parte può essere usata in generale per ogni tipo di getti.

La seconda parte si riferisce a getti con spessori superiori a 30 mm e peso superiore a 1.000 kg. La resistenza a trazione deve essere determinata su provette colate in appendice al getto.

La terza parte classifica la ghisa grigia secondo la durezza ottenuta sui getti. Questa parte può essere usata per qualsiasi tipo di getti per i quali la durezza sia importante nella fase di impiego.

Un accordo generale su tali proposte sarebbe positivo per l'industria della fonderia di tutto il mondo.

## BIBLIOGRAFIA

E. PIWOWARSKY - Hochwertiges Gusseisen, Berlino, 1951.  
Metals Handbook - American Society for Metals, Metals Park, Ohio (USA), 1961.

A. COLLAUD - Réflexions sur les propriétés mécaniques des fontes grises - Friburgo, 1975.

UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione) - Milano, Piazza Diaz 2.

UNSIDER (Sezione di Unificazione Siderurgica) - Milano, Via Torino 44.

CIFOM (Centre d'Information des Fontes Moulées) - Paris Cedex 16, 2 Rue de Bassano.



**Volume II: Ghise grigie**

**Capitolo II**

## **Materiali di carica e correttivi**

- PREMESSA
- GHISE GREGGE DI PRIMA FUSIONE
- ROTTAME DI GHISA
- ROTTAME DI ACCIAIO
- MINERALI PRERIDOTTI
- COKE
- MATERIALI APPORTATORI DI CARBONIO
- DESOLFORANTI
- DISSOLIDANTI
- FERROLEGHE

A cura di: Ernesto Borghigiani  
Giuseppe Cesti  
Alistico Marani



## PREMESSA

Il principale obiettivo di una corretta operazione di fusione è la produzione economica della ghisa con composizione adatta allo spessore dei getti da colare. Questo ha naturalmente lo scopo di ottenere le desiderate caratteristiche fisiche e meccaniche ad un livello commisurato con il tipo di getto richiesto.

I due principali fattori, che influiscono sul raggiungimento di questo scopo, sono i materiali di carica utilizzati nei forni fusori e la conoscenza dell'azione dagli stessi esercitata sulla composizione della carica.

Per prima cosa è altamente desiderabile avere a disposizione, per quanto è possibile in pratica, la composizione chimica dei materiali di carica e cioè i materiali metallici, il coke, gli scorificanti e gli altri correttivi.

I materiali impiegati sono stati suddivisi nei seguenti gruppi:

- Ghise gregge di prima fusione.
- Rottame di ghisa.
- Rottame di acciaio.
- Minerali preridotti.
- Coke.
- Materiali apportatori di carbonio.
- Desolforanti.
- Disossidanti.
- Metalli alliganti.
- Bricchetti.
- Fondenti.
- Scorificanti.
- Ferroleghie.

## GHISE GREGGE DI PRIMA FUSIONE

### Caratteristiche generali

Secondo le Norme UNI 4366 in via di revisione ed Euronorm 1-55, in accordo tra loro, sono definite come *ghise gregge* i prodotti ferrosi, destinati ad una ulteriore trasformazione contenenti generalmente il 2,1% e più di carbonio, nei quali il ferro è l'elemento predominante.

Pertanto, sono considerate ghise gregge non solo i prodotti ottenuti per riduzione del minerale di ferro nell'altoforno, nel forno elettrico, ecc., ma anche le ghise sintetiche, le ghise cioè ottenute per ricarburazione dell'acciaio in un qualsiasi impianto metallurgico.

L'unica condizione limitante è che la ghisa non sia elaborata in una fonderia e colata direttamente nella sua forma definitiva.

Lo schema di classificazione riportato in tab. XII è basato sulla composizione chimica e sui principali settori di utilizzazione, contraddistinguendo ogni ghisa con 4 numeri di cui il primo indica il settore di utilizzazione, il secondo il tipo di composizione per quanto riguarda il tenore di fosforo, il terzo ed il quarto il sottotipo per quanto riguarda rispettivamente il tenore di silicio e manganese.

La suddivisione tra ghise gregge e legate è a sua volta basata sul tenore degli elementi di lega, tenendo però presente che il tenore limite di ogni elemento fissato per le ghise gregge non può essere superato neanche nelle ghise legate, poiché in tale caso rientrerebbero nelle ferroleghie.

In tab. XIII si riportano i limiti inferiore e superiore delle ghise legate.

Tabella XII - Schema fondamentale di classificazione delle ghise gregge.

Ghise gregge non legate	Comuni	Da affinazione	Ghisa Bessemer (serie 0.000) Ghisa Thomas (serie 1.000) Ghisa Martin (serie 2.000)
		Da fonderia	(serie 3.000) (serie 4.000) (serie 5.000)
	Con caratteristiche particolari		(serie 6.000)
Ghise gregge legate	Ghisa speculare		(serie 7.000)
	Ghisa al fosforo		
	Altre ghise		

Tabella XIII - Limite di composizione in percentuale delle ghise gregge legate secondo la Norma UNI 4366.

Elemento	Tenore limite	
	Inferiore	Superiore
Fosforo	> 2,5	< 15
Silicio	—	≤ 8
Manganese	> 6,0	≤ 30
Cromo	> 0,20	≤ 30
Rame	> 0,30	} 10
Nichel	> 0,30	
Titanio	> 0,20	
Zolfo	> 0,08	
Altri elementi (esempio alluminio-molibdeno-vanadio)	≥ 0,10	

Escludendo le ghise da affinazione della serie 0.000, 1.000 e 2.000, tutte le altre serie di ghise possono interessare la fonderia con particolare riguardo a quelle tipiche da fonderia della serie 3.000, 4.000 e 5.000.

Nelle 3 serie citate le ghise gregge comuni non legate tipiche per fonderia sono divise in 9 classi principali a seconda del tenore di fosforo, per cui questa classificazione risulta molto più dettagliata rispetto alle antiche denominazioni di ematite od a basso fosforo, fosforosa a medio fosforo e fosforosa ad alto fosforo.

È altrettanto chiaro che il tipo di frattura — e, quindi, la denominazione bianca, trotata, grigia — è poi dovuta al variare del tenore di silicio e di manganese.

La tab. XIV riporta i limiti di fosforo per le singole classi e serie, trascurando le ultime 2 cifre riguardanti il tenore di silicio suddiviso in intervalli di 0,5% ed il manganese suddiviso a sua volta in 2 classi > 0,7 ÷ ≤ 1% e > 1 ÷ ≤ 1,5%.

I tenori limite per ogni elemento delle ghise comuni da fonderia sono riassunti nella tab. XV.

Se la composizione delle ghise non rientra in questo limite, è classificata nella serie 6.000 di cui non esiste

Tabella XIV - Limiti di P e Si per le singole serie.

Serie	% Si	% P
3.200	> 1,0 e ≤ 4,5	≤ 0,08
3.300	> 4,5 e ≤ 6,0	
3.400	> 1,0 e ≤ 4,5	> 0,08 e ≤ 0,12
3.500	> 4,5 e ≤ 6,0	
4.000	> 1,0 e ≤ 4,5	> 0,12 e ≤ 0,16
4.100	> 4,5 e ≤ 6,0	
4.200	> 1,0 e ≤ 4,5	> 0,16 e ≤ 0,30
4.300	> 4,5 e ≤ 6,0	
4.400	> 1,0 e ≤ 4,5	> 0,30 e ≤ 0,50
4.500	> 4,5 e ≤ 6,0	
4.600	> 1,0 e ≤ 4,5	> 0,50 e ≤ 0,70
4.700	> 4,5 e ≤ 6,0	
4.800	> 1,0 e ≤ 4,5	> 0,70 e ≤ 1,00
4.900	> 4,5 e ≤ 6,0	
5.000	> 1,0 e ≤ 4,5	> 1,00 e ≤ 1,40
5.100	> 4,5 e ≤ 6,0	
5.200	> 1,0 e ≤ 4,5	> 1,40 e ≤ 2,00
5.300	> 4,5 e ≤ 6,0	

Tabella XV - Tenori limite per le ghise da fonderia.

Tenore limite %	Qualità	Con tenore di P	Con tenore di P
		sino a 0,5%	oltre a 0,5%
Carbonio Fosforo Silicio Manganese Zolfo		> 3,5 e ≤ 4,5	> 3,2 e ≤ 4,5
		≤ 0,5	> 0,5 e ≤ 2,0
		> 1,0 e ≤ 6,0	> 1,0 e ≤ 6,0
		> 0,7 e ≤ 1,5	> 0,7 e ≤ 1,5
		≤ 0,06	≤ 0,08
Serie		3.000 e 4.000 (sino a 4.500)	4.000 (a partire da 4.600 e 5.000)

un prospetto riassuntivo dei vari tipi esistenti sul mercato. Questo è giustificato dal fatto che la loro varietà è immensa e può variare da quelle ad alto e basso carbonio, ad alto e basso manganese, anche senza essere legate, a quelle destinate a scopi particolari quali le ghise per sferoidale o per malleabile.

Come considerazione generale è da tenere presente che la maggior parte della ghisa da fonderia è prodotta all'altoforno e che le sue caratteristiche qualitative dipendono dalle particolarità tecniche di produzione che possono essere variate entro ampi, ma ben definiti limiti.

È, infatti, nota l'influenza preponderante della carica ed in particolare del minerale sulla qualità della ghisa prodotta all'altoforno.

### Componenti minori

In tutti i minerali sono presenti elementi in quantità più o meno grande che possono essere ridotti assieme al minerale di ferro e passare nella ghisa in percentuale dipendente dal potenziale chimico dell'ossigeno o non ridotti e, quindi, essere eliminati nella loppa.

Di questi elementi riducibili alcuni sono indesiderati, almeno per impieghi particolari, per cui la loro possibilità di eliminazione nella scoria o meglio ancora l'assenza in carica diventa molto importante. Esempio tipico il titanio, parzialmente riducibile all'altoforno, indesiderato nelle ghise destinate per getti di ghisa sferoidale, per cui è difficile ottenere da certi minerali il tenore massimo rientrante in quello tollerato di 0,04%.

Pertanto, anche se il miglioramento della carica, e la disponibilità mondiale di ottimo minerale di ferro, rende non più così sensibile il problema, è sempre consigliabile fornirsi da produttori di cui si conoscano le ottime qualità del minerale di carica non solo per quanto riguarda il tenore di zolfo, ma anche per gli oligoelementi.

Le ghise della serie 3.000 e 4.000 sono quelle più comunemente usate per la produzione dei getti per la meccanica generale: autoveicoli, motoristica, meccanica agricola e macchine utensili, nonché per il riscaldamento e la sanitaria. I componenti, che normalmente sono tenuti sotto controllo come oligoelementi sempre indesiderabili per gli effetti dannosi quali stabilizzatori di carboni o per la formazione di grafite di forma particolare, sono i seguenti con i relativi tenori massimi:

— Piombo	= 0,005%
— Arsenico	= 0,010%
— Antimonio	= 0,010%
— Stagno	= 0,010%
— Zinco	= 0,005%
— Titanio	= 0,070%

## Produzioni correnti di ghise in pani

All'inizio del capitolo si sono illustrate le caratteristiche generali delle ghise gregge secondo le Norme UNI 4366 e le Norme Euronorm 1-55. Esse servono indubbiamente a definire una classificazione ed un acquisto per quanto riguarda le serie 3.000 e 4.000 nei limiti della tab. XV. Tutti gli altri tipi, che rientrano nella serie 6.000, sono definiti con *caratteristiche particolari*.

## Descrizione delle ghise gregge

### *Ghisa ematite*

Così denominata per il basso tenore di fosforo, nome che le perviene dal minerale una volta maggiormente adoperato. La sua analisi normale è contenuta nei limiti delle classi 3.200-3.500 e cioè con i seguenti titoli:

Cr =  $3,5 \div 4,5\%$ ; Si =  $1 \div 6\%$ ; Mn = fino a  $1,5\%$ ;  
P = fino a  $0,12\%$ ; S =  $0,04\%$  max.

L'ematite è selezionata con intervalli di silicio dello  $0,5\%$  e normalmente nei titoli Si =  $2 \div 2,5\%$  e  $2,5 \div 3\%$  con tenori di manganese dello  $0,7 \div 1\%$ . Con l'aumento del tenore di silicio diminuisce il tenore di carbonio. Gli stabilimenti produttori selezionano inoltre, con il medesimo titolo di silicio, gli intervalli del manganese nella seguente misura: sino a  $0,70\%$ ;  $0,7 \div 1\%$  e  $1 \div 1,5\%$ .

### *Ghisa semi-ematite ed a basso ed alto fosforo*

Le ghise semi-ematite sono quelle che hanno tenori di fosforo compresi nell'intervallo  $0,12 \div 0,5\%$  e comprendono le classi 4.000-4.500, mentre le ghise fosforose hanno il titolo del fosforo  $0,5 \div 2\%$ , cioè le classi 4.600-5.300.

### *Ghise speciali ad alto carbonio*

Sono ghise caratterizzate da un tenore di carbonio superiore al  $4\%$  (può arrivare sino al  $5\%$ ). Sono ottenute con vento caldo e con cariche speciali. Contengono normalmente titanio, bassi tenori di silicio, manganese e fosforo. Il tenore di titanio è in rapporto al silicio direttamente.

### *Ghise speciali a basso carbonio*

Sono ghise caratterizzate da un tenore di carbonio inferiore al  $3\%$ , più precisamente  $2,4 \div 2,8\%$  e tenori di cromo inferiori a  $0,05\%$ . Particolarmente adatte per la produzione di ghisa malleabile.

### *Ghise ad alto manganese*

La Norma UNI 4366 prevede nel  $6\%$  Mn il limite inferiore delle ghise legate al manganese. Tuttavia, sono chiamate comunemente ghise al manganese anche quelle che hanno il contenuto di manganese inferiore ai limiti della Norma UNI 4366; il contenuto è  $1,5 \div 5\%$  Mn.

Sono prodotte in altoforni piuttosto piccoli a vento freddo e di appropriata costruzione e con particolari trattamenti metallurgici. Le ghise ad alto manganese sono

selezionate con tenori di silicio sino al  $3,5\%$ , fosforo  $0,1 \div 0,15\%$  e zolfo  $0,02 \div 0,05\%$ . Esse si distinguono in bianche, trotate e grigie a grana fine.

### *Ghise speciali*

Sono ghise ottenute con minerali scelti allo scopo o con aggiunta di elementi e servono per applicazioni particolari e sono prodotte da stabilimenti specializzati.

Le ghise Cleveland sono tipi di ghise contraddistinti da un tenore di fosforo centrato sull' $1,20\%$ . Questo tenore risulta, da studi effettuati, il migliore compromesso per certi tipi di getti, fra le necessità spesso contraddittorie del prezzo di costo, della resistenza meccanica dei getti, della lavorabilità, della qualità della successiva smaltatura, ecc.

Le ghise Cleveland sono richieste per la fabbricazione di getti piatti e più precisamente: apparecchi di riscaldamento e per cucina, apparecchi a gas, vasche da bagno, altri apparecchi di ghisa smaltata, marmitte, tubi ed apparecchiature idrauliche, ecc.

### *Ghise al carbone di legna*

È prodotta in piccoli altiforni a vento freddo, adoperando come combustibile il carbone di legna e partendo da una carica composta di minerali selezionati e di prima qualità.

Questa ghisa, per il basso contenuto di oligoelementi (Cr =  $0,002\%$ ; Ti =  $0,020\%$ ; As =  $0,002\%$ ; Cu =  $0,003\%$ ; Pb =  $0,001\%$ ) è particolarmente adatta per la produzione di getti di ghisa grigia ad elevata resistenza, getti di ghisa malleabile e come ghisa madre per la produzione di getti con grafite sferoidale.

I Paesi produttori sono: l'Australia, la Svezia, la Germania Occ., il Brasile e la Spagna.

### *Ghise speciali per la produzione di ghisa sferoidale*

Sono ghise ottenute con minerali selezionati per la loro purezza, soprattutto per avere solo tracce dei componenti minori. Prodotte all'altoforno con una condotta speciale e cioè usando un coke con ceneri a basso tenore di titanio, vento a temperature elevate:  $1.223 \div 1.273$  K al forno ( $950 \div 1.000$  °C) e loppa relativamente alta, sono trattate allo stato liquido per ridurre a tracce lo zolfo.

Particolare importanza presentano gli oligoelementi sia ai fini della sferoidizzazione della grafite, sia sulla formazione di ferrite nella ghisa. Alcuni di essi sono decisamente dannosi; se superano un limite di concentrazione nella ghisa madre, ostacolano la nodulizzazione della grafite. Valori limite sono considerati i seguenti tenori: Pb =  $0,002\%$ ; Bi =  $0,002\%$ ; Sb =  $0,002\%$ ; Ti =  $0,05\%$ ; Al =  $0,05\%$ ; Sn =  $0,02\%$ ; As =  $0,025\%$ ; B =  $0,001\%$ ; Cr =  $0,07\%$ ; Cu =  $0,5\%$ .

Secondo i recenti studi effettuati in Giappone, gli effetti degli oligoelementi tendono a sommarsi e così si può avere un'influenza negativa degli elementi in tracce sulla sferoidizzazione della grafite se è elevato il loro contenuto.

Per quanto riguarda il manganese, il fosforo e lo zolfo, i titoli minimi che si riesce ad ottenere sono: manganese =  $0,10\%$ ; fosforo =  $0,005\%$ ; zolfo =  $0,005 \div 0,025\%$ .

Di altri elementi, pur non essendo sempre indesiderabili per i loro effetti, è bene conoscerne l'entità:

- Cromo = 0,02%
- Cobalto = 0,01%
- Rame = 0,01%
- Vanadio = 0,01%
- Nichel = 0,02%

### Stato superficiale

Tutti i produttori di ghise in pani sono ora equipaggiati di appropriate macchine per colare che assicurano alla superficie dei pani assenza di rugosità ed assenza di inclusioni di silice. Anche l'aspetto superficiale dei pani è un importante problema qualitativo, e perché la parte piana del pane sia esente da grossi risucchi che generalmente contengono grafite, e perché le superfici a contatto con le conchiglie non abbiano vaiolature.

Tutte le rugosità aumentano con l'esposizione prolungata agli agenti atmosferici e l'ossidazione, provocando maggiori cali di fusione ed altri inconvenienti qualitativi.

### Caratteristiche strutturali

In conseguenza dell'alta velocità di raffreddamento che si ottiene nelle macchine per colare, le strutture dei pani risultano per le serie 3.000 e 4.000 più uniformi e piuttosto fini, più aperte per la serie 5.000, mentre per le serie 0.000, 1.000, 2.000 possono essere bianche o trottate.

La struttura del pane di ghisa assume particolare importanza in funzione del mezzo fusorio che si ha a disposizione. Poiché la completa dissoluzione di tutti i componenti strutturali della ghisa di carica è funzione della temperatura e del tempo di permanenza, se ne deduce l'utilità di avere un forno fusorio che raggiunga temperature elevate possibilmente pari a 1.773 K (1.500 °C) ed una struttura idonea del materiale di carica.

Hanno pertanto più interesse dal punto di vista della struttura, le ghise di prima fusione con struttura perlitica, pur avendo elevati tenori di silicio e grafite con lamelle di dimensione contenuta.

### Peso e forma del pane

Le macchine per colare hanno favorito la produzione di pani di ghisa di dimensioni uniformi e tali da essere adatti anche per forni di diametro molto piccolo. Lo standard dimensionale di fornitura è all'incirca equivalente per tutti i fornitori qualificati ed il peso del blocchetto unitario oscilla in genere da 3 a 10 kg.

La fig. 3 riporta le dimensioni di pianta e la sezione di alcuni pani di ghisa o blocchetti con i relativi pesi.

La forma del pane di ghisa assume importanza se considerato sotto l'aspetto della trasmissione del calore per irraggiamento, quando è lambito dalle fiamme oppure per conduzione se immerso in un bagno fuso.

Tenuto conto che il caricamento dei forni fusori si avvia sempre più ad essere eseguito tramite scuotitori con pesatura automatica, il peso del pane, la pezzatura, il pane separato e singolo, assumono un aspetto di particolare importanza agli effetti di un caricamento regolare.

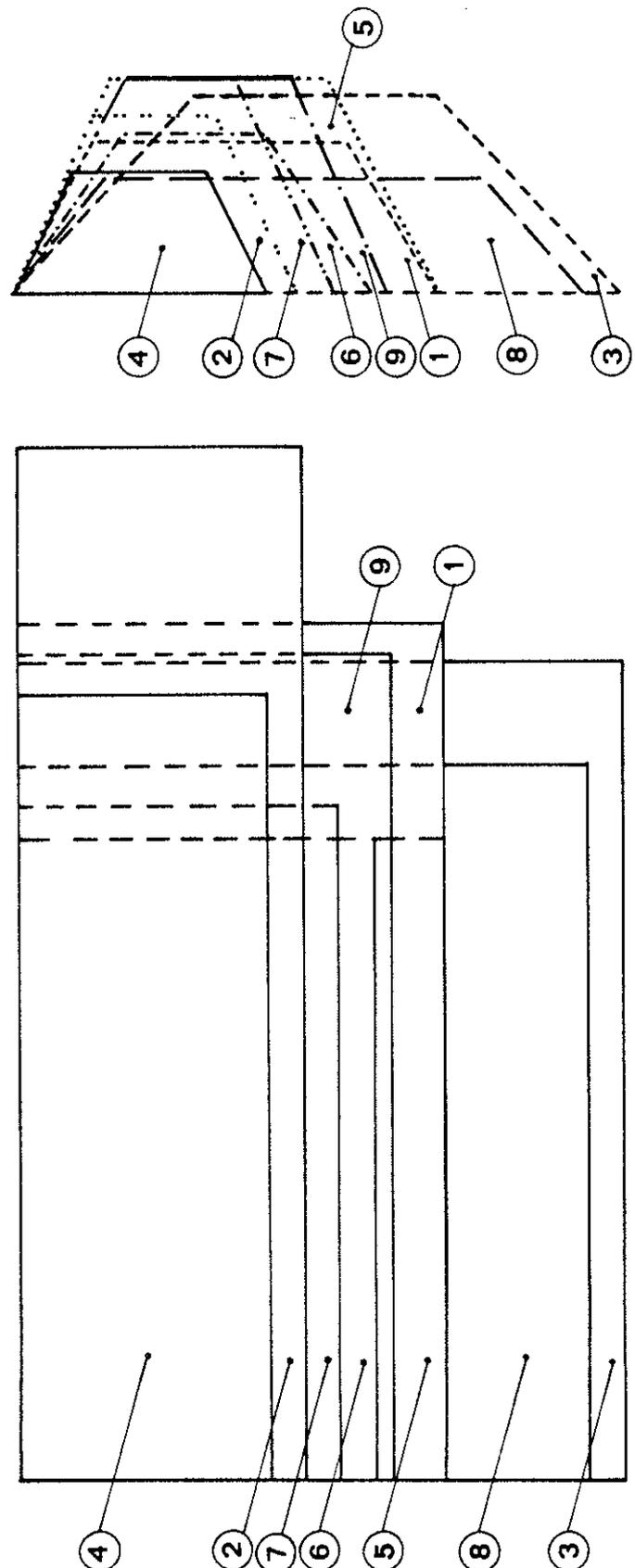


Fig. 3 - Dimensioni di pianta e sezione di alcuni pani di ghisa (scala 1:2).

Per questo motivo sono da preferirsi pani di ghisa con pesi unitari medi di 5 ÷ 10 kg.

### *Ghise al forno elettrico e ghise sintetiche*

Sono ghise elaborate al forno elettrico con riduzione da minerali od al forno elettrico ad arco per carburazione di rottami di acciaio o di preidotti.

La produzione di queste ghise è limitata e generalmente sono fuori commercio, perché sono assorbite dagli stabilimenti produttori per loro uso interno.

La struttura dei pani è molto serrata e le analisi sono tendenzialmente con valori di elementi molto vari e soprattutto con titoli da farle rientrare nelle ghise speciali.

Le considerazioni che precedono sono state redatte sulla base della Norma UNI 4366 in via di revisione e della Euronorm 1-55. Tuttavia, le classificazioni da esse previste non corrispondono alle più attuali, le quali prevedono la designazione della simboleggiatura secondo i simboli chimici degli elementi componenti e determinanti, indicando altresì il valore massimo della relativa percentuale.

### **Cenni di fabbricazione della ghisa di prima fusione**

#### *Premessa*

Le ghise gregge per fonderia sono generalmente prodotte all'altoforno mediante riduzione del minerale di ferro o di altri materiali ferrosi quali i pellets e l'agglomerato.

Prima di parlare delle caratteristiche chimico-strutturali di tali ghise, della loro classificazione ed impiego, è però utile fornire una descrizione, per quanto non molto dettagliata, di tutto il processo di fabbricazione e dei controlli effettuati nel corso del ciclo.

#### *Materie prime in arrivo*

Tutti i materiali in arrivo sono campionati ed analizzati, si tratti di carboni fossili destinati alla cokeria, di minerali fini da inviare all'impianto di agglomerazione, di minerali in pezzatura per l'altoforno, di fondenti vari (calcare, calcarino, olivina, ecc.) o di materiali diversi quali quarzite, ferroleghe ed altri.

Per ogni materiale esiste un preciso sistema di prelievo, in modo da potere preparare campioni rappresentativi sui quali effettuare, nei vari laboratori, tutte le analisi chimico-fisiche, granulometriche, tecnologiche e strutturali previste. Naturalmente tutti questi materiali sono sistemati a parco in cumuli separati, per evitare inquinamenti; infine, quando occorre, frantumati e vagliati negli appositi impianti.

#### *Cokeria*

In tale impianto è impiegato carbone fossile litantra-cico, a basso contenuto di zolfo, che è trasformato in coke metallurgico con un processo di distillazione in forni riscaldati ad oltre 1.473 K (1.200 °C), in assenza di aria.

Il coke, che si ottiene, è caricato all'altoforno insieme ai materiali feriferi ed ai fondenti e deve possedere caratteristiche chimiche e di resistenza tali da garantire una marcia regolare dell'altoforno e quindi una ghisa con analisi ben determinata. Anche in questo caso è indispensabile controllare sistematicamente la qualità del coke ed evidentemente la conduzione della cokeria.

### *Agglomerazione*

Questo impianto consente l'utilizzazione dei minerali fini che non possono essere caricati all'altoforno, in quanto comprometterebbero decisamente la permeabilità della carica.

L'agglomerazione può definirsi un processo di fusione superficiale di questi minerali, che consente di ottenere un prodotto con una percentuale di ferro elevata, una buona pezzatura ed una resistenza fisica idonea per il suo impiego all'altoforno.

In tutti gli stabilimenti moderni i minerali, il calcarino (1) ed il coke (in pezzatura fine) sono dosati a mezzo bilance elettroniche e successivamente mescolati in modo da ottenere un semi-prodotto (la miscela) caricata poi sul nastro di cottura. Anche in questo caso i singoli materiali e la miscela sono controllati sistematicamente dal punto di vista analitico e granulometrico. La miscela, che si trova sul nastro di cottura, passa sotto i fornelli di accensione i cui bruciatori accendono il combustibile contenuto nella stessa; la combustione è alimentata e si propaga, grazie al flusso d'aria aspirata al di sotto del nastro.

L'agglomerato così prodotto, previo raffreddamento e vagliatura, è convogliato ai sili e quindi caricato all'altoforno. I controlli analitici, fisici e granulometrici dell'agglomerato devono essere effettuati con una frequenza elevata, in quanto tale materiale è caricato all'altoforno in percentuali che possono raggiungere anche il 100%, per quanto generalmente si aggirano sul 50-70%. Per la convenienza tecnico-economica che deriva dall'impiego dell'agglomerato in altoforno, gli impianti di agglomerazione sono stati potenziati in tutto il mondo ed attualmente si può raggiungere una produzione giornaliera di oltre 10.000 t per ogni nastro di cottura.

### *Altoforno*

L'altoforno è un forno a tino, di forma particolare e di varie dimensioni, che produce ghisa partendo dal minerale di ferro. La carica è composta, come già accennato, da minerali in pezzatura, pellets, fondenti e coke.

A titolo informativo si accenna che i pellets sono prodotti in appositi impianti dove i fini di minerale, opportunamente miscelati con leganti, sono trasformati in piccole sfere che, dopo cottura, presentano un diametro di 10 ÷ 20 mm circa ed hanno una elevata resistenza alla compressione, tale da consentire un ottimo impiego all'altoforno.

Per quanto riguarda le caratteristiche degli altri materiali componenti la carica, l'argomento è stato già accennato nei paragrafi precedenti. La composizione della carica di un altoforno è calcolata tenendo conto delle caratteristiche qualitative dei singoli materiali e delle condizioni di marcia dello stesso in modo da potere ottenere il tipo di ghisa voluto. È quindi evidente l'estrema importanza di tenere sotto stretto controllo tutte le variabili e seguirne l'andamento per potere intervenire tempestivamente sul processo.

Un altoforno è costituito dalle seguenti parti principali: tino cilindrico, tino conico, ventre, sacca e crogiolo.

In ognuna di queste zone avvengono le reazioni chimiche che permettono la trasformazione dei materiali

(1) Termine siderurgico: calcare di piccole dimensioni (n.d.r.).

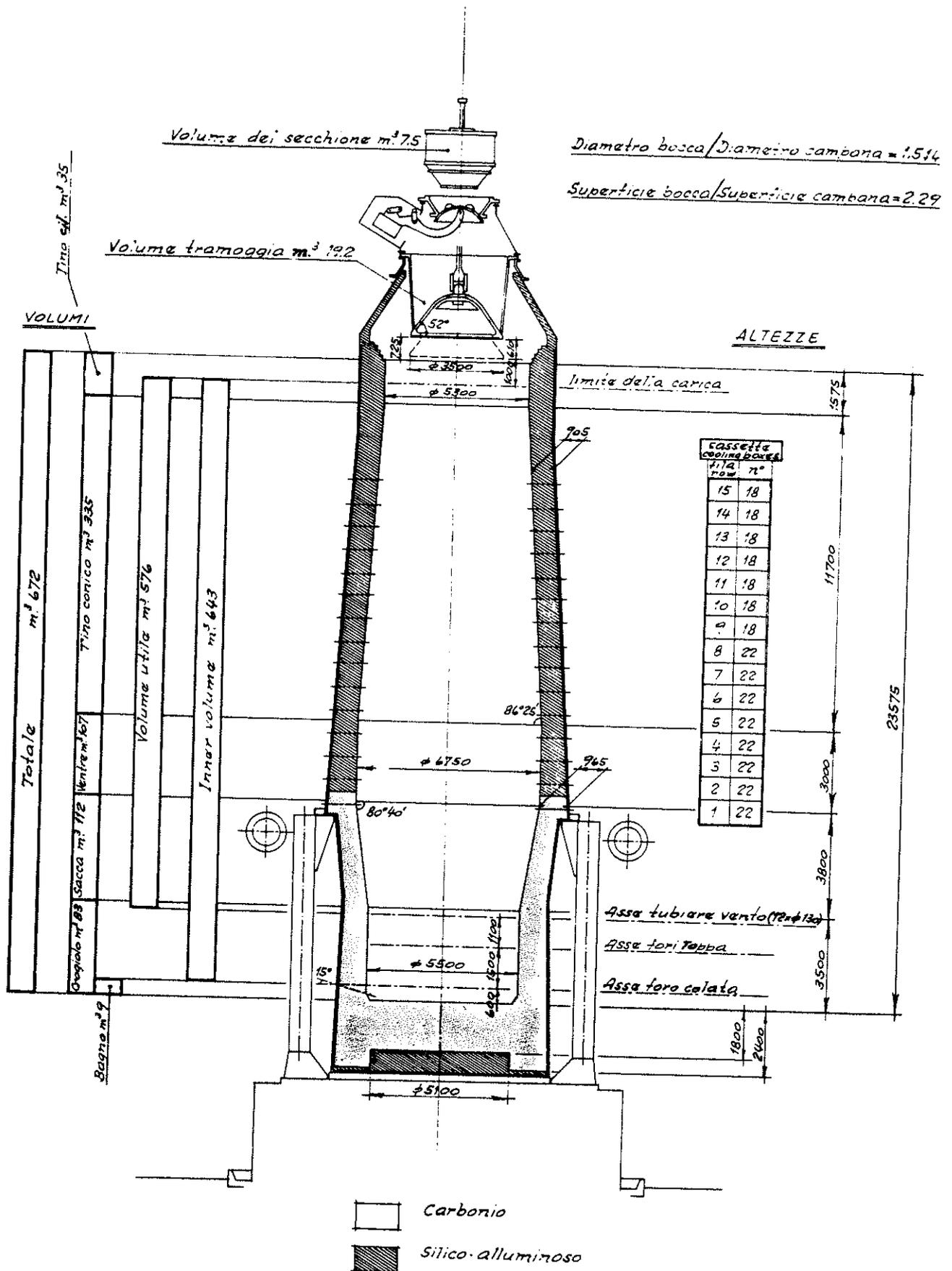


Fig. 4 - Caratteristiche di un altoforno dello Stabilimento Italsider di Trieste.

ferriferi in ghisa. Nella parte alta del crogiolo, in prossimità della sacca, il vento caldo immesso attraverso gli ugelli, a contatto con il carbonio del coke si trasforma in  $\text{CO}_2$  ed a contatto con altro carbonio in  $\text{CO}$  che è il fattore determinante per la riduzione degli ossidi di ferro contenuti nei minerali. Considerando la carica discendente ed iniziando dall'alto, si hanno in sintesi i seguenti fenomeni:

- Eliminazione dell'acqua igroscopica e di idratazione.
- Riduzione indiretta dei materiali ferrosi.
- Riduzione diretta dei materiali ferrosi; formazione delle prime scorie; inizio delle fusioni.
- Fusione completa, riduzione degli ossidi di manganese, silicio, fosforo; carburazione e solforazione della ghisa.
- Combustione del coke; desolforazione della ghisa; formazione completa delle scorie (loppa).
- Separazione della ghisa dalla loppa.
- Colata della ghisa e, separatamente, della loppa.

Come già accennato, gli altiforni hanno dimensioni molto diverse. Il diametro del crogiolo può variare da 5 a  $14 \div 15$  m e la produzione giornaliera da 700 a 11.000 t. A titolo di cronaca si può citare l'altoforno n. 5 di Fukuyama della Nippon Kokan (Giappone) che già nel 1974 aveva raggiunto un record di 11.063 t/giorno. Nello stesso stabilimento sarà costruito un nuovo altoforno con una produzione giornaliera di 12.000 t.

Le altre industrie siderurgiche delle Nazioni industrializzate hanno altiforni pressoché analoghi, sia come diametro del crogiolo sia per produzione. Questo tipo di altoforno è comunque utilizzato per la produzione di ghisa da inviare alle acciaierie (generalmente ai convertitori ad ossigeno L.D.). Gli altiforni, che producono ghise per fonderia, hanno invece dimensioni inferiori (diametro del crogiolo:  $5 \div 8$  m; produzione/giorno  $700 \div 1.200$  t).

Un esempio lo si può vedere nella fig. 4 dove sono riportate le caratteristiche di un altoforno dello stabilimento Italsider di Trieste.

All'atto della spillatura, la ghisa va tenuta strettamente sotto controllo, in modo da potere intervenire sulla marcia dell'altoforno e sulla qualità della ghisa stessa mediante aggiunte di ferroleghè o desolforanti. Per tale ragione deve essere elevata la frequenza di prelievo dei campioni e relativa analisi chimica.



Fig. 5 - Carro siluro dove è versata la ghisa liquida.

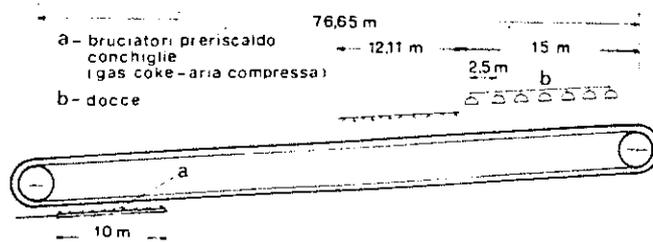


Fig. 6 - Schema di una macchina per colare.

Caratteristiche principali: lunghezza del nastro fra gli assi delle testate 76,60 m; velocità del nastro 18-20 m/min; No. 778 conchiglie; peso delle conchiglie (di ghisa E3) 75 kg.

#### Macchina per colare

La ghisa liquida ottenuta all'altoforno è versata in contenitori capaci, quali secchioni o carri siluro. I secondi sono i più usati (fig. 5).

I contenitori sono, quindi, trasportati alla macchina per colare che è l'impianto destinato alla trasformazione della ghisa liquida in pani solidi. Esso è costituito da un nastro inclinato sul quale sono sistemate le conchiglie; in queste è versato il metallo. Allo scopo di consentire il distacco dei pani dalle conchiglie, prima della colata si irrorava una soluzione di calce idrata. La solidificazione dei pani si ottiene mediante un raffreddamento progressivo ad acqua. Prima di fornire maggiori dettagli, che si rendono necessari per mettere in luce l'importanza di questo impianto ai fini qualitativi del prodotto, si ritiene utile riportare in fig. 6 lo schema di una macchina per colare (dello stabilimento Italsider di Trieste) ed in fig. 7 un particolare della stessa.

In tutti gli impianti moderni sono stati adottati vari accorgimenti per migliorare la qualità dei pani di ghisa. Alcune di queste nuove tecniche possono così riassumersi:

- Installazione di bruciatori sotto il nastro per il preriscaldamento delle conchiglie.
- Installazione di sistemi di pre-raffreddamento dei pani a mezzo nebulizzatori aria-acqua, in modo da consentire una prima e non violenta solidificazione dei pani nella parte superiore.
- Immissione di materiali grafitici nella calce idrata (soluzione che è irrorata, come già accennato, sulle conchiglie).
- Innovazioni per quanto riguarda le pratiche operative di colata (ad esempio: velocità del nastro).

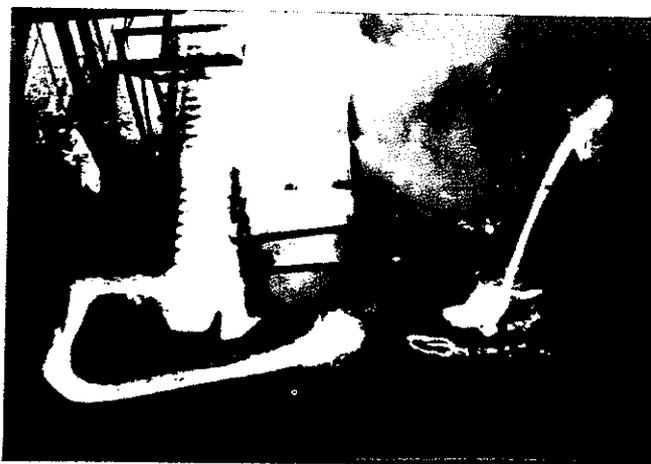


Fig. 7 - Particolare della macchina per colare di fig. 6.

La qualità dei pani, dal punto di vista superficiale e strutturale, può essere in tal modo decisamente migliorata, come del resto dimostrano i risultati. Infatti, gli elementi, che influenzano principalmente tale aspetto, sono i seguenti:

- Temperatura delle conchiglie e tipo di soluzione con cui ricoprirle.
- Caratteristiche costruttive delle conchiglie.
- Sistema e tempo di raffreddamento dei pani.
- Grado di *pulizia* della ghisa colata.

A proposito di quest'ultimo punto si possono adottare contemporaneamente vari accorgimenti. In fig. 7 si nota come la ghisa, prima di essere immessa in rigola<sup>(2)</sup> e successivamente nelle conchiglie della macchina per colare, è versata in un pozzetto munito di barriera per la separazione della grafite dalla ghisa. Anche nel carro siluro si può adottare, allo stesso scopo, un sistema del tipo visibile in fig. 8. La ghisa è così colata dal siluro nel pozzetto e quindi sul nastro non già direttamente dalla bocchetta, ma da un foro sottostante; il sifone così ottenuto trattiene già in partenza buona parte della grafite che galleggia entro il siluro, che è periodicamente vuotato.

(<sup>2</sup>) Termine siderurgico: canale di colata (n.d.r.).

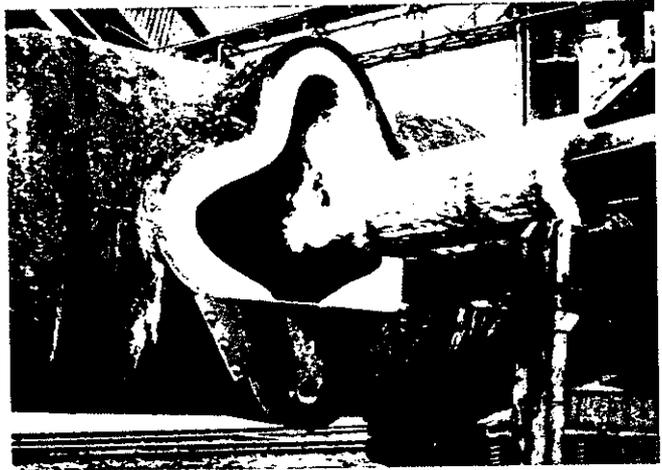


Fig. 8 - Ghisa colata nel pozzetto.

### Ciclo di lavorazione e controllo di qualità

Quanto descritto abbastanza dettagliatamente nei paragrafi precedenti, può essere sinteticamente illustrato nella fig. 9.

Per quanto riguarda la funzione del controllo di qualità in ogni stabilimento moderno, qualche cenno è già stato fatto nel corso della descrizione. Tale servizio ha lo scopo principale di operare con i responsabili degli impianti e di altri Enti specializzati per ottimizzare il livello qualitativo dei prodotti.

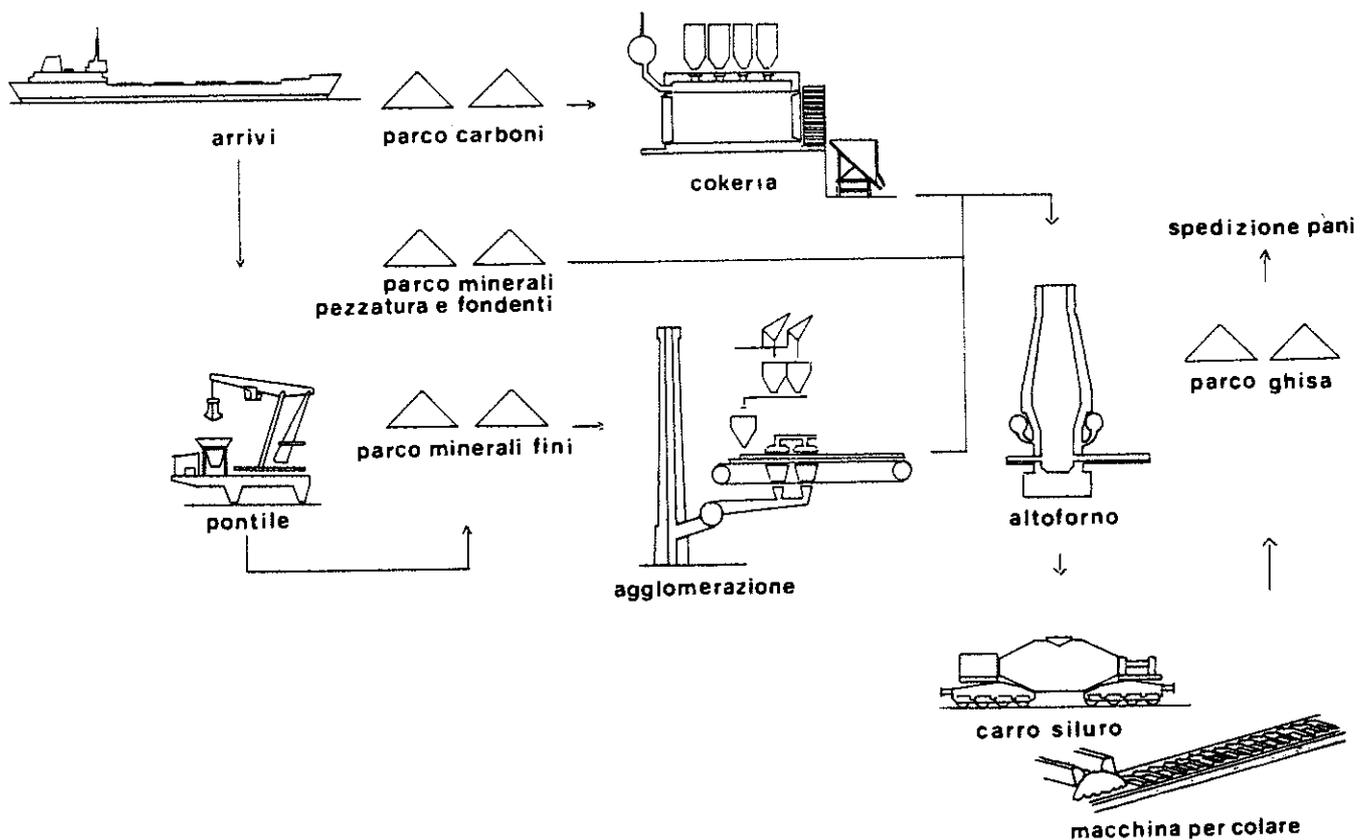


Fig. 9 - Ciclo di lavorazione.

## ROTTAME DI GHISA

Il rottame di ghisa costituisce il naturale ricupero delle eccedenze di lavorazione della fonderia e dei getti dopo che questi, svolta la loro funzione, sono destinati alla demolizione od eliminazione.

La loro suddivisione è, quindi, la seguente:

- Rottame di provenienza interna (di riciclo).
- Rottame di provenienza esterna (di acquisto).
- Torniture.

### Rottame di provenienza interna

Questo rottame rappresenta il residuo del ciclo di produzione dei getti e si può distinguere in:

- Colate, montanti, scarti.
- Bave, colaticci, ferrino.

Le colate, i montanti, gli scarti della fonderia sono materiali di analisi nota. Se la fonderia produce vari tipi di ghisa, dovrà effettuare una selezione per prevederne un razionale ricupero. La selezione è eseguita secondo gli intervalli di contenuto degli elementi principali quali carbonio totale, silicio, manganese, fosforo, ma soprattutto secondo il contenuto di cromo, molibdeno, rame, nichel od altri elementi pregiati. Oltre all'analisi, per questo rottame, che costituisce generalmente una partita di giro superiore al 25%, assume particolare importanza la forma per la quale è necessario prevedere una accurata spaccatura per evitare una densità irregolare della carica, se trattasi di cubilotti. Vi è la tendenza a trascurare questa fondamentale precauzione, dimenticando la sua importanza per la buona riuscita della fusione.

Le bave, i colaticci, il ferrino sono tutto il minuto proveniente dalle lavorazioni della fonderia: gocce di colata, bave della sbavatura e della granigliatura, raccolte dal separatore magnetico. È un rottame generalmente trascurato dalle fonderie e non si tiene conto che rappresenta una partita di giro del 3 ÷ 5%. Si utilizza bene nel forno elettrico; è idoneo all'impiego nel cubilotto solo se opportunamente compattato.

La migliore pratica è quella di riempire delle lattine, formando dei masselli di 25 ÷ 35 kg che possono raggiungere la zona di fusione senza ossidarsi eccessivamente, quindi con un calo normale di fusione.

Le bave, i colaticci ed il ferrino, cioè tutto il minuto della fonderia, prima di essere introdotto nel forno fusorio, deve essere accuratamente setacciato per evitare presenze di sabbia o di corpi estranei.

### Rottame di provenienza esterna

Il rottame di ghisa proveniente dal mercato è un insieme di materiali con differente composizione chimica di svariata provenienza.

Dalla Raccolta degli Usi della provincia di Milano — a cura della Camera di Commercio, Industria, Artigianato e Agricoltura di Milano — si rileva che la classificazione dei rottami di ghisa è la seguente:

- a) Rottami di ghisa meccanica: provengono da demolizione di macchinario in pezzatura pronta al forno, costituiti in particolare da pezzi di macchine utensili, da altre macchine (comprese quelle agricole) e motori in genere, ecc.
- b) Rottami di ghisa comune: sono costituiti in particolare da rottami di tubi di ghisa puliti, rottami di ghisa edilizia, ceppi freno, colonne, radiatori, caldaie, piastre, ecc.
- c) Rottami di ghisa bianca o bruciata: sono costituiti da tutti quei rottami che alla frattura si presentano di ghisa bianca o che hanno subito l'azione del fuoco.
- d) Rottami di lingottiere: basi di lingottiere non bruciate.
- e) Tornitura di ghisa: con la precisazione che trattasi di tornitura fresca, pulita, non ossidata o leggermente o fortemente ossidata.

Una partita di rottami di ghisa, contrattati secondo la denominazione commerciale « rottami di ghisa meccanica », non deve contenere ghisa bianca, bruciata, acciaiosa, malleabile, rottame smaltato e acciaio.

Se oggetto del contratto sono « rottami di ghisa comune » la partita non deve contenere rottami di ghisa bianca, bruciata, smaltata, malleabile e acciaio.

I rottami di ghisa contrattati come materiale « pronto al forno » devono essere in pezzi del peso fino a 50 kg (dimensioni non superiori a 60 x 40 x 40 cm circa). È tuttavia ammessa la presenza di materiale in pezzi del peso fino a 100 kg purché demolibile con la mazza a mano.

Nell'accettazione va tenuto presente che la pezzatura non deve superare un terzo del diametro del forno.

È importante che il rottame di ghisa sia pulito da parti di acciaio quali alberi ed ingranaggi, cuscinetti a sfere, ecc. e non sia contaminato da grasso, olio e gomma. Inoltre, il rottame non dovrebbe contenere parti in lega di alluminio, rame e metallo antifrizione, nonché protezioni superficiali quali zincatura e materiale isolante.

Le parti di metalli eterogenei, secondo la loro quantità, possono portare nella carica percentuale di elementi che di gran lunga superano gli oligoelementi che sono stati richiesti per la ghisa in pani e la loro influenza può essere determinante per la riuscita dei getti.

Il rottame notevolmente arrugginito può causare assorbimento di idrogeno nel bagno fuso. Il rottame minuto può causare difficoltà di condotta del cubilotto.

Di solito il rottame di ghisa è impiegato nella carica in un quantitativo che mediamente arriva sino al 30%; la qualità del rottame infornato deve essere analoga, per spessore ed analisi, ai getti da produrre. Al fine di dare una analisi indicativa dei rottami di ghisa, si riporta la seguente classificazione dei rottami:

	Ct %	Si %	Mn %	P %	S %
— Rottame di ghisa meccanica	3,3	2,0	0,7	0,4	0,1
— Rottame di ghisa comune	3,3	2,2	0,5	0,7	0,1
— Rottame di ghisa bianca o bruciata	3,2	1,5	0,4	0,3	0,1
— Rottame di lingottiere	3,6	1,6	0,8	0,1	0,1

## Torniture da lavorazione meccanica

Le torniture di ghisa sono residuati delle lavorazioni meccaniche. Sono una notevole fonte di approvvigionamento se si tiene conto che per i getti di ghisa meccanica, malleabile e sferoidale, possono rappresentare un peso oscillante dall'8 al 15% del peso del getto.

Le torniture sono più adatte ad essere impiegate nei forni elettrici. Sono stati effettuati molti tentativi di usarle nei cubilotto ed il migliore risultato ottenuto per la praticità del procedimento è stato quello di ridurle in bricchetti cilindrici del diametro di 12 cm ed altezza

di 6 cm con un peso medio di 3,2 kg ed un peso specifico di 4,8 kg/dm<sup>3</sup>. I bricchetti, introdotti con la carica nel cubilotto per una percentuale sino al 10%, hanno dato risultati soddisfacenti ed un calo normale.

Recentemente sono stati messi in commercio pastiglie od ovuli di torniture compresse delle dimensioni di 4 x 5 cm con un peso specifico di 5,5 kg/dm<sup>3</sup>.

Per il forno elettrico l'utilizzo è diretto, previo arrostitimento per togliere l'umidità, gli oli emulsionabili ed i corpi eterogenei di cui sono contaminate anche per salvaguardare l'igiene e la sicurezza sul lavoro.

## ROTTAME DI ACCIAIO

Il rottame di acciaio proviene da demolizioni e da sfridi di lavorazione. Sul mercato si riscontrano le seguenti varietà:

— Rottame di acciaio dolce omogeneo: con spessore minimo di 5 mm e di norma tagliato nella lunghezza massima di 30 cm, è commercialmente denominato ferro da correzione ed è indicato anche come palabile se è ricavato da demolizione di carpenteria, da spuntature di laminazione, da demolizioni in genere. La varietà pantografo è quella che risulta dal taglio di lamiera di medio e forte spessore, sempre con lunghezza massima di 30 cm.

— Armature di materiale ferroviario, che comprende: le traversine, le rotaie, le piastre, le bavette, i bulloni.

— Lamiere in pacchi: se costituite dagli sfridi di stampaggio e/o tranciatura, sono considerate di qualità pregiata; non altrettanto, però, se costituite da lamiere generiche e/o già verniciate.

I pacchi sono generalmente cubici, di due dimensioni: lato di 500 mm e lato di 300 mm.

A causa dei lubrificanti che talvolta ne rivestono le superfici, esse possono produrre fumi molesti all'atto dell'introduzione nel forno fusorio. Quelle ricoperte di vernice possono anche apportare nel bagno quegli elementi non desiderabili eventualmente contenuti nelle vernici stesse.

— Minuto da demolizione di auto: è ricavato dalla demolizione di automobili ed è usato allo stato in cui è prodotto oppure allo stato impacchettato per facilitarne il trasporto e la movimentazione, ridurne la

voluminosità e l'ossidazione. È disponibile anche sotto forma di piccoli pezzi tranciati, sverniciati e puliti dalle parti non metalliche (è il cosiddetto « shredded metal » o « proler »).

Generalmente queste distinzioni commerciali non corrispondono ad una uniformità nella composizione chimica.

In media i rottami di acciaio contengono: C: 0,10 ÷ 0,30%, Si: 0,20 ÷ 0,40%, Mn: 0,40 ÷ 1%.

La lamiera in pacchi proveniente da tranciatura o da stampaggio presenta generalmente un basso contenuto di manganese; questo la rende molto adatta per la produzione della ghisa con grafite sferoidale.

Non è da trascurare l'eventualità che queste lamiere siano oleate con lubrificanti ad elevato contenuto di zolfo, il cui valore può andare dall'1% degli oli nuovi al 30% degli oli già usati nei motori a combustione interna.

I rottami provenienti da acciai speciali, come per esempio quelli per molle, per lamierini per motori elettrici, ecc., apporteranno alla carica i corrispondenti elementi di lega: esempio Si.

Secondo il forno che si usa, la pezzatura e lo stato del rottame impiegato sono determinanti per alcuni aspetti del processo fusorio. Nel caso di preriscaldamento delle cariche per i forni elettrici è importante adottare una pezzatura del rottame che ne contenga al minimo l'ossidazione e che favorisca la velocità di fusione.

Comunque, è necessario evitare l'ossidazione superficiale del rottame per non avere i noti inconvenienti che producono gli ossidi introdotti nel bagno metallico.

## MINERALI PRERIDOTTI

Per materiale preridotto si intende il prodotto ottenuto dagli impianti di riduzione diretta del minerale, escludendo l'altoforno od i convenzionali forni elettrici di riduzione. I processi di riduzione diretta sono svariatissimi e nessuno di essi si è ancora affermato definitivamente rispetto agli altri, anche se la produzione del preridotto va continuamente espandendosi.

Senza entrare nei particolari, i processi di riduzione diretta possono dividersi in 2 grandi categorie, da una parte quelli che utilizzano riducenti solidi, di solito carbone non da coke, di cui tipico si può considerare il processo SL-RN, e dall'altra quelli che utilizzano riducenti gassosi prodotti separatamente dal reattore dove avviene la riduzione stessa.

Una ulteriore suddivisione si può anche fare in quest'ultima categoria fra quelli che fanno avvenire la riduzione in letto fluidizzato, tipo per esempio il processo H-Iron o quelli che utilizzano letti statici tipo il processo Hyl o quelli che utilizzano forni a tino tipo Midrex.

Il prodotto, che si ottiene, può essere spugna di ferro a basso tenore di carbonio od anche ghisa ad alto tenore di carbonio.

Per preridotto si intende, però, normalmente bricchetti o pellets di ferro a basso carbonio che hanno una forte tendenza all'ossidazione, data la loro natura tendenzialmente porosa.

È quindi consigliabile il loro impiego solo se si prevede una utilizzazione quasi immediata per evitare forti perdite, per lo meno di energia, a causa dell'ossidazione.

L'analisi media dei preridotti è nei seguenti limiti: ferro metallico:  $80 \div 90\%$ , silicio:  $1 \div 7\%$ , carbonio:  $0,5 \div 1\%$ , resto: ossidi di alluminio, titanio, calcio, magnesio, fosforo e zolfo in tracce.

Per la loro pezzatura, i preridotti sono usati per acciaieria elettrica o per la produzione di ghisa con forni elettrici od al cubilotto, in sostituzione del rottame di acciaio. Queste ultime applicazioni, ancora in fase sperimentale, hanno suscitato molto interesse.

## COKE

### Produzione di coke attraverso la distillazione del carbon fossile

Dalla distillazione ad alta temperatura del carbon fossile si ricavano 2 prodotti principali: il coke ed il gas. Il coke è di 2 tipi: metallurgico e per fonderia.

Il coke metallurgico, insostituibile elemento nell'operazione di riduzione dei minerali di ferro nell'altoforno, è fabbricato nelle cokerie in apposite camere di riscaldamento fuori del contatto dell'aria, con una miscela di diversi carboni di adatta qualità. Durante questa operazione che avviene a  $1.473 \div 1.673$  K ( $1.200 \div 1.400$  °C), si ha lo svolgimento di sostanze gassose, una parte delle quali, mediante condensazione, dà luogo a sostanze quali il catrame, la naftalina, ecc., mentre quella che rimane allo stato gassoso è un gas combustibile ad alto potere calorifico. Il prodotto residuo solido nelle camere di distillazione è il coke che si presenta in pezzi porosi di colore grigio-argento e di suono metallico.

La qualità del coke dipende essenzialmente dalle proprietà del carbone che si distilla, tuttavia anche le condizioni di cokefazione (temperatura e tempi di distillazione) esercitano la loro influenza. I forni di distillazione sono formati da impilaggi di mattoni refrattari di silice aventi notevole durata e buona conducibilità termica. Il calore per la cokefazione è fornito dalla combustione dello stesso gas di cokeria per irradiazione da appositi compartimenti laterali alla cella contenente il carbone.

Il coke metallurgico deve soddisfare i seguenti requisiti:

- Zolfo non maggiore di 1%
- Fosforo non maggiore di 0,01%
- Acqua non maggiore di 3%
- Ceneri non maggiori di 10%
- Peso specifico dopo essiccazione a 373 K (100 °C):  $500 \div 600$  kg/m<sup>3</sup>
- Potere calorifico inferiore:  $29,295 \div 31,388$  MJ/kg ( $7.000 \div 7.500$  cal/kg).

Deve inoltre possedere buone caratteristiche di resistenza meccanica alla rottura ed all'abrasione. Tali proprietà sono migliorate dal trattamento di frantumazione e vagliatura che il coke appena prodotto subisce per ottenere una pezzatura più calibrata ed omogenea per il successivo impiego.

### Coke per cubilotto

Il coke per fonderia presenta delle esigenze di qualità superiori al coke metallurgico sia per le proprietà chimiche che per quelle fisiche; a tale scopo per la sua produzione sono richieste miscele fossili selezionate e ben integrate ai fini di una razionale cokefazione e tecniche di distillazione tutte particolari che si evolvono attraverso lunghi tempi di distillazione a temperature piuttosto basse.

Un buon coke per fonderia deve possedere le seguenti caratteristiche.

#### Aspetto

Colore grigio argenteo a struttura uniforme e compatta, privo di zone differenziate e spugnose.

#### Umidità

È necessario che in un buon coke per fonderia il tenore di umidità sia il più basso possibile, generalmente è tollerato un valore che non superi il 5%, poiché elevate quantità di acqua abbassano il potere calorifico e presentano riflessi di carattere economico, perché per trasformare in vapore 1 kg di acqua occorrono 2.511 J (600 cal) che sono sottratte dal coke utilizzato.

#### Pezzatura

L'analisi granulometrica deve essere distribuita su poche frazioni senza la presenza di pezzi né troppo piccoli né troppo grandi, in modo da assicurare una buona permeabilità della carica.

Generalmente, a seconda del diametro dei cubilotti, sono consigliate le seguenti pezzature:

- Diametro del cubilotto  $< 600$  mm:  
pezzatura consigliata  $60 \div 90$  mm
- Diametro del cubilotto  $600 \div 1.000$  mm:  
pezzatura consigliata  $90 \div 150$  mm
- Diametro del cubilotto  $> 1.000$  mm:  
pezzatura consigliata  $> 150$  mm.

### Composizione chimica

Per ottenere una ghisa di buona qualità e basso consumo di combustibile è necessario che il coke in carica nel cubilotto abbia il più alto contenuto possibile di carbonio fisso che si traduce in un più elevato potere calorifico, in una più bassa percentuale di ceneri ed in una esigua quantità di impurezze quali zolfo e fosforo.

Si riporta, di seguito, l'analisi chimica media di un buon coke per fonderia:

— Carbonio fisso	> 92%
— Ceneri	< 7%
— Materie volatili	< 1%
— Zolfo	< 0,7%
— Fosforo	< 0,02%
— Potere calorifico superiore	> 30,969 MJ/kg (> 7.400 kcal/kg)

### Resistenza meccanica

È una delle proprietà essenziali del coke metallurgico, dalla quale dipende la regolarità di marcia dei grandi altiforni della capacità produttiva di 10.000 t giornaliere di ghisa; tale caratteristica è elevata a valori ottimali attraverso la composizione di appropriate miscele e lo studio di condizioni di distillazione sempre più controllate, per conseguire nella zona plastica la più adatta velocità di cokefazione del carbone fossile caricato.

Questa proprietà non deve assolutamente essere trascurata nel coke per fonderia, in quanto ha notevole importanza ai fini della conservazione della pezzatura, sia durante le varie fasi di ripresa e trasporto dall'impianto di produzione all'impianto di utilizzazione, sia sotto il peso delle cariche metalliche e non metalliche nell'interno del cubilotto.

Tale caratteristica è espressa da alcuni indici, dei quali di seguito si riportano i valori consigliati per una regolare marcia del cubilotto.

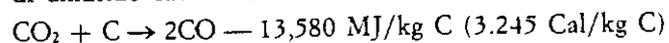
— Indice di caduta	+ 50 mm	94
— Indice Micum	M 80	70
— Indice Micum	M 40	87
— Indice Micum	M 10	9

Per la descrizione della condotta delle prove atte all'ottenimento di tali indici si rimanda al Capitolo *Il coke per cubilotti* del volume *I forni fusori nella fonderia di ghisa*.

### Reattività

Il comportamento del coke sotto l'aspetto della gassificazione e della combustione è misurato dalla sua reattività e cioè dalla velocità con la quale il carbonio in esso contenuto gassifica in presenza di ossigeno, anidride carbonica e vapore d'acqua. Nel caso specifico, tro-

vandosi nell'atmosfera interna del cubilotto, vuol dire capacità che possiede il coke di gassificare in presenza di anidride carbonica secondo la reazione



Questa reazione è alla base della formazione dell'atmosfera riducente nel cubilotto.

Nell'interno del cubilotto dalla zona di combustione del coke, l'anidride carbonica formatesi, seguendo la colonna ascensionale dei gas caldi, passa attraverso le cariche per le zone del cubilotto verso il camino; lungo il suo tragitto incontra altro coke a vari livelli di temperatura e reagisce trasformandosi in CO.

Essendo tale reazione endotermica, il bilancio termico del cubilotto risulta negativamente influenzato.

Questo spiega perché è preferibile impiegare nel cubilotto un coke con bassa reattività; generalmente un coke si presenta più reattivo se è male distillato, oppure se i carboni fossili di origine erano poco adatti a dare un prodotto di qualità a causa della bassa quantità di bitumi oleosi presenti oppure dalla natura delle ceneri che si presentano ricche di ferro.

### Coke speciali

In talune fonderie sono utilizzati coke speciali come:

- Coke H.C. o BR6 compatto e con bassissimo tenore di ceneri. Con l'impiego di tale prodotto è previsto il 20% circa di risparmio in combustibile rispetto al consumo di coke ordinario con conseguente aumento di produzione.
- Formed coke o coke preformato: i buoni carboni da coke vanno sempre più scarseggiando nel mondo, oppure le tecniche di estrazione sono tali da rendere proibitivi i costi di produzione a causa delle notevoli profondità alle quali sono scoperti nuovi giacimenti di litantrace a buon potere cokificante; per questo ed altri fattori non trascurabili è stato messo a punto un nuovo processo di cokefazione che può utilizzare carboni fossili di più basso rango, più facilmente reperibili ed a più basso costo sul mercato mondiale.

Il processo del coke preformato consiste in un'ossidazione, in una carbonizzazione ed in una semicokefazione, utilizzando la tecnica dei letti fluidi, in cui avviene la pirolisi del fossile, nella condensazione del catrame e nella preparazione del legante, nella bricchettazione e successiva cottura delle formelle di coke.

Il prodotto così ottenuto, se pur ancora allo stato semisperimentale, sta dando buoni risultati nell'impiego nel cubilotto con un costo abbastanza inferiore rispetto a quello del coke tradizionale: esempio il BJ polacco.

## MATERIALI APPORTATORI DI CARBONIO

Oltre al coke per fonderia, impiegato nel cubilotto come combustibile ed apportatore di carbonio, esiste una serie di prodotti che hanno la capacità di arricchire di carbonio la ghisa liquida per soluzione. La loro efficacia dipende dalla forma del carbonio di cui sono costituiti.

Sono usati particolarmente nelle cariche per forni elettrici, per correggere il tenore di carbonio sino a coprire l'intero intervallo di 0,2 ÷ 3,5%. Essi possono sviluppare capacità nucleanti in particolari condizioni. I principali prodotti in uso sono di seguito indicati.

### **Polverino da coke da carbone**

È il minuto del coke metallurgico con granulometria compresa tra 3 ÷ 10 mm. La granulometria migliore è 1 ÷ 5 mm. La sua analisi è quella del coke: ceneri 8%, materie volatili 1%, carbonio fisso 90% circa e zolfo minore dell'1%. Per il suo contenuto di zolfo non è adatto ad essere usato per le ghise speciali.

Il rendimento in carbonio assorbito di questo materiale è meno elevato che non per il coke di petrolio e la grafite sintetica e si aggira sul 60 ÷ 70%.

### **Coke di petrolio**

È un residuo della distillazione del petrolio ed ha un alto contenuto di carbonio. In commercio vi sono 2 tipi: uno ordinario ed uno calcinato.

Nel tipo ordinario o normale lo zolfo è contenuto intorno allo 0,5% e le ceneri intorno allo 0,6%. Le materie volatili oscillano dal 15% all'8%. Il tipo calcinato non ha materie volatili ed umidità, ed ha più bassi tenori di zolfo. Il peso specifico apparente è 0,8 ÷ 0,85. La granulometria è variabile: nel tipo normale si può avere una percentuale del 50% inferiore a 10 mm; nel tipo calcinato mediamente la granulometria è 1 ÷ 3 mm.

In commercio vi è anche un coke derivante dalla ridistillazione dell'olio combustibile oltre i 7,5 °E; dopo calcinazione ha un contenuto di zolfo di 0,85 ÷ 1%, ceneri 0,25%, volatili 0,5% massimo. Tutti i coke di petrolio contengono 0,02% di azoto.

### **Grafite**

Vi sono 2 tipi di grafite: uno di origine minerale ed uno sintetico.

La grafite minerale può essere del tipo argenteo a medio ed alto titolo di carbonio od amorfa a medio titolo.

La grafite sintetica è ottenuta per trasformazione ad alta temperatura del carbonio amorfo ottenuto dal coke di petrolio o dall'antracite o dalla grafite naturale ed è di aspetto nero opaco. Con essa si fanno le forme solide di carbonio quali elettrodi, manicotti, ecc. La grafite sintetica, usata per arricchire in carbonio, si trova in commercio in due tipi: uno granulare ed uno in trucioli di lavorazione.

La grafite granulare ha una granulometria compresa fra 2 ÷ 5 mm ed un peso apparente di 0,5 ÷ 0,6 kg/dm<sup>3</sup>. Il carbonio fisso è di circa 90% e le ceneri circa l'8%.

La grafite in trucioli ha ovviamente una granulometria più varia e cioè 0,1 ÷ 5 mm. La densità apparente è di 0,8 ÷ 0,9 kg/dm<sup>3</sup>, un contenuto di carbonio del 99%, di ceneri dello 0,2%, volatili dello 0,2% e zolfo dello 0,2%.

La grafite naturale usata per apporto di carbonio contiene: carbonio fisso circa 85%, zolfo 0,2% massimo, ceneri 13%, volatili 2% circa.

### **Miscele speciali**

Vi sono in commercio miscele composte da appropriati coke da carbone finemente polverizzati e di coke di petrolio e di antraciti pure polverizzati con la granulometria calibrata di 1 ÷ 3 mm.

Trattasi di miscele che sono calcinate e, quindi, quasi prive di materie volatili e con tenori di zolfo inferiori allo 0,7%.

Esse hanno un elevato rendimento di carbonio assorbito e possono essere fornite in confezioni titolate secondo il fabbisogno.

## **DESOLFORANTI**

Allo scopo di ridurre lo zolfo si impiegano materiali che hanno una notevole affinità per questo elemento.

I materiali principalmente usati sono i seguenti.

### **Carbonato di sodio (più comunemente denominato soda)**

Si trova in commercio in 3 forme: in polvere, in bricchetti di polvere compressi, in mattonelle fuse.

La soda in polvere, fusa in uno speciale forno elettrico con elettrodi di ferro, colata in stampi con forma di mattonelle, è particolarmente adatta per essere usata assieme alla carica nei cubilotti; si presta ad essere maneggiata con semplicità. La soda in polvere può essere usata in siviera o durante i travasi dal forno alla secchia oppure meglio insufflata in corrente di azoto tramite un tubo di grafite. Le aggiunte di 0,5 ÷ 1% di soda sul peso della ghisa trattata riducono lo zolfo del 20 ÷ 50%. Durante il trattamento si sviluppano fumi gialli di sodio metallico.

La soda in bricchetti, da sola od in miscelazione con carbone, ha lo stesso uso di quella in polvere, ma dà luogo a perdite perché piuttosto friabile.

La soda prodotta con il metodo Solvay è ottenuta da carbonato di calcio e cloruro di sodio con impianti specifici.

### **Carburo di calcio**

Questo prodotto non ha la sola proprietà di ridurre lo zolfo; qui è descritto l'effetto desolforante, data la sua spiccata affinità per lo zolfo. Il carburo di calcio industriale, impiegato per la produzione di acetilene, non è adatto per quest'uso per l'alto punto di fusione.

È preferibile usare il prodotto a basso punto di fusione: 1.903 K (1.630 °C). Esso ha un tenore di carbonio del 72% e di calcio del 28%, quindi più ricco in calcio (+ 8%) del tipo industriale ed è posto in commercio con la denominazione « F ». La pezzatura media è di 15 ÷ 30 mm, in polvere od in granuli e la sua conservazione abbisogna di particolare attenzione per proteggerlo dal contatto con acqua ed umidità.

L'uso della polvere è praticato tramite un tubo di grafite ed usando l'azoto come veicolo.

La fabbricazione del carburo di calcio è stata il primo processo in cui si è avuta l'applicazione industriale del forno elettrico che può essere del tipo a resistenza diretta o ad arco-resistenza. Alle origini la fabbricazione avveniva in modo discontinuo in forni a resistenza diretta, ma con rendimenti pessimi e con serie disomogeneità per quanto riguardava le caratteristiche del prodotto.

Attualmente il processo è continuo, in forni di tipo per ferroleghe dove ad elevata temperatura si fanno reagire le materie prime costituite da calce ben cotta, esente da alluminio e magnesio, e da carbone, in genere coke.

Il consumo di energia elettrica può essere indicato in circa 4.000 kWh/t, anche se varia entro una fascia re-

lativamente ampia, a seconda del titolo e delle caratteristiche del prodotto.

## Magnesio

Questo elemento metallico ha una grande affinità per lo zolfo. Esso è quindi impiegato per ridurre la quantità nella ghisa, ottenendo tenori molto bassi.

Il suo impiego avviene sotto forma di polveri o di lingotti fusi. In entrambe le applicazioni sono usate apparecchiature specifiche.

Il metodo più pratico è quello che usa il magnesio in blocchetti a peso titolato. Il magnesio è estratto per elettrolisi da cloruro di magnesio fuso.

## DISSOLIDANTI

Sono materiali che hanno una notevole affinità per l'ossigeno ed in particolari condizioni di temperatura sono energici riducenti degli ossidi degli elementi di lega.

I materiali principalmente usati sono i seguenti.

### Siliciuro di calcio

Come tutte le leghe a base di silicio, il siliciuro di calcio possiede una grande affinità per l'ossigeno. Ha un'azione esotermica ed inoltre ha la proprietà di ridurre lo zolfo sotto forma di solfuro di calcio, che si libera rapidamente alla superficie del bagno. In commercio vi sono 2 qualità. La più pregiata è ad elevato contenuto di calcio.

La produzione ed i tipi di siliciuro sono descritti nel paragrafo riguardante le ferro-leghe. In commercio è presentato sotto forma di granelle nella granulometria di  $0 \div 1$  mm, di  $0 \div 3$  mm, oppure di  $3 \div 5$  mm. È usato nella proporzione dello  $0,1 \div 0,3\%$ . Il basso punto di fusione  $1.273 \div 1.473$  K ( $1.000 \div 1.200$  °C) ne favorisce l'assorbimento.

### Carburo di silicio

Il carburo di silicio quale disossidante è generalmente usato allo stato di granelli per i forni elettrici e conglobato in bricchetti assieme ad altri elementi per il cubilotto. Per il forno elettrico si usa il carburo di silicio metallurgico che è costituito da circa il 90% di carburo di silicio, 3% di carbonio libero e 1% di silicio e con granulometria  $0,5 \div 6$  mm. Favorisce la riduzione dell'ossido di ferro, soprattutto se nelle cariche sono usati rottami arrugginiti.

Il suo apporto in carbonio ed in silicio non va trascurato agli effetti dell'analisi. Esso è esente da alluminio. Inoltre per l'apporto di silicio ha un'azione inoculante, favorendo la formazione delle celle eutettiche. Conglobati in bricchetti, per il cubilotto, si usano anche rottami di manufatti in carburo di silicio, quali sostegni

per forni o tubi di riduzione, ecc. che sono mescolati assieme a calce, usando come legante un cemento silico-alluminoso.

In questo caso l'azione che si sviluppa è più complessa, perché interessa anche le scorie, aumentandone la capacità di ridurre gli ossidi. Commercialmente i bricchetti di carburo di silicio sono valutati secondo il contenuto netto di silicio, oppure di carburo di silicio e tenendo conto che il rapporto stechiometrico è di 69 di silicio e di 31 di carbonio, sapendo che il tenore di carburo di silicio metallurgico è di circa il 90%, si può risalire al contenuto di silicio dal peso del bricchetto.

È sempre preferibile determinare il carbonio nel bricchetto per risalire al tenore di carburo di silicio e di silicio; la silice del legante non dà silicio alla ghisa.

Nel calcolo della carica non si dovrà trascurare l'apporto in silicio dei bricchetti.

Il carburo di silicio o carborundum è fabbricato in forni elettrici a resistenza conosciuti come forni Acheson.

La resistenza è a diretto contatto delle materie prime, come indicato nella fig. 10, ed è costituita da un nucleo cilindrico di coke, blocchi di carbone amorfo oppure, ancora, grafite.

La carica è costituita da una miscelanza di silice e di carbone. La silice è sotto forma di sabbia di quarzo a basso contenuto di ossido di ferro ed il carbone è costituito da coke di petrolio o coke metallurgico macinato, vagliato ed a basso contenuto di zolfo.

La carica contiene anche una certa quantità di segatura di legno, che ha lo scopo di rendere porosa la massa e quindi facilitare l'allontanamento di ossido di carbonio, e di sale da cucina, che fa segregare le impurità, soprattutto l'ossido di ferro, formando una scoria vitrea sugli strati esterni della carica. Il carburo di silicio si presenta di colore diverso a seconda del grado di purezza: dal verde azzurro del materiale molto puro al grigio scuro del materiale di purezza meno elevata.

Il consumo di energia elettrica per produrre 1 t di carburo di silicio è di circa 9.000 kWh nei forni de-

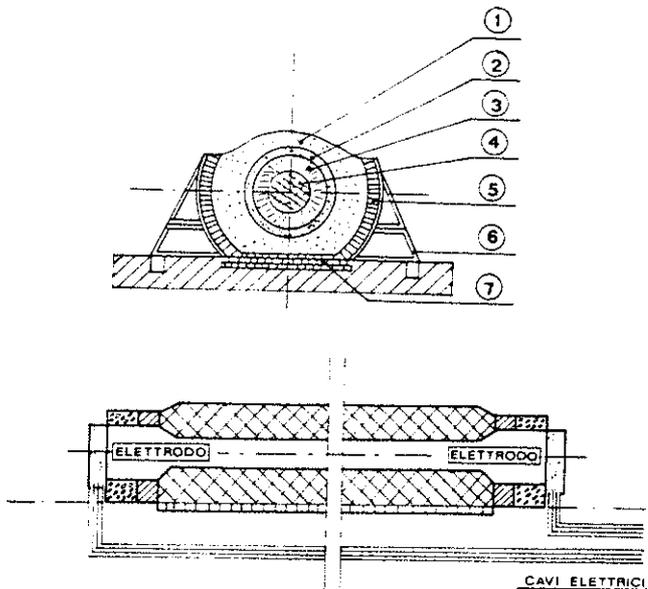


Fig. 10 - Schema di forno per la produzione di carburo di silicio.

- 1 - Materiale non combinato
- 2 - Crosta
- 3 - Carburo di silicio in cristalli
- 4 - Elettrodo di grafite
- 5 - Muratura refrattaria
- 6 - Telaio
- 7 - Suola.

scritti, che hanno un rendimento assai superiore ai forni ad elettrodi (ad arco).

Il carborundum ha una densità di circa  $3,2 \text{ kg/dm}^3$  ed a temperature dell'ordine di  $2.573 \text{ K}$  ( $2.300 \text{ }^\circ\text{C}$ ) si decompone senza fondere. A contatto con la ghisa liquida si dissocia per l'azione di riduzione sugli ossidi, producendo calore. Pur essendo questa azione disossidante la caratteristica preminente, non va trascurato il suo apporto in carbonio, poiché quest'elemento ne costituisce il 30% circa in peso. Per quest'uso il carburo di silicio va usato quale risulta dalla produzione opportunamente granulato.

### Terre rare

Più note come modificanti della struttura della ghisa, sono considerate sotto l'aspetto disossidante per la grande affinità con l'ossigeno per quanto minore del magnesio.

La loro azione è favorita dalle alte temperature ed agiscono in concomitanza con altri elementi come il silicio, il carbonio, il manganese. Gli elementi delle terre rare chiamate anche *lantanidi* sono: lantanio, cerio, praseodimio, neodimio, promezio, samario, europio, gadolino, terbio, disprosio, olmio, erbio, tulio, itterbio, lutezio.

Sono elementi molti simili tra loro ed in natura sono presenti come ossidi o fosfati nella medesima roccia intimamente mescolati fra loro.

Le sabbie monazitiche brasiliane sono la materia prima più comunemente usata per la preparazione di questi elementi. Esse sono ridotte allo stato metallico tramite elettrolisi in appropriate apparecchiature oppure a secco con carbone o magnesio ad alta temperatura in forni elettrici.

Tali metalli avidi di ossigeno e di zolfo disossidano, formando ossidi e solfuri stabili alle alte temperature. I più usati elementi del gruppo sono il lantanio, il cerio, il praseodimio ed il neodimio.

Il lantanio, fra tutti, presenta la massima affinità con l'ossigeno. A  $1.933 \text{ K}$  ( $1.660 \text{ }^\circ\text{C}$ ) due parti per milione di tale elemento restano in equilibrio nel metallo fuso solo con una parte per milione di ossigeno. Nelle stesse condizioni di temperatura occorre un tenore dello 0,1% di cerio per portare l'ossigeno del bagno ad una parte per milione.

Le terre rare si trovano comunemente in commercio sotto forma di composti con silicio ed altri elementi, ottenendone più efficacia e più dosabilità.

L'addizione va praticata in piccole percentuali per evitare l'inclusione nella ghisa dei loro ossidi aventi alto peso specifico ed alto punto di fusione.

### Manganese

Il manganese è, dopo il ferro, il più abbondante metallo pesante presente in natura.

Si ottiene per riduzione dai suoi ossidi minerali con carbone in appositi forni. Questo metallo ha una notevole affinità nei confronti dell'ossigeno e dello zolfo con i quali si combina, formando composti che entrano nella scoria (ossido di manganese) o restano inclusi nella ghisa (solfuro di manganese) finemente dispersi senza però recare danno apprezzabile. Il manganese, come disossidante, è comunemente aggiunto come ferro-manganese con alto contenuto di manganese (80%) in piccole percentuali, perché non va trascurata la sua azione stabilizzante del carburo di ferro.

### Alluminio

L'alluminio si trova sotto forma di bauxite (ossido idrato di alluminio), nei vari tipi di argilla e nelle rocce feldspatiche ed è fra i più abbondanti metalli presenti in natura. Si prepara per elettrolisi dell'ossido fuso in presenza di adatto fondente.

Reagisce facilmente con l'ossigeno, formando un ossido bianco altamente refrattario simile agli ossidi delle terre rare, ma molto più leggero. La disossidazione con alluminio si esplica come energica reazione nei confronti dell'ossigeno, mentre risulta poco efficace nei riguardi dello zolfo.

Per evitare l'inclusione dell'ossido di alluminio nella ghisa è bene usarlo in presenza di calcio e silicio. La proporzione di aggiunta come disossidante non supera lo 0,05% e può essere aggiunto come metallo puro in piccoli blocchetti.

### Metalli alliganti

Oltre ai metalli descritti quali desolforanti (magnesio), disossidanti (manganese ed alluminio) e quelli alligati nelle ferroleghe, si usano in fonderia altri metalli quali lo stagno, il rame ed il nichel di cui si descrivono le caratteristiche.

Lo stagno è un metallo al cui uso si può ricorrere in fonderia per appropriati casi. È fornito normalmente in verghette del peso medio di  $150 \div 200 \text{ g}$ . Lo stagno

per uso di fonderia deve essere super-raffinato e contenere impurezze totali non più dell'1%. In ogni caso i seguenti elementi non dovranno superare le seguenti percentuali: piombo = 0,02%, zolfo ed arsenico = 0,11%. Le verghette di stagno puro, ripiegandole nei vari sensi, devono far sentire il caratteristico scricchiolio.

Il rame è un metallo che si usa correntemente per la produzione di getti di ghisa grigia, malleabile, sferoidale e per ghise speciali. In commercio si trova di prima fusione affinato al titolo 99,9 in lingotti. In fonderia si preferisce usarlo sotto forma di gocce, ricavate dalla fusione di rottami, oppure come ricupero di catodi, conduttori elettrici o trucioli. È necessario accertarsi che il materiale che si usa non sia contaminato da saldature che non siano di rame e che le impurezze contenute non superino per il piombo lo 0,02%, per l'antimonio lo 0,10%, per il tellurio lo 0,01% e per l'arsenico lo 0,10%. Le piccole quantità di berillio che può contenere non sono dannose, in quanto questo elemento ha una forte affinità per lo zolfo.

La solubilità del rame nella ghisa si ritiene sia del 3,5%. Le leghe più usate per aggiunte di rame e quelle più efficaci sono a base di calcio secondo questi titoli indicativi:

- Cu = 52,5%; Ca = 14%; Si = 28%; Sn = 5%; Al = 0,5%
- Cu = 65%; Ca = 10%; Si = 20%; Sn = 4,5%; Al = 0,5%

Il rame può fare da supporto per l'aggiunta di altri metalli quali il magnesio con le leghe 84% Cu, 15% Mg, 0,6% Ce, oppure 16% Cu, 38% Si, 12% Mg, 0,6% Ce, il cromo, lo zirconio ed il titanio. Di questi ultimi si citano le composizioni usate: per il cromo: 87% Cu, 11% Cr; per lo zirconio: 65% Cu, 35% Zr; per il titanio: 70% Cu, 30% Ti.

Il nichel allo stato raffinato si può trovare in commercio sotto forma di sferette o granuli, in cubetti, in cilindri od in croste concentriche ottenute con il processo Mond, oppure in catodi o rottami di essi. In entrambi questi stati ha il titolo di 99,97%, il rimanente 0,3% come tracce di cobalto, rame, ferro e zolfo.

È pure posto in commercio legato con altri elementi. Per dare una panoramica completata anche dalle leghe con magnesio, si riportano le leghe a base di nichel con i seguenti titoli indicativi:

- 0,7 ÷ 0,8% Ce; 13 ÷ 18% Mg; resto Ni
- 26 ÷ 33% Si; 0,7 ÷ 0,8% Ce; 13 ÷ 16% Mg; resto Ni
- 95 ÷ 96% Ni + Co; 1% Cu; 0,1% Fe; 0,1% S
- 92% Ni + Co; 5,5% Si; 1,65% Fe; 0,2% Cu
- 50 ÷ 55% Ni + Co; resto Fe
- 15% Bi; 85% Ni

- 50% Mo; 50% Ni
- 41 ÷ 42% Ni; 54 ÷ 57% Nb
- 47 ÷ 50% Ni; 17 ÷ 10% Cr
- 50% Ni; 8% Cr; 24% Cu
- 50% Ni; 50% Cu.

### Bricchetti

Servono ad introdurre soprattutto con la carica del cubilotto le ferroleghie ad alto titolo, proteggendole dall'ossidazione e relativo calo, ottenendone correzioni nelle condizioni più favorevoli.

Il bricchetto è generalmente costituito dalla ferrolegha miscelata ad un fondente ed agglomerata da un cemento alluminoso. Si usa conglobare in bricchetti le ferroleghie di silicio, manganese, cromo, fosforo, titanio, carburo di silicio, siliciuro di calcio, secondo contenuti predeterminati.

Si usa inoltre conglobare altri materiali quali soda, soda e carbone, spatofluore e soda al fine di favorire la scorificazione e la desolfurazione.

Si possono chiamare pure bricchetti i pacchetti Wachenfeld o termocariche. Essi sono prodotti al fine di facilitare l'introduzione in siviera di correttivi in pesi determinati che non possono essere aggiunti alla carica sia per l'esiguità della produzione da eseguire, sia perché gli elementi si ossiderebbero eccessivamente. Le ferroleghie o gli elementi sono contenuti in appositi pacchetti assieme a sostanze esotermiche atte ad elevare la temperatura quando sono riscaldate dal bagno. In questo modo la perdita in calore è compensata e la dissoluzione dell'elemento è assicurata. Con le termocariche si possono introdurre cromo molibdeno, titanio, vanadio.

### Fondenti

Per completare l'argomento sui materiali di carica si elencano i principali fondenti che, mescolati alla carica metallica, facilitano la formazione delle scorie nei forni fusori e cioè: calcare (detto anche castina), spatofluore (detto anche fluorina), calce.

Il loro impiego e le loro caratteristiche sono già stati illustrati nel volume *I forni fusori nella fonderia di ghisa*.

### Scorificanti

Per facilitare la raccolta delle scorie dalla superficie dei bagni dei forni elettrici o delle siviere sono usati dei prodotti raddensanti che facilitano l'estrazione della scoria.

## FERROLEGHE

### Caratteristiche generali

Si definiscono ferroleghie quelle leghe in cui accanto al ferro sono presenti altri metalli o metalloidi e che trovano generalmente impiego in siderurgia.

Esse costituiscono indubbiamente uno dei fattori tec-

nici determinanti che hanno permesso alla siderurgia di giungere al suo grande sviluppo attuale.

L'uso delle ferroleghie nella pratica siderurgica si può dire abbia accompagnato lo sviluppo di quest'ultima fin dalle origini, anche se talvolta l'effetto della presenza di altri elementi era scoperto incidentalmente.

L'inizio della produzione delle ferroleghie di maggiore importanza può essere situato tra la seconda metà dell'800 e gli inizi del '900.

Il ferro-manganese fu prodotto per la prima volta nel decennio tra il 1860 ed il 1870, il ferro-cromo al 26% venne fabbricato per la prima volta nel 1869, il ferro-silicio era già prodotto nel 1875 all'altoforno, con un contenuto di silicio fino al 20%, anche se solo dopo il 1900 la produzione di questa ferroleghie iniziò su vasta scala, con l'applicazione del forno elettrico. Nel campo specifico delle ghise e della loro inoculazione, lo studio dell'impiego delle ferroleghie si sviluppò con una certa consistenza dopo il 1920.

Le ferroleghie, pur essendo destinate ad essere impiegate in siderurgia, nella fabbricazione dell'acciaio o della ghisa, si differenziano tra loro per l'azione che sono destinate a svolgere e per il processo di fabbricazione che le ha originate.

Un'ampia suddivisione merceologica è normalmente così effettuata:

- Ferroleghie comuni: ottenute direttamente per riduzione degli ossidi minerali all'altoforno od al forno elettrico.
- Ferroleghie affinate: a basso contenuto di carbonio, prodotte con doppio trattamento metallurgico.
- Ferroleghie speciali: quelle ottenute per metallotermia.

Un'ultima osservazione può essere effettuata sulla definizione di ferroleghie, che possono forse essere considerate come denominate impropriamente in quanto nella maggioranza dei casi il ferro non è affatto presente come elemento preponderante. Le caratteristiche principali di alcune ferroleghie sono riportate nella tab. XVI.

### Cenni di fabbricazione

Le ferroleghie sono fabbricate con 3 diversi metodi: all'altoforno, al forno elettrico e per metallotermia.

Ciascuno di questi metodi ha possibilità limitate per quanto riguarda le caratteristiche ed il tipo di ferroleghie che può essere con esso prodotta, ed in genere quando 2 metodi possono essere impiegati per fabbricare la stessa ferroleghie, solo uno di essi ha avuto una diffusione nettamente prevalente sull'altro.

Si può definire, questo, un processo di *selezione naturale* in cui entrano in gioco diversi elementi di valutazione, fra i quali preponderanti sono l'elemento qualitativo ed economico.

Per produzioni all'altoforno sono utilizzati normali altofori a coke di media potenza, del tutto simili a quelli per la ghisa.

Con questo metodo si producono ferroleghie, a partire da ossidi la cui riduzione è possibile a temperature non elevatissime, come il ferro manganese standard al  $75 \div 80\%$  Mn e  $6 \div 7\%$  C, la ghisa manganesifera  $6 \div 30\%$  Mn ed il ferro-silicio a basso tenore di silicio:  $8 \div 14\%$  Si, fino ad un massimo del 20%.

La metallurgia del forno elettrico è la metallurgia delle elevate temperature; consente la riduzione degli ossidi refrattari e la fabbricazione in grandi quantità delle ferroleghie necessarie alla siderurgia.

Il forno elettrico per la produzione di ferroleghie, definito in genere come *forno ad arco sommerso* o *forno ad arco-resistenza*, è caratterizzato dal fatto che, a diffe-

renza del forno ad arco del tipo per acciaio, i suoi elettrodi lavorano immersi nella miscela che è costantemente caricata nel forno stesso. La corrente in questo caso passa attraverso la carica del forno, generando calore per effetto Joule, oltre che attraverso l'arco elettrico che scocca tra la punta dell'elettrodo e la suola del forno.

Naturalmente le caratteristiche chimiche dei materiali caricati nel forno sono un punto fondamentale per determinare i valori di impurezza nel prodotto finito.

Sotto questo aspetto sono importanti, ad esempio, i contenuti di calcio e di alluminio nei materiali di carica per la produzione di ferro-silicio: sono due elementi che, anche se solo proporzionalmente, si ritrovano tuttavia nel prodotto finale.

I forni per la produzione di ferroleghie hanno raggiunto dimensioni e potenze ragguardevoli, fino a ben oltre i 75 MVA.

Al forno elettrico si fabbrica la grande maggioranza delle ferroleghie utilizzate in notevoli quantitativi come il ferro-silicio, il ferro-cromo carburato ed affinato, il silicio-manganese, il ferro-manganese, il silicio di calcio, il ferro-silicio-alluminio ed altre leghe carurate.

Il processo metallotermico è il processo più costoso per la produzione di ferroleghie a basso contenuto di carbonio ed è fondamentalmente basato sulla grande affinità per l'ossigeno dell'alluminio e del silicio.

Si possono distinguere essenzialmente tre tipi di processi: l'alluminotermia, la silico-alluminotermia e l'elettrosilicotermia.

Con il metodo alluminotermico sono prodotti ferrotitanio, ferro-vanadio, ferro-tungsteno, ferro-boro, ferro-zirconio, ecc.

Il ferro-molibdeno è fabbricato con il metodo silico-alluminotermico.

Per definire una classificazione che tenga conto delle caratteristiche sia di composizione che d'impiego, le ferroleghie sono divise in:

- Correttive, aggiunte alla carica.
- Di apporto, aggiunte al bagno metallico.
- Inoculanti, per ottenere azioni sulla struttura.
- Modificanti, che variano la forma della grafite.

### Ferroleghie correttive

Sono solitamente aggiunte alla carica metallica e sono preferite le ferroleghie a basso o medio titolo al fine di ridurre le perdite dell'elemento caricato durante la fusione.

Le principali sono:

- Ghisa siliciosa al  $10 \div 12\%$  di silicio; prodotta direttamente all'altoforno, può ovviamente essere elaborata al forno elettrico ed è magnetica.
- Ghisa manganesifera con titoli di manganese dal 5 al 25%; è prodotta direttamente all'altoforno od al forno elettrico. Per la sua grana grossa a larghi cristalli lucenti è chiamata ghisa speculare ed è magnetica.
- Ghisa silico-manganesifera al 15% di silicio e 5% di manganese: è prodotta al forno elettrico ed è magnetica.
- Ferro-silicio al  $20 \div 25\%$  di silicio: è prodotto al forno elettrico, ma, data la scarsa domanda, quasi tutti i produttori ne hanno abbandonato la produzione. È magnetico.

Tabella XVI - Caratteristiche principali di alcune ferroleghie.

Ferroleghia	Composizione chimica													
	Mn	Si	C	S	P	Cr	Ca	Al	W	Mo	V	Ti	Sn	Cu
Ferro-manganese carburato 75/80*	75 ÷ 80	≤ 2	≤ 8	≤ 0,04	≤ 0,40	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ferro-manganese affinato	80 ÷ 85	≤ 2	≤ 1	≤ 0,04	≤ 0,40	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ferro-manganese superaffinato	80 ÷ 85	≤ 1	≤ 0,50	≤ 0,04	≤ 0,40	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ferro-silico-manganese 65/70 - 20/25	65 ÷ 70	20 ÷ 25	≤ 2	≤ 0,05	≤ 0,20	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ferro-silico-manganese 45/50 - 20/25	45 ÷ 50	20 ÷ 25	≤ 2	≤ 0,05	≤ 0,20	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Silico speculare 15-5	4 ÷ 6	14 ÷ 16	≤ 2,50	≤ 0,05	≤ 0,20	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ferro-silicio 90/95	—	90 ÷ 95	≤ 0,20	≤ 0,10	≤ 0,10	—	—	≤ 2	—	—	—	—	—	—
Ferro-silicio 75/80	—	75 ÷ 80	≤ 0,30	≤ 0,10	≤ 0,10	—	—	≤ 2	—	—	—	—	—	—
Ferro-silicio 45/50	—	45 ÷ 50	≤ 0,40	≤ 0,15	≤ 0,10	—	—	≤ 1,50	—	—	—	—	—	—
Ferro-silicio 20/25	—	20 ÷ 25	≤ 1,50	≤ 0,15	≤ 0,10	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ferro-silicio 10/12	—	10 ÷ 12	≤ 2	≤ 0,15	≤ 0,10	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ferro-cromo carburato 6/8 C	—	≤ 3	6 ÷ 8	≤ 0,15	≤ 0,10	60 ÷ 70	—	—	—	—	—	—	—	—
Ferro-cromo carburato 4/6 C	—	≤ 3	4 ÷ 6	≤ 0,15	≤ 0,10	60 ÷ 70	—	—	—	—	—	—	—	—
Ferro-cromo affinato 2 C	—	≤ 2	≤ 2	—	—	60 ÷ 70	—	—	—	—	—	—	—	—
Ferro-cromo affinato 1 C	—	≤ 2	≤ 1	—	—	60 ÷ 70	—	—	—	—	—	—	—	—
Ferro-cromo superaffinato 0,5 C	—	≤ 2	≤ 0,50	—	—	60 ÷ 70	—	—	—	—	—	—	—	—
Ferro-cromo superaffinato 0,1 C	—	≤ 2	≤ 0,10	—	—	60 ÷ 70	—	—	—	—	—	—	—	—
Silico-cromo 40/45 - 35/40	—	40 ÷ 45	≤ 0,10	—	—	35 ÷ 40	—	—	—	—	—	—	—	—
Ferro-fosforo 22/25	≤ 0,20	1,5 ÷ 2	≤ 0,25	—	22 ÷ 25	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Silico-calcio 60/70 - 20/25	—	60 ÷ 70	≤ 1	≤ 0,10	≤ 0,10	—	20 ÷ 25	≤ 3	—	—	—	—	—	—
Silico-calcio 60/65 - 30/35	—	60 ÷ 65	≤ 1	≤ 0,10	≤ 0,10	—	30 ÷ 35	≤ 3	—	—	—	—	—	—
Silico-manganese-alluminio 20-20-10	19 ÷ 21	≤ 20	—	—	—	—	—	9 ÷ 11	—	—	—	—	—	—
Silico-alluminio 45/50 - 15/20	—	45 ÷ 50	—	—	—	—	—	15 ÷ 20	—	—	—	—	—	—
Ferro-wolframio 75/85	≤ 1	≤ 1	—**	≤ 0,06	≤ 0,06	—	—	≤ 0,5	75 ÷ 85	60 ÷ 65	—	—	≤ 0,15	≤ 0,50
Ferro-molibdeno 60/65	≤ 0,75	≤ 1	—**	≤ 0,20	≤ 0,10	—	—	—	—	—	50 ÷ 60	—	—	—
Ferro-vanadio 50/60	—	≤ 1	—**	≤ 0,10	≤ 0,10	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ferro-titanio 22/25	—	≤ 2	—**	—	—	—	—	—	—	—	—	22 ÷ 25	—	—
Ferro-titanio 37/40	—	≤ 2	—**	—	—	—	—	—	—	—	—	37 ÷ 40	—	—
Ferro-titanio 45/50	—	≤ 3	—**	—	—	—	—	—	—	—	—	45 ÷ 50	—	—

\* Il ferro-manganese carburato 75/80 qui indicato corrisponde al tipo 8380 della Euronorm 1-55; per quest'ultimo però il limite inferiore del contenuto di manganese è 76% anziché 75%.

\*\* Commercialmente esente.

— Ferro-silicio 45 ÷ 50%: è prodotto al forno elettrico, è fornito in pezzatura tout-venant, salvo particolari richieste. Non è magnetico e deve essere conservato al riparo dall'umidità.

#### Ferroleghie di apporto

Sono generalmente aggiunte al bagno fuso, sia per rettificare l'analisi di elementi già aggiunti in carica, sia per introdurre elementi che per la loro esigua quantità richiesta non sono posti in carica. Sono ferroleghie ad alto titolo o sono l'eutettico della lega al fine di facilitare lo scioglimento e l'assorbimento nel bagno fuso.

Nella tab. XVII sono riportati i punti di fusione di alcuni metalli puri e delle ferroleghie di più frequente impiego e più facilmente reperibili.

Il nichel « F » è prodotto al forno elettrico, contiene il 92% di nichel e si trova in commercio sotto forma di piccole gocce e trova impiego nella fonderia di ghisa

per il suo basso punto di fusione. Negli ultimi anni le bricchette di nichel (si tratta di nichel puro 99,95 min. in polvere sinterizzato in panettini del peso di circa 40 g con dimensioni di circa 2 x 2 x 1 cm) che per la loro natura si sciolgono facilmente nel bagno, tendono a sostituire il nichel « F » a causa del minor costo.

Si riporta l'esposizione delle principali caratteristiche delle ferroleghie e della loro fabbricazione.

#### Ferro-silicio

Il silicio è uno degli elementi più abbondanti in natura, dove si trova sotto forma di ossidi o di silicati.

I composti del silicio entrano a far parte di un grandissimo numero di minerali e di argille. Il biossido di silicio o silice si può trovare sotto una forma caratterizzata da purezza piuttosto elevata ed è presente nel quarzo, nelle quarziti, nel calcedonio, nelle arenarie e nelle sabbie.

Tabella XVII - Punti di fusione di alcuni metalli puri e delle ferroleghie di più frequente impiego.

Metallo-ferrolegha	Composizione %	Punto di fusione K (°C)	Densità g/cm <sup>3</sup>
Alluminio	Al = 100	933 (660)	2,7
Ferro-alluminio	Al = 35, Fe = 65, Al = 50, Fe = 50	1.503 ÷ 1.543 (1.230 ÷ 1.270)	5,1
Cromo	Cr = 100	2.148 (1.875)	7,2
Ferro-cromo	Cr = 64, Si = 1, C = 5, Fe = 30	1.613 ÷ 1.733 (1.340 ÷ 1.460)	7,2
Manganese	Mn = 100	1.517 (1.244)	7,43
Ferro-manganese	Mn = 78, Si = 1, C = 7, Fe = 14	1.333 ÷ 1.493 (1.060 ÷ 1.220)	7,3
Molibdeno	Mo = 100	2.883 (2.610)	10,2
Ferro-molibdeno	Mo = 60-70, Si = 0,5, Fe = 29-39	1.943 ÷ 1.983 (1.670 ÷ 1.710)	9,4
Nichel	Ni = 100	1.729 (1.456)	8,9
Ferro-nichel	Ni = 92, Si = 5, C = 1, Fe = 2	1.513 ÷ 1.553 (1.240 ÷ 1.280)	8,8
Ferro-niobio	Nb + Ta = 65, Al = 1,5, Si = 1,5, Fe = 32	1.783 ÷ 1.813 (1.510 ÷ 1.540)	8,3
Silicio	Si = 100	1.683 (1.410)	2,3
Ferro-silicio	Si = 45, Al = 1, Fe = 54	1.488 ÷ 1.573 (1.215 ÷ 1.300)	5,4
Ferro-silicio	Si = 75, Al = 1, Fe = 24	1.483 ÷ 1.588 (1.210 ÷ 1.315)	3,8
Ferro-silicio	Si = 90, Al = 1, Fe = 9	1.483 ÷ 1.653 (1.210 ÷ 1.380)	2,9
Ferro-titanio	Ti = 40, Al = 3, Fe = 57	1.608 ÷ 1.753 (1.335 ÷ 1.480)	5,9
Ferro-titanio	Ti = 70, Al = 4, Fe = 26	1.343 ÷ 1.408 (1.070 ÷ 1.135)	5,4
Ferro-tungsteno	W = 80, Fe = 20	1.923 ÷ 2.373 (1.650 ÷ 2.100)	15,4
Ferro-vanadio	V = 80, Al = 1,5, Si = 1, Fe = 37,5	1.968 ÷ 2.043 (1.695 ÷ 1.770)	6,4
Siliciuro di calcio	Ca = 30-35, Si = 60-65	1.253 ÷ 1.473 (980 ÷ 1.200)	2,3
Nichel F	Ni = 90-92, Si = 6	1.533 (1.260)	—

Dal punto di vista della produzione di ferro-silicio, la scelta della materia prima apportatrice di silicio è soggetta a tutta una serie di considerazioni che restringono il campo possibile al quarzo ed alle quarziti. Agli inizi il ferro-silicio fu prodotto all'altoforno, con contenuti di silicio che arrivavano però ad un massimo del  $18 \div 20\%$ . Solo successivamente fu possibile la produzione di ferro-silicio a titolo medio ed elevato, fino a giungere al silicio metallico, con l'introduzione del forno elettrico.

In entrambi i casi il processo di riduzione degli ossidi richiede che questi ultimi siano caratterizzati da particolari requisiti chimico-fisici: le impurità devono essere molto basse per non ritrovare nel prodotto finale elementi indesiderati; il comportamento alle alte temperature cui avviene il processo e la conducibilità elettrica devono essere entro una fascia ristretta di valori; le pezzature devono essere ben controllate, con esclusioni di sabbie e frazioni sottili. Sono tutti fattori che, come sopra accennato, limitano notevolmente la scelta non solo per quanto riguarda l'apportatore di silicio, ma anche per i riducenti, quali fossile, coke, legna, ecc., costringendo ad una loro rigorosa selezione.

Non bisogna dimenticare, inoltre, che il ferro-silicio è una ferrolega per la cui produzione i consumi di energia sono particolarmente elevati: come accennato, essi sono funzione del contenuto di silicio e possono variare da circa 5.500 kWh/t nel caso del Fe-Si  $45 \div 50\%$ , a circa 9.000 kWh/t per il Fe-Si  $75 \div 80\%$ , fino a circa 13.000 kWh/t nel caso del silicio commercialmente definito metallico.

Il punto di fusione varia tra  $1.488 \div 1.573$  K ( $1215 \div 1.300$  °C) per il Fe-Si  $45 \div 50\%$  e tra  $1.483 \div 1.588$  K ( $1.210 \div 1.315$  °C) per il Fe-Si  $75 \div 80\%$ ; il peso specifico è circa  $5,1$  kg/dm<sup>3</sup> per il Fe-Si  $45 \div 50\%$  e circa  $3$  kg/dm<sup>3</sup> per il Fe-Si  $75 \div 80\%$ .

Un particolare accenno può essere fatto a proposito del comportamento del ferro-silicio per taluni suoi contenuti di silicio, durante l'immagazzinamento. Si è infatti sperimentato che il ferro-silicio conservato per lunghi periodi, ma soprattutto se esposto all'umidità, aveva tendenza a disgregarsi, con emissioni, anche se in piccole quantità, di gas venefici. In particolare questo fenomeno era tipico delle leghe contenenti dal  $30\%$  al  $40\%$  Si e di quelle contenenti dal  $50\%$  al  $60\%$  Si.

Questo fenomeno è stato quello che ha condizionato la scelta delle gradazioni commerciali del ferro-silicio, nei tipi  $20 \div 25\%$ ,  $45 \div 50\%$  e  $75 \div 80\%$  Si.

La disgregazione si può talvolta verificare nel caso del Fe-Si  $45 \div 50\%$ , in dipendenza di fattori piuttosto complessi e molteplici, fra i quali sembra essere fondamentale il contenuto di alluminio in relazione al rapporto fra contenuto di silicio e di ferro ed in presenza di umidità.

La conservazione in ambiente asciutto, sempre raccomandabile per tutte le ferroleghe, dovrebbe rallentare enormemente, per non dire eliminare, il fenomeno.

La disgregazione è, invece, praticamente assente nel ferro-silicio con titolo più elevato.

Nell'ambito della produzione del ferro-silicio si può fare rientrare la produzione di ferro-silicio-magnesio, prodotto a partire appunto da ferro-silicio. Questa ferrolega ternaria si trova in commercio con specifiche che possono variare in campi abbastanza ampi soprattutto per quanto riguarda il contenuto di magnesio, di calcio e di terre rare e, quindi, di cerio.

Il procedimento di fabbricazione è basato essenzialmente sull'aggiunta del magnesio, del calcio, delle terre rare, ecc. al ferro-silicio allo stato liquido, in modo da ottenere la composizione desiderata.

Purtroppo gli elementi menzionati non sono certamente fra i più agevoli da manipolare ed i procedimenti da seguire sono piuttosto delicati e richiedono un controllo ed una attenzione costante, oltre che particolari accorgimenti. Uno di questi può essere, ad esempio, il controllo dello spessore dei pani di Fe-Si-Mg, che deve essere tale, in genere ridotto, da impedire segregazioni del magnesio durante la solidificazione e garantirne una distribuzione omogenea.

### Ferro-silicio-zirconio

Lo zirconio è presente nella crosta terrestre in quantità abbastanza elevata, superiore ad esempio a quella di altri metalli come nichel, zinco, rame; tuttavia è considerato un metallo raro, per il suo elevato grado di dispersione e le difficoltà di estrazione dai suoi minerali.

I minerali di importanza commerciale sono lo zircon (ZrO<sub>2</sub> - SiO<sub>2</sub>), la baddeleite (ZrO<sub>2</sub>) e l'eudialite, silico-zirconato complesso di sodio, potassio e ferro.

Per quanto riguarda la produzione di leghe di zirconio, è interessante osservare che l'ossido di zirconio non può essere ridotto con carbonio, in aria, in quanto si avrebbe la formazione preferenziale di carburi e di nitruri di zirconio. Questo comportamento è, tuttavia, fortemente condizionato dalla presenza di silicio che limita, per non dire impedisce, la formazione dei composti sopra accennati. È proprio su questo fatto che si basa la produzione di ferroleghe, partendo da una carica di minerale concentrato di zirconio, di quarzo e di coke. Va, tuttavia, sottolineato che la facilità, con cui tendono a formarsi i carburi, rende la condotta del forno particolarmente delicata e difficile.

Procedimenti di tipo discontinuo impiegano come riducenti materiali di diverse caratteristiche. Possono essere utilizzati, ad esempio, ferro-silicio e carbone di legna, insieme ad una certa quantità di calce come fluidificante della scoria. La carica è macinata, accuratamente mescolata e quindi portata a fusione in un forno elettrico ad arco, dove hanno luogo le diverse reazioni.

La produzione di ferro-silicio-zirconio può anche essere effettuata per riduzione degli ossidi con alluminio o silicio, tuttavia le condizioni termodinamiche sfavorevoli al procedere delle reazioni richiedono la somministrazione di una certa quantità di calore effettuabile attraverso l'impiego di un forno elettrico.

Il ferro-silicio-zirconio contiene di solito il  $35 \div 40\%$  Zr e  $40 \div 50\%$  Si, con una temperatura di fusione variabile tra  $1.533$  e  $1.618$  K ( $1.260 \div 1.345$  °C).

### Ferro-manganese

Il manganese è un elemento relativamente abbondante, anche se ampiamente disperso in natura ed entra nella composizione di un grande numero di minerali, di cui però pochi sono di importanza commerciale. In questi minerali il manganese è presente in percentuali varianti dal  $42\%$  al  $55\%$  e soprattutto nella forma MnO<sub>2</sub>, che è l'ossido di manganese più stabile alle condizioni normali di pressione e temperatura.

I maggiori giacimenti di minerale di manganese si trovano in U.R.S.S., in India, in Brasile, nel Ghana e nella Repubblica del Sud Africa.

La produzione di ferro-manganese può essere effettuata all'altoforno — pratica seguita soprattutto in Francia e nella Repubblica Federale Tedesca — oppure al forno elettrico per ferroleghie.

L'altoforno è del tipo classico, del tutto simile a quello per la produzione di ghisa, così come il forno elettrico è nella sua configurazione analogo al tipo già descritto. In entrambi la riduzione avviene per mezzo di carbone, in particolare coke.

Il ferro-manganese è prodotto secondo diverse specifiche ed è commercializzato suddividendo le diverse qualità in relazione essenzialmente al contenuto di carbonio.

Si hanno così il Fe-Mn standard con 75 ÷ 80% Mn e 5 ÷ 7% C ed il Fe-Mn affinato con 80 ÷ 85% Mn e 0,5-1-1,5% C max.

Il consumo di energia elettrica per tonnellata di ferro-manganese si aggira intorno a 3.500 ÷ 4.000 kWh, mentre per il ferro-manganese affinato è intorno a 500 kWh. Questi valori possono comunque variare entro limiti relativamente ampi.

#### Ferro-cromo

Il ferro-cromo è una lega ottenuta riducendo a mezzo del carbone gli ossidi di cromo e di ferro contenuti nella cromite. È prodotto al forno elettrico per ferroleghie.

In genere il ferro-cromo prodotto al forno contiene una certa quantità di carbonio, data la grande affinità del cromo con il carbonio a dare carburi. Regolando opportunamente la composizione della miscela, la marcia del forno e la composizione della carica, si può variare il contenuto di carbonio nella lega entro valori abbastanza ampi.

I procedimenti per ottenere il ferro-cromo affinato e superaffinato sono, invece, molto più complessi e coinvolgono diversi passaggi metallurgici.

Il ferro-cromo è presente sul mercato con diverse specifiche:

- Ferro-cromo-carburato: 60 ÷ 65% Cr, 4 ÷ 6% C
- Ferro-cromo *charge chrome*: 60 ÷ 55% Cr, 6 ÷ 8% C
- Ferro-cromo medio carbonio: 60 ÷ 65% Cr, 2 ÷ 4% C
- Ferro-cromo affinato: 60 ÷ 65% Cr, 1% C
- Ferro-cromo superaffinato: 60 ÷ 65% Cr, 0,10% C

Il tipo più usato nella fonderia di ghisa è la lega 60 ÷ 65% Cr carburato al 4 ÷ 6% perché a più basso punto di fusione.

#### Ferro-fosforo

Il fosforo si trova in natura soprattutto sotto forma di apatite e di fosforiti, costituite da fosfato tricalcico.

L'esame dei dati termodinamici permette di stabilire che il fosforo può essere ridotto, dal pentossido, dal silicio, dall'alluminio ed anche dal carbonio. La produzione di ferro-fosforo avviene, quindi, utilizzando riducenti carboniosi in altoforni o forni elettrici da ferroleghie.

I materiali di carica sono costituiti da apatiti o fosforiti, da ossidi di ferro o rottami di acciaio e da coke.

Nel forno elettrico si ottiene un prodotto con contenuto di fosforo più elevato che non nell'altoforno; il forno elettrico deve essere del tipo ermeticamente chiuso per evitare la fuga dei vapori di fosforo che si liberano dalla carica.

Il ferro-fosforo può anche essere ottenuto come sottoprodotto della produzione industriale del fosforo al forno elettrico.

Questa ferroleghia contiene in genere fino al 25% P, il cui contenuto è comunque una funzione del metodo impegnato per produrla. Il punto di fusione per la lega contenente il 24 ÷ 25% P è di circa 1.623 K (1.350 °C).

#### Ferro-titanio

Il titanio è uno dei più diffusi elementi in natura ed è associato a diversi minerali, anche se solo pochi di essi possono rivestire importanza industriale: principalmente il rutilo (TiO<sub>2</sub>), l'ilmenite (FeO · TiO<sub>2</sub>), titanite (CaO · SiO<sub>2</sub> · TiO<sub>2</sub>) e la perovskite (CaO · TiO<sub>2</sub>).

Il ferro-titanio può essere prodotto per riduzione degli ossidi contenuti nel minerale titanifero, in genere sotto forma di concentrato contenente non meno del 38% TiO<sub>2</sub>, attraverso il processo alluminotermico. Questo processo è praticamente il solo metodo applicato nell'industria per produrre ferro-titanio a partire da minerali.

Infatti la riduzione degli ossidi di titanio con carbone o con silicio, anche se termodinamicamente possibile, porta ad ottenere una ferroleghia con caratteristiche non desiderabili nella maggior parte delle sue applicazioni.

Nella riduzione con carbone si ha una inevitabile formazione di carburi di titanio, per cui la ferroleghia contiene in genere 20 ÷ 25% Ti con carbonio variante tra 6% e 8%, mentre effettuando la riduzione con silicio, si ha la formazione di silicio-titanio (30% Ti, 30% Si).

La riduzione alluminotermica del concentrato di minerale di titanio può essere effettuata con o senza l'ausilio di un forno ad arco, con elettrodi di grafite, del tipo impiegato per la produzione di acciaio.

Il sistema, che ha trovato la più vasta diffusione, è la riduzione alluminotermica degli ossidi di titanio senza l'impiego del forno elettrico.

Con i metodi sopra descritti si può produrre ferro-titanio con un contenuto di titanio variante tra il 20% ed il 50% ed un contenuto di carbonio inferiore a 0,20%.

Tipiche impurezze sono silicio ed alluminio, che in dipendenza dal contenuto di titanio possono raggiungere rispettivamente il 3% ed il 10%.

Le temperature di fusione del ferro-titanio, nel campo di composizione indicato, variano da circa 1.713 K (1.440 °C) del ferro-titanio al 20% Ti, a 1.803 K (1.530 °C) con il 30% Ti, a 1.573 K (1.300 °C) con il 50% Ti.

Accanto alla produzione primaria di ferro-titanio, bisogna menzionare la produzione di ferroleghia ottenuta ricuperando rottami, tranciate o torniture di leghe di titanio, derivanti dalla fabbricazione di parti destinate soprattutto all'industria chimica ed aeronautica.

Il ferro-titanio così prodotto, nella grande maggioranza dei casi, ha un contenuto di titanio intorno al 70% e per questa ragione è definito come eutettico. Questa ferroleghia è caratterizzata da un punto di fusione piuttosto basso, circa 1.373 K (1.100 °C) e da una densità di circa 5,5 kg/dm<sup>3</sup>.

La composizione, relativamente alla presenza di altri elementi, è funzione della composizione dei materiali di carica; in genere si può avere la presenza di alluminio fino ad un massimo del 4,5%, di vanadio fino ad un massimo del 3% e, talvolta, di stagno fino ad un massimo dell'1,5%. Lo zolfo ed il fosforo sono inferiori allo 0,03% ed il carbonio è inferiore allo 0,20%.

### Ferro-molibdeno

Il molibdeno si trova in natura principalmente sotto forma di molibdenite ( $\text{MoS}_2$ ), wulfenite ( $\text{PbMoO}_4$ ), e powellite ( $\text{CaMoO}_4$ ).

Di questi minerali il più abbondante è la molibdenite che costituisce la principale materia prima per la fabbricazione del molibdeno e delle sue leghe.

L'ossido di molibdeno è prodotto per arrostitimento della molibdenite concentrata, che contiene zolfo in misura del 32 ÷ 35%, in forni a suola multipla del tipo Herreshof. Il prodotto così ottenuto è poi ridotto per mezzo di carbone in forno elettrico o per via silicotermica.

La produzione silicotermica del ferro-molibdeno consiste nel mescolare intimamente l'ossido di molibdeno con il silicio, generalmente sotto forma di ferro-silicio, e nel fare avvenire la reazione in forni cilindrici, dove in tale reazione procede in modo piuttosto veloce.

Ai 2 materiali di base costituenti la carica è aggiunto anche alluminio, per aumentare l'effetto termico della reazione e quindi fluidificare maggiormente le scorie e permettere una migliore separazione del metallo dalle scorie stesse.

Allo stesso scopo in genere sono aggiunti calce, spatofluore ed ossidi di ferro in eccesso rispetto a quanto necessario, per ottenere la ferrolega di titolo desiderato.

Il ferro-molibdeno così prodotto ha di solito un contenuto di molibdeno variante tra il 60% e il 70%, il carbonio è inferiore allo 0,1%, il silicio raggiunge l'1,5% massimo.

Il peso specifico è circa 9,5 kg/dm<sup>3</sup> e la temperatura di fusione varia da 1.773 a 2.273 K (1.500 ÷ 2.000 °C), a seconda del contenuto di molibdeno.

### Ferro-tungsteno

Il tungsteno è un metallo contenuto in quantità piuttosto piccola nella crosta terrestre; si trova in minerali che sono principalmente sali di acido tungstico ed in concentrazioni sotto forma di triossido, varianti da 0,5% a 1,2%.

A causa della relativa povertà dei minerali naturali, questi devono essere spesso concentrati ripetutamente.

I principali minerali contenenti tungsteno sono la wolframite [(Fe, Mn)  $\text{WO}_4$ ], la ferberite ( $\text{FeWO}_4$ ) e la scheelite ( $\text{CaWO}_4$ ), dei quali la wolframite è di gran lunga la più importante.

La produzione di ferro-tungsteno può essere effettuata per riduzione del triossido da parte del carbone in forni elettrici, oppure per via silico-alluminotermica. La produzione di ferro-tungsteno per via silico-alluminotermica avviene con modalità simili a quelle illustrate per gli analoghi procedimenti per il ferro-molibdeno ed il ferrotitanio.

L'ossido di tungsteno ( $\text{WO}_3$ ) è ridotto dal silicio e dall'alluminio, presenti contemporaneamente nella carica.

Il ferro-tungsteno ha normalmente un contenuto di tungsteno variante tra 75% e 85%, con carbonio variante tra 0,1% e 1%. Il peso specifico della ferrolega in oggetto è circa 15,4 kg/dm<sup>3</sup> ed il suo punto di fusione è compreso tra 1.973 e 2.373 K (1.700 ÷ 2.100 °C), in dipendenza del contenuto di tungsteno.

### Ferro-vanadio

Il vanadio è presente in notevole quantità nella crosta terrestre, ma è sempre stato considerato un elemento piuttosto raro a causa della sua estrema dispersione in natura. A causa della sua elevata reattività chimica forma un grande numero di composti e non forma alcun minerale specifico, ma si trova in genere combinato con ossidi di altri metalli, soprattutto ferro.

Il vanadio è dunque presente nel minerale di ferro, nei minerali polimetallici di rame, piombo e zinco.

Una terza fonte di vanadio sono anche le ceneri di alcuni carboni fossili o di alcuni tipi di petrolio, che possono contenere fino al 25% di vanadio.

Minerali contenenti vanadio sono la vanadite [ $\text{Pb}_5(\text{VO}_4)\text{Cl}$ ], la carnotite [ $\text{K}_2(\text{UO}_2\text{VO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ].

In genere i minerali contenenti vanadio sono sottoposti ad un arricchimento, seguito poi da un trattamento chimico per eliminare le impurezze indesiderate. Tali trattamenti sono di diversa natura a seconda della forma sotto cui si trova il vanadio nel minerale.

Il ferro-vanadio può essere prodotto per elettrolitizzazione degli ossidi con carbone, per via alluminotermica o silicotermica.

Il ferro-vanadio prodotto al forno elettrico per riduzione con carbone degli ossidi è in genere caratterizzato da un contenuto di carbonio abbastanza elevato, fino all'8 ÷ 9%, dovuto alla facilità con cui il vanadio forma carburi. In genere questo tipo di ferro-vanadio è sottoposto ad un processo di decarburazione sotto scoria ossidante, ad alta temperatura. In questo modo il carbonio può essere ridotto al 2 ÷ 3%.

La produzione di ferro-vanadio per via alluminotermica è basata sulla riduzione del pentossido di vanadio da parte dell'alluminio che è in grado di ridurre anche gli ossidi di vanadio più stabili. Inoltre le condizioni di reazione sono ancora più favorevoli, grazie alla solubilità del vanadio nel ferro.

Il ferro-vanadio è disponibile con diversi contenuti di vanadio la cui percentuale può variare dal 40 ÷ 50% al 60%, fino ad arrivare all'80%. Normalmente l'alluminio è contenuto in percentuali inferiori al 2%, così come il silicio è contenuto in percentuali inferiori all'1,5%. Il carbonio è normalmente al di sotto dello 0,1%.

Il peso specifico del ferro-vanadio varia da 6,4 a 7,2 kg/dm<sup>3</sup>, al diminuire del contenuto in vanadio dall'80% al 45%.

La temperatura di fusione varia da 1.673 K (1.400 °C) per il 45% di vanadio a circa 1.973 K (1.700 °C) per l'80% di vanadio.

### *Ferroleghe inoculanti*

Le ferroleghe inoculanti sono aggiunte alla ghisa liquida poco prima della colata ed hanno la capacità di produrre nel getto variazioni notevoli della struttura

metallografica e delle caratteristiche meccaniche per effetto della variazione del numero delle celle eutettiche.

Sono ferroleghie generalmente ad alto contenuto di silicio perché sono ottenute dal ferro-silicio al 45 ÷ 50% oppure al 75 ÷ 80% per aggiunta di elementi qualificanti.

Le aggiunte di queste ferroleghie, prodotte al forno elettrico, sono percentualmente modeste (circa 0,2 ÷ 1%) e la piccola modificazione dell'analisi chimica non può giustificare le notevoli variazioni delle proprietà finali della ghisa; tuttavia è da tener conto del rendimento in silicio il quale va ad aggiungersi al titolo del bagno. Nella tab. XVIII sono riportate le più comuni ferroleghie inoculanti con la relativa analisi tipica (il saldo a 100 è il ferro).

Per quanto riguarda l'azione dei vari elementi, la pratica e l'esecuzione dell'inoculazione si rimanda al Capitolo *Le inoculazioni* del Volume 1° della *Metallurgia delle ghise*.

Esse sono poste in commercio in granelle di varie dimensioni: 0-1, 1-3, 3-8, 8-15, 15-30 mm oppure in polvere compressa in piccole formelle dal peso determinato per l'inoculazione in staffa.

#### Siliciuro di calcio

Il siliciuro di calcio è stato una delle prime leghe inoculanti impiegate. La sua influenza è stata studiata soprattutto da Meehan il quale mise a punto il procedimento che da lui prende il nome, per l'utilizzazione di alte percentuali di rottame di acciaio nelle cariche del cubilotto.

Il siliciuro di calcio è prodotto nei forni elettrici per ferroleghie attraverso la riduzione contemporanea dell'os-

sido di silicio e della calce, utilizzando quale apportatore di calcio anche il carburo di calcio.

I materiali di carica consistono in quarzo, calce, carburo di calcio e carboni di diverso tipo ed origine fra i quali anche carbone di legna, peraltro costoso.

La condotta del forno durante la produzione di siliciuro di calcio è particolarmente delicata e richiede una sorveglianza continua e molto accurata delle condizioni operative in tutti i loro aspetti. In particolare le reazioni del forno sono rapidissime e molto sensibili a modifiche, anche piccole, dei parametri operativi.

Assume, perciò, una fondamentale importanza la composizione accurata della carica, talvolta resa difficile dalla natura stessa dei materiali che la compongono.

I consumi specifici di energia elettrica per la produzione di siliciuro di calcio si situano intorno a 13.000 kWh/t.

Il siliciuro di calcio può essere considerato un tipico esempio di uso improprio del termine ferroleghie: pur appartenendo a questo largo gruppo di materiali, in genere il contenuto di ferro varia dal 4 al 7%.

Il siliciuro di calcio è prodotto in 2 tipi fondamentali: il tipo con 60 ÷ 65% Si e 30 ÷ 35% Ca e quello con 65 ÷ 75% Si e 20 ÷ 25% Ca, con temperatura di fusione varianti nell'intervallo da 1.253 a 1.473 K (980 ÷ 1.200 °C).

#### Ferroleghie modificanti della grafite

Queste ferroleghie, introdotte in opportuna quantità nella ghisa liquida, provocano nei getti il passaggio della grafite da lamellare a sferoidale, da lamellare a vermiculare. Sono prodotte introducendo il magnesio e gli

Tabella XVIII - Leghe per inoculazione.

Denominazione commerciale	Composizione %									
	Si	Ca	Al	Mn	Zr	Sr	Ba	Mg	Ce	Ti
Ca-Si	60 ÷ 65	30 ÷ 33	1							
Si-Ca-Zr	50 ÷ 55	15 ÷ 20			15 ÷ 20					
ZL80N	~ 80	2,1	~ 1	1,5						
AFRO	~ 75	3	~ 0,7		1					
SMZ	60 ÷ 65	0,6 ÷ 1	0,75 ÷ 1,25	5 ÷ 7	5 ÷ 7		0,6 ÷ 0,9			
Fe-Si 75	75 ÷ 80	0,4 min.	1 max.							
Superseed	75	< 0,1	< 0,5			0,6 ÷ 1				
Inoculov 63	60 ÷ 65	1,5 ÷ 2	1 ÷ 1,5	9 ÷ 12			4 ÷ 6			
Grafidox	50	6	1							10
202	55 ÷ 60	0,5 ÷ 1	0,5 ÷ 1					1 ÷ 2	0,3 ÷ 0,5	
PIC	75 ÷ 80	0,4 min.	1 max.			tracce	tracce			
Si-Zr	47 ÷ 52 30 ÷ 35				35 ÷ 40 12 ÷ 15					
CSF 10	36 ÷ 40					Terre rare	12 ÷ 15		9 ÷ 11	
Lega VS	16	0,5		10			Cromo 42			0,55
Inobar	60 ÷ 65	1	1,20				9,11			
Inosil	75 ÷ 80	3 ÷ 5	1,3 ÷ 1,7							
Inocard	35 ÷ 40		< 0,50				5 ÷ 6			

altri elementi, che caratterizzano le varie leghe, nella ferrolega di base allo stato fuso. Questo può essere fatto in vari modi:

- Ponendo il magnesio sul fondo della siviera e ricoperto con tornitura di acciaio e lamiera.
- Preriscaldando i pani od il cilindro di magnesio ad una adeguata temperatura ed immergendolo molto rapidamente nel bagno della ferrolega base.
- Immettendo il magnesio sotto opportune coperture.

Le principali ferroleghe modificanti sono:

- Fe-Ni-Mg la cui analisi tipica è: Ni = 60 ÷ 65%; Mg = 15 ÷ 17%; Fe = 18 ÷ 25%; si trova anche con tenori di mischmetal<sup>(3)</sup> dall'1% al 3%. È la ferrolega a base di nichel più usata, in quanto alla notevole facilità d'impiego e sicurezza di ripetibilità dei risultati caratteristica delle leghe nichel-magnesio, associa una percentuale di ferro che sostituisce parzialmente il nichel, senza tuttavia alterare il rendimento in magnesio della lega.

<sup>(3)</sup> Il « mischmetal » è una lega, contenente circa il 50% di cerio, il 25% di lantanio, il 15% di neodimio, il 5% di praseodimio, ed altri metalli del gruppo delle terre rare, ottenuta dal trattamento delle sabbie monazitiche che contengono anche torio e uranio (n.d.r.).

- Fe-Si-Mg la cui analisi tipica è: Si = 50 ÷ 55%; Al = 0,5 ÷ 1%; Mg = 5 ÷ 10%; Ca = 0,5 ÷ 1%; Fe = 45 ÷ 47%. Fanno eccezione a questa composizione le leghe Fe-Si-Mg al 2 ÷ 3% Ca per le quali il calcio è aggiunto nella carica sotto forma di ferro-calcio.

Con uno dei metodi descritti nell'introduzione sono aggiunti magnesio, mischmetal, calcio e ferro in percentuali variabili facendo, però, in modo che la percentuale finale del silicio nella ferrolega sia intorno al 45 ÷ 48%.

Le leghe più usate sono quelle al 5 ÷ 6% e 9 ÷ 10% Mg; sono state praticamente abbandonate quelle con tenori superiori, in quanto la resa in magnesio risultava troppo bassa. Queste leghe sono in commercio con percentuali variabili di calcio, alluminio, mischmetal al fine di soddisfare le esigenze delle fonderie.

- Lega CG per la produzione della ghisa con grafite vermiculare. Questa lega ha la seguente composizione: Mg = 4 ÷ 5%, Ti = 8,5 ÷ 10,5%, Ce = 0,20 ÷ 0,35%, Ca = 4 ÷ 5,5%, Al = 1 ÷ 1,5%, Si = 48 ÷ 52%, il resto è ferro.

La spiegazione del fenomeno della trasformazione della grafite, la quantità e le modalità dell'impiego di queste leghe saranno trattate nel Volume 3° della *Metallurgia delle ghise*.

**Volume II: Ghise grigie**

**Capitolo III**

## **La fusione della ghisa**

- INTRODUZIONE
- PREMESSA GENERALE AL CAPITOLO
- CUBILOTTO
- FORNI AD INDUZIONE
- FORNI AD ARCO
- FORNI FUSORI D'ALTRO TIPO
- SCELTA DEL FORNO FUSORIO
- BIBLIOGRAFIA

A cura di: Erminio Astori  
Antonio Calabrò  
Elio Calamari  
Carlo Dalmazio  
Pio Fumagalli  
Giovanni Riccio  
Valentino Riva  
Alfonso Vercelli  
Giulio Zanotti



## INTRODUZIONE

I forni, che si adoperano per la fusione della ghisa grigia, sono in ordine di importanza:

- Cubilotto.
- Forno elettrico (ad induzione e ad arco).
- Altri forni.

In Italia la ripartizione della fusione risulta all'incirca come segue sul totale della ghisa fusa:

- Cubilotti: 70%.
- Forni elettrici ad induzione: 20%.
- Forni elettrici ad arco: 8%.
- Altri forni: 2%.

La composizione della ghisa liquida ottenuta è determinata dai materiali di carica impiegati, dalla condotta dei mezzi fusori e dalle elaborazioni derivanti da opportune aggiunte che sono effettuate allo scopo di realizzare le condizioni metallurgiche prescritte.

In particolare per la ghisa grigia, in funzione di una determinata carica solida e di una determinata composizione chimica finale prescritta, l'operazione di fusione influenza l'andamento della solidificazione, la forma e la distribuzione delle lamelle di grafite e gli effetti dell'eventuale inoculazione.

Questi effetti sono collegati con il livello di ossidazione, con il contenuto di gas e con i cicli temperatura-tempo della ghisa liquida, che sono differenti da forno a forno.

Questo è uno dei motivi per il quale talvolta sono impiegati 2 forni in *duplex*, in cui il primo funziona come fusorio e l'altro come regolatore, per ottenere le migliori caratteristiche di entrambi.

Per esempio, un cubilotto può essere accoppiato con un forno ad induzione: il primo per la sua caratteristica di fondere velocemente in modo continuo ed il secondo per mantenere o surriscaldare il metallo, consentendo anche di fare opportune aggiunte nel bagno.

La scelta di un impianto fusorio per la ghisa grigia dipende da diversi fattori tecnici ed economici che sono strettamente legati ai costi di installazione e di esercizio, anche in funzione della disponibilità dei materiali di carica e delle fonti energetiche (tab. XIX).

Non esistono a questo proposito regole semplici ed ogni soluzione deve essere studiata e valutata singolarmente. Di questo si parlerà più dettagliatamente in seguito.

Tabella XIX - Confronto fra alcuni mezzi fusori per ghisa grigia.

Caratteristiche	Cubilotto		Forno ad induzione a crogiolo	Forno ad arco
	convenzionale a vento freddo	a vento caldo senza rivestimento		
Tipo di operazione . . . . .	continuo	continuo	continuo od intermittente	intermittente
Forma . . . . .	cilindro	cilindro	tazza	coppa
Sorgente di energia . . . . .	coke	coke e gas	elettricità	elettricità
Rendimento termico di fusione, %	60 ÷ 70	50 ÷ 60	70	80
Rendimento termico di surriscaldamento, % . . . . .	5	5	70	20 ÷ 30
Refrattario . . . . .	acido	carbonioso	acido	acido o basico
Scoria . . . . .	acida	acida o basica	acida	acida o basica
Controllo della composizione chimica . . . . .	discreto	buono	eccellente	eccellente
Avancrogiolo o mescolatore . . . . .	necessario	necessario	non necessario	necessario
Emissioni m <sup>3</sup> /t . . . . .	1.400	1.120	30	840
Livello di rumorosità, dB . . . . .	80	80	70	> 90

Nota: In Europa — particolarmente in Germania, Inghilterra e Francia — sta riprendendo piede il vecchio forno rotativo a tamburo anche per notevoli capacità di produzione oraria. Esso è alimentato indifferentemente con polverino di carbone, nafta o metano ed aria preriscaldata; può riuscire interessante per piccole e medie fonderie per la sua versatilità produttiva e per l'impiego di combustibili di larga disponibilità.

## PREMESSA GENERALE AL CAPITOLO

I forni fusori sono qui considerati dal punto di vista operativo-metallurgico; per i dettagli costruttivi e di fun-

zionamento di carattere generale si rimanda al volume *I forni fusori nella fonderia di ghisa*.

## CUBILOTTO

### INTRODUZIONE

Il cubilotto, forno a tino con una eccellente capacità di scambio termico tra i prodotti della combustione ed i materiali di carica, è ancora oggi il principale forno fusorio per la ghisa grigia, dal tipo normale al tipo ad alta resistenza. Accoppiato con altri forni (elettrici, a gas, ecc.), può rendere utilissimi servizi anche nel campo delle ghise speciali.

Nato in tempi moderni alla fine del XVIII secolo, dopo pochi decenni aveva già assunto una grande importanza nella fonderia di ghisa.

Innumerevoli sono state le proposte di miglioramento e di modifica, ma il cubilotto ha conservato fino ad oggi la sua fisionomia fondamentale originaria sia per quanto si riferisce alla sua costruzione che al suo funzionamento.

### CUBILOTTO CONVENZIONALE

Il cubilotto è un forno verticale del tipo *a tino*, nel quale i materiali da fondere sono caricati dall'alto, alternati opportunamente con il coke e con i fondenti. La combustione, attivata dal vento (una corrente d'aria insufflata dal basso e che attraversa il forno salendo verso l'alto), fa sì che il materiale scenda ed incontri zone di temperature diverse. In queste zone, come si dirà più avanti, avvengono vari fenomeni che conducono alla produzione, nella zona inferiore del forno, di un flusso di ghisa liquida e di scoria. Il cubilotto è, quindi, un forno fusorio di tipo continuo.

La sua costruzione è semplice e relativamente poco costosa e la sua condotta facile e regolare.

Il cubilotto è costituito da una carcassa cilindrica in lamiera di acciaio, rivestita internamente da materiale refrattario generalmente acido sotto forma di mattoni o di pigiate.

L'insieme della carcassa e del rivestimento refrattario poggia su una base di spessa lamiera sostenuta da colonne.

Il fondo è costituito da una portella con 1 o 2 battenti sulla quale è costruita la suola, con pendenza inclinata verso il foro di spillatura.

Lateralmente od anteriormente si ricava la porta di accensione e di pulizia.

Nella parte alta del forno, prima del camino, si trova un'apertura di caricamento, bocca di carica, con una plancia per l'esecuzione di detta operazione. Il camino deve

essere di un'altezza tale da assicurare il tiraggio naturale ed evitare uscite di fiamma o di gas dalla bocca di carica.

Il vento a temperatura ambiente proveniente dalla soffiante passa attraverso la cassa a vento di forma anulare ed entra nel forno mediante ugelli di lamiera saldata o di ghisa ed in casi particolari di rame. In corrispondenza di questi nella carcassa metallica sono ricavate aperture per manovre di pulizia e per il controllo visivo della fusione.

Un po' sotto il piano degli ugelli (15 ÷ 20 cm) è praticato il foro delle scorie che sbocca in un piccolo canale esterno. Sul fondo, a livello della suola, è sistemato il foro di spillatura in comunicazione esterna con un canale di colata in lamiera rivestito da refrattario.

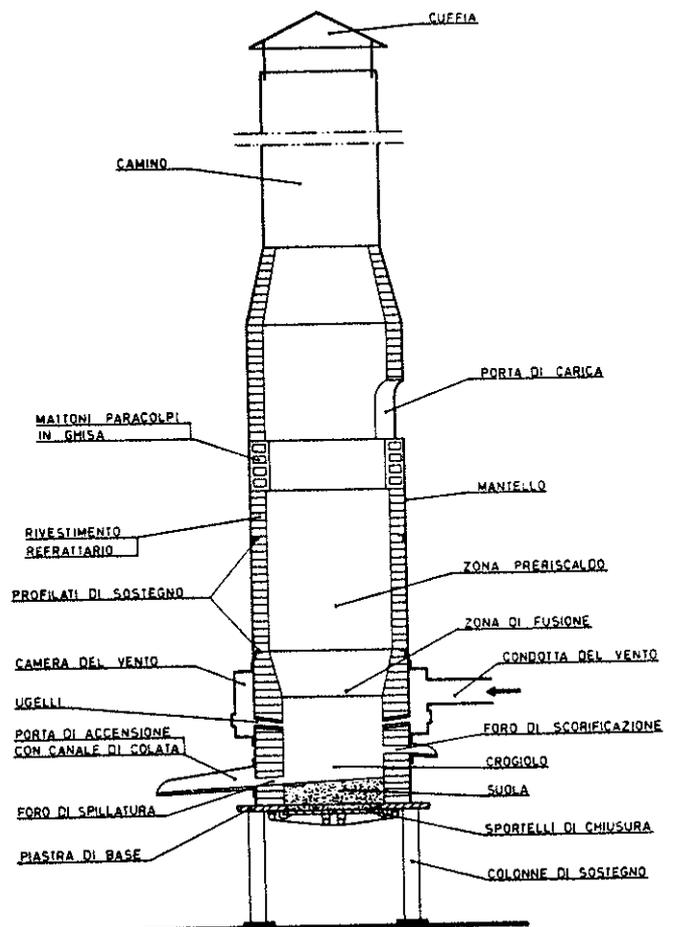


Fig. 11 - Schema di un cubilotto tradizionale.

Tabella XX - Caratteristiche numeriche del cubilotto.

Diametro interno reale D (1) m	Sezione del cubilotto m <sup>2</sup> (1)	Produzione in t/h con rapporto Fe/coke (senza dote) (1)				Peso cariche coke kg (1)	Altezza della dote di coke sopra gli ugelli cm (1)	Peso di calcare kg (2)	kg (2) Peso cariche metalliche per coke			Produzione oraria optimum P = 61P <sup>2</sup> t (1)	Volume d'aria per ottenere P (m <sup>3</sup> /sec) (1)	Pressione normale altezza mm Hg (1)
		6,7 15%	7,7 13%	9,1 11%	11,1 9%				% 10 ÷ 12	% 12 ÷ 14	% 14 ÷ 16			
0,500	0,196	0,97	1,12	1,35	1,70	20	78 ÷ 93	6 ÷ 7	180	150	130	1,5	0,4 ÷ 0,6	370
0,600	0,283	1,33	1,58	1,92	2,40	30	92 ÷ 107	9 ÷ 10	270	220	200	2,2	0,6 ÷ 0,8	530
0,700	0,385	2,00	2,30	2,70	3,20	40	93 ÷ 108	12 ÷ 14	360	300	280	2,9	0,8 ÷ 1,1	530
0,800	0,503	2,70	3,10	3,60	4,30	60	100 ÷ 115	18 ÷ 20	560	460	400	3,8	1,0 ÷ 1,5	610
0,900	0,636	3,40	3,80	4,50	5,50	70	101 ÷ 116	20 ÷ 25	660	540	480	4,9	1,3 ÷ 1,9	610
1,000	0,785	4,40	5,20	6,20	7,50	90	105 ÷ 120	25 ÷ 30	840	700	600	6,0	1,6 ÷ 2,3	700
1,100	0,950	5,00	5,80	7,00	8,60	110	106 ÷ 121	30 ÷ 35	1.000	850	750	7,2	1,9 ÷ 2,7	700
1,200	1,130	6,00	6,80	8,00	9,80	130	112 ÷ 127	40 ÷ 45	1.200	1.000	900	8,6	2,2 ÷ 3,2	760
1,300	1,320	6,60	7,60	9,50	11,60	150	114 ÷ 129	45 ÷ 50	1.400	1.200	1.000	10,0	2,6 ÷ 4,0	790
1,400	1,530	7,30	8,60	11,10	13,50	180	114 ÷ 129	55 ÷ 60	1.700	1.400	1.200	11,8	3,1 ÷ 4,6	790
1,500	1,760	8,40	10,50	12,70	15,50	210	114 ÷ 129	65 ÷ 70	1.900	1.600	1.400	13,5	3,9 ÷ 5,4	790
1,600	2,010	10,20	12,20	14,20	17,40	240	114 ÷ 129	75 ÷ 80	2.200	1.800	1.600	15,3	4,3 ÷ 5,9	790

(1) D è misurato prima della fusione, a 20 cm sotto gli ugelli.

(2) Dati ricavati dalla tabella di « Guida pratica per la condotta dei cubilotti », Edizioni 1948, pag. 23.

(3) Dati ricavati dalla tabella n. 24.1, pag. 202 di « The cupola and its operations ».

(4) Volume calcolato in funzione di 9 ÷ 9,5 m<sup>3</sup> d'aria per kg di coke e tenendo conto delle fughe tra il ventilatore e gli ugelli. Queste cifre non sono, quindi, assolute e devono essere adattate ad ogni impianto.

Nel cubilotto si distinguono 5 zone la cui estensione, peraltro, non è perfettamente definita (fig. 11):

- Zona di materiali solidi (carica).
- Zona di fusione.
- Zona di surriscaldamento.
- Zona degli ugelli.
- Zona del crogiolo.

Per le dimensioni principali del cubilotto è determinante la produzione oraria di ghisa liquida richiesta, la quale dipende principalmente dal diametro interno del forno sul piano degli ugelli (tab. XX).

Ben condotto, il cubilotto fornisce fino a 90 kg/h (superando la vecchia formula  $P = 60 D^2$ ) di ghisa liquida per ogni decimetro quadrato di sezione interna.

L'altezza del crogiolo dipenderà dalla quantità di ghisa richiesta per ogni spillata. Sotto il piano degli ugelli dovrà esserci sufficiente spazio per la ghisa da raccogliere per la spillata e relativa scoria.

100 kg di ghisa liquida ed il 5% di scoria occupano uno spazio di  $14 + 2,5 = 16,5 \text{ dm}^3$  e, poiché il crogiolo è occupato per circa la metà dal coke, richiedono un'altezza di

$$\frac{16,5 \times 2}{Q} = \frac{33}{Q} \text{ dm}$$

in cui Q è la sezione del crogiolo in decimetri quadrati.

Normalmente l'altezza degli ugelli rispetto alla suola in cubilotti con diametro 600 ÷ 700 mm è di circa 500 mm, in cubilotti con diametro 700 ÷ 900 mm è di circa 620 mm ed in cubilotti con diametro 1.200 mm è di circa 820 mm.

Al di sopra del piano degli ugelli si ha la combustione e più in alto la zona di surriscaldamento e la zona di fusione.

Più sopra ancora le cariche sono preriscaldate dai gas di combustione.

L'altezza del tino deve essere tale che i gas di combustione abbiano tempo sufficiente per raffreddarsi prima di arrivare al camino. Soltanto se si verifica questa condizione, il calore prodotto è convenientemente utilizzato.

Quanto più grande è il diametro del forno, tanto maggiore deve essere la pressione del vento, perché questo possa penetrare fino al centro del forno. E quanto maggiore è la pressione del vento, tanto maggiore è la velocità del gas e, quindi, maggiore dovrà essere l'altezza del tino per consentire lo scambio di calore dei gas caldi alle cariche in discesa.

Gli ugelli sono disposti in modo da distribuire uniformemente il vento sul piano orizzontale e le loro dimensioni devono consentire al vento di raggiungere l'interno del cubilotto: generalmente il rapporto sezione ugelli/sezione interna del forno varia da 1/6 a 1/4.

Il rivestimento del cubilotto è generalmente acido, costituito da mattoni o pigiata. Il profilo interno deve facilitare la discesa delle cariche.

La portata del vento, introdotta nel cubilotto a mezzo di soffianti, ha un'importanza decisiva sull'andamento della combustione e, quindi, sul consumo di coke e sulla temperatura e qualità della ghisa (1).

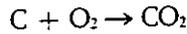
(1) Per raggiungere risultati particolari riguardanti il lato qualitativo ed economico della produzione della ghisa liquida, sono state adottate alcune varianti, come rivestimento basico, vento caldo, doppio ordine degli ugelli, vento arricchito di O<sub>2</sub>, ecc. di cui si parlerà più avanti.

## LA COMBUSTIONE

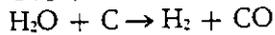
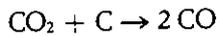
La combustione, qualunque sia la funzione del cubilotto, di rifusione o di trasformazione metallurgica più o meno complessa, è il punto principale da considerare.

Trascurando per un momento le cariche metalliche e pensando al cubilotto come un semplice generatore di gas (fig. 12), si possono distinguere due zone principali:

— Zona di combustione o di ossidazione caratterizzata dalla reazione:



— Zona di gassificazione o di riduzione con le reazioni:



Naturalmente queste zone non sono così nettamente delimitate come nello schema e possono avere una geografia diversa a secondo del percorso dei gas attraverso il coke.

In generale la reazione  $CO_2 + C \rightarrow 2CO$  è favorita da:

- Elevata temperatura.
- Forte spessore dello strato di coke attraversato da  $CO_2$ .
- Piccola pezzatura del coke.
- Scarsa quantità di aria (ossigeno).

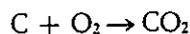
È interessante calcolare la quantità di aria occorrente per la combustione ed il volume dei gas di combustione (scarico) e per questo occorre partire dai singoli elementi che partecipano alla combustione.

Dal peso atomico degli elementi e dal volume della grammo-molecola si calcola l'ossigeno necessario per la combustione e da questo la quantità di aria.

Il volume di una grammo-molecola di gas è 22,412 l in condizioni normali <sup>(2)</sup>.

Si rileva che:

- Una grammo-molecola di carbonio (pari a 12 g) richiede per la combustione completa (a  $CO_2$ ) una grammo-molecola di ossigeno (pari a 32 g, corrispondenti a 22,412 l) e fornisce una grammo-molecola di  $CO_2$  (pari a 44 g, corrispondenti a 22,412 l):



pertanto 12 kg di carbonio richiedono 22,412 m<sup>3</sup> di ossigeno ovvero per 1 kg di carbonio sono richiesti

$$\frac{22,412}{12} = 1,86 \text{ m}^3 \text{ di ossigeno. La quantità di aria}$$

contenente 1,86 m<sup>3</sup> di ossigeno è 8,9 m<sup>3</sup> (essendo l'ossigeno presente nell'aria nella concentrazione del 20,96%). I gas di combustione di 1 kg di carbonio saranno in quantità pari alla somma della quantità prodotta di  $CO_2$  più la quantità di azoto presente nella quantità di aria consumata (nel caso di combustione completa) e cioè 8,9 m<sup>3</sup> (uguale alla quantità di aria richiesta).

- Una grammo-molecola di carbonio (pari a 12 g) richiede per la combustione incompleta (a CO) mezza molecola di ossigeno (pari a 16 g, corrispondenti a

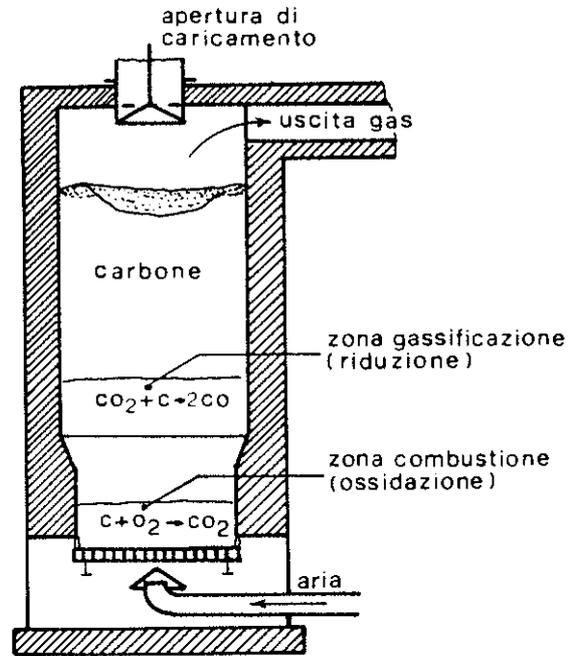
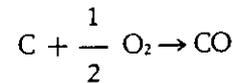


Fig. 12 - Schema di gassogeno.

11,2 l) e fornisce una grammo-molecola di CO (pari a 28 g, corrispondenti a 22,412 l):



pertanto 12 kg di carbonio richiedono 11,2 m<sup>3</sup> di ossigeno per la combustione incompleta, ovvero per

$$1 \text{ kg di carbonio sono richiesti } \frac{11,2}{12} = 0,92 \text{ m}^3$$

di ossigeno. Questi sono contenuti in 4,4 m<sup>3</sup> di aria. La combustione incompleta di 1 kg di carbonio (a

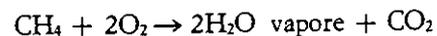
$$CO) \text{ fornisce quindi } \frac{22,412}{12} = 1,86 \text{ m}^3 \text{ di CO}$$

ed il gas di combustione sarà 5,3 m<sup>3</sup> cioè in quantità pari alla somma della quantità di CO prodotto (1,86 m<sup>3</sup>) più la quantità di azoto presente nella quantità

$$\text{di aria consumata } \left( \frac{79,4}{100} \cdot 4,4 = 3,5 \text{ m}^3 \right). \text{ Per}$$

una combustione incompleta il volume di gas di combustione è maggiore del volume di aria entrato in reazione.

- Considerando il metano come combustibile principale al posto del carbonio, si ha che una grammo-molecola di  $CH_4$  (corrispondente a 22,412 l) nella combustione con 2 grammo-molecole di  $O_2$  (corrispondenti a 44,824 l) fornisce una grammo-molecola di  $CO_2$  (corrispondente a 22,412 l) e 2 grammo-molecole di  $H_2O$  vapore (corrispondenti a 44,824 l):



ossia 1 m<sup>3</sup> di  $CH_4$  richiede 2 m<sup>3</sup> di  $O_2$ , che sono contenuti in 9,5 m<sup>3</sup> di aria. I gas di combustione saranno quindi, per 1 m<sup>3</sup> di metano bruciato, in quantità di 10,5 m<sup>3</sup>, cioè pari alla somma delle quantità di  $H_2O$

<sup>(2)</sup> Anche tutte le misure di volume di gas che seguono sono date in condizioni normali di temperatura e di pressione.

vapore (2 m<sup>3</sup>), della CO<sub>2</sub> (1 m<sup>3</sup>) e del N<sub>2</sub> presente nell'aria entrata in reazione  $(9,5 \cdot \frac{79,04}{100} = 7,5 \text{ m}^3)$ .

Da quanto esposto si deduce che la quantità di aria occorrente per la combustione di 1 kg di carbonio dipende dal tipo di reazione di combustione che si verifica e, quindi, del tipo di gas di combustione che si forma.

Questa condizione è rappresentata con il cosiddetto rapporto di combustione che si scrive  $\eta_v = \frac{\text{CO}_2}{\text{CO}_2 + \text{CO}}$  dove le percentuali di CO<sub>2</sub> e CO sono quelle determinate mediante analisi dei gas di scarico. Il valore di questo rapporto, come si vedrà in seguito, è un parametro fondamentale per la marcia del cubilotto.

Per avere un valore abbastanza preciso dell'aria da soffiare ed una indicazione sulla soffiante da installare, occorre tenere conto, oltre che dell'aria di combustione determinata come sopra, anche delle perdite delle condutture che dalla soffiante portano alla cassa a vento ed agli ugelli, e dell'ossigeno consumato per l'ossidazione dei vari elementi, Fe, Si, Mn, ecc. (cali di fusione: 15 ÷ 20% circa).

Dall'ossigeno contenuto in CO<sub>2</sub> e CO dei gas di scarico si può ricavare l'aria di combustione su 100 parti in volume. Dal contenuto di ossigeno libero dei gas di scarico si ricava l'eccesso eventuale di aria soffiata; dall'azoto si ricava la quantità di aria totale.

La differenza tra aria totale e la somma dell'aria di combustione e dell'aria in eccesso fornisce l'aria di ossidazione (cali) su 100 parti in volume.

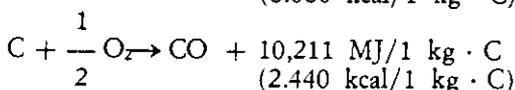
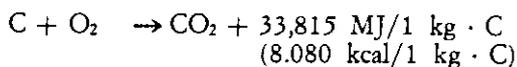
L'aria di ossidazione si può anche calcolare in base all'analisi chimica dei materiali introdotti in forno e dei prodotti ottenuti (ghisa, scoria).

A titolo di esempio si riporta:

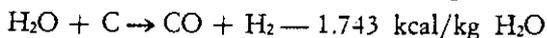
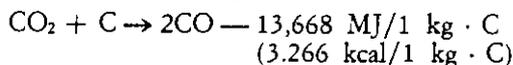
- Per 1 kg di Mn ossidato a MnO occorre 0,2 m<sup>3</sup> di O<sub>2</sub>.
- Per 1 kg di Si ossidato a SiO<sub>2</sub> occorre 0,78 m<sup>3</sup> di O<sub>2</sub>.
- Per 1 kg di Fe ossidato a FeO occorre 0,2 m<sup>3</sup> di O<sub>2</sub>.

In condizioni normali medie l'aria di ossidazione è il 5% dell'aria di combustione.

Il calore necessario per le diverse trasformazioni che avvengono nel cubilotto è fornito, come si è già visto, dalle reazioni:



Reazioni endotermiche hanno luogo al di sopra della zona di combustione e tra queste si citano:



Come risultato, da tali sviluppi ed assorbimenti di calore, si hanno temperature nei diversi punti e momenti sulle quali è interessante soffermarsi.

La temperatura di combustione di una sostanza si calcola in base al calore di combustione, alla quantità di gas di combustione per unità di peso ed in base ai calori specifici dei gas di combustione.

Si indichi con W le calorie sviluppate da 1 kg di combustibile, con V il volume dei gas di combustione che si formano per 1 kg di combustibile e con S il calore specifico dei gas di combustione.

Si ha l'espressione

$$W = V \cdot S \cdot T$$

dove T = temperatura di combustione e si ricava

$$T = \frac{W}{V \cdot S}$$

Questa formula dice che la temperatura è indipendente dalla quantità di combustibile, aumenta con l'aumentare del calore sviluppato da 1 kg di combustibile e diminuisce con l'aumentare della quantità di gas di combustione.

Per fare questo calcolo occorrono quindi, oltre al calore di combustione e la quantità di gas di combustione, i calori specifici dei gas, i quali dipendono anche dalla temperatura. Cioè:

$$T = \frac{W}{\text{CO}_2 \cdot S_1 + \text{CO} \cdot S_2 + \text{H}_2 \cdot S_3 + \text{O}_2 \cdot S_4 + \text{N}_2 \cdot S_5 + \text{H}_2\text{O} \cdot S_6}$$

dove:

- W = calorie per 1 kg di combustibile.
- CO<sub>2</sub>, CO = m<sup>3</sup> di gas per 1 kg di combustibile.
- S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> = calori specifici dei gas alla temperatura di combustione.

La temperatura del forno è in generale del 15 ÷ 20% inferiore a quella così calcolata.

La temperatura del forno deve essere naturalmente superiore al punto di fusione del metallo da fondere, in modo da consentire anche l'opportuno surriscaldamento.

Si faccia ora il caso del vento caldo applicato al cubilotto.

Nei calcoli sopracitati l'aria era considerata a 273 K (0 °C).

Un significativo guadagno di temperatura si ottiene con il preriscaldamento del vento.

Per esempio, 1 kg di carbonio brucia in CO con aria teorica 4,45 m<sup>3</sup> e sviluppa 10,211 MJ (2.440 kcal), producendo 5,38 m<sup>3</sup> di gas di combustione.

La temperatura di combustione si calcola come segue:

$$T = \frac{W}{V \cdot S} = \frac{2.440}{5,38 \cdot 0,33} = 1.647 \text{ K (1.374 °C)}$$

Se si scalda il vento a 773 K (500 °C) si portano nella zona di combustione 4,45 x 500 x 0,31 = 2,888 MJ (690 kcal).

$$\text{Sarà quindi } T = \frac{2.440 + 690}{5,38 \cdot 0,34} = 1.993 \text{ K (1.720 °C)}$$

Il numeratore è risultato così sensibilmente più alto, mentre al denominatore la quantità di gas rimane invariata e soltanto il calore specifico varia in relazione alla temperatura da 0,33 a 0,34.

L'aumento della temperatura è di 1.993 K - 1.647 K = 346 °C (1.720 °C - 1.374 °C = 346 °C) che rappresenta il 25% circa.

## LA LEGGE DEL CUBILOTTO

Nella fusione al cubilotto la carica metallica, il coke e le aggiunte varie sono introdotti in successione per cui i componenti metallici sono fusi e surriscaldati per azione del calore sviluppato dalla combustione del coke.

I gas di combustione si muovono in contro corrente dal basso in alto e trasmettono il calore alle cariche che discendono.

Per una marcia regolare del forno si deve cercare una buona miscelazione dei componenti nella carica e questa miscelazione è facilitata da una sufficiente altezza del forno, anche per cariche di peso rilevante.

In condizioni normali il peso della carica metallica deve essere 1/10 della produzione oraria.

Le variazioni degli elementi possono essere determinate in base alla quantità ed alla composizione dei materiali caricati e dei materiali ricavati dalla fusione facendo un bilancio.

Specialmente Jungbluth e collaboratori hanno cercato di studiare i processi in questo modo e di ricavare le relazioni fondamentali del processo di fusione nel tempo.

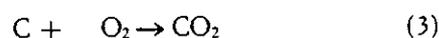
Poiché in prima approssimazione la velocità di combustione del coke è costante per una qualità costante (specialmente pezzatura e costituzione fisica e chimica), la quantità di ghisa prodotta nell'unità di tempo dipenderà da quanto coke deve essere bruciato per unità di peso di ghisa, dalla portata del vento che è necessaria per la combustione di 1 kg di coke e dalla portata del vento soffiato nel forno nell'unità di tempo.

Se si indica con S la produzione in t/h di ghisa liquida, con K la quantità di coke in kg per 100 kg di ghisa liquida, con k il tenore di C del coke, con W la portata del vento in m<sup>3</sup>/min e con L la portata del vento in m<sup>3</sup>/kg di C del coke, sarà:

$$S = \frac{60}{10} \cdot \frac{W}{100} \cdot \frac{K \cdot k \cdot L}{100} \text{ t/h} \quad (1)$$

Il numeratore rappresenta la portata del vento soffiata in 1 h ed il denominatore la portata del vento necessaria per 1 t di ghisa liquida.  $\frac{W}{100}$  rappresenta i kg di C richiesti da 100 kg di ghisa liquida.

Poiché il carbonio può bruciare secondo la reazione



nel primo caso occorrono 0,93 m<sup>3</sup> di ossigeno per 1 kg di C e nel secondo caso occorrono 1,86 m<sup>3</sup> di ossigeno per 1 kg di C; per bruciare il carbonio in CO occorrono 4,45 m<sup>3</sup> di aria e per bruciare il carbonio in CO<sub>2</sub> occorrono 8,9 m<sup>3</sup> di aria (il tenore di O<sub>2</sub> nell'aria è eguale a 21%).

In una kilomole di CO<sub>2</sub> ed in una kilomole di CO è contenuta la stessa quantità di C e precisamente 12 kg per cui in 1 m<sup>3</sup> di ciascuno di questi gas è contenuta la stessa quantità di C e cioè 0,536 kg.

In base all'analisi dei gas di scarico di un cubilotto che teoricamente marci senza aggiunta di calcare e senza cali di fusione relativi al ferro ed agli altri elementi, si può determinare la parte del carbonio del coke che brucia in CO e quella che brucia in CO<sub>2</sub> mediante il confronto dei tenori di CO e CO<sub>2</sub>.

Per esempio: il gas di scarico contiene CO<sub>2</sub> = 10% e CO = 18,2% per un totale del 28,2%.

$$\text{Sarà: } \frac{10}{28,2} = 0,355 \text{ parti di 1 kg di C bruciate in CO}_2;$$

$$\frac{18,2}{28,2} = 0,645 \text{ parti di 1 kg di C bruciate in CO.}$$

Se si indica la parte di 1 kg di C bruciata in CO<sub>2</sub> con  $\eta_v$  e la parte bruciata in CO con  $(100 - \frac{\eta_v}{100})$ ,

allora la portata del vento, che è necessaria in queste condizioni per la combustione di 1 kg di C, sarà:

$$L = \frac{2 \cdot 4,45 \cdot \eta_v + 4,45 \cdot 100 - 4,45 \eta_v}{100} = \frac{4,45 (2 \eta_v + 100 - \eta_v)}{100} = \frac{4,45 (\eta_v + 100)}{100} = 4,45 \frac{100 + \eta_v}{100} \text{ m}^3/\text{kg C} \quad (4)$$

Poiché, come detto sopra, 1 m<sup>3</sup> di CO<sub>2</sub> e 1 m<sup>3</sup> di CO contengono la stessa quantità di C e precisamente 0,536 kg, dall'analisi dei gas di scarico si può ricavare  $\eta_v$ .

$$\text{Sarà: } \eta_v = \frac{CO_2}{CO_2 + CO} \cdot 100 \quad (5)$$

Così la formula (1) diventa:

$$S = \frac{60}{10} \cdot \frac{W}{100} \cdot \frac{K \cdot k \cdot 4,45 \frac{100 + \eta_v}{100}}{100} \text{ t/h} \quad (6)$$

Questa formula, od equazione di Jungbluth, è stata ricavata per via matematica e per la sua conferma non richiede prove pratiche. Ma si deve vedere se qualche fattore è interdipendente.

La quantità di coke e le portate del vento sono indipendenti e non si influenzano a vicenda. Ma vi è una dipendenza tra coke di carica e rapporto di combustione, ed una dipendenza tra portata del vento e rapporto di combustione, il quale non è univoco, in quanto il coke di carica a sua volta esercita la sua influenza.

Il cubilotto deve essere considerato come un gasogeno in cui la CO<sub>2</sub> che si forma davanti agli ugelli, salendo si trasforma in CO secondo la reazione di Boudouard:



Da questo processo di riduzione ha origine il CO.

Questo processo peggiora il rendimento termico per il suo carattere endotermico e per il suo consumo di coke.

La riduzione della CO<sub>2</sub> e la conseguente formazione del CO e il valore di  $\eta_v$  dipendono da molti fattori.

Precisamente il rapporto di combustione dipende da:

- Andamento della temperatura all'interno del forno.
- Quantità di coke di carica e sua qualità.
- Durata del contatto tra le fasi che reagiscono.

A loro volta questi fattori dipendono dalla pezzatura del coke e sua resistenza meccanica, dalla portata del vento, dal preriscaldamento del vento, dall'aggiunta di carburo di calcio, dall'arricchimento del vento con ossigeno, dalla pezzatura della carica metallica, ecc.

Jungbluth e collaboratori hanno trovato una relazione

tra  $\frac{K \cdot k}{100}$  e  $\eta_v$  che è illustrata in fig. 13.

In base a questa relazione,  $\eta_v$  diminuisce con l'aumentare della quantità del coke di carica.

Il rapporto di combustione aumenta con l'aumentare della portata del vento, come da fig. 14.

Quanto sopra avviene perché la velocità dei gas nel forno risulta aumentata e risulta diminuito il tempo di contatto fra le fasi che reagiscono tra loro.

Questo effetto è tanto meno marcato quanto più è elevata la percentuale del coke di carica.

Poiché con l'aumento della portata del vento si ha un aumento della temperatura dei gas che agisce in senso contrario al  $\eta_v$ , si può verificare il caso in cui tutti e due gli effetti aumentano contemporaneamente.

Dall'equazione (6) risulta che tutti i fattori che, a parità di altre condizioni, abbassano il rapporto di combustione  $\eta_v$ , portano ad un aumento della produzione oraria.

Dall'altra parte si deve notare che le oscillazioni di  $\eta_v$  influiscono in maniera meno marcata sulla produzione oraria rispetto alle variazioni della portata del vento e del coke di carica, come si può anche dedurre dall'equazione (6).

L'equazione della produzione oraria si può rappresentare graficamente. Ma non si può avere un diagramma valido per tutti i cubilotti, poiché in esso entra  $\eta_v$  e questo fattore influisce sul diagramma stesso.

In fig. 15 è rappresentato il diagramma a raggi.

Questo diagramma ha soprattutto un valore didattico e mostra che, a parità di quantità di coke di carica o  $K \cdot k$

$\frac{K \cdot k}{100}$  o  $\eta_v$ , la produzione oraria è direttamente propor-

zionale alla portata del vento, ma che, a parità di portata del vento, la produzione oraria non è in tutto inversamente

proporzionale al coke di carica o  $\frac{K \cdot k}{100}$ , ma un poco

inferiore, in quanto con l'aumentare del coke di carica

aumenta  $\frac{K \cdot k}{100}$ , ma diminuisce  $\eta_v$ .

Si verifica cioè che l'aumento di produzione oraria, dovuta all'aumento della portata del vento, è attenuato dall'aumento di  $\eta_v$  e che la riduzione di produzione, dovuta all'aumento della percentuale di coke, è attenuata dalla conseguente diminuzione di  $\eta_v$ .

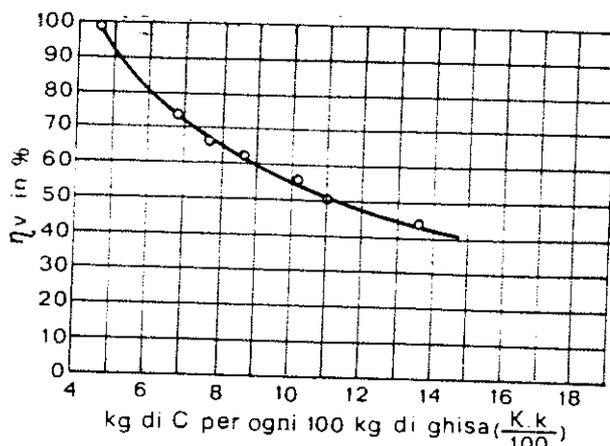


Fig. 13 - Relazione tra il rapporto di combustione  $\eta_v$  e  $\frac{K \cdot k}{100}$  nel cubilotto, secondo H. Jungbluth e collaboratori.

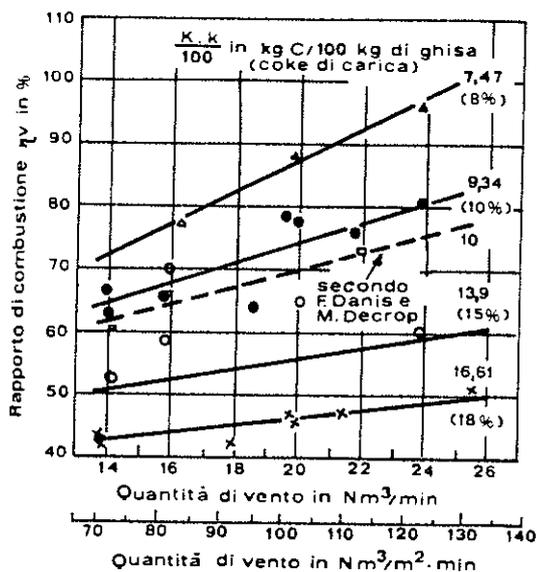


Fig. 14 - Relazione tra il rapporto di combustione e la portata del vento per differenti valori del coke di carica, secondo W. Patterson, F. Neumann, F. Danis e M. Decrop.

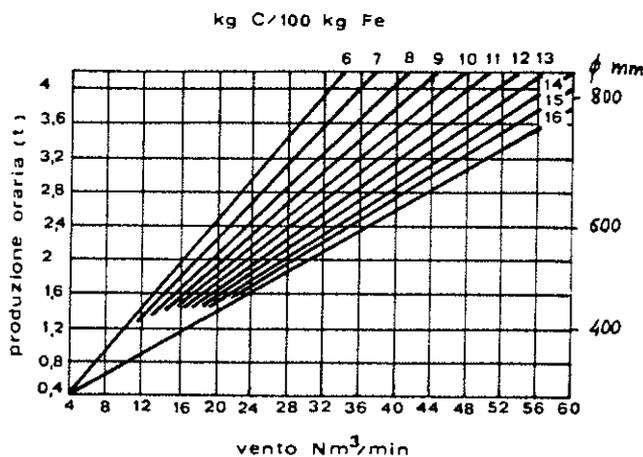


Fig. 15 - Diagramma «a raggi», secondo H. Jungbluth; per una data carica di coke ed un dato rapporto di combustione, la produzione oraria è direttamente proporzionale alla portata del vento.

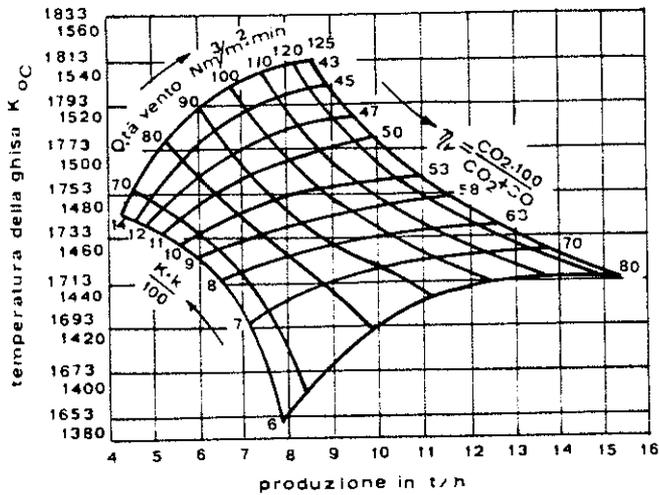


Fig. 16 - Diagramma « a rete » per la relazione tra temperatura della ghisa e produzione oraria, secondo H. Jungbluth e H. Korschan.

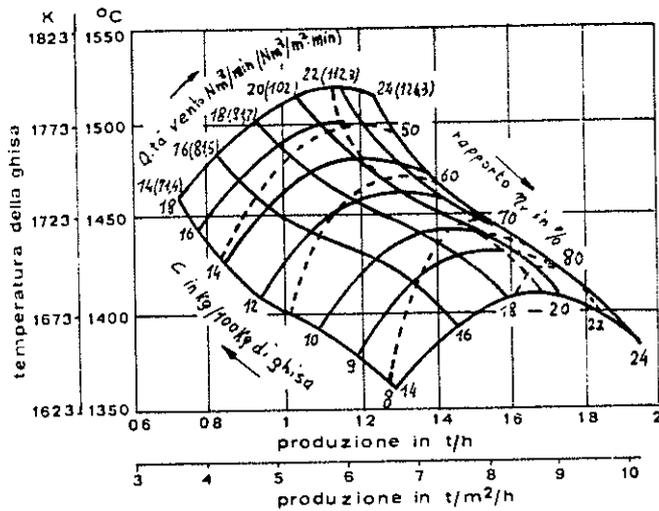


Fig. 17 - Diagramma « a rete », secondo W. Patterson e F. Neumann.

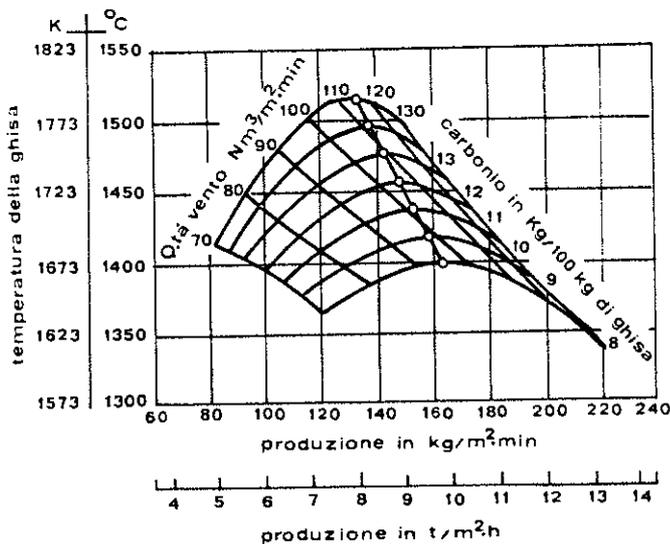


Fig. 18 - Diagramma « a rete », secondo W. Patterson, H. Siepman e H. Pacyna.

Jungbluth e Korschan hanno rappresentato i risultati dei loro studi nel diagramma *a rete* (fig. 16), nel quale compare l'importante parametro della temperatura della ghisa.

È interessante notare che questo avveniva negli anni immediatamente precedenti la seconda guerra mondiale.

Studi successivi di Patterson e Neumann hanno portato all'elaborazione del diagramma di fig. 17 ed altri studi di Patterson, Siempmann e Pacyna al diagramma di fig. 18.

La differenza fra questi diagrammi si può spiegare con il fatto che sono stati impiegati diversi tipi di strumenti per la misura delle temperature.

In ogni caso il diagramma *a rete* rimane il più valido mezzo per rappresentare il meccanismo di funzionamento del cubilotto.

Ad esempio, nel diagramma di fig. 18 le condizioni di lavoro più convenienti sono rappresentate dalla zona immediatamente a sinistra della linea che congiunge i punti di massima temperatura della ghisa liquida.

Se si considera ora un cubilotto di 0,5 m<sup>2</sup> di sezione (diametro 800 mm) per una produzione di 4,3 t/h pari a 8,6 t/m<sup>2</sup>/h di ghisa liquida alla temperatura di 1.743 ÷ 1.763 K (1.470 ÷ 1.490 °C) misurati con termocoppia ad immersione, si ricava dal diagramma una richiesta in carica del 12% di carbonio, pari al 13,3% di coke e di una portata del vento di circa 110 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/min, pari a 3.300 m<sup>3</sup>/h.

Questi dati teorici, pur dovendo essere corretti per le varie perdite che si verificano in esercizio, risultano estremamente orientativi per la relazione tra produzione oraria, temperatura della ghisa, coke in carica e portata del vento nel forno considerato.

Nel caso dell'impiego del vento caldo si ha il diagramma di fig. 19: si rileva che il diagramma è spostato a destra e verso l'alto, cioè verso valori più elevati della produzione oraria e della temperatura della ghisa.

## LA SCORIA

La scoria, che si forma nel cubilotto, è costituita dalle ceneri del coke, dalla erosione del refrattario, dalle perdite al fuoco del ferro e degli altri elementi ed, infine, dalle impurezze introdotte insieme con la carica (per lo più sabbia aderente e ruggine).

Poiché questa scoria, costituita principalmente da componenti acidi, è viscosa ed appiccicosa, si effettuano aggiunte di calce per migliorare la viscosità, allo scopo di rendere possibile un buon deflusso dal forno ed una netta separazione della scoria dalla ghisa.

Ma poiché nella fusione al cubilotto tra le fasi si verificano reazioni desiderate ed indesiderate che, per esempio, provocano cali ed aumenti, ogni fusione al cubilotto deve essere vista come un processo metallurgico.

Una condotta orientata e controllata della scoria è una premessa per una produzione sufficientemente sicura di una ghisa qualitativamente senza difetti.

Fino a tempi recenti è stata impiegata solo la fusione con rivestimento acido.

Dopo lo sviluppo del rivestimento basico, l'introduzione del vento caldo e dei forni senza rivestimento nella zona di fusione, aumentarono le possibilità di impiego della scoria basica.

Il forno senza rivestimento e con raffreddamento esterno ad acqua (fig. 20) è, da un punto di vista metallurgico, il più idoneo; infatti esso produce il proprio velo refrattario mediante la scoria che si forma e di conseguenza la marcia può essere acida o basica a scelta. Anche le irregolarità per erosione anomala del refrattario tradizionale sono eliminate e questo aumenta la sicurezza della condotta della scoria.

Le reazioni chimico-fisiche che avvengono nel cubilotto dipendono da numerosi fattori tra i quali sono particolarmente importanti i seguenti:

- Temperatura della ghisa.
- Condizioni ossidanti o riducenti dei gas di scarico.
- Composizione chimica di metallo e scoria.
- Intensità e durata del contatto.

Sulla base di queste grandezze saranno considerati in seguito i processi metallurgici della fusione al cubilotto e saranno trattati i principali elementi della ghisa come ferro, manganese, silicio, carbonio, zolfo e fosforo.

Tutte le 4 grandezze precedenti dipendono in notevole misura dalle condizioni di esercizio ed in speciale modo dalla portata del vento, dal preriscaldamento del vento e dalla carica di coke. La variazione di una o più condizioni di esercizio agisce su più grandezze e questo rende difficile la comprensione delle dipendenze fondamentali.

La quantità di scoria, riferita a 100 kg di ghisa, può oscillare tra 3,5 e 12 kg e, in media, è  $4 \div 7$  kg/100 kg di ghisa.

Da un punto di vista termico la quantità è da considerarsi piccola, in quanto per la fusione di 1 kg di scoria sono necessarie  $1,674 \div 2,093$  MJ ( $400 \div 500$  kcal). Per una condotta regolare la quantità di scoria, per cubilotti che lavorano in continuazione, non deve essere troppo piccola, altrimenti insorgono difficoltà di esercizio.

### Aggiunte scorificanti

Poiché tra i costituenti della scoria del cubilotto normalmente prevalgono quelli acidi, è necessario effettuare aggiunte basiche per ottenere una migliore fluidità ed anche per ragioni metallurgiche.

Per lo più è impiegato calcare. Questo si spiega non solo dal punto di vista economico per l'ottenimento abbondante di calce, ma anche per il fatto che la calce è considerata un componente idoneo della scoria che, oltre a fluidificare  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , influisce anche favorevolmente sulla desolfurazione.

Nel forno acido il calcare serve principalmente per fluidificare le parti acide della scoria. In generale l'aggiunta di calcare è dal 20% al 40% del coke di carica.

Poiché bisogna tenere conto di una erosione del refrattario spesso variabile, non si può stabilire una relazione costante del calcare con il coke di carica. L'aggiunta di calcare deve essere effettuata in relazione alle condizioni di esercizio in vista della composizione desiderata

delle scorie: basicità  $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$  da 0,5 a 1.

Impiegando HC-coke (High Carbon Coke), a causa della minore percentuale di ceneri, l'aggiunta di calcare deve essere ridotta.

Il calcare può essere sostituito in tutto od in parte con la dolomite, in quanto il  $\text{MgO}$  ha una azione analoga a  $\text{CaO}$ .

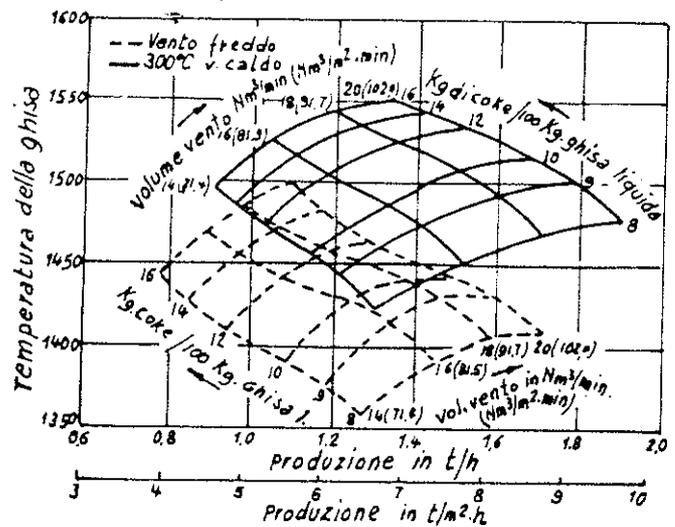


Fig. 19 - Aumento della temperatura della ghisa per azione del vento caldo con diverse cariche di coke, secondo W. Patterson e F. Neumann.

In un forno basico, attraverso l'erosione del rivestimento refrattario, una parte della scoria acida è neutralizzata e fluidificata. Poiché in generale si cerca di ottenere una basicità

$\left( \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} \right)$  di  $1,5 \div 3,5$ , è necessaria una aggiunta supplementare di sostanze basiche.

Per questo è impiegata calce o dolomite.

A causa del punto di fusione più elevato di questa scoria molto basica, devono essere effettuate altre aggiunte che, a seconda della necessità, contengono poco o niente  $\text{SiO}_2$ .

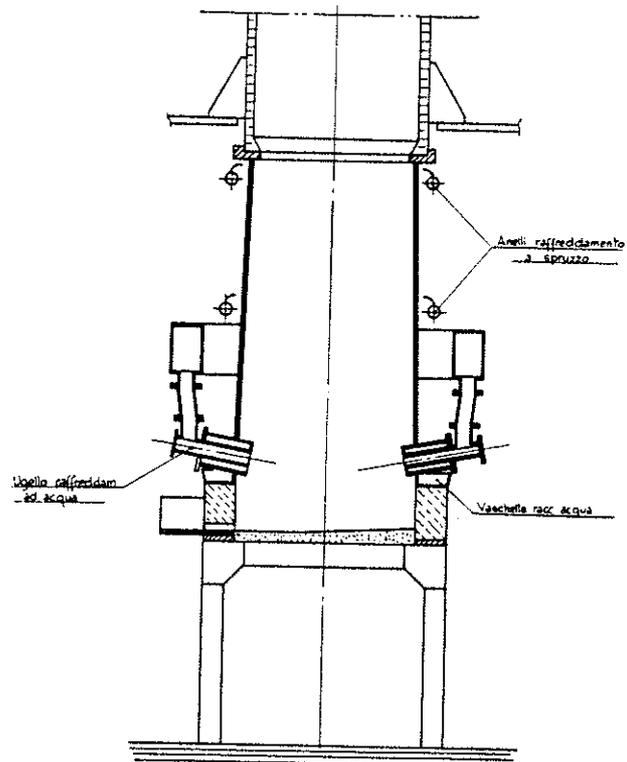


Fig. 20 - Cubilotto senza rivestimento con raffreddamento ad acqua mediante spruzzatori ed ugelli di rame raffreddati ad acqua.

Nella marcia basica non si può stabilire una aggiunta valida in tutti i casi, poiché la composizione della scoria desiderata è diversa nei diversi casi.

Nel caso del forno senza rivestimento la condotta della scoria è più semplice, in quanto le variazioni dipendono soltanto dalle perdite al fuoco e non vi è erosione del refrattario.

Con l'impiego del carburo di calcio (in seguito alla combustione si forma CaO) l'aggiunta di calcare deve essere ridotta in misura corrispondente.

È da notare che 1 kg di  $\text{CaC}_2$  fornisce 0,84 kg di CaO, mentre 1 kg di  $\text{CaCO}_3$  fornisce soltanto 0,55 kg di CaO.

Poiché il carburo di calcio contiene soltanto il  $69 \div 74\%$  di  $\text{CaC}_2$  ed il resto è costituito da CaO, con l'impiego per la combustione di 1 kg di carburo di calcio si sostituiscono 1,65 kg di calcare.

Nella fusione in forno acido con una aggiunta di carburo di calcio oltre il 2% la quantità di calce che si forma è molto elevata, per cui questa deve essere neutralizzata e fluidificata mediante ulteriori aggiunte. Per questo può essere impiegata la quarzite o meglio ancora la chamotte ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ), in quanto quest'ultima è relativamente facile da fluidificare e contemporaneamente è aumentato il tenore di  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nella scoria con diminuzione del punto di fusione della medesima.

### Viscosità

Una scoria molto fluida riduce il pericolo di formazione di *corone*, per esempio sugli ugelli, di conseguenza si deve cercare di ottenere una bassa viscosità della scoria del cubilotto. Inoltre la velocità delle reazioni tra la scoria e le fasi presenti è determinata in gran parte dalla viscosità.

La viscosità è principalmente in funzione della temperatura e della composizione chimica. Con l'aumento della temperatura si ha in generale una diminuzione della viscosità (fig. 21).

Tenendo fissa la temperatura nel cubilotto, rimane ancora la possibilità di influire sulla viscosità della scoria attraverso la composizione. Aumentando il rapporto  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ , cioè aumentando la percentuale di calce, diminuisce la viscosità nell'intervallo acido ed aumenta la viscosità, passando da una basicità di 1,3 ad una di 1,4 ed oltre.

Nelle scorie molto basiche,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  agiscono nel senso di diminuire la viscosità.

Poiché si deve tendere a mantenere al minimo il tenore di ossidi di ferro e di manganese nelle scorie del cubilotto, occorre effettuare delle aggiunte che riducano la viscosità e facilitino la riduzione di questi ossidi, come dolomite e spatofluore.

### Basicità

Le scorie che si trovano in pratica presentano un sistema complesso con numerosi componenti.

Al fine di caratterizzare l'azione della scoria, sono state proposte varie formule, distinguendo i componenti basici ed i componenti acidi:

— Ossidi basici:  $\text{CaO}$ ;  $\text{MgO}$ ;  $\text{MnO}$ ;  $\text{FeO}$ .

— Ossidi acidi:  $\text{SiO}_2$ ;  $\text{P}_2\text{O}_5$ ;  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

$\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  si comportano come anfoteri e cioè nelle scorie fortemente basiche agiscono come componenti acidi e nelle scorie fortemente acide come componenti basici.

Come formula fondamentale della basicità si può adottare sia:

$$B = \frac{\text{Concentrazione dei componenti basici}}{\text{Concentrazione dei componenti acidi}} \quad (7)$$

oppure la differenza:

$$B = \text{Concentrazione dei componenti basici} - \text{Concentrazione dei componenti acidi} \quad (8)$$

in cui si deve tenere conto del diverso carattere di acidità o basicità dei singoli componenti, mediante un fattore.

Poiché CaO ed  $\text{SiO}_2$  sono i principali componenti, per definizione hanno il fattore 1. I fattori degli altri componenti sono tali da esprimere quante volte un componente è basico come la calce od acido come la silice.

Ma finora non si è potuto determinare una formula della basicità valida in generale. Come formula semplice e pratica della basicità è impiegato il rapporto dei due principali costituenti;

$$B = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} \quad (9)$$

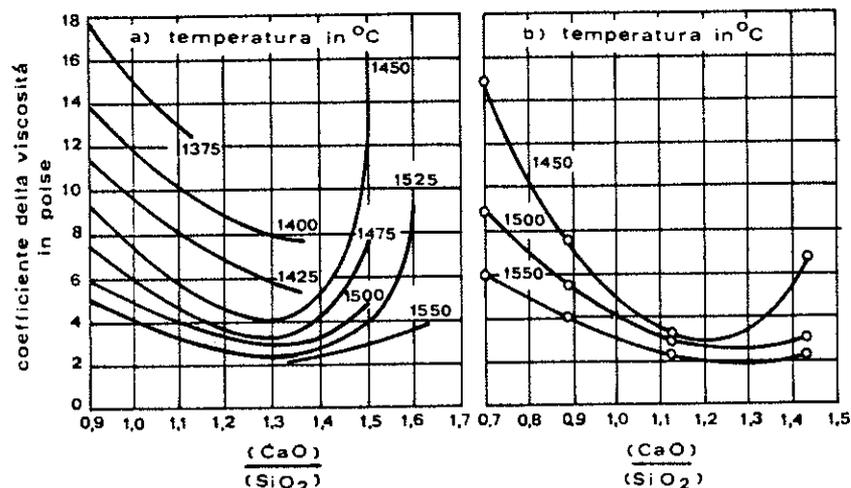


Fig. 21 - Dipendenze della viscosità dal rapporto  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  e dalla temperatura, secondo P. Kozakevitch e E. Hofmann.

oppure:

$$B = \frac{\text{CaO}}{\text{CaO} + \text{SiO}_2} \quad (10)$$

Gli altri costituenti più comuni presenti nella scoria sono l'allumina e la magnesia che molti ricercatori tengono presente:

$$B = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3} \quad (11)$$

L'allumina presenta un comportamento anfotero e si comporta come acido soltanto in una scoria fortemente basica e non può essere impiegata sotto questa forma.

Una scoria di cubilotto è costituita principalmente da  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  che raggiungono complessivamente la percentuale del 90%, e da altri componenti quali  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MnO}$ , solfuri, spatofluore ed acido fosforico.

L'acido fosforico si trova sotto forma di trifosfato di calcio o calcio tetrafosfato ed il suo tenore è così basso che si può trascurare.

$\text{FeO}$  e  $\text{MnO}$  possono oscillare in misura maggiore, a seconda della condotta del forno.

Nel caso di forno a vento caldo con marcia riducente, la somma dei due ossidi è per lo più  $1 \div 3\%$ , mentre nel forno a vento freddo si hanno valori maggiori ( $5 \div 7\%$ ).

Poiché  $\text{FeO}$  e  $\text{MnO}$  influenzano fortemente la reazione tra scoria e ghisa o l'andamento della carburazione (processi di ossidazione), essi non sono compresi nella formula della basicità, ma sono considerati come parametri. Il  $\text{MgO}$ , che è particolarmente alto nel caso dell'aggiunta di dolomite, si comporta diversamente. Esso non reagisce direttamente con la ghisa e suoi elementi di lega o con il carbonio, ma agisce fortemente sulla basicità e fluidità e quindi sull'azione degli altri costituenti della scoria.

Per quanto sopra è stata scelta come misura della basicità la formula semplificata:

$$B = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2} \quad (12)$$

## Elaborazione e comportamento della scoria

Nella condotta del cubilotto un aumento della quantità di scoria ha differenti ripercussioni rispetto ai forni a riverbero ed ai forni elettrici.

In questi tipi di forni, infatti, aumentando la quantità di scoria, si ottiene una corrispondente diluizione dello zolfo e del fosforo, perciò sono favorite la desolfurazione e la defosforazione.

Si può a proposito del cubilotto considerare il caso della spillatura continua e della spillatura intermittente.

In generale si può dire che una aumentata quantità di scoria nel caso di spillatura continua (ghisa e scoria) è legata ad un aumento del calo di fusione; in questo caso, l'altezza della scoria e della ghisa nel crogiolo rimane praticamente invariata.

Con la spillatura intermittente questa altezza varia in continuazione e, di conseguenza, l'altezza della scoria influenza in modo diverso le reazioni tra scoria e ghisa, scoria e coke e scoria e refrattario, poiché variano la superficie, il tempo di contatto e di reazione.

## I PROCESSI METALLURGICI

Sono esaminati i comportamenti di alcuni elementi principali costituenti le ghise grigie, che meritano attenzione speciale durante il processo fusorio al cubilotto.

### Ferro e manganese

Il ferro ed il manganese nel cubilotto si comportano in maniera molto simile per quanto riguarda le loro reazioni chimico-fisiche e per questo sono qui trattati insieme. Nelle condizioni di esercizio del cubilotto essi possono essere ossidati oppure i loro ossidi possono essere ridotti.

Come ossidanti sono da considerare soprattutto le fasi gassose (ossigeno ed anidride carbonica), la ruggine aderente al materiale di carica ed i componenti della scoria che perdono facilmente ossigeno. Il ferro ed il manganese ossidati in questo modo possono essere nuovamente ridotti dal carbonio del coke, in modo che la composizione finale della ghisa liquida si presenta come il risultato di ossidazione e riduzione.

L'ossido di  $\text{Fe}^{+++}$  è contenuto in piccola quantità nel coke e può, come già detto, essere introdotto in forno come ruggine aderente come impurezza od anche con le aggiunte.

Inoltre è possibile che, con la riduzione di questo ossido, si abbia un aumento del ferro (fig. 22).

Il calo e l'aumento sono il risultato di un elevato numero di reazioni, che avvengono all'interno del cubilotto con la partecipazione di diverse sostanze come ferro solido o liquido, scoria (solida o fluida), coke, refrattario e gas.

Quanto più alta è la temperatura e più riducente è la marcia, tanto minore è il calo del ferro e del manganese, poiché diminuisce l'ossidazione ed è favorita la riduzione degli ossidi già formati (fig. 23).

Se il forno è condotto in modo che è introdotta la quantità ottimale del vento (massima temperatura della ghisa), si ha contemporaneamente il minimo calo, cioè si realizzano le condizioni ottimali di funzionamento del cubilotto.

Poiché aumentando il coke di carica aumenta la temperatura, e si accentuano le condizioni riducenti, diminuisce il calo. Si è pure trovato un minimo del valore del

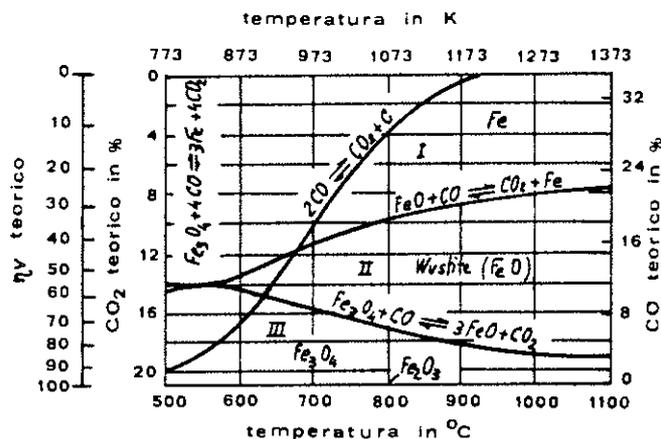


Fig. 22 - Campi di esistenza del ferro e suoi ossidi per diversi tenori di CO e CO<sub>2</sub> della fase gassosa (resto fino al 100% = N<sub>2</sub>), secondo i dati di R. Schenck.

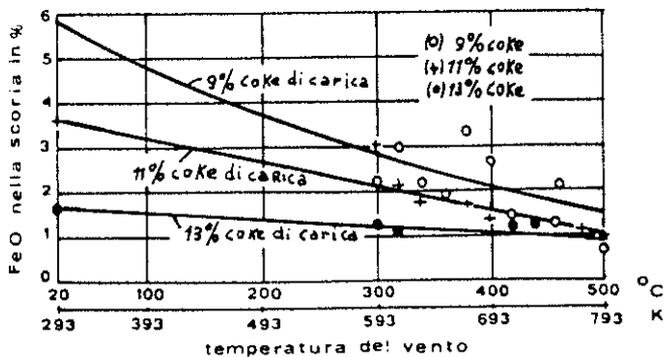


Fig. 23 - Tenore di FeO della scoria in funzione della temperatura del vento per diverse cariche di coke, secondo H. Jungbluth e K. Stockkamp.

tenore di FeO in corrispondenza di una pezzatura media del coke di 60/80 mm.

Mentre nella parte media ed alta del tino, a causa della composizione dei gas, esistono condizioni prevalentemente ossidanti, nella zona della ghisa liquida, della dote e specialmente nel crogiolo si sviluppa l'azione riducente del carbonio del coke, in modo che è recuperata una parte del calo già verificatosi.

Prima che la scoria ed il metallo abbiano raggiunto la loro composizione finale, in questa zona avvengono reazioni tra coke, ghisa e scoria che lo circondano.

Poiché le goccioline di ghisa devono trovare la loro strada attraverso la scoria, la misura delle reazioni che avvengono tra queste fasi dipende dall'altezza dello strato di scoria che incontrano.

Considerando bene i fenomeni che avvengono nel cubilotto dal punto di vista del tempo e della posizione, risulta che non solo vi è una successione, ma una simultaneità di condizioni ossidanti e riducenti a seconda della temperatura, i gas ed i contatti delle fasi presenti.

Per il confluire delle goccioline di scoria dalle diverse zone del forno si ha nel crogiolo la scoria finale che presenta le conseguenti oscillazioni di composizione.

Per concludere, si può affermare che premessa fondamentale per realizzare un calo minimo del ferro e del manganese nel cubilotto è quella di ottenere, a parità di altre condizioni, una ghisa liquida alla massima temperatura possibile.

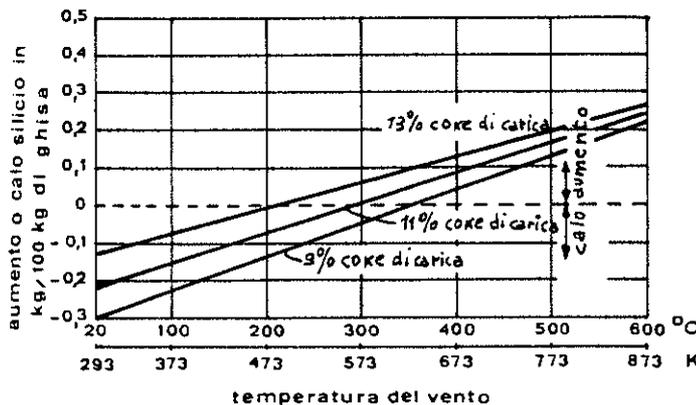


Fig. 24 - Influenza della temperatura del vento sul calo di fusione del silicio in funzione della carica di coke, secondo H. Jungbluth e K. Stockkamp.

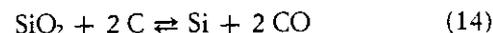
## Silicio

Il silicio è introdotto in forno oltre che allo stato metallico come elemento di lega nella ghisa in pani, rottami di ghisa, ferro-silicio, ecc. anche sotto forma di ossido come costituente della cenere del coke e sotto forma di sabbia aderente ai panotti, al boccame e getti rotti. Inoltre si introduce  $\text{SiO}_2$  da parte della scoria proveniente dal refrattario del cubilotto acido.

Una riduzione del  $\text{SiO}_2$  ad opera del CO



nel cubilotto è trascurabile. L'equazione procederà, quindi, nella direzione dell'ossidazione del silicio. Nel cubilotto a vento freddo si ha in generale un calo del silicio, che è tanto più forte quanto più bassa è la temperatura, quanto più alto è il tenore di  $\text{CO}_2$  della fase gassosa (vedere equazione 13), e quindi il valore di  $\eta_v$ , e quanto più basica è la scoria. In condizioni fortemente riducenti, e per elevate temperature in forno, al di sopra della temperatura di inversione, come possono essere raggiunte con il vento caldo, nel forno acido è anche possibile un aumento del silicio



come è stato dimostrato sperimentalmente da diversi autori (fig. 24).

Poiché nel cubilotto si ha la contemporanea presenza di condizioni ossidanti e riducenti, anche le possibili reazioni devono essere considerate da questo punto di vista. Le risultanti goccioline di ghisa e di scoria possono essere molto differenti nel loro tenore di silicio, a seconda delle strade che hanno percorso. In periferia, nella zona dell'ossigeno libero si avrà una forte ossidazione del silicio, mentre al centro del forno, a causa della reazione delle particelle di scoria con il coke od il metallo, è possibile persino una riduzione della silice.

In ogni caso, tuttavia, l'ossidazione al centro del forno sarà bassa a causa del basso potenziale dell'ossigeno.

Nella parte inferiore non percorsa da correnti di gas, e cioè nel crogiolo del cubilotto, le reazioni metallurgiche corrispondono, a seconda del tipo di rivestimento, a quelle di un crogiolo acido o basico riempito di coke. L'atmosfera in questa parte del forno può essere ritenuta riducente, poiché a contatto con il coke si ha un elevato rapporto  $\text{CO}/\text{CO}_2$ . Se questa zona del forno è rivestita con una pigiata carboniosa, cubilotto neutro, le condizioni riducenti sono ancora più accentuate. La ghisa che gocciola deve percorrere la sua strada attraverso la scoria presente che scioglie la pellicola di ossido delle goccioline. A seconda della temperatura e la composizione delle due fasi, il silicio può essere in questo modo ossidato oppure la silice ridotta. Del significato dell'altezza dello strato di scoria, che specialmente nella marcia intermittente è soggetto ad oscillazioni, è già stato detto. Anche alla superficie di contatto tra scoria e metallo e tra coke e scoria o metallo si verificano azioni reciproche che sono alla fine dipendenti dalla bagnabilità.

La bagnabilità del coke da parte della scoria è migliore che da parte del metallo, e con l'aumentare della basicità la bagnabilità si sposta in favore del metallo.

Poiché il silicio è fortemente riducente, esso è ossidato per il contatto con la scoria contenente FeO presente nel cubilotto.

In definitiva, tutti i provvedimenti, che portano ad un basso tenore di FeO e MnO, riducono il calo del silicio, a condizione che non sia aumentata la basicità della scoria.

Un aumento del silicio nel cubilotto è in primo luogo la conseguenza di una riduzione del SiO<sub>2</sub> da parte del carbonio.

Condizioni riducenti ed alta temperatura in forno riducono il calo del silicio ed i cali del ferro e del manganese.

L'influenza della basicità della scoria è contraria; con basicità crescente aumenta la scorificazione del silicio, mentre diminuisce il calo del ferro e del manganese.

Per ottenere il desiderato tenore di silicio finale, che in generale oscilla tra 1% e 2,5%, deve essere aggiunto Fe-Si.

Un'aggiunta di leghe ad alto tenore di silicio (esempio: Fe-Si 75%) è legata a perdite maggiori che con leghe a più bassa concentrazione (ghise siliciose), poiché la reattività di una sostanza è direttamente proporzionale alla sua concentrazione.

Il calo minimo si ottiene sicuramente con l'impiego di una carica con una sufficiente concentrazione di silicio in modo da evitare l'aggiunta di Fe-Si.

## Carbonio

Il massimo assorbimento di carbonio da parte del ferro è rappresentato in fig. 25 sia per il sistema binario Fe-C che per la ghisa di normale composizione.

La minore solubilità nella ghisa è da attribuire in primo luogo alla forte azione del silicio contraria all'assorbimento del carbonio. Lo zolfo ed il fosforo riducono la solubilità del carbonio, ma la percentuale nella ghisa è

così piccola che la loro influenza, che corrisponde ad  $\frac{1}{3}$  della loro concentrazione, è insignificante.

Il manganese aumenta la solubilità del carbonio nella ghisa, ma la sua azione è modesta e può essere in generale trascurata a causa della sua bassa concentrazione.

Quanto più il tenore di carbonio della carica metallica è al di sotto del tenore di saturazione e cioè anche quanto meno silicio, zolfo e fosforo sono disciolti nella ghisa, tanto maggiore sarà la tendenza all'assorbimento del carbonio per contatto con il carbonio del coke.

L'assorbimento di carbonio da parte del ferro si può suddividere in due tempi, la soluzione in superficie e la diffusione in profondità; cioè il processo di soluzione di una sostanza solida dipende dalla velocità di diffusione.

Sulla base di dati sperimentali devono essere trattate le influenze delle grandezze citate sulla carburazione nel cubilotto e devono essere studiate per esprimere separatamente tutti i fattori, poiché in generale con la variazione soltanto di una condizione di esercizio, come per esempio, della carica di coke, contemporaneamente variano molte grandezze collegate. È evidente l'influenza della composizione chimica della carica.

In fig. 26 risulta che il tenore di carbonio della carica oscilla entro vasti limiti a seconda della carica stessa, nella quale ha grande influenza la percentuale del rottame di acciaio a causa del suo basso tenore di carbonio.

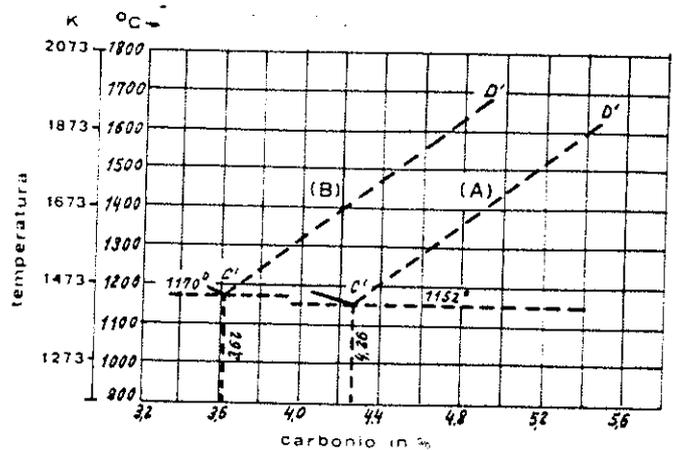


Fig. 25 - Tenore di saturazione della ghisa liquida in carbonio nel sistema binario Fe-C (A) e per una ghisa con Si = 2%; Mn = 0,5%; S = 0,1%; P = 0,1% (B), secondo W. Patterson, F. Neumann e H. Schenck.

L'aumento del carbonio è anche qui tanto minore quanto maggiore è il tenore di carbonio della carica. Nel caso di tenore molto elevato della carica si può avere una decarburazione.

Il grosso intervallo di variazione è da attribuire alle differenti condizioni di esercizio.

Quanto più basso è il tenore di silicio e più alto il tenore di manganese della ghisa, tanto migliore è la carburazione. Motivi di questo comportamento risiedono nello spostamento della massima solubilità del carbonio.

Risulta, inoltre, che la solubilità del carbonio nel ferro aumenta con la temperatura. Per l'esempio riferito la solubilità aumenta da 3,62% a 1.443 K (1.170 °C) (punto eutettico C') a 4,72% a 1.873 K (1.600 °C).

Da questo deriva che la carburazione deve essere favorita con l'aumento della temperatura e questo, tanto più è comprensibile, in quanto il processo di soluzione, da un punto di vista cinetico, avviene più velocemente e più compiutamente alle temperature superiori.

Poiché la carburazione avviene nella zona della ghisa liquida, può essere aumentata la temperatura di questa

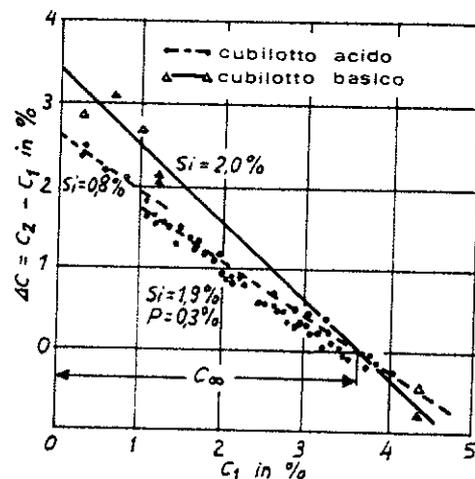


Fig. 26 - Carburazione nel cubilotto in funzione del tenore di carbonio della carica, secondo R. Kreszewski.  
C<sub>1</sub> = tenore di carbonio nella carica  
C<sub>2</sub> = tenore di carbonio della ghisa liquida carburata

zona, per esempio, mediante l'aumento del coke di carica, l'impiego di adatte qualità di coke, l'aggiunta di  $\text{CaC}_2$ , il preriscaldamento del vento o l'aumento della portata del vento nel caso in cui il forno sia impiegato con vento in quantità ridotta.

La zona di carburazione può anche estendersi verso il basso, prolungando la zona del forno al di sotto degli ugelli. In questo settore che non è percorso dai gas del forno più o meno ossidanti, si ha una diminuzione della temperatura a seconda della posizione della zona, poiché non si ha un ulteriore apporto di calore. Anche il crogiolo può essere prolungato al di sotto del foro di colata, in modo da avere un pozzetto di ghisa dove questa è in permanenza a contatto con il coke e può subire una certa carburazione supplementare.

Se si vuole una forte carburazione, la parte inferiore del forno deve essere riempita con coke povero di ceneri; se si vuole evitare una carburazione, è necessario tenere la zona del crogiolo (tra il piano degli ugelli e la suola del forno) più corta possibile ed impiegare anche coke più ricco di ceneri.

Per escludere l'influenza del coke di carica, in fig. 27 è riportata la temperatura ottenuta con diverse portate di vento. Si nota una migliore carburazione con marcia calda del forno. La leggera caduta in corrispondenza di una grandissima portata di vento (maggiore campo di variazione per bassi tenori di carbonio) è da attribuire allo spostamento delle zone di combustione e di fusione ed alle condizioni fortemente ossidanti legate alle più elevate portate di vento ed alla diversa velocità di fusione; in tali condizioni il processo di carburazione, che avviene contemporaneamente nel forno, può essere migliorato ulteriormente.

La misura della carburazione dipende anche dalla durata del contatto delle sostanze che partecipano alla reazione e la velocità della carburazione è una funzione esponenziale.

Sull'influenza della qualità del coke si è concordi nel-

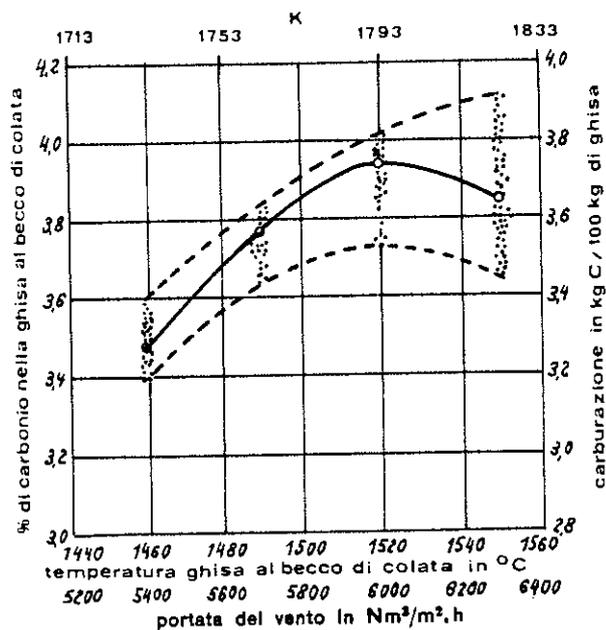


Fig. 27 - Carburazione e tenore di carbonio della ghisa al becco di colata in funzione della temperatura della ghisa con una scoria contenente 50 ÷ 55%  $\text{CaO}$  e 20 ÷ 25%  $\text{SiO}_2$ . Variazione della temperatura mediante la portata specifica del vento, secondo A. F. Oberhofer.

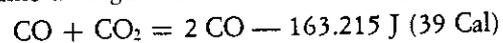
attribuire una grande importanza al tenore di ceneri. Il contatto tra la ghisa liquida ed il carbonio del coke è fortemente influenzato dal tenore di ceneri. Un maggiore tenore di ceneri diminuisce la carburazione e questo può essere spiegato attraverso la cattiva possibilità di contatto tra la ghisa liquida ed il carbonio del coke che è rivestito dalle ceneri.

È noto che la grafite di elettrodo con la bassissima percentuale di ceneri dello 0,6% carbuca nel modo migliore. Ricerche furono effettuate da vari autori con coke aventi differenti tenori di ceneri: tutti sono arrivati alla stessa conclusione, cioè hanno determinato una minore carburazione in corrispondenza di tenori di ceneri più elevati.

La migliore azione carburante del HC-coke è da attribuire in parte al basso tenore di ceneri.

D'altra parte, l'influenza del tenore di ceneri sulla carburazione è tanto maggiore, quanto maggiore è il tenore di carbonio della carica, poiché i fattori cinetici in generale agiscono tanto più fortemente quanto maggiore è la distanza dalla condizione di equilibrio.

Si è studiata l'influenza della reattività del coke sulla carburazione. Per reattività del coke si intende la sua attitudine a reagire con  $\text{CO}$  secondo l'equazione:



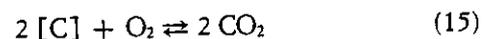
È difficile però considerare separatamente l'azione della reattività, in quanto nelle ricerche con diversi tipi di coke oltre alla reattività risultano variare anche altre proprietà del coke (resistenza, abrasione, tenore di ceneri, ecc.) che pure hanno influenza sulla carburazione. In particolare il tenore e la composizione delle ceneri del coke influiscono direttamente sulla reattività, poiché esercitano un'azione catalitica sulla reazione del carbonio con l'ossigeno o l'anidride carbonica.

Inoltre con la reattività variano altre grandezze importanti per la carburazione, come per esempio il profilo della temperatura e la composizione dei gas nel cubilotto.

Per questo alcuni studiosi hanno sostenuto il punto di vista secondo il quale un coke con bassa reattività carbuca meglio, poiché questo tipo di coke in generale porta ad un aumento della temperatura che si dimostra prevalente sull'effetto singolo della reattività.

Infine, anche la composizione della scoria gioca un ruolo importante sui processi di carburazione, pur essendo la sua azione in generale solo indiretta. Sono tutti d'accordo che la carburazione è favorita dalla crescente basicità della scoria (fig. 28).

Si è visto però che nel cubilotto sussistono delle condizioni ossidanti e riducenti variabili con il luogo e con il tempo; cioè oltre alla reazione di carburazione può avvenire anche una ossidazione del carbonio; di conseguenza, il tenore finale di carbonio sarà la somma delle reazioni intervenute, con particolare riguardo alle seguenti:



oppure:



L'influenza dell'atmosfera del forno (condizioni ossidanti o riducenti) risulta dalla fig. 29. Con l'aumento del rapporto di combustione  $\eta_v$  e valori alti di  $\text{CO}_2$ , diminuisce il tenore di carbonio nella ghisa.

Probabilmente la variazione di  $\eta_v$  è da attribuire alle differenti cariche di coke ed alle conseguenti oscillazioni

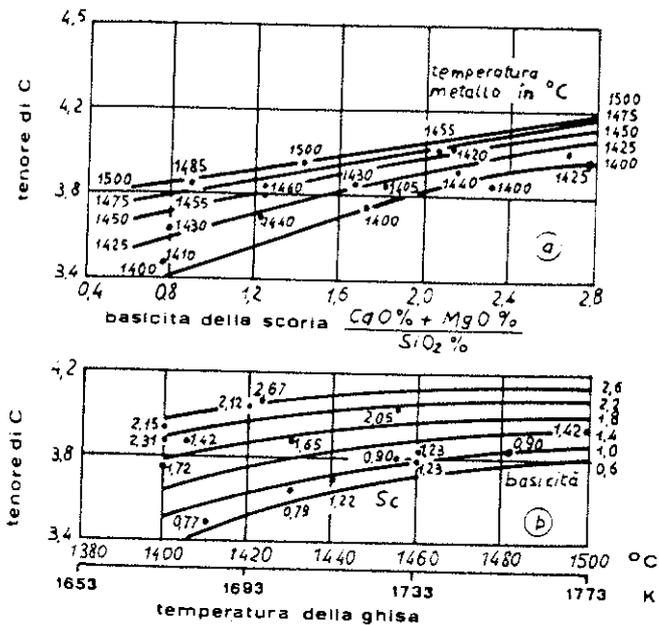
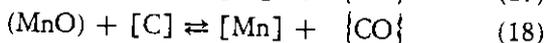
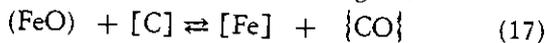


Fig. 28 - Tenore di carbonio in funzione della basicità e della temperatura, secondo H. J. Leyshon e R. B. Coates.

di temperatura, per cui queste grandezze sono influenzate da quelle relative all'atmosfera gassosa.

L'ossidazione può avvenire secondo le seguenti equazioni anche attraverso la formazione primaria di ossido superficiale sulle goccioline di ghisa od attraverso il contatto con scoria contenente ferro e manganese:



Le condizioni per la formazione di germi di CO sono favorite dalla superficie ruvida del coke.

Per un crescente tenore di FeO e MnO della scoria, diminuisce il tenore di carbonio nella ghisa.

Si può concludere dicendo che la carburazione, in definitiva, risulta favorita dai seguenti fattori:

- Fusione ad alta temperatura.
- Percentuale elevata di coke di carica.
- Coke poco reattivo e basso di ceneri.
- Basso tenore di FeO nella scoria (scoria poco acida o basica).

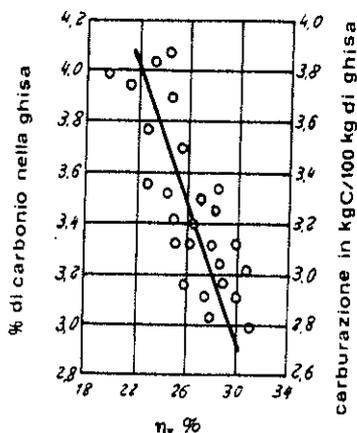


Fig. 29 - Carburazione e tenore di carbonio della ghisa in funzione del rapporto di combustione  $n_v$  con una scoria avente  $50 \div 55\%$  CaO e  $20 \div 25\%$  SiO<sub>2</sub>, secondo A. F. Oberhofer.

## Zolfo

Nell'elaborazione delle ghise si attribuisce importanza allo zolfo poiché questo elemento influisce sulle proprietà delle ghise stesse. È noto che di solito quando lo zolfo è presente nelle ghise in concentrazioni elevate, rappresenta un elemento dannoso.

Durante il processo di fusione nel cubilotto lo zolfo è assorbito dalla ghisa soprattutto proveniente dal coke e dai rottami di ghisa, in misura inferiore dai rottami di acciaio e dalle ghise in pani. I tenori medi di zolfo dei materiali di carica sono in genere i seguenti:

— Ghisa in pani	0,01 ÷ 0,07%
— Rottami di acciaio	0,02 ÷ 0,04%
— Rottami di ghisa	0,07 ÷ 0,15%
— Coke	0,80 ÷ 1,20%

I valori di assorbimento di zolfo proveniente dal coke sono in genere del  $40 \div 50\%$  per il vento freddo, mentre con il vento caldo scendono al  $30\%$  circa.

La ripartizione dello zolfo introdotto tra i diversi componenti (ghisa, scoria e gas di scarico) dimostra che la parte di zolfo che passa nella ghisa aumenta con l'aumentare della percentuale di coke in carica.

Contemporaneamente aumenta anche la porzione volatile che fuoriesce con il gas di scarico e la porzione che passa nella scoria.

A seconda della basicità e della temperatura, la scoria esercita un'azione desolforante per contatto con la ghisa; ciò avviene quando il passaggio dello zolfo della ghisa nella scoria è più forte del passaggio dello zolfo dal coke nella ghisa; temperature crescenti favoriscono questa desolforazione (fig. 30).

Per il cubilotto non si può assumere in generale come misura della desolforazione la ripartizione dello zolfo tra scoria e ghisa (S)/[S]; infatti, nel forno acido anche con l'aumento dello zolfo nella scoria può avvenire un aumento dello zolfo nella ghisa.

Ciò è dovuto al fatto che la scoria acida è saturata di zolfo in modo relativamente veloce e di conseguenza preleva soltanto poco zolfo dalla ghisa.

Invece con la condotta del cubilotto con scorie basiche, aumentando la temperatura, si ottiene parallelamente una desolforazione con ripartizione (S)/[S]. Infatti in questo caso l'aumento dello zolfo nella scoria, proveniente dalla ghisa, risulta più forte rispetto alle scorie acide (fig. 31).

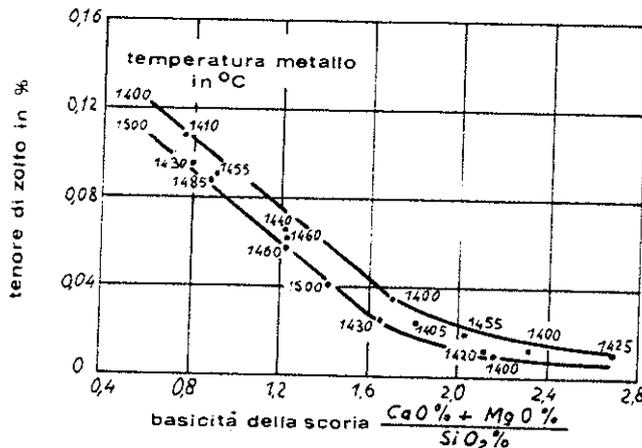


Fig. 30 - Tenore di zolfo nella ghisa in funzione della basicità della scoria e della temperatura del metallo.

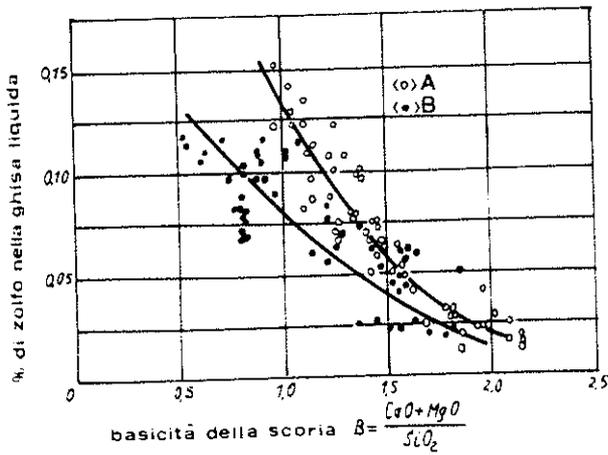


Fig. 31 - Relazione tra il tenore di zolfo della ghisa liquida e la basicità della scoria, secondo D. Logotheris (A) e K. Stockkamp (B).

La solubilità dello zolfo nel ferro può essere ridotta con aggiunta di manganese. Questo è da attribuire al fatto che tra manganese e zolfo esistono forti affinità, per cui, raggiungendo un certo rapporto di concentrazione del manganese e dello zolfo, si arriva alla formazione di  $MnS$ , il quale è insolubile nella ghisa (vedi la nota formula  $Mn\% = 0,30 + 1,7 S\%$ ).

La solubilità dello zolfo è ridotta ulteriormente dal carbonio e dal silicio. Questo non è da attribuire alla formazione di composti, come nel caso del manganese, ma è una conseguenza dell'azione del silicio e del carbonio che aumenta l'attività dello zolfo (fig. 32).

In conclusione, si può dire che la desolfurazione, reazione fortemente endotermica, risulta favorita da:

- Alta temperatura.
- Elevato tenore di  $CaO$  e basso tenore di  $FeO$  nella scoria.
- Presenza di  $Si$  e  $Mn$  nel metallo.
- Aggiunta di  $CaC_2$ , energico riduttore ed apportatore di calore.

### Fosforo

Durante la fusione della ghisa nel cubilotto non si determinano reazioni apprezzabili del contenuto di fosforo

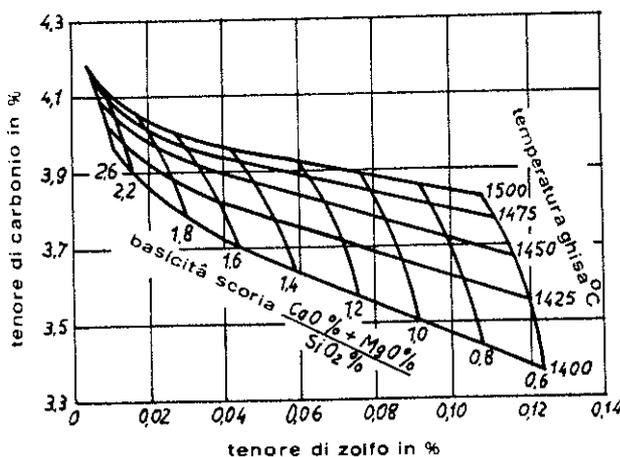


Fig. 32 - Relazione tra il tenore di carbonio e di zolfo della ghisa per varie temperature del metallo e grado di basicità della scoria, secondo H. J. Leyshon e R. B. Coates.

in carica. Infatti, le condizioni metallurgiche di funzionamento, anche nel caso di rivestimento basico, non danno luogo a processi di defosforazione se non in misura trascurabile.

### LA CONDOTTA DEL CUBILOTTO

Nella condotta del cubilotto occorre tenere presenti numerosi fattori ai quali deve essere attribuita la massima importanza.

#### Qualità del coke

La qualità del coke, in accordo con le esigenze di fonderia e con i risultati di sistematiche sperimentazioni, si possono brevemente riassumere come segue:

- Caratteristiche chimiche:
  - basso tenore di ceneri, zolfo, umidità, sostanze volatili
  - alto tenore di carbonio fisso.
- Caratteristiche fisiche:
  - pezzatura: solitamente in base al diametro del cubilotto. Con l'aumento della pezzatura entro certi limiti, a parità di diametro interno del forno, si ha: aumento del rapporto di combustione  $\eta_v$  con maggiore percentuale di  $CO_2$  nei fumi e quindi marcia più ossidante; aumento della temperatura dei fumi; riduzione della produzione oraria specifica; aumento della temperatura della ghisa.
  - Per quanto riguarda la pezzatura del coke più idonea, è scelta empiricamente fra 1/10 e 1/7 del diametro interno del forno: in pratica per diametro interno di 800 mm si adotta una pezzatura attorno a 100 mm, per diametri maggiori o minori si aumenta o si riduce detto valore fra 70/80 e 120/150 mm;
  - resistenza meccanica: deve essere elevata per potere conservare la pezzatura integra ed uniforme durante tutto il processo di fusione e garantire una buona permeabilità della carica: valore indice MICUM 80 > 70%;
  - reattività: debole il più possibile. La velocità di reazione ad alta temperatura del carbonio del coke con anidride carbonica dipende essenzialmente dalla concentrazione di  $CO_2$  e dalla superficie esterna di contatto coke/gas; questa superficie di contatto evidentemente è tanto minore quanto maggiore è la pezzatura.
  - A temperature più basse, al disopra della dote nella zona di preriscaldamento, la velocità di reazione è più lenta e dipende dalla reattività del coke, cioè dall'attitudine a reagire con  $CO_2$  e maggiormente dalla sua porosità, che è tanto più elevata quanto è minore la sua densità o peso specifico. Un coke eccessivamente poroso e reattivo è incline a sgretolarsi in questa zona del cubilotto, squilibrando la marcia del forno: valore reattività: prova KM < 0,20; prova Rieffel < 18%.
  - Queste considerazioni spiegano la preferenza del fonditore per un coke compatto ad alto peso specifico e di relativamente grossa pezzatura, poco reattivo e meccanicamente resistente.

## La dote

La dote, oltre che sostenere il peso delle cariche, provvede a mantenere costante il livello del punto di massima temperatura e della zona di fusione.

L'alimentazione della dote, a mezzo delle cariche normali e delle false cariche di coke durante la fusione, serve a questo scopo, ma bisogna tenere presente che il rinnovo totale della dote durante la fusione non è possibile e quindi l'esito della fusione dipende in gran parte dalla qualità del coke impiegato per la dote.

Non esiste regola definitiva, confermata dalla pratica, che permetta di indicare con certezza l'altezza della dote per ogni tipo di cubilotto.

In ogni forno, in relazione ai rapporti costruttivi ed alla disposizione degli ugelli, sotto l'influenza della quantità (volume) e della pressione del vento, indipendentemente dall'altezza iniziale della dote, si stabilizza in modo definitivo il punto di massima temperatura e della zona di fusione che è accertabile a fusione ultimata.

La zona di fusione è situata ad una altezza variabile da 800 mm a 1.500 mm al di sopra del piano inferiore degli ugelli ed è in stretto contatto con la zona di massima temperatura.

Caricando coke di dote in misura superiore al suddetto punto, si determina una zona di fusione iniziale più estesa e più fredda; il coke eccedente si consuma poi gradualmente fino a raggiungere il punto di stabilizzazione. Si ottiene cioè una ghisa al becco di colata meno calda di quella ottenibile in condizioni di altezza di dote normale.

Il fenomeno si avverte con l'uscita di una fiamma intensa alla bocca di carica e con l'apparizione della prima ghisa in un tempo superiore a 10 min.

Con una dote di altezza troppo bassa, la prima ghisa apparirà al canale di colata in un tempo brevissimo (meno di 5 min) e sarà calda, ma con il proseguire della fusione diventerà sempre più fredda.

Per ottenere che le cariche metalliche fondano nella giusta zona di fusione, appena sopra la zona di massima temperatura, il metodo più sicuro è di identificare per ogni cubilotto la zona di fusione e la corrispondente altezza della dote.

Per questo si effettueranno fusioni di prova con varie altezze della dote.

Dopo ognuna di queste fusioni occorrerà accertare lo stato della zona di fusione e l'altezza della medesima in base alla posizione della zona erosa del rivestimento, che si stabilizzerà in un determinato punto, indipendentemente dall'altezza iniziale della dote e questa sarà l'altezza più appropriata della dote che assicura il migliore andamento del cubilotto.

Il quantitativo di coke della dote si determina, perciò, prima in volume e poi in peso.

Stabilita l'altezza della dote e scelto il coke, si procede al caricamento ed all'accensione.

## Coke di carica

Il coke di carica, cioè il coke necessario per la fusione delle singole cariche metalliche, è determinato in funzione del diametro interno del cubilotto. Il peso della

carica di coke di fusione si stabilisce in base all'altezza che si vuol dare allo strato di combustibile teoricamente immaginabile tra le successive cariche metalliche (in pratica si ha un mescolamento completo del coke con le cariche metalliche).

Questa altezza varia a seconda dell'esperienza del fondero da 100 a 200 mm in base al diametro del forno; la carica di coke risulta all'incirca  $70 \div 75 \text{ kg/m}^2$  di sezione del forno.

## Carica metallica

Il peso della carica metallica dipende dal diametro del cubilotto e dal rapporto desiderato fra il peso del coke di carica ed il peso della carica metallica stessa. Di solito detto rapporto varia tra l'8% ed il 14% circa, a seconda delle caratteristiche funzionali del cubilotto, della temperatura della ghisa da realizzare e della composizione della carica metallica.

Il numero delle cariche, che dovrebbero passare in zona di fusione, in relazione al consumo di coke, dovrebbe oscillare tra 8 e 12/h; il peso delle cariche metalliche di  $900 \text{ kg/m}^2$  circa di sezione.

## Calcolo della composizione delle cariche metalliche

Stabilita l'analisi della ghisa da ottenere in base alle caratteristiche meccaniche ed allo spessore dei getti, utilizzando per orientamento le apposite tabelle ed i diagrammi strutturali, occorre calcolare la miscela di carica per il cubilotto, tenendo in debito conto la variazione dei singoli elementi durante il processo fusorio:

Solitamente si hanno a disposizione:

- Pani di ghisa nuova.
- Rottami di ghisa.
- Rottami di acciaio.
- Boccami (rottame interno).
- Correttivi per la carica: bricchetti a titolo noto di Si, Mn, P, Cr, Ni, Mo, Cu.
- Ferroleghie in zolle per la carica: Fe-Si, Fe-Mn, Fe-Cr, Fe-P.
- Aggiunte nel liquido in secchia: metalli puri in gocce o piccoli pezzi come Ni, Cr, Al, Cu; oppure *termocariche* e ferroleghie in graniglia.

Tutti questi materiali sono stati illustrati nel Capitolo *Materiali di carica* cui si rimanda per le relative composizioni chimiche e caratteristiche.

Nella marcia del cubilotto si può presentare il caso che la stessa miscela di carica sia mantenuta durante tutto l'arco della fusione (getti di grande serie); frequentemente, però, nelle fonderie che lavorano per conto terzi, si presenta la necessità di cambiare più volte la miscela di carica (in ogni caso una miscela dovrebbe durare almeno 1 h).

Non sembra razionale fondere per prime le cariche ipoeutetiche con forte impiego di acciaio, in quanto si verificano solitamente forti assorbimenti di zolfo e ghisa fredda.

In certi casi si possono correggere leggere differenze di analisi mediante aggiunte in siviera: tuttavia, per differenze sensibili si deve procedere alla variazione della carica, tenendo presente di separare i vari tipi di miscela mediante 2 ÷ 3 false cariche di coke che consentono di vuotare il crogiolo e di mantenere la separazione del boccame, soprattutto quello proveniente da cariche ad alta percentuale di acciaio oppure legate.

Si riportano due esempi di calcolo della carica metallica per cubilotto a vento freddo per una ghisa G 30 per monoblocchi (tab. XXI) ed una ghisa G 15 a medio tenore di P per getti con spessori sottili (tab. XXII). Si rileva che, mentre le analisi della ghisa in pani e del boccame sono generalmente note, quelle del rottame di ghisa meccanico e comune di provenienza varia, sono solitamente stimate.

### Tipo di spillata

Il cubilotto può essere previsto per la spillata intermittente o per la spillata continua.

Nella spillata intermittente la quantità massima di ghisa, che può essere prelevata dal forno in una sola volta, è determinata dal diametro del cubilotto e dall'altezza degli ugelli rispetto alla suola.

Con questo tipo di spillata le operazioni devono essere condotte con la massima regolarità possibile per evitare un aumento del carbonio nella ghisa dovuto ad un contatto prolungato con il coke della dote.

Parallelamente si deve regolare la fuoriuscita della scoria attraverso l'apposito foro, in modo da mantenere sempre un consistente strato della medesima sulla ghisa liquida.

Nella spillata continua, con scorificazione frontale (esiste anche la scorificazione posteriore da apposito foro), il cubilotto ha un solo foro di uscita per la ghisa e per le scorie. La separazione continua della scoria avviene mediante apposito canale munito di sifone.

### Temperatura all'interno del cubilotto

È interessante considerare l'andamento della temperatura all'interno del cubilotto ed in particolare la posizione della zona di massima temperatura.

Dalla porta di caricamento, scendendo verso il basso, la temperatura cresce fino al piano degli ugelli. Nel caso dell'impiego del vento freddo si ha l'andamento rappresentato in fig. 33.

La zona di massima temperatura è invece rappresentata in fig. 34 nella quale si possono anche osservare gli effetti, sulla temperatura della ghisa, da parte del vento caldo, e dell'impiego di ugelli sporgenti.

### Sistemi di controllo

Per realizzare esattamente le composizioni chimiche volute per la ghisa, è necessario disporre di mezzi di controllo veloci ed accurati.

I controlli possono essere meno frequenti quando si adotta il procedimento *duplex*, in quanto così si ottiene la migliore miscelazione e la migliore regolazione della temperatura prima della colata.

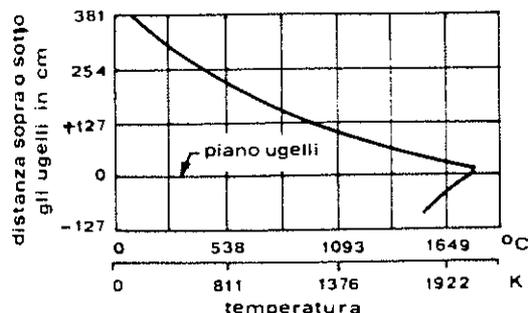


Fig. 33 - Relazione tra la temperatura ed il piano degli ugelli nel cubilotto a vento freddo.

Gli spettrometri a lettura diretta consentono analisi tempestive e precise. Spettrometri sotto vuoto possono essere usati per la determinazione di carbonio e zolfo. È anche di grande utilità l'impiego dell'analisi termica per la determinazione del carbonio equivalente.

Infine la prova di fluidità ed il sempre valido provino di tempra fornisce indicazioni significative sull'importante tendenza alla tempra bianca della ghisa.

Questa tendenza è esaltata da una serie di condizioni come:

- Basso tenore di carbonio e di silicio (acciaio in carica).
- Presenza di elementi stabilizzatori dei carburi (Cr, Mo, Mn).
- Elevato tenore di zolfo (non bilanciato dal Mn).
- Elevato tenore di gas.
- Bassa temperatura di colata in aggiunta ad una delle precedenti condizioni.

La temperatura della ghisa viene misurata con pirometro ottico o meglio ad immersione.

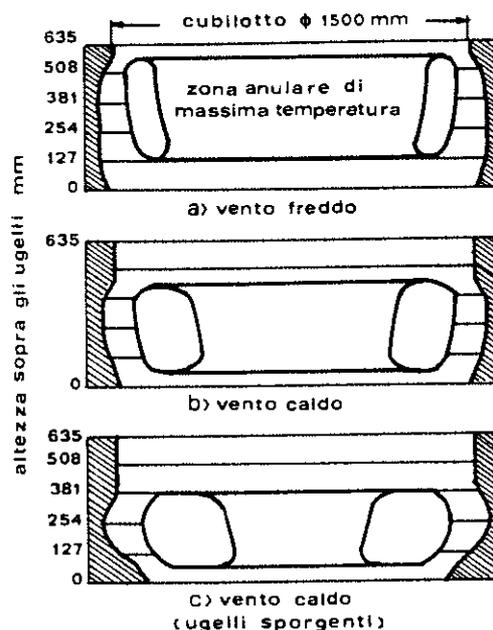


Fig. 34 - Posizioni e forme delle zone di massima temperatura in relazione al piano degli ugelli per cubilotti a vento freddo ed a vento caldo.

Tabella XXI - Calcolo della carica al cubilotto a vento freddo per una ghisa G 30 per monoblocchi.

Analisi teorica: Cr = 3,3%; Si = 1,7%; P = 0,25%; Mn = 0,8%;  
S = 0,08%; Ni = 1,5%; Cr = 0,3%

Componenti la carica		Composizione chimica dei materiali di carica %							Elementi in carica %						
Materiale	Quantità %	Si	Cr	P	Mn	S	Ni	Cr	Si	Cr	P	Mn	S	Ni	Cr
Ematite affinata	25	1,5	3,3	0,05	0,6	0,05	—	—	0,37	0,83	0,01	0,15	0,01	—	—
Rottame di ghisa meccanico	25	2,0	3,4	0,55	0,7	0,10	—	—	0,50	0,85	0,13	0,17	0,02	—	—
Rottame di acciaio	15	0,3	2,7	0,10	0,6	0,07	—	—	0,04	0,40	0,01	0,08	0,01	—	—
Rifusione	35	1,7	3,3	0,25	0,8	0,08	1,5	0,3	0,60	1,16	0,09	0,28	0,02	0,52	0,10
	100														
1/3 bricchetto di silicio da 1 kg									1,51	3,24	0,24	0,68	0,06	0,52	0,10
1/3 bricchetto di manganese da 1 kg									0,33	—	—	—	—	—	—
1 bricchetto di nichel da 1 kg									—	—	—	0,33	—	—	—
1/4 bricchetto di cromo da 1 kg									—	—	—	—	—	1,00	—
Carburazione									—	0,10	—	—	—	—	0,25
Calo { 10% Si									1,84	3,34	0,24	1,01	0,06	1,52	0,35
{ 20% Mn									0,18	—	—	—	—	—	—
{ 20% Cr									—	—	—	0,20	—	—	—
Assorbimento (13% di coke in carica)									1,66	3,34	0,24	0,81	0,06	1,52	0,28
Analisi finale presunta									—	—	—	—	0,03	—	—
									1,66	3,34	0,24	0,81	0,09	1,52	0,28

Nota: La carburazione dei rottami di acciaio a contatto con il coke di fusione si aggira sul 2,7%. Lo zolfo contenuto nel coke è gassificato per il 70% in forma di SO<sub>2</sub> e SO<sub>3</sub> che sfuggono assieme ai gas; il resto è assorbito dalla carica. L'analisi del rottame di ghisa meccanico rappresenta un valore medio.

Tabella XXII - Calcolo della carica al cubilotto a vento freddo per una ghisa G 15 per getti con spessori sottili (radiatori).

Analisi teorica: Cr = 3,25%; Si = 2,50%; P = 0,55%  
Mn = 0,55%; S = 0,14% max

Componenti la carica		Composizione chimica dei materiali di carica %					Elementi in carica %				
Materiale	Quantità %	Si	Cr	P	Mn	S	Si	Cr	P	Mn	S
Ematite	17,15	2,64	3,80	0,09	0,83	0,06	0,45	0,65	0,01	0,14	0,010
Rottame di ghisa meccanico	20,00	2,20	3,20	0,60	0,50	0,09	0,44	0,64	0,12	0,10	0,018
Rottame di ghisa comune	24,28	2,00	3,10	0,90	0,60	0,12	0,49	0,75	0,22	0,15	0,029
Rottame di acciaio	10,00	0,30	2,70	0,10	0,70	0,07	0,03	0,27	0,01	0,07	0,007
Rifusione	28,37	2,50	3,25	0,66	0,54	0,12	0,71	0,93	0,19	0,15	0,034
	100,00										
3/4 bricchetto di silicio da 1 kg							2,12	3,24	0,55	0,61	0,098
1/12 bricchetto di manganese da 1 kg							0,75	—	—	—	—
Calo { 10% Si							2,87	3,24	0,55	0,69	0,098
{ 20% Mn							0,29	—	—	—	—
Assorbimento (13% di coke in carica)							2,58	3,24	0,55	0,55	0,098
Analisi finale presunta							—	—	—	—	0,039
							2,58	3,24	0,55	0,55	0,137

Nota: La carburazione dei rottami di acciaio a contatto con il coke di fusione si aggira sul 2,7%. Lo zolfo contenuto nel coke è gassificato per il 70% in forma di SO<sub>2</sub> e SO<sub>3</sub> che sfuggono assieme ai gas; il resto è assorbito dalla carica. Le analisi dei rottami meccanico e comune rappresentano valori medi presunti.

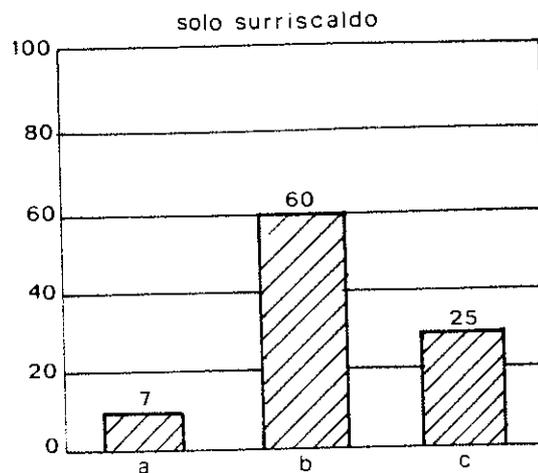
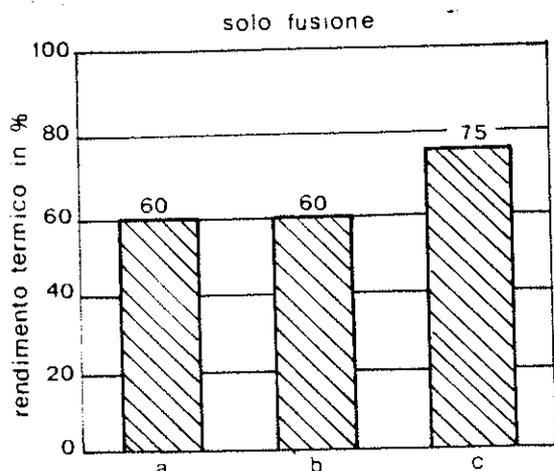


Fig. 35 - Rendimento termico di vari forni fusori: a) cubilotto, b) forno ad induzione, c) forno ad arco.

### CARATTERISTICHE DELLA GHISA PRODOTTA AL CUBILOTTO ACIDO A VENTO FREDDO

Da quanto è stato esposto in precedenza, risulta possibile controllare efficacemente la marcia del cubilotto al fine di ottimizzare il suo rendimento e di conseguire ottime caratteristiche metallurgiche nella ghisa prodotta.

Si possono produrre tutte le ghise grigie meccaniche comuni dai tipi G 10 a G 30 e le ghise basso-legate fino a circa 0,5% Cr, 2% Ni, 1% Mo.

La carica metallica è composta generalmente da ghisa in pani, ricuperi interni, rottami di ghisa meccanica o comune, rottami d'acciaio (fino al 20 ÷ 25% del totale) e correttivi vari. Le temperature al canale possono raggiungere i 1.723 ÷ 1.753 K (1.450 ÷ 1.480 °C).

Un cubilotto acido a vento freddo ben condotto può garantire analisi con tolleranze di ± 0,1% C e di temperatura della ghisa di ± 25 °C.

### BILANCIO TERMICO E RENDIMENTO DEL CUBILOTTO A VENTO FREDDO

Il cubilotto, pur essendo un eccellente mezzo fusorio per la carica solida, presenta limitazioni nella fase di surriscaldamento della ghisa.

L'impiego ideale del cubilotto consiste nel fondere la carica di ghisa alla più bassa temperatura possibile, riservando il surriscaldamento ad un forno elettrico in duplex.

Lownie, confrontando i vari mezzi fusori per la ghisa, ha ricavato il significativo diagramma (fig. 35), che conferma l'alta idoneità del cubilotto per la fusione e quella del forno ad induzione per il surriscaldamento.

Il cubilotto acido a vento freddo tradizionale presenta dei rendimenti termici — rapporto tra calore immesso ed utilizzato — che variano dal 25% al 35% a seconda della temperatura di spillata della ghisa.

Nel diagramma di fig. 36 si rileva un rendimento del 30% cioè la fusione ed il surriscaldamento della ghisa hanno utilizzato complessivamente meno di un terzo del calore disponibile mentre il 39% e il 18% sono usciti dal camino sotto forma rispettivamente di calore latente e sensibile; il resto perdite varie.

### VARIANTI AL CUBILOTTO TRADIZIONALE

#### Cubilotto a vento freddo a marcia basica

Il cubilotto a vento freddo a marcia basica, sviluppatosi dopo il 1950, è rivestito con materiale basico: essenzialmente dolomite o magnesite sinterizzate per calcinazione, agglomerate in blocchi, mattoni o sotto forma di pigiate legate con catrame da applicarsi a caldo.

L'aggiunta di castina in carica è tale che la scoria presenta un indice di basicità elevato (normalmente maggiore di 1,4) con la seguente composizione approssimativa: CaO: 50 ÷ 55%; SiO<sub>2</sub>: 28 ÷ 32%; MgO: 8 ÷ 10%; MnO: 0,5 ÷ 1%; FeO: 0,2 ÷ 0,5%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 5 ÷ 6%.

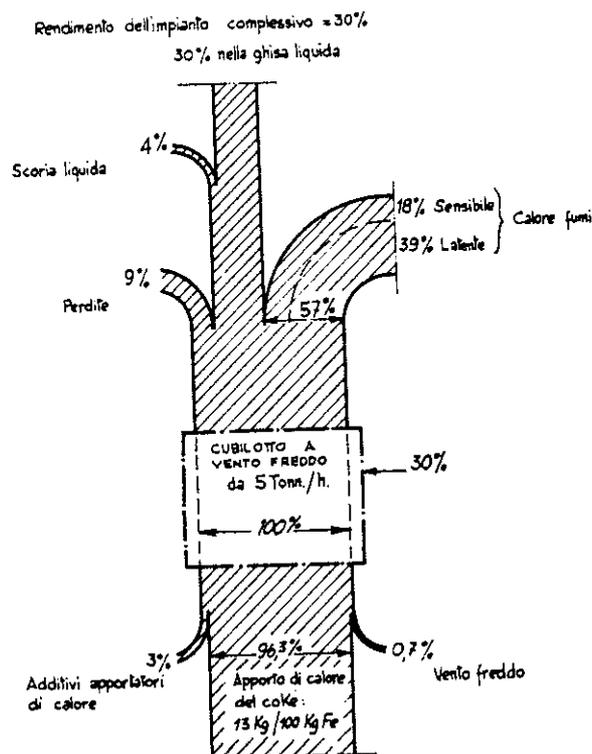


Fig. 36 - Diagramma termico di un cubilotto a vento freddo.

Questo tipo di scoria, come è stato illustrato in precedenza, è molto più attiva metallurgicamente di una scoria acida. È caratterizzata, infatti, da una forte capacità desolforante per la presenza di elevati tenori di CaO libero e bassi tenori di FeO, come pure è in grado di migliorare la carburazione, con possibilità di impiego di elevate percentuali di acciaio in carica, essendo molto fluida e, quindi, non aderente al coke. Il coke della zona di combustione appare depurato dalle ceneri che lo rivestono solitamente nella marcia acida, con intensificazione della sua reattività e velocità di combustione.

Le scorie si presentano di aspetto calcareo-vetroso fino ad una basicità di  $1,4 \div 1,5$ ; calcaree fra  $1,5$  e  $1,6$ , sfiorite oltre  $1,6$ . Tuttavia le applicazioni sono rimaste limitate sia per il costo e le difficoltà del rivestimento, sia perché l'energica attività metallurgica della scoria basica è esaltata pienamente solo dalle elevate temperature, quali sono ottenibili con l'impiego del vento caldo: diversamente si deve ricorrere a costose aggiunte di fluidificanti quali spatofluore e carburo di calcio in carica.

Inoltre le scorie basiche a temperatura relativamente basse non consentono un controllo del tenore di silicio, il cui calo è incostante e può arrivare al  $30 \div 40\%$ , mentre il calo del manganese si riduce sensibilmente.

Tranne qualche applicazione per getti di grosso spessore nel campo della ghisa per lingottiere o sferoidale, la marcia basica a vento freddo non ha trovato diffusione pratica.

### Cubilotto a vento caldo

Nella ricerca della riduzione dei costi di fusione sono state studiate e sperimentate alcune variazioni al cubilotto tradizionale a vento freddo. Una delle innovazioni che ha incontrato maggior favore è l'adozione del vento caldo.

I motivi principali sono i seguenti:

- La combustione più attiva fra carbone ed aria calda permette di raggiungere temperature più elevate (fig. 37) con risultati vantaggiosi sulla carburazione della carica, sulla desolfurazione e sulla temperatura della ghisa al becco di colata.
- La maggiore temperatura, spostando l'equilibrio  $\text{CO}-\text{CO}_2$  a favore del CO, origina un ambiente più riducente che diminuisce l'ossidazione del silicio, del ferro e del manganese (fig. 38).
- La possibilità di preparare una carica con materiale meno pregiato e con meno ferroleghie.
- Ghisa più calda e con minore tendenza alla tempra.

Per migliorare ulteriormente i vantaggi economici, sono state introdotte altre varianti al cubilotto tradizionale e precisamente:

- Riscaldamento del vento ottenuto con uno scambiatore di calore funzionante con gli stessi gas del cubilotto e conseguente miglioramento del bilancio termico.
- Ugelli di rame raffreddati ad acqua per garantire la costanza del vento e l'uniformità delle zone di combustione.
- Raffreddamento con acqua del mantello del cubilotto e limitazione del rivestimento refrattario alla zona sotto gli ugelli.

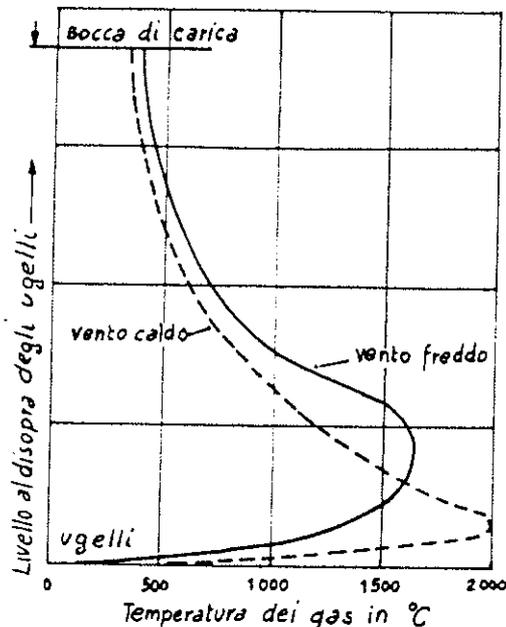


Fig. 37 - Regime di temperatura in un cubilotto a vento caldo ed a vento freddo.

— Sifone autoscorificante a pressione per evitare lo stazionamento dei prodotti di fusione all'interno del cubilotto, riducendo così l'usura del refrattario del forno.

Quest'ultima realizzazione, unita alla precedente, permette di portare la campagna del forno acido ad 1 o 2 settimane senza interventi sul rivestimento refrattario.

Queste realizzazioni meritano di essere esaminate in dettaglio.

### Preriscaldamento del vento con recuperatore

Una delle prime soluzioni adottate per riscaldare il vento con i gas del cubilotto è stata quella del recuperatore a fascio di tubi (fig. 39).

Questo scambiatore ha una elevata resa termica, ma presenta qualche inconveniente dovuto alla notevole quantità di polveri che escono dal cubilotto insieme con i gas.

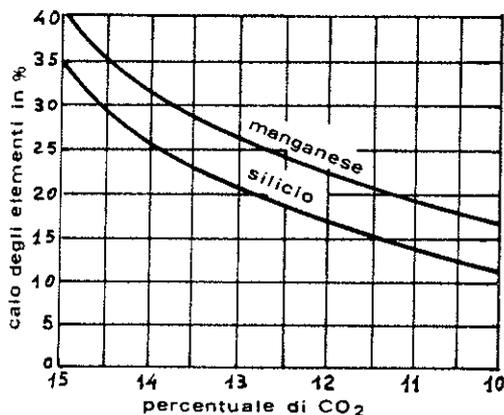


Fig. 38 - Effetto del tipo di combustione (ossidante-riducente) sui cali degli elementi nel cubilotto.

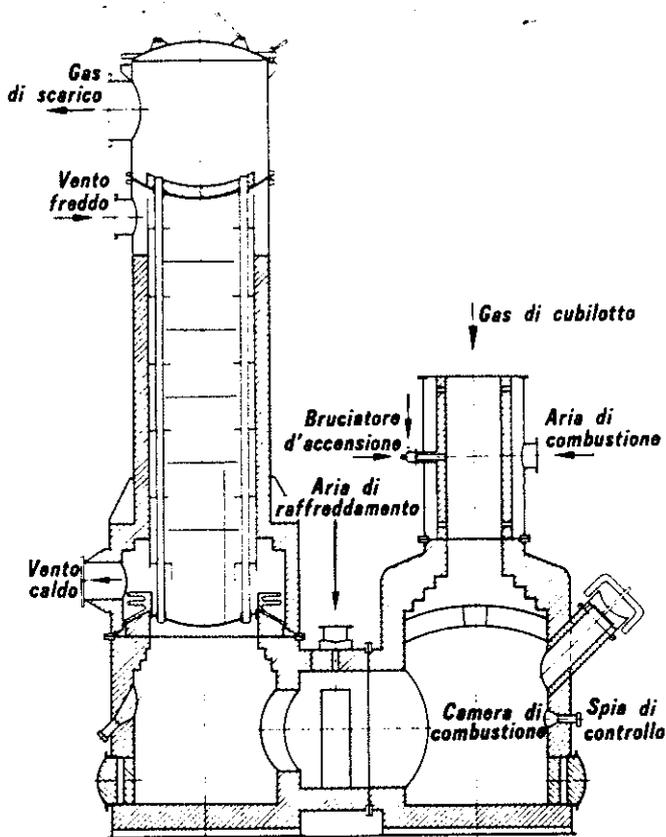


Fig. 39 - Ricuperatore a tubi d'acciaio per cubilotti a vento caldo.

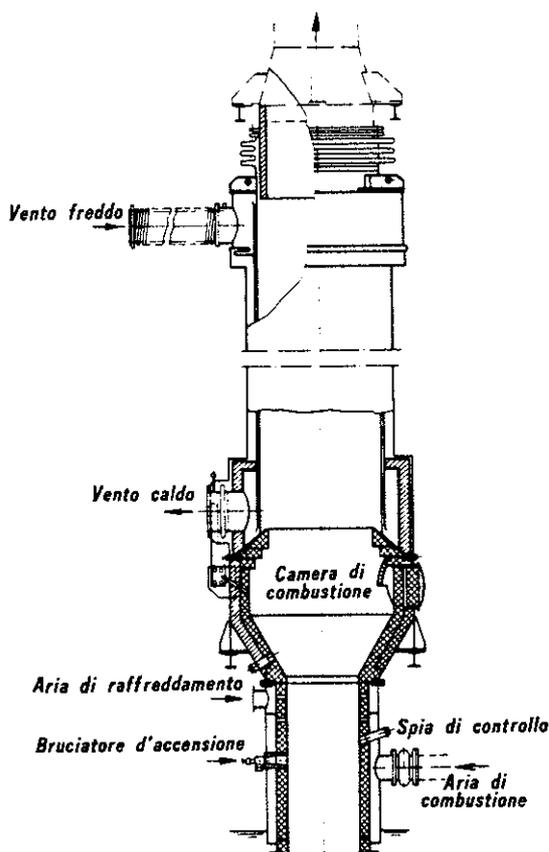


Fig. 40 - Ricuperatore ad irraggiamento.

- Ciò costringe a ripetute operazioni di pulizia dello scambiatore per non perdere in efficienza della resa termica.

Un recuperatore con rendimento inferiore, ma con minori difficoltà di esercizio, è quello ad irraggiamento (fig. 40).

L'impianto è costituito da una camera di combustione sormontata da un camino a doppie pareti in acciaio termoresistente. Nella camera di combustione i gas del cubilotto contenenti mediamente il 15% CO sono bruciati in CO<sub>2</sub> con aggiunta di aria.

Il calore sviluppato porta i prodotti della combustione a  $1.173 \div 1.273$  K ( $900 \div 1.000$  °C); questi, salendo per il camino, cedono parte del loro calore al vento del cubilotto che passa nell'intercapedine e ne portano la temperatura a  $673 \div 773$  K ( $400 \div 500$  °C) circa.

Quando la quantità di CO nei gas del cubilotto è insufficiente, si può adottare un recuperatore con funzionamento misto a gas del cubilotto più combustibile supplementare.

È importante regolare con attenzione il tiraggio del recuperatore per evitare di aspirare contemporaneamente i gas del cubilotto e l'aria proveniente dalla bocca di caricamento. Questo innescerebbe in anticipo la reazione fra CO e O<sub>2</sub>.

Spostando la zona di combustione dalla sua sede logica, si avrebbero perdite di calore ed il deterioramento delle condotte dei gas.

Quando il recuperatore è collegato con un impianto di abbattimento di polveri, si deve curare la taratura della valvola che regola automaticamente l'aspirazione.

Nella camera di combustione deve sempre essere accesa una fiamma pilota di innesco ed è comunque una buona norma ventilare il recuperatore per evitare pericolosi accumuli di CO.

È bene ricordare che anche un semplice recuperatore ad irraggiamento richiede una pulizia delle pareti per favorire lo scambio termico.

Questa operazione deve essere effettuata almeno una volta alla settimana, introducendo dall'alto del recuperatore un tubo con aria compressa, facendolo stazionare per alcuni minuti a diversi livelli fino a quando le polveri aderenti alla lamiera non sono distaccate completamente.

#### Preriscaldamento del vento con riscaldatore indipendente

In alcuni casi è opportuno lavorare con un preriscaldatore autonomo, cioè senza utilizzo diretto del calore sensibile e latente dei gas del cubilotto.

Questo si verifica quando i gas sono poveri di CO per bassi tenori di coke in carica oppure per particolari esigenze di spazio in fonderia o per assicurarsi un vento caldo a temperatura costante dall'inizio a fine fusione. In particolare va segnalato l'uso di questo sistema per ottenere un controllo metallurgico della condotta, adeguata all'elaborazione di ghise di qualità.

I preriscaldatori possono essere del tipo a conversione ad alto rendimento oppure ad irraggiamento di più bassa efficienza; sono alimentati ad olio o gas combustibile. In certi casi si utilizzano contemporaneamente miscele di gas combustibile con aggiunte di gas di ricupero provenienti dal cubilotto (sistema di preriscaldamento misto).

In fig. 41 è riportato un cubilotto dotato di riscaldatore indipendente.

## Ugelli di rame

Durante la fusione il consumo progressivo del refrattario nella zona di immissione del vento nel cubilotto cambia nel tempo il diametro del forno.

Questo provoca nel cubilotto tradizionale uno spostamento delle zone di combustione ed una differente penetrazione del vento nella carica. Sono pertanto variate le condizioni di lavoro con opportune regolazioni della marcia del cubilotto.

L'ugello di rame raffreddato ad acqua (fig. 42) mantiene costanti nel tempo le varie zone di ossidazione e riduzione favorendo un buon andamento della fusione.

Un flussometro mantiene sotto controllo la quantità d'acqua di raffreddamento di ciascun ugello che deve essere assolutamente garantita con impianti di riserva.

Va rilevato che per l'eventuale sostituzione di un ugello avariato si può provvedere con una fermata del cubilotto di 1 o 2 h.

## Raffreddamento del mantello e rivestimento refrattario

Eliminando il rivestimento refrattario del cubilotto nella parte superiore agli ugelli e sostituendolo con un raffreddamento ad acqua del mantello (fig. 43), si ha un cambiamento sostanziale rispetto alla marcia del cubilotto convenzionale. Non vi sono variazioni del diametro interno del forno e la durata del refrattario posto sotto gli ugelli è di 1 o 2 settimane.

Questo permette l'installazione di un cubilotto singolo, spostando la riparazione del refrattario a fine settimana. Le perdite, dovute alla dispersione di calore per il raffreddamento con acqua del mantello, sono compensate dai vantaggi sopracitati.

Quando si effettua la riparazione del refrattario, è bene coprire con pigiate refrattarie la punta degli ugelli di rame, raccordandola al mantello del cubilotto. Ciò per proteggere gli ugelli dalla prima ghisa, quando questi non sono ancora protetti dalla scoria.

La quantità di acqua per il raffreddamento del mantello è regolata in modo da avere un innalzamento della temperatura non superiore a 303 K (30 °C) circa.

L'acqua è distribuita sul mantello da una serie di di-

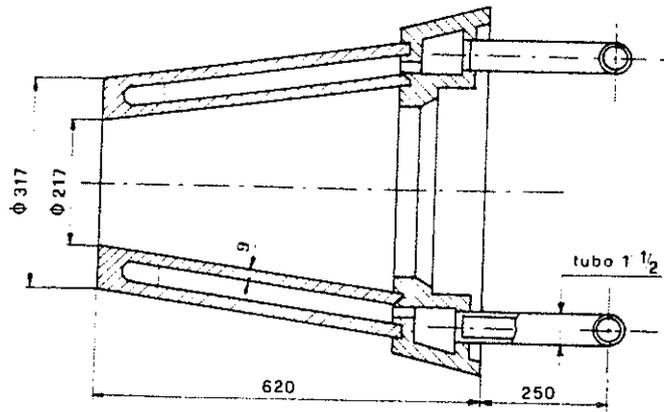


Fig. 42 - Ugello di rame per cubilotto da 30 t/h.

versi spruzzatori disposti ad anello in modo da realizzare un velo continuo d'acqua su tutta la superficie. Anche questo raffreddamento deve essere collegato ad un impianto di riserva che ne garantisca la continuità.

Normalmente l'acqua che raffredda gli ugelli interni è utilizzata per il mantello e quindi raffreddata in un circuito esterno prima di essere riciclata.

Dove se ne presenta l'occasione, per il raffreddamento del mantello si impiega anche acqua di mare.

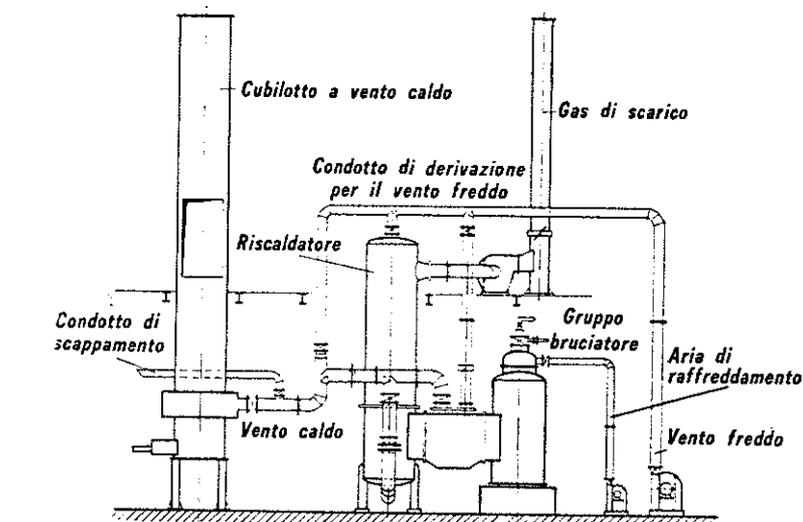


Fig. 41 - Impianto di un cubilotto a vento caldo con riscaldatore indipendente.

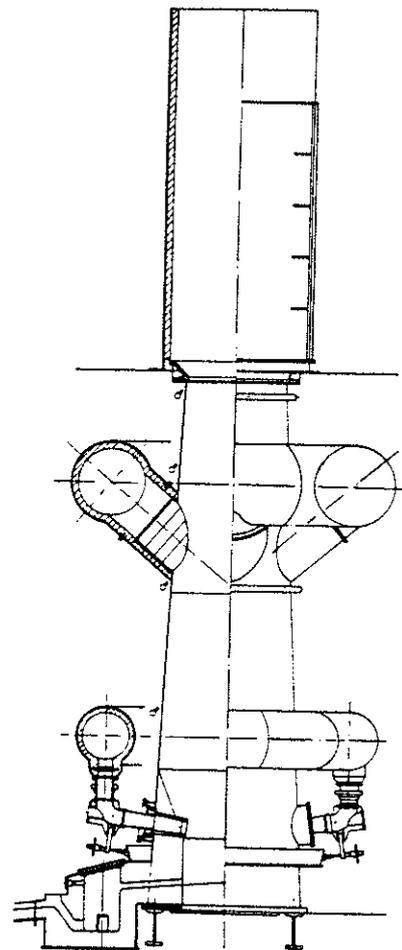


Fig. 43 - Cubilotto a vento caldo senza rivestimento con sifone a pressione.

Il refrattario usato per la parte bassa del forno è prevalentemente costituito da pigiata acida quarzifica con il  $90 \div 95\%$   $\text{SiO}_2$  e  $5\%$   $\text{Al}_2\text{O}_3$ , refrattarietà  $1.923 \div 1.983$  K ( $1.650 \div 1.710$  °C). Il consumo è di  $3 \div 4$  kg/t di ghisa (contro i  $20 \div 50$  kg/t di ghisa dei cubilotti non raffreddati).

La posa in opera è effettuata prevalentemente a spruzzo con lancia ad aria compressa.

### Sifone autoscorificante a pressione

Uno dei punti fondamentali di un moderno cubilotto a campagna prolungata è il dispositivo che raccoglie i prodotti della fusione e separa la ghisa dalla scoria (fig. 44).

La particolare disposizione a livello più basso rispetto al cubilotto evita che ghise e scorie stazionino all'interno del forno consumando il refrattario.

Sono altresì evitate variazioni di composizione della ghisa legate ai cambiamenti di pressione all'interno del cubilotto ed alle reazioni con scoria e coke.

L'uscita della ghisa e della scoria avviene con canali a pressione, dimensionati in modo da garantire la perfetta separazione della scoria.

Questa scoria può in seguito essere granulata con acqua e trasportata con l'ausilio di una pompa ad un silos di raccolta.

È utile ricordare che eventuali usure anomale al sifone possono essere riparate durante la notte senza dovere togliere il coke contenuto nel cubilotto. La parte più soggetta ad usura è quella dell'uscita delle scorie ed è pertanto buona norma attrezzare il sifone con un doppio canale da usare a giorni alterni.

Il materiale refrattario per il canale a sifone è costituito normalmente da una pigiata quarzifica arricchita con grafite e precisamente:  $\text{SiO}_2$  80%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$   $6 \div 8\%$ ; C  $10 \div 13\%$ ; refrattarietà  $1.923 \div 1.983$  K ( $1.650 \div 1.710$  °C); consumo  $3 \div 4$  kg/t di ghisa.

Posa in opera con pestello ad aria compressa con l'ausilio di una sagoma metallica.

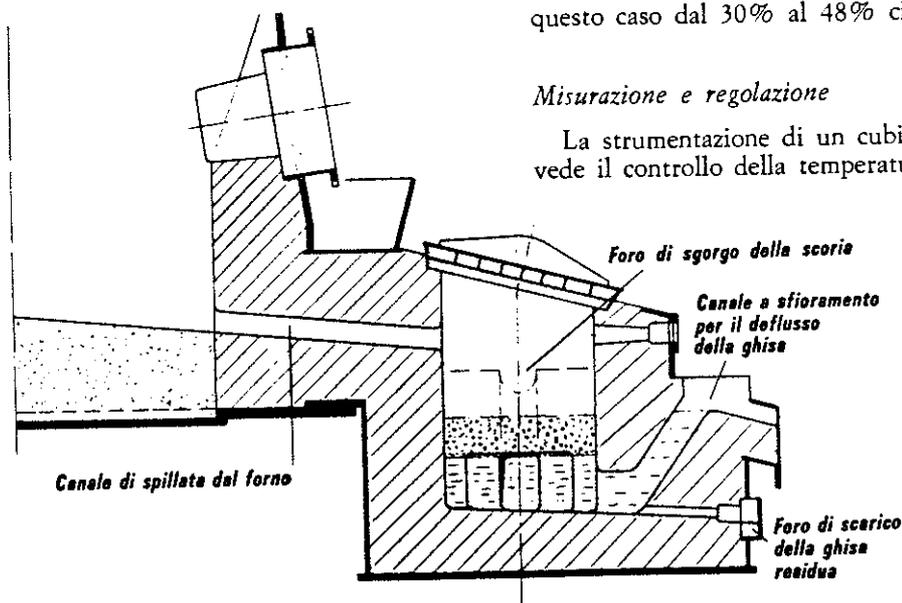


Fig. 44 - Sifone a pressione.

Rendimento dell'impianto complessivo = 48,3%

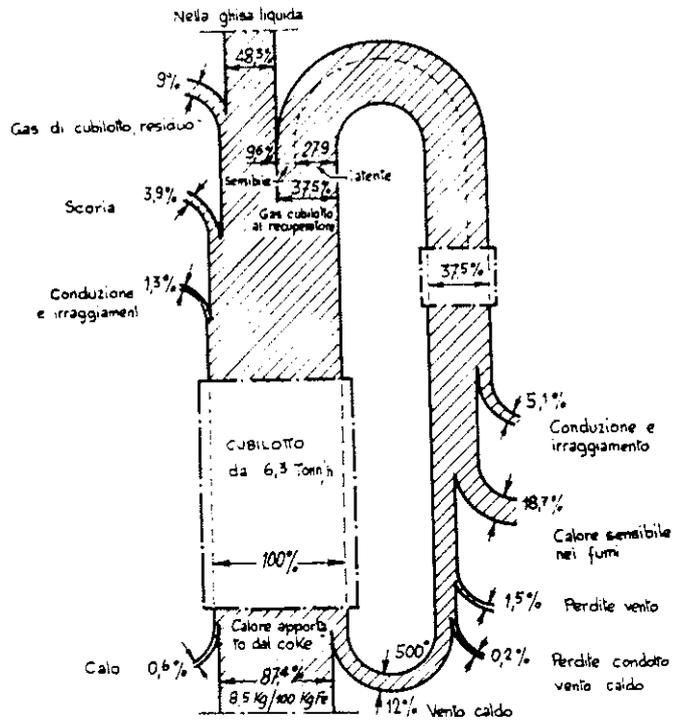


Fig. 45 - Diagramma di bilancio termico per cubilotto a vento caldo.

### Bilancio termico

Il rendimento termico risulta come rapporto fra il calore prodotto dalle sostanze reagenti e il calore assorbito per portare il metallo alla temperatura finale.

È da notare che differenti funzionamenti del cubilotto legati alle necessità di carburazione del bagno fanno sì che il rendimento possa risultare molto diverso.

È evidente, comunque, che rispetto al cubilotto senza ricupero di calore si ha un vantaggio legato allo sfruttamento del calore generato dai gas uscenti dal cubilotto.

Prendendo come riferimento il diagramma del cubilotto a vento freddo tradizionale, il rendimento passa in questo caso dal 30% al 48% circa (fig. 45).

### Misurazione e regolazione

La strumentazione di un cubilotto a vento caldo prevede il controllo della temperatura dei gas di uscita dal

cubilotto, della camera di combustione del recuperatore e del vento caldo.

Sono controllate la portata del vento e la sua pressione nella zona di prelievo del gas dal forno.

Molto utile è il controllo della composizione dei gas del cubilotto per i tenori di CO e CO<sub>2</sub>.

Tutte queste misurazioni facilitano grandemente il lavoro dell'operatore al forno.

Si cita qualche esempio:

- Una elevata temperatura dei gas del cubilotto può corrispondere ad una velocità troppo elevata del vento con conseguente limitato riscaldamento della carica.
- Una temperatura bassa nella camera di combustione richiama l'attenzione su una insufficienza di CO.
- Una temperatura irregolare del vento caldo segnala un andamento disuniforme della fusione.
- Una pressione elevata al cubilotto può segnalare una carica troppo compatta od un eccesso di vento.
- Un rapporto CO/CO<sub>2</sub> anomalo corrisponde ad un rapporto coke/carica metallica non adeguato.

Tra le strumentazioni di impiego recente si possono considerare di grande aiuto la lettura continua della temperatura della ghisa al becco di colata, effettuata con cellula fotoelettrica e la determinazione immediata del carbonio equivalente effettuata con analisi termica della curva di raffreddamento della ghisa.

### Scoria

In un cubilotto a marcia acida il rapporto di basicità  $\frac{CaO + MgO}{SiO_2}$  normalmente è mantenuto sul valore di

0,7 ÷ 0,8. La quantità di fondente (CaCO<sub>3</sub>) è variata fra 2 ÷ 4% della carica metallica oppure fra il 30 ÷ 40% del coke di carica, in funzione dei residui sabbiosi aderenti al bocchame di ritorno ed alla quantità di coke.

Per rendere la scoria fluida, per avere il coke ben pulito e quindi più attivo, per avere una migliore reazione con la ghisa e facilità di evacuazione della scoria è bene tenere presente il diagramma CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ed i punti in cui si hanno i composti più bassofondenti che corrispondono all'area tratteggiata del diagramma (fig. 46).

### Carica metallica

In considerazione della buona disponibilità alla carburazione ed alla costanza dei valori di analisi, è possibile effettuare cariche con oltre il 60% di acciaio che, opportunamente dosate nei componenti, possono servire alla preparazione di ghisa grigia, malleabile e sferoidale.

### Marcia basica

Il buon successo del cubilotto a vento caldo con marcia acida ha incoraggiato l'applicazione dello stesso procedimento al cubilotto con marcia basica.

Con la marcia basica sono stati ottenuti buoni risultati soprattutto in caso di fusione continua, protratta anche per alcune settimane.

Il rivestimento del forno è costituito unicamente da una pigiata carboniosa in corrispondenza del crogiolo, analogamente a quanto praticato negli altiforni.

Sopra gli ugelli di rame, raffreddati con circolazione di acqua, non si applica alcun rivestimento, in quanto il mantello del forno è protetto all'esterno da un velo di acqua continua (fig. 47).

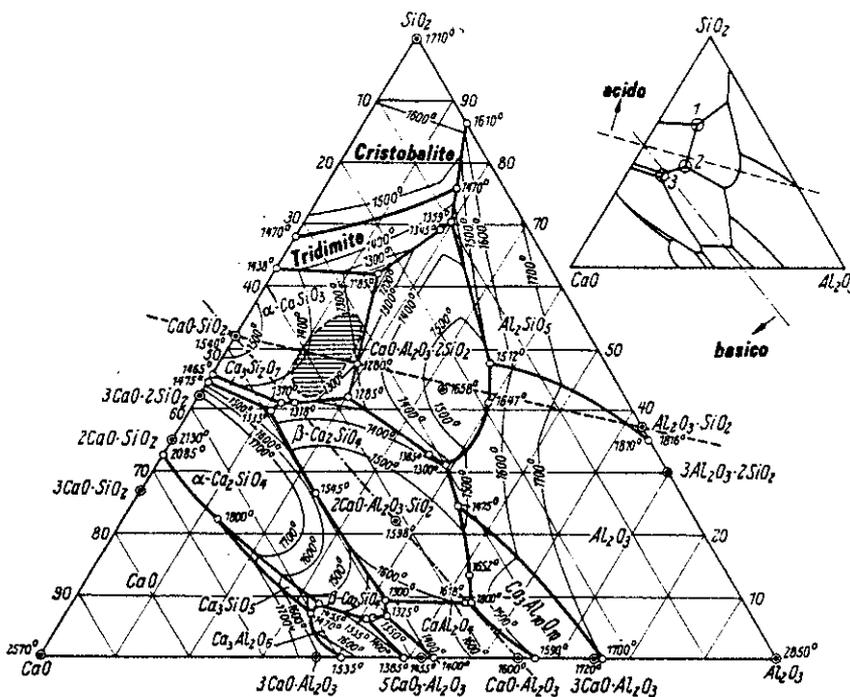


Fig. 46 - Diagramma Rankin delle scorie.

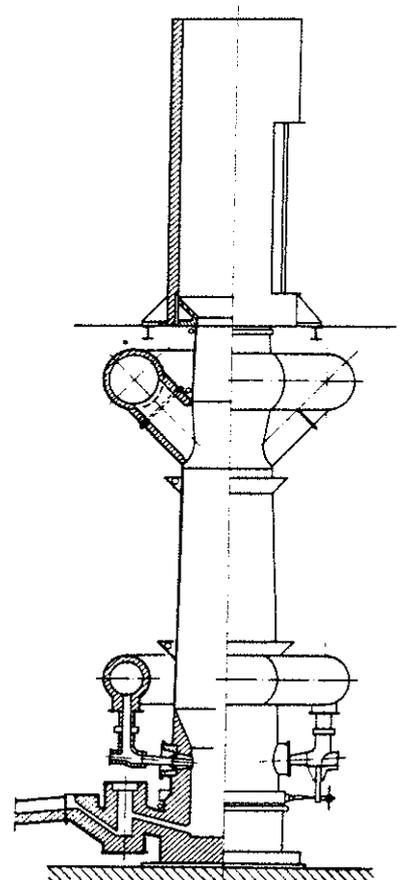


Fig. 47 - Cubilotto a vento caldo predisposto per la marcia basica.

Come già detto, gli ugelli con raffreddamento ad acqua permettono di mantenere costante il diametro del forno. Man mano che il rivestimento iniziale della zona di fusione fonde, è sostituito dalla scoria basica che vi aderisce grazie al forte raffreddamento del mantello esterno.

Un separatore delle scorie a forma di sifone mantiene in forno una parte delle scorie ad alta basicità.

La ghisa fusa passa attraverso questo strato, si dissocia e si desolfora.

Un cubilotto, come quello caratterizzato sopra, è in grado di lavorare con una scoria esattamente precalcolata mediante l'aggiunta in carica di adatti materiali scorficanti. Si può lavorare con scorie ed alta basicità risultanti da condizioni riducenti di fusione e da elevate temperature del vento 873 K (600 °C) ed altre. Queste scorie dopo raffreddamento si disgregano in polvere bianca, praticamente esente da ossidi metallici.

È così possibile ottenere una desolfurazione spinta con tenore di zolfo nella ghisa dello 0,01% circa.

Il cubilotto a vento caldo a marcia basica permette di ottenere una ghisa di elevata qualità, anche partendo da materiali di carica di minimo costo.

Una carica può essere costituita da rottame di acciaio (pacchetti fortemente ossidati), scarti, ritorni, spuntature, ecc.

I principali vantaggi del cubilotto basico a vento caldo possono essere così riassunti: buona carburazione e desolfurazione della ghisa, depurazione del bagno metallico, possibilità di esercizio continuo della fusione.

È una soluzione adatta nei casi in cui occorra fondere grandi quantità di ghise con qualità costante. Il suo impiego è possibile nelle fonderie produttrici di getti di ghisa con elevato tenore di carbonio, come quelle che producono lingottiere per acciaierie, tubi centrifugati, radiatori e getti per meccanica pesante.

Grazie alla purezza ed al basso zolfo la ghisa proveniente da questo cubilotto può essere utilizzata anche per produrre ghisa sferoidale.

Questi impianti non sono economici per le normali fonderie. Il tempo ridotto di fusione e la necessità di cambiare tipo di ghisa creano delle difficoltà, in quanto la composizione delle scorie deve essere adattata al tipo di ghise da produrre.

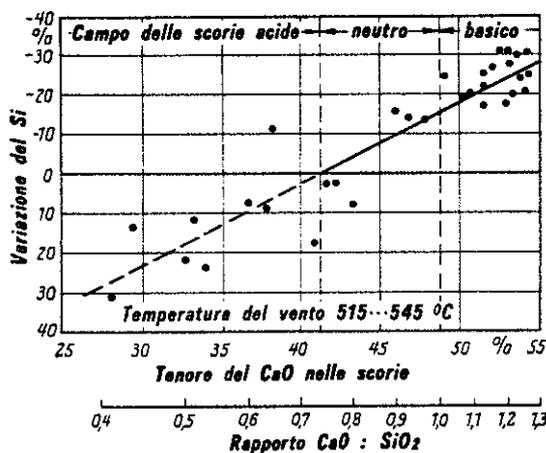


Fig. 48 - Relazione tra il calo di silicio ed il rapporto  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ , secondo De Sy e Doat.

La composizione delle scorie è particolarmente importante per l'esercizio del cubilotto a marcia basica.

Aumentando la basicità, aumenta il carbonio nella ghisa, mentre lo zolfo è ridotto in proporzione. A parità di composizione le scorie si comportano diversamente nei riguardi del silicio al variare della temperatura.

Una scoria molto basica ed a bassa temperatura provoca un calo molto forte del silicio, mentre una scoria avente la stessa composizione e temperatura più elevata può portare alla riduzione della silice; di conseguenza, con un minimo calo per ossidazione, si potranno ottenere anche elevati tenori di silicio nella ghisa (fig. 48).

### Cubilotto con doppio ordine degli ugelli

Questo sistema *storico* è stato recentemente ripreso da studiosi russi, tedeschi ed inglesi con principi diversi.

I tedeschi dell'Institut für Giesserei Technik puntano sulla teoria secondo la quale l'aria fredda o calda immessa attraverso gli ugelli dell'ordine superiore sistemati sopra la zona di fusione ad un livello di temperatura di 1.173 ÷ 1.273 K (900 ÷ 1.000 °C) brucia il CO in CO<sub>2</sub> in modo che tutto il potere calorifico del coke si sviluppa nel cubilotto, cioè si realizza una post-combustione del CO.

Gli inglesi della British Cast Iron Research Association (BCIRA) sostengono che, per ottenere i migliori risultati, il vento deve essere diviso in quantità circa uguale tra i due ordini di ugelli sistemati a 915 mm di distanza, cioè sotto la zona di fusione. Questo metodo aumenta l'altezza efficace della dote e quindi realizza condizioni migliori per il passaggio del calore quando le goccioline di ghisa attraversano la dote.

Gli studiosi della BCIRA hanno concluso che:

- La condotta di un cubilotto con due ordini di ugelli consente una più elevata temperatura della ghisa al becco di colata, per un determinato consumo di coke oppure una riduzione del consumo di coke per una determinata temperatura della ghisa, insieme ad un aumento della produzione oraria.
- Per il migliore rendimento del sistema, il vento deve essere diviso ugualmente tra i due ordini di ugelli, correttamente distanziati.
- Nelle condizioni studiate, in un cubilotto da 760 mm di diametro, la temperatura della ghisa può essere aumentata di 45 ÷ 50 °C rispetto allo stesso cubilotto operante con un solo ordine di ugelli, a parità di altre condizioni.
- A parità di vento il consumo di coke può essere ridotto del 20 ÷ 30% e la produzione oraria aumentata del 10 ÷ 20% in funzione della temperatura della ghisa.
- Il cubilotto a due ordini di ugelli a parità di coke di carica, aumenta il tenore di carbonio, aumenta leggermente il tenore di manganese e riduce leggermente il tenore di silicio e di zolfo.
- La distanza migliore tra i due ordini di ugelli è di 915 mm indipendentemente dal diametro del forno.
- I vantaggi presentati da questo metodo sono attribuiti, senza troppa convinzione, ad una riduzione delle perdite di calore nei gas del cubilotto e ad un migliore scambio di calore nel passaggio del metallo in gocce attraverso la dote.

Uno schema di cubilotto con doppio ordine di ugelli è rappresentato in fig. 49.

Anche per il metodo tedesco, della post-combustione del CO, sono dichiarati analoghi aumenti della temperatura della ghisa oppure risparmi di coke con aumenti della produzione oraria legati evidentemente al miglior pre-riscaldamento della carica.

### Cubilotto con vento arricchito di ossigeno

Solo recentemente si sono verificate condizioni tecniche ed economiche per il rilancio di questo vecchio processo applicato al cubilotto.

Il metodo è semplice. Una quantità misurata di ossigeno puro è iniettato nel vento del cubilotto.

Il tenore di ossigeno del vento può essere variato dal 21% (aria atmosferica) fino al 26% (5% di ossigeno aggiunto). Con questo arricchimento di ossigeno la temperatura della zona di combustione aumenta di circa 20 °C per ogni unità percentuale di ossigeno aggiunto.

Il rapporto di combustione  $\eta$ , diminuisce con l'aumentare dell'ossigeno nel vento, cioè prevale la reazione  $C + O_2 \rightarrow CO_2$ , fortemente esotermica sull'altro  $C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$  meno esotermica e diminuiscono pure i gas di scarico che inevitabilmente asportano calore dalla zona di combustione.

Da notare che per la combustione di 1 kg di carbonio in aria atmosferica si formano 8,9 m<sup>3</sup> di gas, mentre per combustione in ossigeno puro si formano soltanto 1,87 m<sup>3</sup> di gas.

L'arricchimento del vento può essere effettuato in tre modi:

- In continuazione, per ottenere un risparmio di materie prime.
- In continuazione, per aumentare la produzione oraria.
- Ad intermittenza, per realizzare avviamenti rapidi ed una più efficace regolazione del cubilotto.

I benefici ottenuti sono massimi controllando tre variabili: portata del vento, tenore di ossigeno del vento e modalità di arricchimento (in continuazione o ad intermittenza).

Risparmi notevoli di materiali di carica (coke) sono ottenuti riducendo il vento ed aggiungendo 2 ÷ 3% di ossigeno in continuazione.

Per esempio, un vento di 280 m<sup>3</sup>/min contiene 59 m<sup>3</sup>/min di ossigeno. Con un arricchimento del 2% di ossigeno (5 m<sup>3</sup>/min) il vento può essere ridotto a 255 m<sup>3</sup>/min (con 54 m<sup>3</sup>/min di ossigeno). Sommando 54 + 5 m<sup>3</sup>/min di ossigeno si ha che 59 m<sup>3</sup>/min di ossigeno continuano ad entrare nel cubilotto anche se il vento è ridotto del 9% e quindi con minore volume di fumi e minore quantità asportata di calore sensibile. Un aumento di produzione si ottiene mantenendo il vento normale ed aggiungendo in continuazione il 3 ÷ 4% di ossigeno.

Per esempio aggiungendo il 3% di ossigeno ad un vento di 280 m<sup>3</sup>/min si hanno 71 m<sup>3</sup>/min di ossigeno che entrano nel cubilotto, dei quali 59 provenienti dal vento e 12 dall'ossigeno aggiunto. Per ottenere questa quantità di ossigeno, occorrerebbe soffiare 335 m<sup>3</sup>/min di vento. Si ha quindi un aumento di produzione oraria del 20%, in confronto con le condizioni normali (vento 280 m<sup>3</sup>/min).

I vantaggi dell'arricchimento del vento con ossigeno possono essere così sintetizzati:

- Risparmio di coke di carica.
- Riduzione del calo del silicio.
- Possibilità di eliminare o ridurre la ghisa in pani (se più costosa).
- Ghisa più calda al becco di colata.
- Temperatura più alta in forno e minori inconvenienti di marcia.
- Ridotto volume dei gas di scarico.

Il diagramma a rete per effetto dell'impiego di ossigeno subisce uno spostamento verso destra e verso l'alto.

Nel caso dell'impiego di vento caldo l'1% di ossigeno aggiunto corrisponde a circa 356 K (83 °C) di riscaldamento del vento.

### Cubilotto con aggiunta di carburo di calcio

Negli anni '50 furono fatte le prime ricerche sistematiche con aggiunta nelle cariche del cubilotto di carburo di calcio per saldatura (produzione di acerilene).

Successivamente si sperimentò un carburo speciale a basso punto di fusione (composizione eutettica). Il carburo è aggiunto nella misura dell'1 ÷ 8% nella carica ferrosa e consente di ridurre la carica di coke. Si parla di un risparmio di coke fino al 25%. Con la riduzione del coke si ha una corrispondente riduzione dello zolfo nella ghisa.

La favorevole azione del carburo di calcio sulla desolfurazione dipende da un elevato grado di saturazione del carbonio della ghisa, in quanto soltanto in questo caso il carburo di calcio si scinde in calcio e carbonio invece che in CaO e C e si lega con S.

La produzione oraria aumenta corrispondentemente alla diminuzione della carica di coke.

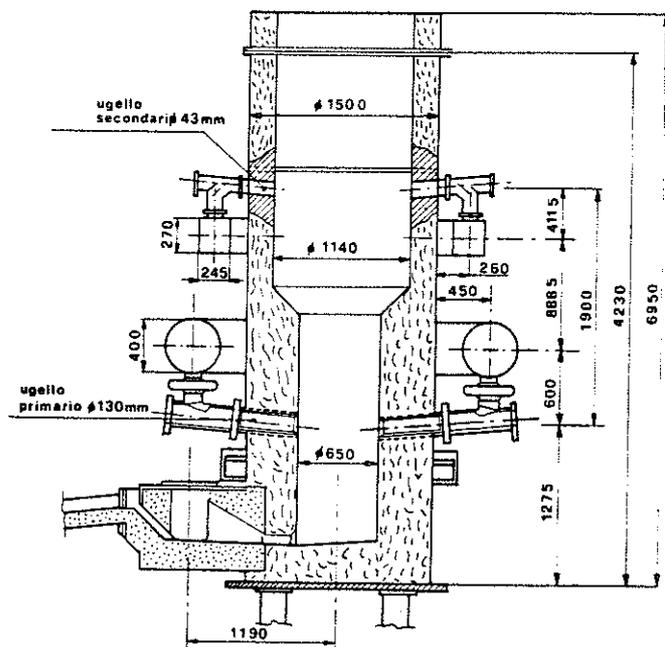


Fig. 49 - Cubilotto a vento caldo con preriscaldatore indipendente modificato per post-combustione.

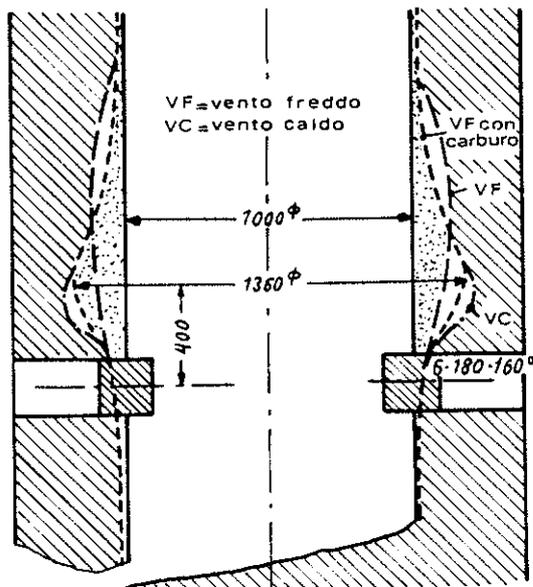


Fig. 50 - Usura del refrattario per aggiunta di carburo in carica.

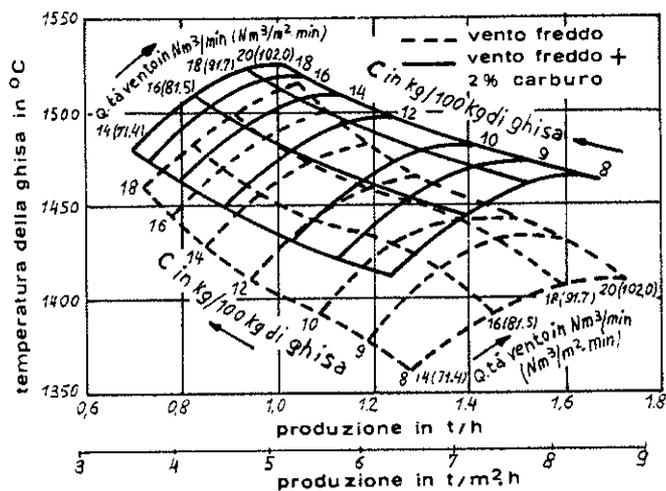


Fig. 51 - Diagramma a rete per aggiunta del 2% di carburo di calcio.

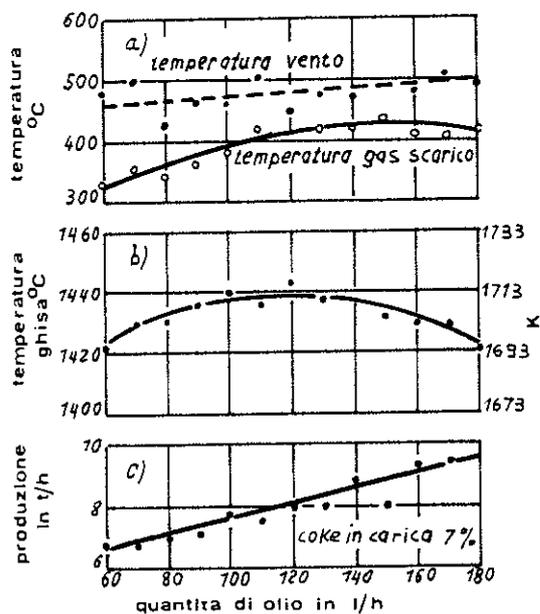


Fig. 52 - Aumento della produzione per aggiunta di olio combustibile con 7% di coke di carica.

L'aumento della temperatura della ghisa consente una migliore carburazione e riduce in generale i cali. A motivo della formazione di CaO in seguito a decomposizione del carburo di calcio, l'aggiunta di castina può essere ridotta anche del 50%.

Senza riduzione del coke di carica con una aggiunta del 4% di carburo di calcio alla prima ed alla seconda carica si ha un rapido riscaldamento del forno e già all'inizio si può spillare ghisa calda.

Con l'aggiunta di carburo di calcio nel cubilotto a vento freddo si ha una variazione dell'erosione del rivestimento refrattario. Mentre con la marcia normale l'erosione si verifica per una certa estensione sopra il piano degli ugelli, nel caso dell'aggiunta di carburo di calcio corrisponde un poco a quanto si verifica nel cubilotto a vento caldo.

La zona di fusione è più profonda e più stretta in altezza (fig. 50).

In fig. 51 è rappresentato il diagramma a rete di un cubilotto che marcia con l'aggiunta del 2% di carburo di calcio. Il diagramma subisce uno spostamento verso l'alto e leggermente verso sinistra.

### Cubilotto con bruciatore ausiliario ad olio combustibile

In generale si può dire che questo sistema fornisce risultati paragonabili a quelli che si ottengono con un cubilotto a doppio ordine di ugelli, ovviamente per quest'ultimo senza l'aggravio del costo del combustibile.

Un caso tipico è rappresentato in fig. 52. Il cubilotto lavora con il 7% di coke di carica e tenori crescenti di olio bruciato nell'unità di tempo. In queste condizioni si è ottenuto un aumento di produzione oraria fino al 45%. La caduta della temperatura della ghisa è spiegata con il fatto che, per elevate quantità di olio bruciato nell'unità di tempo, la combustione non avviene regolarmente. I bruciatori ausiliari possono essere collocati sul piano degli ugelli o su un piano superiore.

### Cubilotto con bruciatori supplementari a metano

Si deve distinguere tra i cubilotti che marciano con bruciatori ausiliari nei quali il coke è sostituito in parte dal gas ed i cubilotti che marciano esclusivamente a metano.

Uno studio tedesco è stato effettuato su un impianto rappresentato in fig. 53.

Partendo da una normale carica di coke del 15% sono stati successivamente sostituiti il 20%, 40% e 60% dell'energia del coke con l'energia del metano. Inoltre è stata determinata l'altezza ottimale del bruciatore. Il metano è stato bruciato completamente in camere di combustione esterne al forno.

Sono stati ottenuti i seguenti risultati (fig. 54): stabilita una temperatura di 1.753 K (1.480 °C), sufficiente per ottenere una ghisa metallurgicamente accettabile, si è trovato che, per l'impianto considerato, si poteva sostituire il 40% dell'energia del coke con quella del metano senza provocare variazioni di temperatura. Il metano impiegato è risultato in media di 55 m³/t di ghisa.

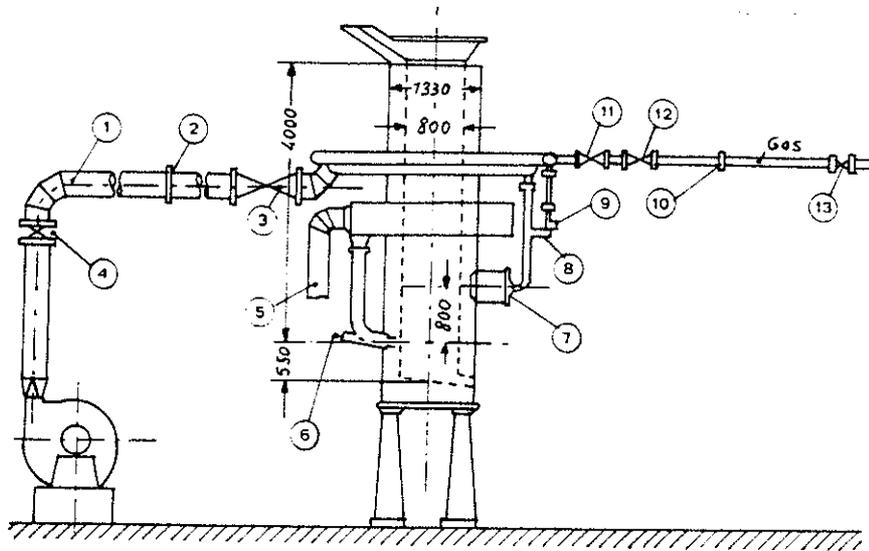


Fig. 53 - Cubilotto con riscaldamento supplementare a metano.

- 1 - Aria di combustione per gas.
- 2 - Diaframma di misura.
- 3 - Regolatore pressione aria.
- 4 - Valvola magnetica di chiusura.
- 5 - Aria di combustione per coke.
- 6 - Ugello vento freddo.
- 7 - Bruciatore di gas.
- 8 - Miscelatore.
- 9 - Regolatore miscela aria-gas.
- 10 - Diaframma di misura.
- 11 - Equilibratore di pressione.
- 12 - Sicurezza magnetica gas-aria.
- 13 - Valvola.

In queste condizioni la produzione oraria ottimale era del 27,3% più alta di quella con il 15% di coke senza metano. Questa produzione era di 5,6 t/h. Le curve della produzione oraria e della temperatura sono relativamente piatte. Si può quindi variare la produzione oraria entro un largo intervallo senza sensibili variazioni di temperatura. La condotta del cubilotto è flessibile.

Il tenore di carbonio, passando dal 15% di coke di carica al 9% di coke più il metano (equivalente al rimanente 6% di coke) è diminuito dal 3,6% al 3,4%. Il silicio è passato da 1,83% a 1,75%.

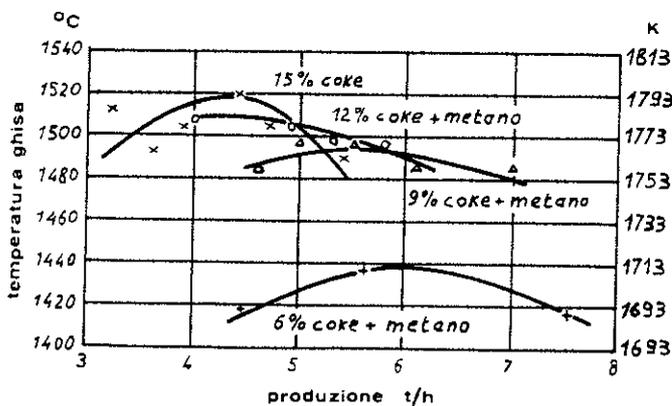


Fig. 54 - Diagramma temperatura-produzione per diverse percentuali di coke di carica (con bruciatori ausiliari a metano).

Di conseguenza il grado di saturazione è passato da 0,99 a 0,95. Il tenore di manganese è passato da 0,68% a 0,65%. Lo zolfo è risultato direttamente proporzionale al coke di carica. Il tenore di FeO nella carica è aumentato con la diminuzione del coke di carica e l'aumento del metano. La temperatura della ghisa è rappresentata dalla fig. 55.

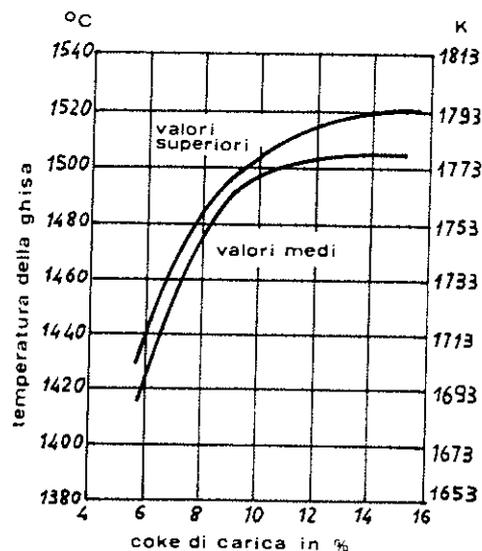


Fig. 55 - Temperatura della ghisa in funzione della carica di coke (con bruciatori ausiliari a metano).

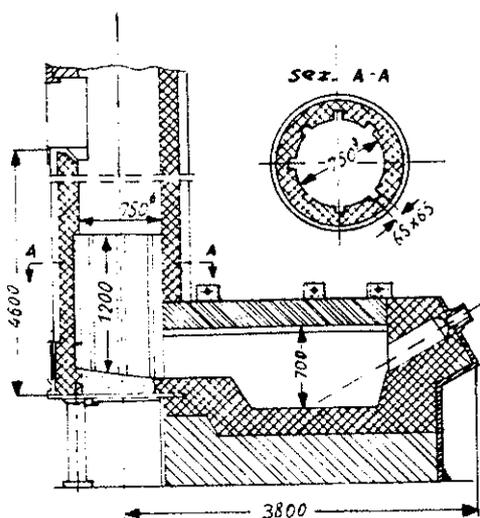


Fig. 56 - Cubilotto a gas.

Da tutte le ricerche finora effettuate si ricava che la sostituzione del coke con il metano ha dei limiti. Infatti, in presenza di coke, per tenori crescenti di metano, è sempre più forte la produzione di gas di generatore e cioè è richiesta una quantità sempre maggiore di calore per la riduzione dei prodotti di combustione del metano ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  in  $\text{CO}$  o  $\text{H}_2$ ). La conseguenza è l'abbassamento della temperatura della ghisa al di sotto dei limiti ammissibili.

Una spiegazione è la seguente: nel cubilotto in condizioni normali per la reazione dell'ossigeno dell'aria con il carbonio del coke si forma  $\text{CO}_2$  come prodotto primario della combustione. La  $\text{CO}_2$  che sale in controcorrente rispetto alle cariche di coke è ridotta in  $\text{CO}$ . Questo processo assorbe calore e consuma carbonio del coke.

Così nella zona di immissione del metano si ha un relativo impoverimento di coke ed una sproporzione rispetto al vento che entra dagli ugelli. A causa dell'eccesso di vento la temperatura della zona di combustione è sfavorevolmente influenzata.

I bruciatori ausiliari hanno tutti il notevole svantaggio che l'energia introdotta va in parte perduta ed il processo di combustione del coke è disturbato dal consumo di carbonio per la riduzione dei prodotti della combustione del metano.

### Cubilotto a metano

La versione a gas del cubilotto è stata riproposta dai russi negli anni '60 con particolarità costruttive del forno che lo fanno somigliare molto al cosiddetto forno Flaven (fig. 56).

Un'altra versione costruttiva è presentata dal forno Dakez per il quale sono dichiarati consumi di  $110 \div 120 \text{ m}^3$  di gas da  $35,573 \text{ MJ/kg}$  ( $8,500 \text{ kcal/kg}$ ) di ghisa, temperature di  $1.673 \div 1.693 \text{ K}$  ( $1.400 \div 1.420 \text{ }^\circ\text{C}$ ) e cali del  $10\%$  C (fig. 57).

Gli inglesi negli anni '70 hanno posto e mantenuto in funzione un forno a gas più simile al cubilotto normale a coke. Il forno può marciare a propano, olio o metano escludendo il coke.

La zona di fusione è delimitata in altezza da una griglia a fasci di tubi costruiti in materiale resistente al calore e raffreddati all'interno ad acqua. Dopo la griglia è posto uno strato di materiale speciale a base di grafite in forma di blocchi; sopra questo strato appoggiano le cariche metalliche. La fusione è ottenuta mediante il calore sviluppato da una serie di bruciatori a gas propano, disposti su tutta la circonferenza del mantello del cubilotto, dotati di apparecchiature per le singole regolazioni di portata di gas, aria, pressione.

La ghisa liquida, che si raccoglie nel crogiolo sottostante la griglia, è carburata mediante iniezione di grafite (resa  $40\%$ ), ottenuta con lancia ad immersione a flusso continuo.

Si raggiungono temperature di spillata di  $1.673 \div 1.703 \text{ K}$  ( $1.400 \div 1.430 \text{ }^\circ\text{C}$ ). La produzione del cubilotto descritto è di  $4 \div 5 \text{ t/h}$ . Non si ha aumento di zolfo.

Il forno a gas presenta oscillazioni di temperatura e di composizione chimica inferiori a quelle del forno a coke.

Si ha il vantaggio di una minore quantità di emissioni. Si sono misurate  $4 \text{ kg/h}$  di polveri emesse e cioè  $1 \text{ kg/t}$  di ghisa.

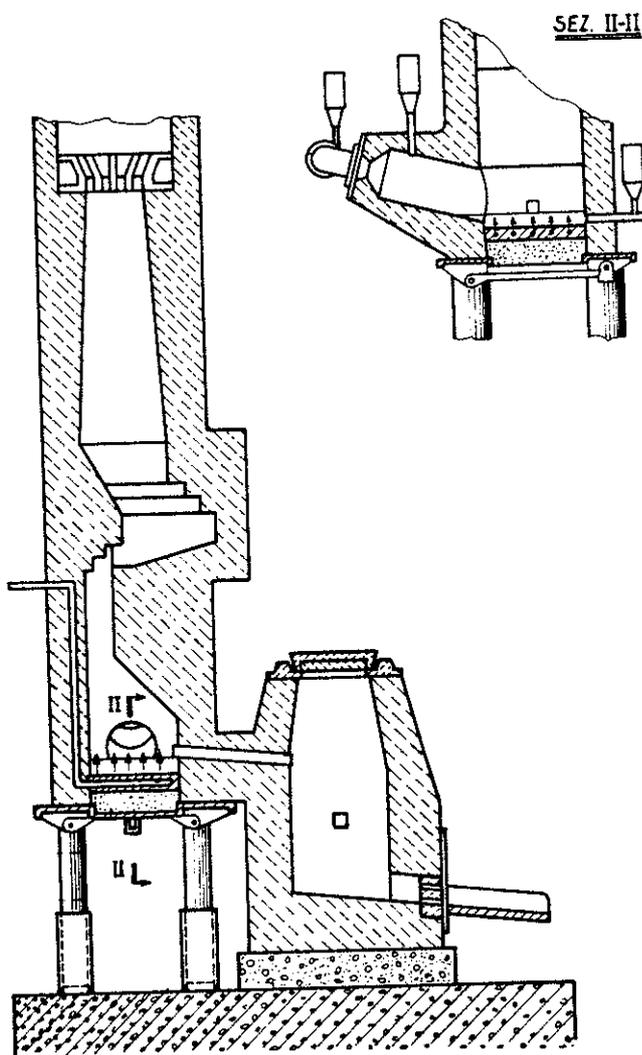


Fig. 57 - Cubilotto a gas (forno Baku).

## FORNI AD INDUZIONE

### ORIGINI E SVILUPPI

Prescindendo dal fatto che il primo forno ad induzione fu costruito<sup>(3)</sup> verso il 1903 per la fusione dell'acciaio, le origini e gli sviluppi di questo forno nel campo della fusione della ghisa risalgono al 1942 con il forno senza nucleo od a media frequenza (M.F.)<sup>(4)</sup> già usato da più di un decennio per l'acciaio, e subito dopo l'ultima guerra mondiale con il forno a bassa frequenza (B.F.) con canale<sup>(5)</sup> ed il forno a bassa frequenza senza canale<sup>(6)</sup> impropriamente detto *a crogiolo*. Si può perciò dire che le origini e gli sviluppi del forno ad induzione per la ghisa sono storia recente e, se si vuole essere più precisi, per il suo vero sviluppo e la sua intensa applicazione in questo campo, è storia di questo dopo guerra.

Per maggiore chiarezza si riportano gli schemi di principio di questi 4 tipi di forni fondamentali (figg. 58-59-60-61), dai quali sono derivati altri forni fusori (d'attesa, di surriscaldamento, di alimentazione e speciali), funzionanti secondo le più moderne tecniche richieste dalle tecnologie di fonderia e dalle sempre più rigorose esigenze metallurgiche della fonderia di ghisa.

Il forno della fig. 58 è il prototipo dei forni ad induzione a B.F. con canale; quello della fig. 59 è il prototipo dei forni ad induzione a M.F.; quello della fig. 60 è derivato dal forno con canale Ajax-Wajtt, passando da canale verticale a canale orizzontale od inclinato e risale al 1952, mentre quello della fig. 61 è derivato dal forno Jacoviello passando da alimentazione a M.F. (500 ÷ 10.000 Hz) ad alimentazione a B.F. (< 60 Hz) cioè, frequenza di rete, e risale anch'esso alla stessa data.

Per quanto applicazioni di forni ad induzione nel campo fusorio della ghisa vi fossero state prima e durante la guerra, un vero e proprio sviluppo si è verificato dopo il 1952 con l'avvento dei suddetti 2 tipi di forni a B.F. che si sono in seguito sviluppati in modo diverso, l'uno come forno di attesa e surriscaldamento dando origine all'avanzato forno elettrico o forno di attesa, e l'altro come forno fusorio vero e proprio, dando origine ad altre interessanti applicazioni fusorie.

La fonderia dispone oggi di una vasta gamma di forni ad induzione capaci di soddisfare le fondamentali esigenze fusorie in molte piccole, medie e grandi fonderie, specialmente dove si richiede un prodotto di qualità.

Le maggiori applicazioni di questi forni sono avvenute nei Paesi europei della Comunità, negli USA, in Giappone, in Inghilterra, in Russia e nei Paesi dell'Est. In Italia, dove la sensibilità dei fonditori verso questi forni è stata all'avanguardia, si contano oggi circa 220 forni fusori del tipo a B.F. senza canale per una potenza elettrica complessiva di 150 MW, e circa 190 forni di attesa per una potenza elettrica complessiva di circa 75 MW.

Sia il forno ad induzione con canale che il forno ad induzione senza canale (*coreless*), hanno avuto anche in quest'ultimo decennio importanti modificazioni ed applicazioni; il principio fondamentale sul quale è basato il loro funzionamento è quello del trasformatore elettrico con il secondario in corto circuito.

<sup>(3)</sup> Forno Kjellin, siderurgista svedese.

<sup>(4)</sup> Forno Jacoviello e forno Northrup.

<sup>(5)</sup> Forno Calamari.

<sup>(6)</sup> Forno Junker.

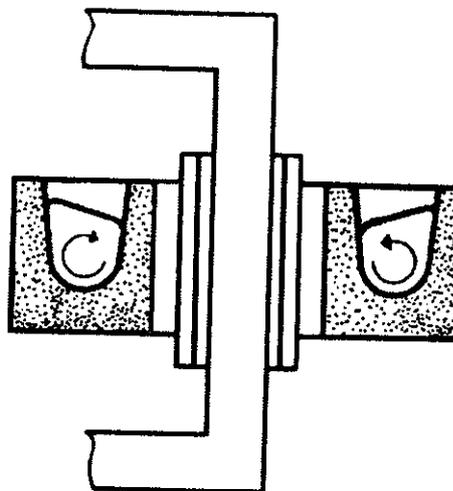


Fig. 58 - Schema di principio del forno ad induzione a B.F. con canale scoperto.

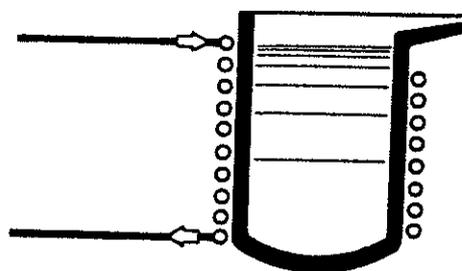


Fig. 59 - Schema di principio del forno ad induzione a M.F.

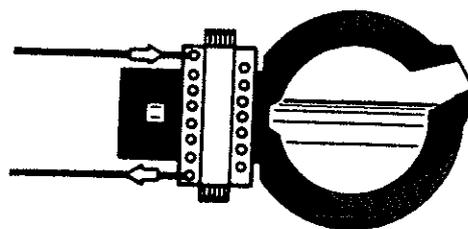


Fig. 60 - Schema di principio del forno ad induzione a B.F. con canale chiuso.

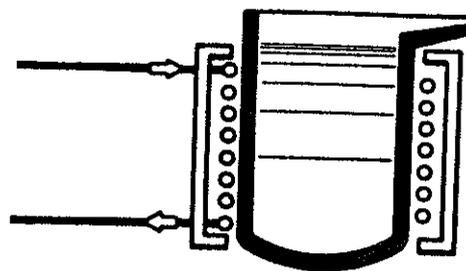


Fig. 61 - Schema di principio del forno ad induzione a B.F. senza canale.

Il fenomeno di trasformazione dell'energia elettrica in calore per i forni con canale è quello di una corrente indotta che percorrendo la spira secondaria trasforma l'energia elettrica in calore secondo la nota legge di Joule  $W = I^2R$ .

Nei forni senza canale il fenomeno fisico è lo stesso, ma la spira secondaria non è costituita da un canale, bensì da una equivalente spira nell'interno del bacino che si considera tubolare per tutta l'altezza del metallo fuso, percorsa da corrente indotta con intensità decrescente dalla superficie perimetrale verso l'interno. Si può così affermare in linea di principio che dal punto di vista elettrico e funzionale i forni con canale sono forni ad induttanza costante, mentre quelli senza canale (a bacino) sono forni ad induttanza variabile, per cui le apparecchiature elettriche di alimentazione saranno differenti tra loro.

## CLASSIFICAZIONE

Nella presente classificazione si prenderanno in esame due categorie di forni ad induzione con canale e senza canale. Per ciascuna di esse i forni sono elencati in ordine di applicazione e di sviluppo nel campo della fusione della ghisa. Si vedrà che nello stesso tempo detta classificazione risulta effettuata anche secondo i valori di frequenza impiegata (B.F. per i forni con canale, B.F. per i forni senza canale e M.F. per i forni senza canale a frequenza compresa tra 60 e 10.000 Hz). Per semplicità di interpretazione si illustra questa classificazione graficamente.

Nella fig. 62 sono indicati: forni con canale e forni senza canale od a crogiolo.

I forni con canale, che sono sempre a B.F., si dividono in due categorie: forni fusori, forni di attesa. I forni senza canale possono essere a B.F. a frequenza intermedia (tri-frequenza e doppia tri-frequenza) ed a M.F. Quelli a B.F. sono i più impiegati per la fusione della ghisa, quelli a

tri-frequenza sono più indicati per l'acciaio, mentre quelli a M.F. sono stati sino ad oggi impiegati più che altro per la fusione delle ghise o acciai speciali. I forni a M.F. si dividono in due gruppi, a seconda che siano alimentati a frequenza costante (con gruppo convertitore elettromeccanico rotante) oppure a frequenza variabile (con gruppo convertitore elettronico statico). Una classificazione di forni non ha la funzione di indicare il tipo di forno *optimum* per una determinata operazione fusoria, ma quella testé esaminata consentirà di descrivere organicamente gli aspetti costruttivi, funzionali, applicativi e di conduzione dei vari tipi di forni in essa compresi e le operazioni metallurgiche relative.

## CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE

Seguendo la classificazione dei forni ad induzione per ghisa ed acciaio, si esamina ora l'aspetto costruttivo e funzionale rispetto al modo di trasformazione dell'energia elettrica in calore di ciascun tipo di forno, con l'intento di descrivere detti forni nei loro aspetti costruttivi principali applicando, nello stesso tempo, una appropriata nomenclatura delle parti fondamentali che li compongono.

### Forni con canale

Si può dire che tutti i tipi di forni ad induzione con canale (canale aperto, canale verticale, canale orizzontale od altro) sono forni a B.F. e sono capaci di fondere e surriscaldare la ghisa anche a temperature dell'ordine di 1.823 K (1.550 °C). Ma il tipo di forno che ha dato i migliori risultati pratici di affidabilità è il forno *con canale ad inclinazione variabile* con bacino ad asse orizzontale (fig. 63) (bacino a botte). Questo tipo di forno è più comunemente impiegato nella fonderia di ghisa, limitatamente ed in casi speciali, come forno fusorio e più largamente come forno di attesa nelle diverse forme ed applicazioni. Tra i forni ad induzione è il più semplice

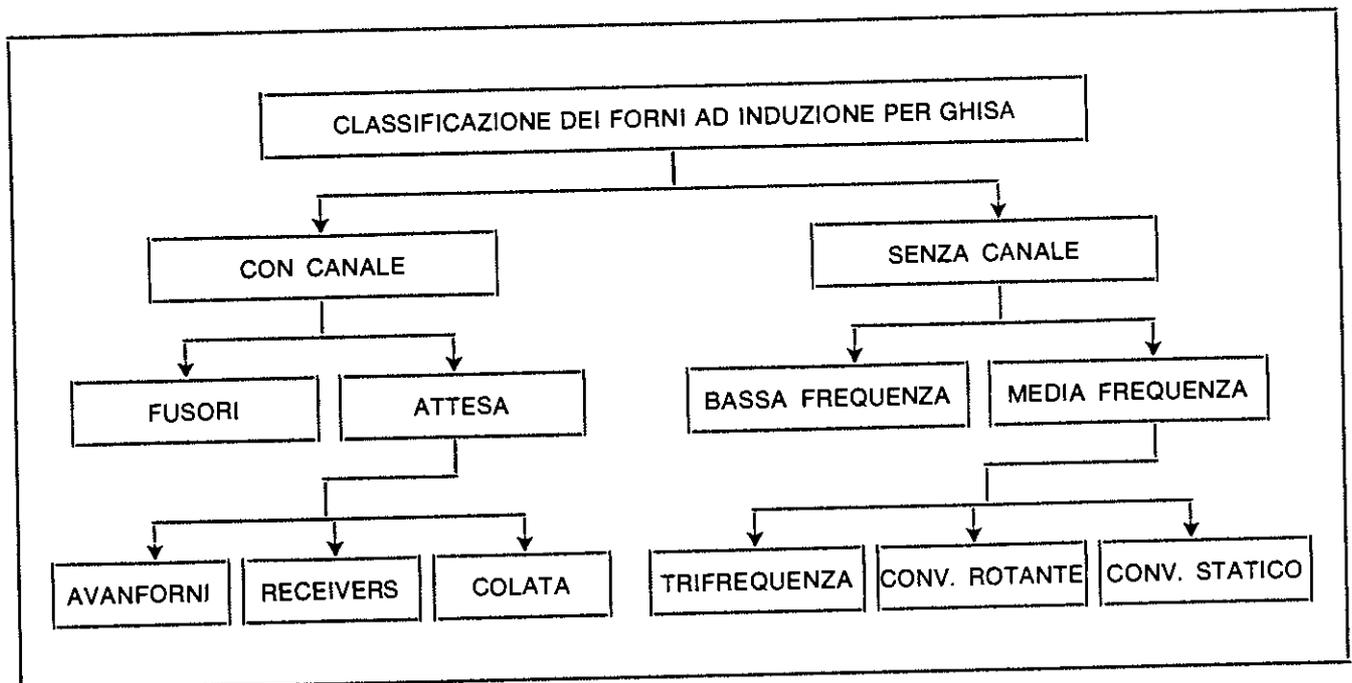


Fig. 62 - Classificazione dei forni ad induzione.

ed è quello che offre il migliore rendimento elettrico, il minore consumo, il minore ingombro ed il minore costo di installazione. A causa dei canali secondari soggetti ad otturazioni e rotture, non è detto però che esso sia anche il migliore forno per fondere la ghisa, ed in seguito si vedrà per quali ragioni. I forni con canale possono essere monofasi o trifasi, con uno o più induttori.

Un impianto di forno ad induzione con canale è generalmente costituito da:

- Apparecchiatura elettrica di alimentazione, comando e controllo.
- Forno propriamente detto.

#### Apparecchiatura elettrica

L'alimentazione elettrica di un impianto di forni con canale è tra le più semplici e può essere fatta a bassa tensione (B.T. 380 V) od a media tensione (M.T. 11.000 ÷ 30.000 V); distinta in B.T. per potenze sino a 300 kW circa ed in M.T. per potenze superiori.

Indipendentemente dal fatto che il forno sia monofase o trifase, l'alimentazione di linea è quasi sempre trifase, salvo per piccole potenze inferiori a 100 kW. Date le sue caratteristiche elettriche elevate, il fattore di potenza ( $\cos \varphi$ ) è superiore a  $0,60 \div 0,70$  per cui una modesta batteria di condensatori è sufficiente per un rifasamento contrattuale ad un  $\cos \varphi \approx 0,80$  in Italia, e  $0,95$  generalmente all'estero. In ogni caso vi è sempre un autotrasformatore elettrico a gradini per la regolazione della potenza (fig. 64).

La regolazione automatica della temperatura non è ancora stata attuata per certe difficoltà di realizzazioni pratiche, ma è ritenuto che un controllo saltuario della stessa con coppie termoelettriche ad immersione sia più pratico e sufficiente.

#### Forno propriamente detto

È generalmente costituito da una incastellatura fissa di acciaio ed una incastellatura rovesciabile, ruotante su rulli od a mezzo di cilindri oleodinamici, sulla quale è fissato il bacino o crogiolo, sia pure ad asse verticale o ad asse orizzontale (a botte). A questo sono applicati uno o più induttori che a loro volta possono essere fissi al bacino od intercambiabili e comprendono: la carcassa, il nucleo magnetico, la bobina primaria, il canale secondario, un sistema di raffreddamento ad acqua o ad aria, oppure misto acqua-aria. Il bacino e gli induttori sono rivestiti di materiale refrattario.

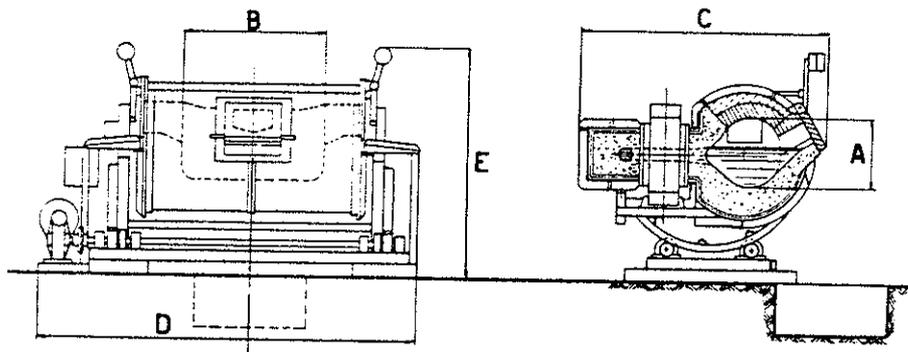


Fig. 63 - Forno ad induzione con canale ad inclinazione variabile.

#### Forni fusori

Le caratteristiche principali, che conferiscono al forno con canale ad inclinazione variabile o con bacino a botte la preferenza rispetto alle tradizionali esecuzioni a bacino verticale, sono: l'eliminazione della pressione metallostatica sui canali che consente una maggiore sollecitazione termica, la posizione dei canali posti sempre sulla superficie del bagno che consente una più rapida fusione, la forma del bacino chiusa che consente di aumentare il rendimento termico e di raggiungere le alte temperature necessarie.

Il forno è essenzialmente costituito da un bacino di fusione, da uno o più induttori montati su opportune incastellature basculanti su rulli di rotazione oppure rovesciabili a mezzo di cilindri oleodinamici.

Allo scopo di migliorare la loro affidabilità questi forni sono costruiti con un solo induttore monofase sino a  $300 \div 500$  kW, e con due o più induttori per potenze superiori. Nel primo caso l'apparecchiatura di alimentazione comprenderà un sistema di equilibratura del carico monofase/trifase, mentre nel secondo caso l'alimentazione sarà trifase con carico praticamente equilibrato.

Gli induttori possono essere del tipo fisso o del tipo intercambiabile. Il rivestimento refrattario in pigiata refrattaria può essere acido, basico o neutro. Il raffreddamento dell'induttore e dei canali può essere ad acqua, ad aria, o misto. Comunque, il consumo di acqua è sempre

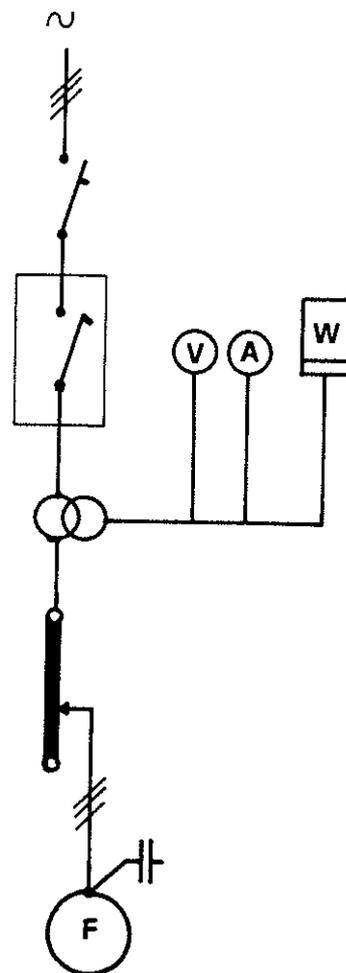


Fig. 64 - Schema elettrico di alimentazione trifase del forno ad induzione con canale.

assai limitato e tale da non richiedere un impianto di raffreddamento a circuito chiuso.

Questi forni fusori sono generalmente impiegati per piccole produzioni di ghise speciali, ma sono state costruite anche unità fusorie di grande capacità (10.000 kg, 2.000 kW) e si tende ad arrivare a induttori di 3.000 kW di potenza.

Nella tab. XXIII sono riportate le principali caratteristiche tecniche generali di alcuni tipi di forni fusori ad induzione con canale allo scopo di mettere in evidenza i rapporti capacità/potenza, le produzioni ed i consumi indicativi.

Una delle caratteristiche interessanti dal punto di vista metallurgico è che i moti convettivi del bagno fuso sono molto limitati in confronto agli altri tipi di forni. Per contro, certi materiali (torniture e simili) possono essere fusi soltanto con notevole difficoltà ed appunto per mancanza di agitazione del bagno fuso. Questi forni hanno una limitata applicazione come forni fusori e sono stati largamente sviluppati come forni di attesa.

#### Forni di attesa

Il forno ad induzione di attesa è generalmente a bacino orizzontale (a botte), e deriva, come già detto, dal forno ad induzione con canale ad inclinazione variabile. La principale caratteristica di questi forni, che li distingue dai forni fusori, è il rapporto capacità/potenza che è molto più grande. Tuttavia questo rapporto nei forni di attesa è differente tra forni di attesa per mantenimento in temperatura, e forni di attesa per surriscaldamento.

Alcuni tipi di forni di attesa sono muniti di sistema di colata automatica o semiautomatica a tampone, ed altri di sistema di colata a pressione di gas dove un dosatore automatico di pressione spinge la quantità di ghisa fusa voluta attraverso un tubo di colata. La manovra può essere manuale od automatica.

I forni di attesa con canale sono maggiormente impiegati nelle grandi fonderie e perciò sono quasi sempre di media e grande capacità.

Nella tab. XXIV sono riportate le principali caratteristiche generali di alcuni forni di attesa per mantenimento e le caratteristiche per forni di attesa e surriscaldamento di 373 K (100 °C). Anche in questi casi sono in evidenza i rapporti capacità/potenza, le produzioni, i surriscaldamenti ed i consumi.

I forni di attesa possono essere:

- Direttamente accoppiati al forno fusorio (cubilotto, forno ad arco, forno ad induzione *coreless* od altro)

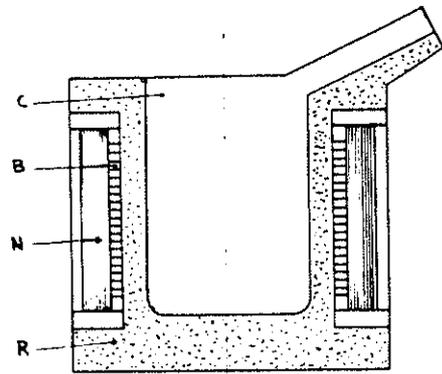


Fig. 65 - Schema di un forno ad induzione a crogiolo.

C - Crogiolo  
B - Bobina  
N - Nucleo magnetico  
R - Refrattario

con canali di colata a mezzo dei quali riceve la ghisa fusa. La caratteristica principale di tale accoppiamento sarà quella di permettere le colate saltuarie senza interrompere l'alimentazione della ghisa dal forno fusorio.

- Indipendenti dal forno fusorio per i quali l'alimentazione di ghisa fusa avviene a mezzo di siviere trasportabili. La caratteristica principale, in questo caso, è quella di avere una appropriata bocca di caricamento che può essere lo stesso becco di colata.

#### Forni senza canale (a crogiolo)

I forni ad induzione senza canale che interessano la fonderia di ghisa si dividono in tre categorie: bassa frequenza (50 ÷ 60 Hz); media frequenza (500 ÷ 10.000 Hz); frequenze intermedie (tri-frequenze 150 ÷ 180 Hz, bi-trifrequenze 300 ÷ 450 Hz). Non si prenderanno in esame i forni ad alta frequenza (oltre 20.000 Hz) perché non interessano industrialmente la fusione della ghisa.

I forni a B.F. sono quelli che, sino ad oggi, hanno trovato maggiore impiego per la ghisa, ma con l'evolversi dell'elettronica e della metallurgia anche gli altri si vanno sempre più sviluppando in questo campo (fig. 65).

#### Forni a bassa frequenza

La classificazione delle frequenze in elettrotermia stabilisce che la B.F. è la frequenza di rete (50 Hz per l'Eu-

Tabella XXIII - Principali caratteristiche tecniche di alcuni forni fusori ad induzione con canale.

Potenza kW	Capacità kg	Produzione kg/h	Consumo kWh/t	Temperatura K (°C)	Ingombri esterni (approssimativi) mm
80	150	100	620	1.723 (1.450)	1.600 x 2.200 x 2.300
120	200	165	600	1.723 (1.450)	1.800 x 2.600 x 1.500
160	300	260	580	1.723 (1.450)	2.000 x 2.800 x 1.600
300	800	500	550	1.723 (1.450)	2.000 x 3.100 x 2.000
500	1.500	900	520	1.723 (1.450)	2.400 x 3.500 x 2.200
800	3.000	1.500	500	1.723 (1.450)	2.600 x 3.800 x 2.500
1.200	5.000	1.800	500	1.723 (1.450)	2.600 x 4.000 x 2.600
1.500	10.000	2.800	500	1.723 (1.450)	3.000 x 4.500 x 2.800

Tabella XXIV - Principali caratteristiche tecniche di alcuni forni ad induzione con canale, per attesa e surriscaldamento.

Capacità t	Per mantenimento		Per surriscaldamento 373 K/h (100°C/h)		Ingombri esterni (approssimativi) mm
	Potenze kW	Consumo kWh/h	Potenze kW	Consumo kWh/t	
2	100	40	150	68	2.100 x 2.800 x 2.000
3	120	36	220	67	2.200 x 3.000 x 2.200
5	160	33	350	65	2.900 x 3.600 x 2.600
10	250	32	650	60	2.500 x 4.500 x 3.000
15	350	30	950	55	3.000 x 4.800 x 3.300
20	500	28	1.200	50	3.800 x 5.000 x 3.500
30	750	25	1.800	42	4.200 x 5.500 x 3.800
50	1.200	20	2.600	35	4.600 x 6.000 x 4.000

ropa e qualche Paese dell'America Latina, e 60 Hz per gli Stati Uniti ed altri Paesi).

I forni a B.F. senza canale, detti anche a frequenza di rete, appartengono a questa categoria e, per le loro caratteristiche elettriche e costruttive, si prestano molto bene per la fusione della ghisa: infatti è stato proprio il settore delle fonderie di ghisa dove essi hanno trovato il loro maggiore impiego e sviluppo.

Un impianto di forno a B.F. senza canale è generalmente costituito da:

- Apparecchiatura elettrica di alimentazione, comando e controllo.
- Apparecchiatura di rifasamento.
- Apparecchiatura di equilibratura del carico.
- Forno propriamente detto.
- Impianto di raffreddamento.

#### Apparecchiatura elettrica

Come per gli altri forni, l'alimentazione elettrica di un forno senza canale può essere a B.T. od a M.T.; è a B.T. per potenze sino a 300 kW circa ed a M.T. per potenze più alte. Il forno senza canale è sempre monofase, ma l'alimentazione della rete elettrica dovrà essere trifase e con carico praticamente equilibrato, per cui apposite apparecchiature per questi scopi saranno inserite nel circuito di alimentazione (fig. 66). Il comando ed il controllo del forno sono ottenuti in parte automaticamente dall'apposito quadro di manovra che solitamente è montato sulla stessa piattaforma del forno ed in vicinanza ad esso.

La potenza del forno è regolata a mezzo di un trasformatore a gradini con comando a distanza ed il collegamento tra linea di alimentazione e forno è fatto generalmente con cavi flessibili raffreddati ad acqua.

#### Rifasamento

Per le sue particolari caratteristiche elettriche costruttive (circuito magnetico aperto) il fattore di potenza di questo forno è molto basso ( $\cos \varphi = 0,15 \div 0,20$ ) per cui è richiesta una relativamente grande batteria di condensatori rifasatori (fig. 67). Una parte della batteria sarà costantemente inserita (batteria fissa) ed una parte sarà inserita e disinserita con il variare della potenza del forno (batteria variabile). Le batterie sono montate su appositi telai in vicinanza del forno ed hanno un notevole ingombro ed in alcuni casi sono raffreddate ad acqua o ad aria. La regolazione del fattore di potenza è normal-

mente ottenuta con apposito regolatore che mantiene il  $\cos \varphi$  prossimo all'unità ( $0,95 \div 0,98$ ). Le batterie di rifasamento non richiedono alcuna particolare manutenzione né consumano, in via di principio, energia elettrica.

#### Equilibratore di carico

Il forno a B.F. senza canale è sempre monofase con minime potenze elettriche dell'ordine di  $150 \div 200$  kW. È quindi necessario, per una razionale installazione, che

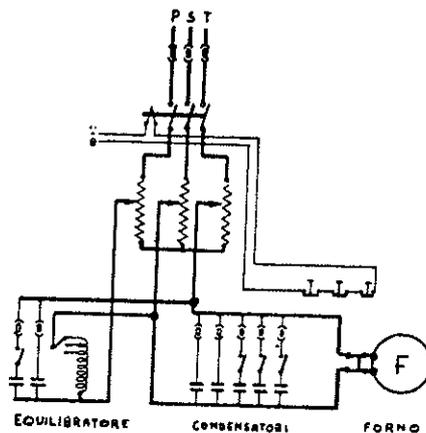


Fig. 66 - Schema elettrico di alimentazione del forno a B.F. senza canale.

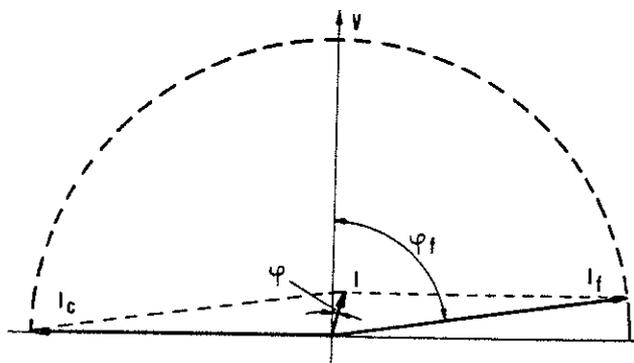


Fig. 67 - Diagramma vettoriale di rifasamento di un circuito elettrico molto induttivo.  
 $V$  = Tensione  
 $I_f$  = Corrente del forno  
 $I_c$  = Corrente dei condensatori  
 $I$  = Corrente di linea  
 $\cos \varphi_f$  = Fattore di potenza del forno  
 $\cos \varphi$  = Fattore di potenza della linea

sia alimentato dalla rete trifase. Questa esigenza è soddisfatta con l'installazione di un equilibratore di carico statico, il quale provvede a distribuire equamente il carico monofase sulle tre fasi di alimentazione. Questo apparato è costituito da una reattanza variabile e da un condensatore a valore costante, accoppiati elettricamente secondo lo schema della fig. 66 e l'operazione di equilibratura è automaticamente comandata da un apposito regolatore. Non avendo nessun organo in movimento, anch'esso non richiede alcuna particolare manutenzione.

### Forno propriamente detto

È generalmente costituito da una incastellatura fissa di acciaio ed una incastellatura rovesciabile rotante su appositi supporti a mezzo di cilindri oleodinamici, sulla quale è fissato l'induttore che a sua volta comprende: bobina induttrice, gioghi magnetici, rivestimento refrattario costituente il bacino (crogiolo).

Il coperchio è generalmente ancorato all'incastellatura mobile ed è comandato a distanza da appositi sistemi meccanici od oleodinamici.

La bobina induttrice costituisce l'elemento più importante del forno e dalla sua costruzione dipendono spesso la durata ed il buon funzionamento del forno stesso.

Essa è costruita con uno speciale profilato di rame elettrolitico a sezione irregolare cavo per la circolazione dell'acqua di raffreddamento. È generalmente costituita da più elementi di 2-3-4-5 spire ciascuno, collegati elettricamente in serie ed uniti idraulicamente in parallelo.

Ogni elemento è munito di controllo dell'acqua di circolazione (temperatura e portata) ed ogni anomalia di funzionamento è segnalata sul quadro di manovra con segnale ottico ed acustico.

Nei forni con potenza sino a  $400 \div 500$  kW circa, la bobina è unica, mentre nei forni con potenze maggiori la bobina è divisa in due o più parti collegate in parallelo. La costruzione della bobina deve essere vista sotto due aspetti: elettrico e meccanico. Il primo riguarda l'isolamento tra spira e spira, mentre il secondo si riferisce alla resistenza meccanica, dato che nel suo interno sono contenuti il rivestimento refrattario e la carica metallica.

Il bacino (o crogiolo) di refrattario, destinato a contenere la ghisa fusa, è pure un elemento importante per la vita del forno, per cui appositi apparati elettrici sono installati per controllare continuamente il suo stato di efficienza.

I gioghi magnetici disposti radialmente all'esterno della bobina hanno la funzione di guidare e rafforzare il flusso magnetico, ed aumentare il rendimento del forno.

### Impianto di raffreddamento

In tutti i tipi di forni ad induzione si rende necessario il raffreddamento degli induttori e, nel caso dei forni senza canale, la cosa è particolarmente importante per la grande quantità d'acqua necessaria ad assorbire il calore dissipato dalle perdite elettriche della bobina induttrice e quello dovuto alle perdite termiche del refrattario.

Normalmente l'acqua di raffreddamento entra in un collettore inferiore al quale fanno capo le entrate della bobina, percorre i vari settori in parallelo della bobina stessa per raccogliersi in un altro collettore superiore e passare allo scarico. Un impianto di questo tipo deve essere sempre munito di un serbatoio di riserva.

La pressione dell'acqua può variare da 405.300 Pa a 202.650 Pa (da 4 a 2 atm) tra piccoli e grandi forni, mentre la portata va da 2 a 15 e più  $m^3/h$  (fig. 68).

Data l'elevata quantità di acqua necessaria, nei forni di media e grande capacità si pone il problema del suo ricupero con circolazione a circuito chiuso. In questi casi l'impianto di raffreddamento (specialmente per più forni) è studiato nel contesto di tutto l'impianto idrico della fonderia o dello stabilimento.

Gli impianti di raffreddamento a circuito chiuso sono in prevalenza:

- Con scambiatore di calore acqua/acqua.
- Con scambiatore di calore acqua/aria.
- Con scambiatore di calore misto acqua/aria-acqua.
- Con torre di raffreddamento acqua/acqua-aria (acqua a circuito chiuso).

L'adozione di uno o dell'altro tipo di raffreddatore dipende da alcuni fattori come i costi dell'acqua, situazione dell'ambiente, disponibilità di acqua, scarichi dell'acqua.

Gli impianti sopra indicati si considerano impianti ausiliari alle installazioni di forni elettrici e sono generalmente costruiti da case specializzate in base ai dati elaborati dal costruttore dei forni, in collaborazione con l'utilizzatore sulla scorta degli elementi elencati e secondo le esperienze acquisite.

È importante anche adottare una alimentazione separata d'acqua di emergenza per garantire la continuità del raffreddamento in caso di guasti al circuito principale.

Nella tab. XXV sono riportate le principali caratteristiche tecniche generali di alcuni tipi di forni ad induzione a B.F. senza canale.

Due caratteristiche distinguono questi forni: la loro capacità che non può essere inferiore a 1.000 kg ed il fenomeno del rimescolamento della ghisa fusa (Stirring effect) che è molto accentuato. Queste caratteristiche li rendono perciò adatti per produzioni di media e grande capacità ed idonei anche alla fusione di rottami, torniture e sfridi di lavorazione.

Le capacità di questi tipi di forni fusori oscillano fra 1.000 kg con potenze di 300 kW e 60 t con potenze di 25.000 kW.

### *Forni a media frequenza*

In elettrotermia è considerata media frequenza la banda di frequenze comprese tra 60 e 10.000 Hz. Pertanto i forni fusori per ghisa che rientrano in questa banda di frequenze, si chiamano forni a M.F. e si dividono attualmente in tre categorie, a seconda del tipo di apparecchiatura impiegata per generare la M.F., e sono:

- Forni alimentati da convertitore statico a frequenza triplicata.
- Forni alimentati da convertitore rotante di frequenza.
- Forni alimentati da convertitore statico a tiristori.

Questi forni, nel campo della fusione della ghisa, hanno un ruolo meno interessante del forno a B.F., ma si ritiene utile esaminarli ugualmente anche in vista dei futuri sviluppi che potranno avere i forni a M.F. comandati a tiristori. La tab. XXVI riporta alcuni tipi di forni a M.F. con le relative caratteristiche tecniche.

Essi hanno in comune i componenti che costituiscono un impianto e, se pur diversi tra loro, sono:

Tabella XXV - Principali caratteristiche tecniche di alcuni forni ad induzione a B.F. senza canale (crogiolo).

Potenza kW	Capacità t	Produzione kg/h	Consumo kWh/t	Temperatura K (°C)	Superficie occupata (forno + cabina) m <sup>2</sup> ~
300	1	450	650	1.723 (1.450)	26
500	2	850	620	1.723 (1.450)	35
750	3	1.300	600	1.723 (1.450)	38
1.000	5	1.800	580	1.723 (1.450)	42
1.500	7	2.700	565	1.723 (1.450)	45
2.000	10	3.600	550	1.723 (1.450)	50
3.000	15	5.400	530	1.723 (1.450)	54
5.000	25	9.000	520	1.723 (1.450)	60
8.000	35	1.420	520	1.723 (1.450)	72
10.000	40	1.750	520	1.723 (1.450)	90

- Apparecchiatura elettrica di alimentazione, comando e controllo.
- Convertitore (o generatore) di frequenza.
- Apparecchiatura di rifasamento.
- Forno propriamente detto.
- Impianto di rovesciamento.
- Impianto di raffreddamento.

#### Forni a tri-frequenza

Sono forni identici ai forni a B.F. dai quali si differenziano solo per il valore della frequenza e della tensione di alimentazione. La frequenza del valore di 150 Hz (cosiddetta tri-frequenza) oppure  $2 \times 150 \text{ Hz} = 300 \text{ Hz}$  (bi-trifrequenza) (multipli di 300 sono possibili, ma non ammissibili per basso rendimento) è ottenuta con uno speciale trasformatore trifase a ferro saturo (fig. 69) oppure con reattore a ferro saturo, che costituiscono il convertitore di frequenza incluso nella stessa apparecchiatura elettrica di alimentazione e dalla stessa comandati.

La batteria di condensatori rifasatori sarà proporzionata allo sfasamento della corrente del forno (come si sa, a pari caratteristiche di un forno, il fattore di potenza diminuisce con il crescere del valore della frequenza) e costruttivamente sarà come quella dei forni a B.F.

Il forno vero e proprio, dal punto di vista costruttivo, è in tutto simile al forno a B.F. salvo piccoli particolari.

Le caratteristiche che lo differenziano sono: la possibilità di costruire unità con capacità minima di 300 kg anziché 1.000 kg e di avere un rimescolamento interno (stirring effect) assai più basso.

Altrettanto dicasi per l'impianto di rovesciamento e l'impianto di raffreddamento.

Con l'avvento del convertitore statico a tiristori, questo tipo di alimentazione è da ritenersi superata.

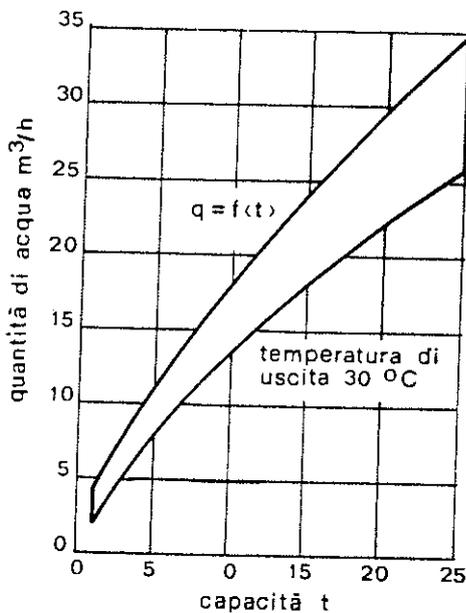


Fig. 68 - Consumo dell'acqua di raffreddamento dei forni a B.F. senza canale, in funzione della capacità.

Tabella XXVI - Principali caratteristiche tecniche di alcuni forni ad induzione a M.F.

Potenza kW	Capacità t	Produzione kg/h	Consumo kWh/t	Temperatura K (°C)	Superficie occupata (forno + cabina) m <sup>2</sup> ~
100	0,2	120	760	1.723 (1.450)	20
150	0,4	180	750	1.723 (1.450)	22
300	0,6	380	740	1.723 (1.450)	25
500	1,0	650	720	1.723 (1.450)	30
800	2,0	1.050	700	1.723 (1.450)	38
1.000	3,0	1.420	665	1.723 (1.450)	40
1.500	5,0	2.050	660	1.723 (1.450)	42
2.000	8,0	2.750	655	1.723 (1.450)	50
3.000	10,0	4.200	650	1.723 (1.450)	60

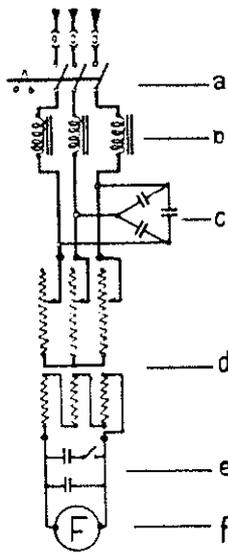


Fig. 69 - Schema elettrico del forno ad induzione a tri-frequenza.

### Forni con convertitore rotante

Nelle poche installazioni, fatte nel campo della ghisa, sono state impiegate frequenze da  $500 \div 4.000$  Hz, a seconda della capacità del forno; questi valori di frequenze richiedono particolari costruzioni sia del forno che dell'impiantistica relativa. Il convertitore di frequenza è costituito da un gruppo elettrico moto-generatore, normalmente ad asse verticale di costruzione speciale ad alta affidabilità, ed è comandato dalla stessa apparecchiatura elettrica di alimentazione la quale può essere a M.T. od a B.T. a seconda della potenza del forno.

La batteria di condensatori di rifasamento è pure di costruzione particolare, sia per gli elevati valori delle frequenze che delle tensioni in gioco. Per queste ed altre ragioni essi sono normalmente raffreddati ad acqua. Il forno propriamente detto richiede una speciale costruzione delle incastellature metalliche, dei gioghi magnetici e della bobina induttrice per evitare, a causa dell'alto valore della frequenza, perdite di flusso magnetico, riscaldamento delle parti metalliche esterne, con conseguente diminuzione del rendimento.

La bobina induttrice, pur avendo una costruzione simile a quella dei forni a B.F., è costruita con tubo di rame elettrolitico a sezione rettangolare con spessore uniforme. I gioghi magnetici, di lamierino magnetico a bassissime perdite, non sono montati su forni di piccola capacità (meno di 500 kg), ma sono opportuni per capacità più elevate. Sempre a causa dell'elevato valore della frequenza, il fattore di potenza di questi forni è di  $0,10 \div 0,12$ .

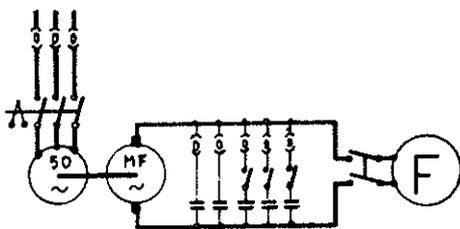


Fig. 70 - Schema elettrico di alimentazione del forno ad induzione a M.F. con convertitore rotante.

Sia l'impianto di rovesciamento che l'impianto di raffreddamento non si differenziano sostanzialmente dal punto di vista costruttivo da quello dei forni a B.F.

L'impianto elettrico a monte del convertitore di frequenza richiede particolari esecuzioni imposte dai valori delle frequenze in gioco (fig. 70).

### Forni con convertitore statico a tiristori

Dal punto di vista impiantistico e costruttivo una installazione di forno a M.F., comandato da convertitore statico a tiristori, si differenzia da una installazione comandata da convertitore rotante soltanto per il tipo di generatore di frequenza. I convertitori statici a tiristori sono apparecchiature elettroniche costituite da diodi controllati opportunamente collegati e regolati, racchiusi in quadri ad armadio per cui si presentano come le comuni apparecchiature elettriche protette, con i relativi strumenti di misura e controllo (fig. 71).

Fino ad oggi queste apparecchiature hanno interessato poco la fonderia di ghisa, ma è da prevedere che nei prossimi decenni, sia per la perfezione che i tiristori raggiungeranno, sia per il loro funzionamento automatico e sia per la versatilità che conferiscono a tutto l'impianto, l'interesse sarà sentito anche in questo campo, come lo è già oggi nei settori degli acciai speciali e degli acciai inossidabili.

## FUNZIONAMENTO ED APPLICAZIONI

In precedenza si è visto quali sono i fenomeni fisici su cui è basata la trasformazione dell'energia elettrica in calore. Si esaminerà ora come questo calore si trasmette alla carica nei diversi casi e come è utilizzato nell'intimo del funzionamento elettrotermico. L'argomento porterà a trattare anche delle applicazioni di questi forni sotto i diversi punti di vista dell'impiantistica, della produzione, delle grandezze, dell'ambiente e di altre considerazioni che si faranno, seguendo la classificazione esposta precedentemente.

### Forni con canale

Anche se gli impianti dei forni ad induzione con canale per la fusione della ghisa sono relativamente semplici, la loro messa in marcia ed il loro funzionamento sono piuttosto delicati soprattutto per il canale secondario che è soggetto ad ostruzioni, corrosioni e rotture a causa delle forti sollecitazioni termiche e meccaniche cui esso è sottoposto. Infatti è nel canale secondario che si genera il calore, il quale si trasmette alla carica soprastante da fondere per conduzione e per convezione; lo scambio termico tra metallo del canale e quello del bacino è favorito dai moti convertivi dovuti ai fenomeni elettrodinamici dell'induttore (fig. 72) e dal *pinch effect* (fenomeno della restrizione) che può essere più o meno esaltato, dipendendo dalla sollecitazione elettrica dell'indotto (canale).

I tre tipi caratteristici di questi forni (figg. 73-74-75) ritenuti idonei per la fusione della ghisa funzionano con tale principio ed hanno forma alquanto diversa uno dall'altro.

Il primo (fig. 73) ha il canale sul fondo in posizione verticale; il refrattario del fondo canale è sollecitato meccanicamente dalla colonna metallostatica sovrastante, rom-

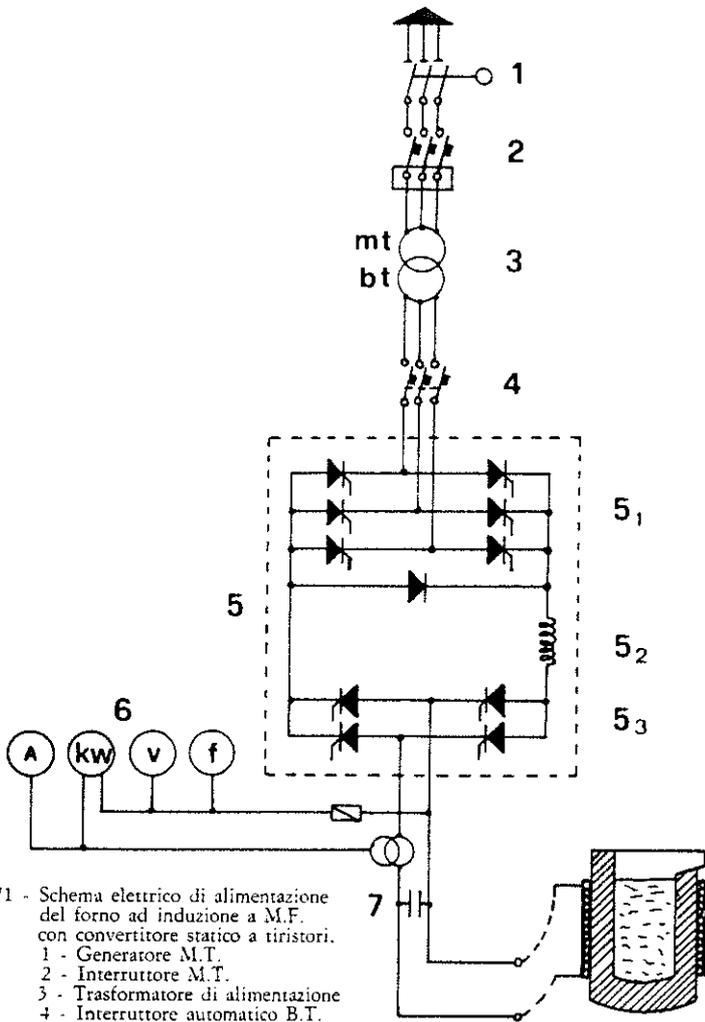


Fig. 71 - Schema elettrico di alimentazione del forno ad induzione a M.F. con convertitore statico a tiristori.  
 1 - Generatore M.T.  
 2 - Interruttore M.T.  
 3 - Trasformatore di alimentazione  
 4 - Interruttore automatico B.T.  
 5 - Convertitore  
 5/1 - Raddrizzatore  
 5/2 - Induttanza  
 5/3 - Invertitore  
 6 - Strumentazione  
 7 - Rifasamento  
 8 - Forno

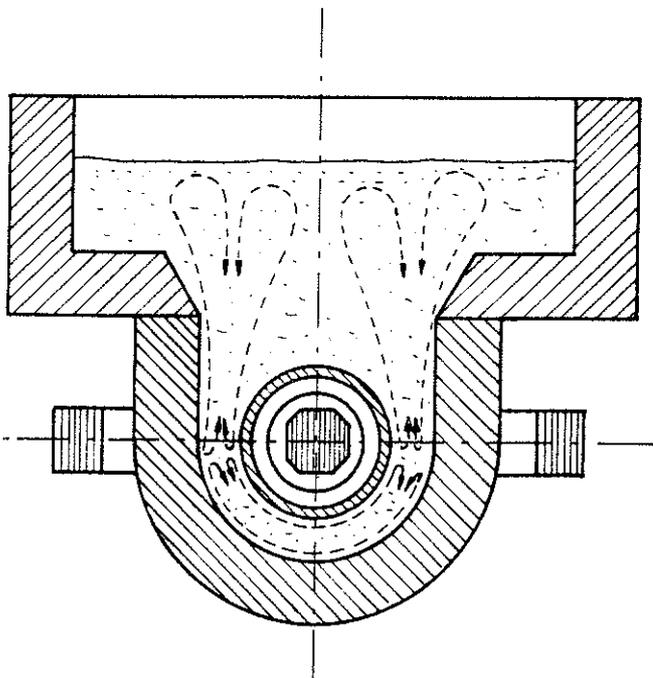


Fig. 72 - Moti convettivi nei forni ad induzione con canale.

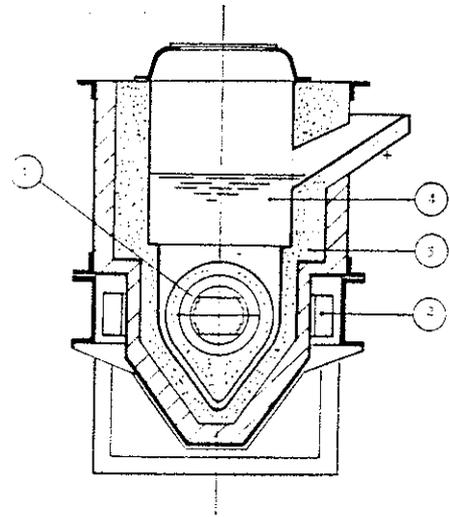


Fig. 73 - Forno ad induzione con canale verticale.  
 1 - Bobina induttrice  
 2 - Nucleo magnetico  
 3 - Canale secondario  
 4 - Bacino

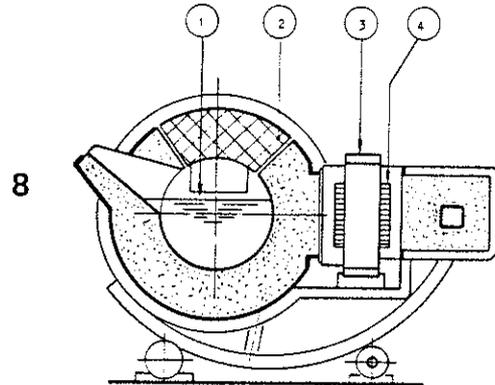


Fig. 74 - Forno ad induzione con canale orizzontabile (inclinazione variabile).  
 1 - Bacino  
 2 - Rivestimento refrattario  
 3 - Nucleo magnetico  
 4 - Bobina induttrice

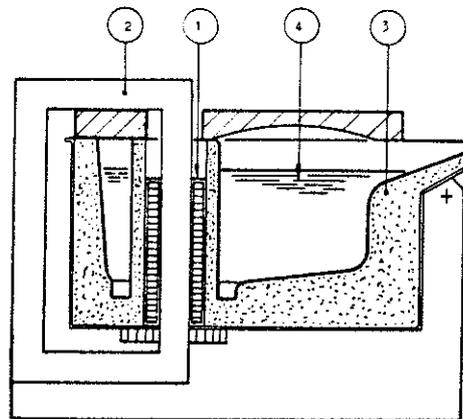


Fig. 75 - Forno ad induzione con canale aperto.  
 1 - Bobina induttrice  
 2 - Nucleo magnetico  
 3 - Rivestimento refrattario  
 4 - Bacino

pendosi facilmente: inoltre lo scambio di calore fra il metallo del canale e quello del bacino è difficoltoso e la differenza di temperatura tra i due punti è di  $150 \div 200^\circ\text{C}$ .

Il secondo (fig. 74) è basato sulla teoria che elimina la pressione metallostatica sul fondo, avendo il canale secondario in posizione variabile, ma sempre sulla superficie del bagno. Si riducono le sollecitazioni e si possono così raggiungere maggiori temperature, ottenendo una minore differenza di temperatura tra canale e bacino (inferiore a  $100 \div 150^\circ\text{C}$ ).

Il terzo (fig. 75) è un forno derivato dal forno con canale aperto e costruttivamente si presenta semplice e razionale, ma racchiude in sé due inconvenienti: lo scambio di calore tra il canale aperto ed il bacino è difficoltoso, il refrattario che costituisce la colonna centrale è rapidamente corrosa dai moti convettori elettrodinamici che in questo caso si manifestano in senso circolare anziché verticale.

Un forno ad induzione con canale può essere avviato in due modi: con metallo liquido o con metallo solido (avviamento da freddo); nel primo caso il canale è libero, mentre nel secondo caso il canale è pieno di metallo solido, cioè contiene la sagoma di ghisa.

#### *Avviamento con metallo liquido*

Dopo avere eseguito un certo periodo di essiccazione del refrattario con fiamma a gas od elettricamente e constatata l'efficienza di tutte le apparecchiature, si versa nel forno una certa quantità di ghisa fusa. Questa, riempiendo il canale secondario, dà al forno la possibilità di assorbire potenza e quindi di iniziare il funzionamento. Così chiuso l'interruttore di linea, dal quadro di comando si regola la potenza del forno manovrando opportunamente il commutatore del trasformatore di potenza e controllando gli assorbimenti di potenza e di corrente. Dopo un certo periodo ( $8 \div 24$  h) di stabilizzazione con ghisa liquida, si inizia l'introduzione delle cariche solide distribuite nel tempo in quantità proporzionale alla capacità del forno ed alla quantità di metallo già esistente nel bacino, regolando contemporaneamente la potenza del forno che, essendo una macchina elettrica ad impedanza costante, può funzionare anche a potenza praticamente costante. È importante evitare che durante il caricamento si formi nel forno il caratteristico crostone solido in superficie.

Durante la fase di caricamento il forno funzionerà a pieno carico con il massimo rimescolamento del bagno e questa condizione resterà ancora per un certo tempo per completare la fusione della carica e per surriscaldarla alla temperatura voluta che, però, non deve superare i  $1.823\text{ K}$  ( $1.550^\circ\text{C}$ ).

Si eseguono quindi le operazioni metallurgiche, la scorificazione ed il controllo della temperatura, per procedere quindi alla colata. Questa può avvenire a getto od a colata calma e può essere effettuata anche a distanza da un solo operatore. Un dispositivo automatico interrompe l'alimentazione nel forno appena inizia la colata, comunque l'operazione deve essere eseguita anche dall'operatore prima di iniziare la manovra.

Terminata la colata, il forno è riportato nella sua posizione di lavoro ed, avendo di solito lasciato una sufficiente quantità di ghisa liquida nel forno, le cariche solide possono riprendere subito. Il buon funzionamento del forno è indicato dagli strumenti di misura, come

kilowattmetro, amperometri, cosfmetro; in particolare gli amperometri danno un'indicazione sul comportamento del canale secondario e sul pinch effect. Un eccesso di assorbimento di corrente ( $> 30 \div +40\%$ ) vuol dire che il canale è consumato e si richiede il suo rifacimento. Un eccesso di oscillazione degli amperometri, con relativo aumento del fattore di potenza, indica che il canale si è ristretto. Un abbassamento di potenza vuol dire che il canale è ostruito.

Come deve essere fermato un forno ad induzione con canale sarà detto più avanti. Si deve tuttavia sapere subito che anche questa operazione può essere fatta prevedendo l'avviamento con metallo liquido o l'avviamento con metallo solido (avviamento da freddo). Nel primo caso il forno è vuotato completamente; nel secondo caso una parte di metallo (dote) si lascia raffreddare nel canale, procedendo secondo opportune regole che evitino la rottura del refrattario.

#### *Avviamento da freddo*

Il forno è stato predisposto per avviamento con solo metallo solido, lasciando nel canale la stessa sagoma di ghisa usata per eseguire il rivestimento refrattario. Prima dell'avviamento il forno è essiccato o comunque preriscaldato e la stessa sagoma di ghisa del canale può servire allo scopo, alimentando il forno elettricamente con minima potenza. Contemporaneamente, anche un'essiccazione con fiamma nel bacino può essere effettuata con cautela, a fiamma diffusa. Dopo questo periodo d'essiccazione si inizia ad introdurre nel forno piccole cariche e contemporaneamente ad aumentare la potenza sino a portare a fusione la sagoma e le cariche aggiunte, per poi procedere con cariche sempre più grandi man mano che si forma il bagno, aumentando contemporaneamente la potenza del forno sino al pieno carico.

Inizialmente i moti convettivi del metallo fuso sono abbastanza accentuati, essi favoriscono la velocità di avviamento e poi diminuiscono il loro effetto man mano che aumenta il livello del bagno.

Superata la fase di avviamento, il forno viene a trovarsi nelle condizioni di funzionamento descritte in precedenza e tutto poi procede nello stesso modo sino alla colata ed alla ripresa della successiva fusione.

È da notare che l'avviamento da freddo è sempre più pericoloso e difficile dell'avviamento con metallo liquido per cui, quando non è indispensabile, deve essere evitato.

#### *Forni fusori*

Come si è visto, i forni con canale possono partire sia con metallo liquido che con metallo solido, purché lo consentano certi particolari e caratteristiche costruttive.

D'altra parte l'avviamento da freddo di questi forni, in molti casi, è una esigenza inderogabile per quelle fonderie che non dispongono di altri forni fusori, come è il caso di molte piccole fonderie, dove questi forni sono più usati.

Il funzionamento di un forno fusorio con canale, durante una campagna fusoria, può così avvenire a marcia continua od a marcia discontinua; la marcia discontinua può, a sua volta, essere con arresto totale del forno, oppure passando dalla condizione di lavoro a quella di riposo ed attesa, lasciando il forno in funzione con una

potenza proporzionata al mantenimento liquido della ghisa contenuta. Il programma di marcia del forno durante una campagna fusoria è stabilito in base alle esigenze produttive della fonderia nel suo complesso ed è quasi sempre differente da un caso all'altro. Quello che invece è pressoché uguale in tutti i casi è il diagramma di assorbimento della potenza del forno durante una fusione (fig. 76). Osservando tale diagramma, si vede che il forno può assorbire la sua piena potenza per quasi tutta la durata della fusione, funzionando con un coefficiente di utilizzazione dell'80 ÷ 90%.

Si è già detto che il forno ad induzione con canale impiegato come solo forno fusorio non presenta interesse per la grande e per la media fonderia di ghisa, mentre può trovare impiego nelle piccole fonderie per ghise speciali.

### Forni di attesa

I forni di attesa sono avviati sempre con metallo liquido, per cui il loro funzionamento è più semplice e sicuro rispetto agli analoghi forni fusori.

La loro marcia può essere continua o discontinua a seconda del ciclo e del programma di produzione della fonderia. Di solito sono impiegati nelle medie e grandi fonderie con vari compiti come: attesa, surriscaldamento, contenitore, mescolatore od altro e ciascuna di queste applicazioni esige condizioni di funzionamento diverse uno dall'altro. Pertanto, non vi è un diagramma di marcia costante o ripetibile, comune a tutte le applicazioni, come è invece per i forni fusori.

Il loro impiego va sempre più diffondendosi nelle medie e grandi fonderie di ghisa, specialmente come avanzato forno per funzionamento in duplex con il cubilotto.

Si parlerà in modo particolareggiato dell'impiego dei forni di una certa grandezza, e cioè di quelli la cui capacità è superiore a 15 o 20 t.

Trattasi di uno dei primi tipi di forno elettrico comparso in fonderia, ma poi ha subito un'eclisse, dovuta alle difficoltà di esercizio, legate più che altro ai materiali refrattari impiegati.

Da oltre 20 anni la messa a punto di refrattari di alta qualità e di particolari tecniche costruttive stanno permettendo l'impiego sempre più massiccio di questo forno, anche nella fonderia di ghisa. Del resto si hanno notizie di forni con canale usati anche in fonderia d'acciaio. Le sue caratteristiche ne fanno essenzialmente un bacino di raccolta, dove la ghisa prodotta dall'installazione fusoria

è immagazzinata, omogeneizzata, portata alla giusta temperatura di colata e quindi mantenuta a questa temperatura.

Tale forno è perciò impiegato essenzialmente nell'esercizio in duplex, insieme con forni ad induzione a crogiolo, con cubilotti e con forni ad arco.

Dato il suo fine specifico, di fungere cioè da polmone tra installazione fusoria e linea di colata, la sua capacità deve essere relativamente grande. In genere si sceglie, come parametro per la sua capacità, un contenuto utile pari ad almeno due volte la produzione oraria del forno fusorio. Un forno con canale in duplex con un cubilotto da 8 ÷ 10 t/h dovrà avere quindi una capacità utile di 16 ÷ 20 t.

Per capacità utile si intende tutta la ghisa che si può spillare senza intaccare la dote di base o piede del bagno, vale a dire la ghisa necessaria per riempire i canali, il colletto di raccordo tra indotto e vasca ed una certa quantità ancora per compensare, con la pressione metallostatica, la spinta dei moti creati dal campo elettromagnetico dell'indotto. Un forno con canale della capacità utile di 20 t potrà così avere una capacità totale di 24 ÷ 27 t.

Questo, dunque, è l'impiego naturale del forno con canale, ma non mancano i casi di applicazione come forno fusorio, parzialmente ed anche totalmente fusorio.

In proposito si può citare il caso di una fonderia in cui il reparto fusione è costituito da una batteria di forni a crogiolo, precisamente 3 della capacità di 4 t, con una potenza installata di 700 kW. Questi forni eseguono la fusione di una carica composta da soli trucioli di ghisa, selezionati e preriscaldati a 873 K (600 °C) circa. Il caricamento dei trucioli avviene in continuo, tramite una macchina speciale collegata con il preriscaldatore. I forni suddetti hanno una produzione netta di 1,3 t/h. A lato di questa batteria si trova il forno con canale. Si tratta di un forno a tamburo, con due induttori sfalsati a 90°, ciascuno della potenza di 1.000 kW. La capacità utile del forno è di 56 t. Il caricamento avviene attraverso una porta a ghigliottina, situata sulla fronte opposta al becco di spillata. Gli attrezzi, che servono a caricare il forno, sono una pipa, per immettere la ghisa liquida proveniente dai forni a crogiolo, ed un canale vibrante per immettere la carica solida, formata esclusivamente dal boccame e dai ritorni di fonderia. Ogni mezz'ora si carica 1,3 t di ghisa liquida ed ogni 6 min è immersa una carica di 300 kg di boccame. Dal forno sono spillate ogni giorno da 100 a 120 t, lavorando su 2 turni. L'induttore dura 5 mesi circa ed è sostituito nel giro di 2 h. Il bacino ha una durata di 10 ÷ 12 mesi ed è riparato ogni 4 ÷ 5 d con il sistema a spruzzo, lungo la linea delle scorie, operando attraverso il portello di scorificazione posto lateralmente.

Si è citato il caso per confermare come sia oggi noto e praticato l'uso del forno con canale quale strumento fusorio in fonderia di ghisa.

Si è però del parere che questo, almeno allo stadio attuale dei refrattari, non sia il suo uso naturale e che gli esercizi non devono essere del tutto economici. Il rivestimento refrattario del forno è un rivestimento composito, formato da refrattari diversi a seconda delle zone di impiego e che necessita di particolari tecniche per la messa in opera. Se alla spesa si aggiunge quella delle riparazioni settimanali, il fatto che ogni 10 ÷ 12 mesi il forno dev'essere rifatto completamente, si vedrà che

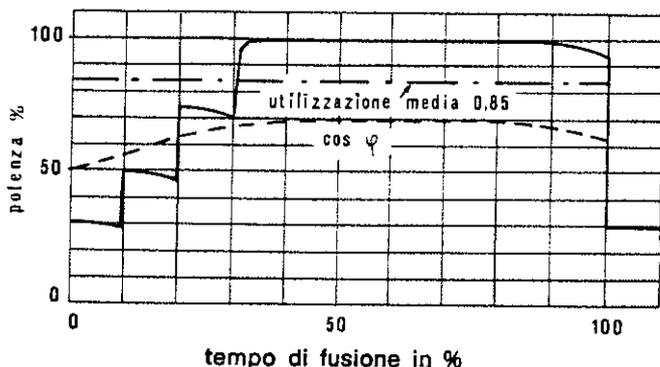


Fig. 76 - Curva caratteristica di potenza assorbita dal forno con canale durante una fusione.

tenendo conto della ghisa trattata la spesa varia da 1.000 a 1.500 Lit/t.

Perché i refrattari oggi in commercio possano sopportare la temperatura per lunghi tempi, è necessario che il calore sia asportato il più rapidamente possibile, e ciò si ottiene con un apposito circuito di raffreddamento applicato a tutta la superficie della cassa dell'induttore. Ma perché il raffreddamento sia efficace, bisogna che lo spessore del refrattario non sia molto grande. Esso, infatti, nelle parti più sottili non supera i  $10 \div 15$  cm.

Ora è necessario tener conto che nel canale non solo si sviluppano le temperature più elevate del forno, ma anche si hanno i movimenti vorticosi dovuti alle forze generate dal campo elettromagnetico. Tali forze sono così violente che potrebbero letteralmente espellere dal canale la ghisa liquida contenuta, se ad esse non contrastasse la pressione metallostatica del bagno sovrastante. È facile comprendere come l'azione erosiva della ghisa in movimento, unita a quella dell'alta temperatura, possano avere ben presto ragione della resistenza del refrattario, se non si limitassero ragionevolmente l'una e l'altra.

Ma vi sono anche altri motivi. Ogni fonditore sa che fondere significa produrre scorie. E le scorie aggrediscono il rivestimento refrattario della vasca, aderiscono ai sifoni d'ingresso e d'uscita della ghisa, persino nei canali dell'induttore. Si è infatti potuto notare, in un forno in duplex con cubilotti, che dopo un lungo periodo d'attesa, vale a dire dopo un certo numero di ore a bassa potenza, l'assorbimento elettrico dell'induttore possa a volte diminuire. Dando potenza, si nota come nel giro di poco tempo gli assorbimenti si riassettino su valori normali. Ciò significa che, durante l'attesa, una certa quantità di scorie ha aderito alle pareti del canale riducendone la sezione, mentre le stesse scorie sono poi state lavate via dalla corrente vorticoso del metallo messo in movimento dalla maggiore potenza inserita. Fondere inoltre significa caricare di tanto in tanto del metallo solido, in altre parole, aprire il forno dando così il passaggio all'aria che andrà ad arricchire di ossigeno l'atmosfera della vasca.

Di qui deriva un ulteriore incremento all'azione aggressiva delle scorie ed anche un'ossidazione del bagno stesso. Non va poi trascurata la difficoltà di correggere l'analisi o di procedere ad alligazioni di qualsiasi genere, a causa del movimento trascurabile sulla superficie del bagno.

### Forni senza canale

Come in tutti i forni ad induzione la parte più soggetta ad inconvenienti è il refrattario che contiene il metallo fuso, che in questo caso è il bacino (crogiolo) cilindrico verticale.

Nel bacino si sviluppano, infatti, i fenomeni che sono alla base della generazione e della diffusione del calore, e di questi fenomeni i due più importanti sono: la penetrazione (skin effect) ed i moti convettivi (stirring effect).

Il primo è espresso dalla relazione

$$\epsilon = 50 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \text{ in cm} \quad (19)$$

in cui:

- $\rho$  = resistività della ghisa;
- $\mu$  = permeabilità magnetica relativa;
- $f$  = frequenza della tensione di alimentazione.

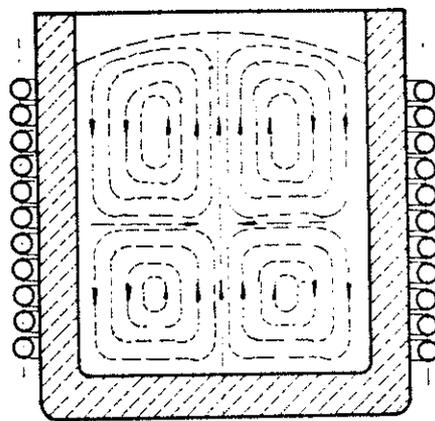


Fig. 77 - Moti convettivi nei forni ad induzione senza canale.

Si deduce che il coefficiente di penetrazione  $\epsilon$  è inversamente proporzionale al valore della frequenza.

I secondi si manifestano con la formazione di una protuberanza sulla superficie del bagno fuso, cosiddetta *duomo* (fig. 77); l'altezza  $h$  del duomo è un indice che valorizza indirettamente l'intensità dei moti convettivi; è espressa dalla formula empirica:

$$h = \frac{1}{\sqrt{f \cdot p \cdot \rho}} \alpha \quad (20)$$

dove:

- $f$  = frequenza della tensione di alimentazione.
- $p$  = peso specifico del metallo.
- $\rho$  = resistività del metallo.
- $\alpha$  = coefficiente che varia con la frequenza (per la ghisa alla frequenza di 50 Hz:  $\alpha = 16$ ).

Lo scambio termico tra la zona generatrice di calore e la carica da fondere avviene pressoché direttamente e quindi con più rapidità che non nei forni con canale.

### Forni a bassa frequenza

L'avviamento dei forni a B.F. può essere fatto da carica solida o da carica liquida dopo avere proceduto all'operazione di essiccazione del refrattario, usufruendo della stessa sagoma metallica del bacino scaldato elettricamente e di una fiamma a gas opportunamente impiegata, in modo da non provocare surriscaldi localizzati.

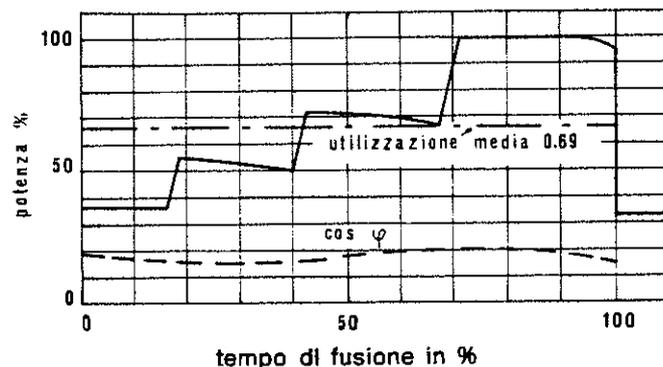


Fig. 78 - Curva caratteristica di potenza assorbita dal forno senza canale durante una fusione.

### Avviamento con carica solida

La carica è disposta sul fondo del bacino per una altezza di almeno  $\frac{2}{3}$  di questo, stipata e compatta il più possibile. Meglio se è usato un massello compatto con diametro il più possibile vicino a quello del bacino e con una altezza pari ad  $\frac{1}{3}$  o  $\frac{1}{2}$  dell'altezza di questo. Allimentando il forno in modo che assorba la massima potenza, la carica è investita dal flusso magnetico che, creando le note correnti indotte, trasformano l'energia elettrica in calore, scaldando la carica sino alla fusione. A questo punto i fenomeni della penetrazione e dei moti convettivi si sviluppano nella loro pienezza ed il forno può ritenersi avviato. Dalla compattezza della carica dipende il tempo di avviamento; è chiaro che, usando il massello prefabbricato, questo tempo è ridotto al minimo possibile, ma purtroppo è sempre lungo. In ogni modo si deve procedere al riempimento completo del forno per evitare shock termici nel refrattario.

### Avviamento con carica liquida

Avviene versando una certa quantità di ghisa fusa nel bacino in una o più volte, sino a riempirlo per almeno sino al 25 ÷ 50% della sua capacità nominale. Tale sistema di avviamento è ovviamente più semplice e più rapido dell'avviamento con carica solida, poiché il forno assume subito tutte le sue piene caratteristiche funzionali e può passare immediatamente a produrre. Anche in questo caso si deve procedere all'aggiunta di cariche solide o di ghisa fusa sino al completo riempimento del bacino in modo da evitare shock termici.

I forni ad impedenza variabile assorbono una potenza proporzionale alla quantità del metallo contenuto e, pertanto, funzionano a potenza variabile dall'inizio alla fine della fusione (fig. 78). Per questa ragione e per il fatto che l'avviamento con carica solida richiede molto tempo, durante una campagna fusoria, detti forni non devono essere vuotati completamente tra una colata e l'altra.

Dalla stessa formula (20) si vede che l'effetto dei moti convettivi è inversamente proporzionale alla frequenza e, quindi, esso è molto accentuato nei forni a B.F. Il fenomeno, che può essere regolato entro certi limiti agendo su alcuni parametri costruttivi, è un fenomeno positivo per la fusione della ghisa e dà al forno la caratteristica di rapido scambio di calore con la carica da fondere e di

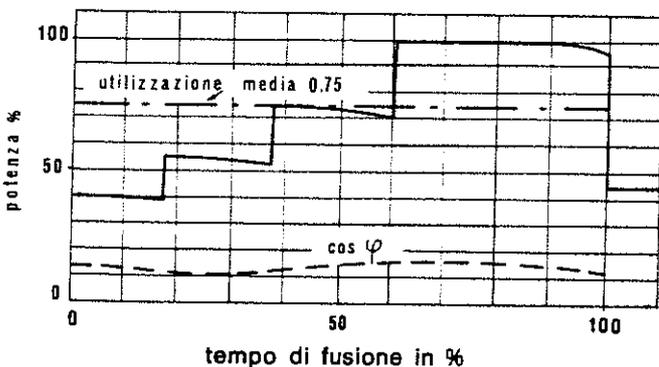


Fig. 79 - Curva caratteristica di potenza assorbita dal forno senza canale a tri-frequenza.

rimescolamento della stessa per la sua omogeneizzazione. La distribuzione della temperatura della ghisa fusa risulta praticamente uniforme in tutta la massa.

Per le loro prestazioni, il loro impiego è soprattutto per forni fusori, ma non mancano casi di applicazioni per forni di attesa e di surriscaldamento. Tipiche applicazioni in grandi fonderie sono in duplex con cubilotti e con forni ad arco.

In questi casi essi presentano una capacità molto grande rispetto alla potenza elettrica, con conseguente notevole riduzione dei moti convettivi nel bacino.

### Forni a media frequenza

Si è visto che vi sono 3 serie di forni ad induzione a M.F. che interessano il campo della fusione della ghisa (a frequenza intermedia o tri-frequenza, a frequenza costante, a frequenza variabile). Dal punto di vista generale il funzionamento di questi forni è molto simile ai forni a B.F. e soltanto alcune caratteristiche li differenziano, rendendo gli uni più adatti degli altri per certe applicazioni. Per queste particolarità si rende necessario esaminarli separatamente.

### Forni a tri-frequenza

Rispetto ai forni a M.F. questi forni presentano un più basso valore dei moti convettivi ed un leggero minore coefficiente di penetrazione; inoltre, l'avviamento con carica solida è di più facile attuazione ed in un tempo relativamente più breve. Per contro le apparecchiature elettriche di alimentazione sono più complesse e richiedono un maggiore controllo, potendo talvolta recare disturbo alle reti elettriche delle società distributrici di energia.

Il diagramma di potenza durante una fusione (fig. 79) risulterà più lineare di quello del forno a B.F. e ciò comporta una migliore utilizzazione del forno.

Questi forni trovano impiego specialmente nelle piccole fonderie (per capacità comprese fra 300 e 1.000 kg) ed in applicazioni speciali per ghise particolari.

### Forni con convertitore rotante

Anche questi forni, come per i precedenti (B.F. e tri-frequenza) funzionano a frequenza costante. Il valore delle frequenze per la ghisa può essere scelto fra 500 e 3.000 Hz.

Risultano alcuni vantaggi derivanti dalla possibilità di scegliere il valore ottimale della frequenza, cioè: capacità minima dei forni sino a 50 kg, riduzione e regolazione dei moti convettivi, aumento della potenza specifica kW/t; brevi tempi di fusione; partenza rapida da carica solida. I forni risultano pertanto molto versatili e con larghe possibilità per un esercizio semplice e pratico. La caratteristica di potenza durante una colata (fig. 80) risulta ancora più lineare di quella del forno a tri-frequenza, ma non ancora del tutto lineare.

### Forni con convertitore statico a tiristori

Sono forni a frequenza variabile entro certi limiti. La caratteristica deriva dalla particolarità delle apparecchiature a tiristori di variare automaticamente la frequenza in funzione del valore della impedenza del forno, in modo da fornire a questo la frequenza ottimale per il massimo rendimento in ogni momento durante il funzionamento.

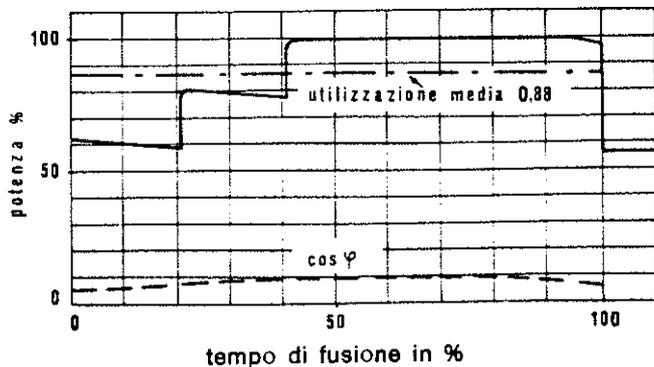


Fig. 80 - Curva caratteristica di potenza assorbita dal forno senza canale a M.F. con convertitore rotante.

Il funzionamento automatico è basato sul fenomeno della risonanza del circuito oscillante. Infatti, il forno ad induzione e la batteria di rifasamento costituiscono un circuito oscillante le cui rispettive reattanze  $X_L$  e  $X_C$  saranno in risonanza con un valore di frequenza dato dalla seguente nota formula:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

in cui:

- $f_0$  = frequenza di risonanza.
- $L$  = induttanza del circuito.
- $C$  = capacitanza del circuito.

Il valore di  $f_0$ , cui corrisponde la potenza massima del forno, si verifica per  $L = C$ .

Poiché il valore della reattanza del forno varia durante il funzionamento specialmente da bacino vuoto a bacino pieno, anche il valore di  $f_0$  dovrà variare per ottenere sempre la massima potenza del forno; come detto questa variazione è fatta automaticamente dallo stesso convertitore a tiristori, formando così un diagramma di potenza che è praticamente costante dall'inizio alla fine della fusione; con un coefficiente di utilizzazione della potenza praticamente vicino a 1 (fig. 81).

Il tipo di forno presenta i vantaggi funzionali che si sono esaminati per gli altri tipi di forni a M.F. con i miglioramenti che derivano da un sistema così elastico ed automatico di alimentazione.

Fino ad oggi nessuna applicazione di questi forni, per la fusione della ghisa, è stata eseguita in Italia, per il

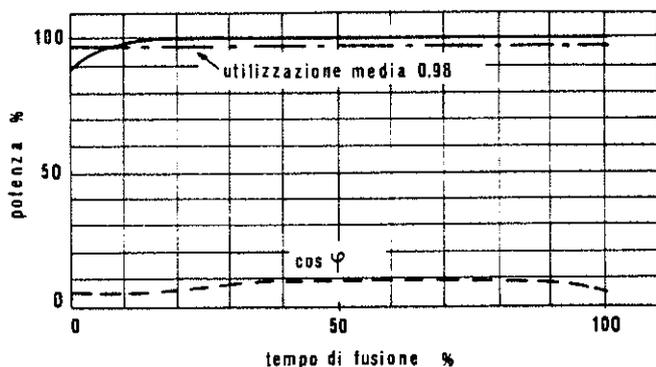


Fig. 81 - Curva caratteristica di potenza assorbita dal forno senza canale a M.F. con convertitore a tiristori.

poco interesse che la fonderia di ghisa ha per il forno a M.F., in genere specie per il costo più elevato degli impianti rispetto a quelli dei forni a B.F. Sono, però, da tenere presenti i vantaggi tecnologici e metallurgici offerti da simili installazioni che in certi casi possono compensare il loro maggior costo d'impianto.

## RIVESTIMENTI REFRAZZARI

Il rivestimento refrattario dei forni ad induzione ha, in genere, una importanza predominante per il buon funzionamento dei forni stessi. Si può affermare che il loro notevole sviluppo avuto in questi anni è dovuto in gran parte alle migliorate caratteristiche dei refrattari che impiegano.

I refrattari possono essere di natura acida, basica o neutra; quelli acidi sono a base di silice ( $SiO_2$ ), quelli basici a base di magnesia ( $MgO$ ) e quelli neutri sono a base di allumina ( $Al_2O_3$ ). Costruttivamente i rivestimenti dei forni sono generalmente eseguiti con pigiate, oppure con refrattari prefabbricati od ancora con pigiate insieme a prefabbricati. La scelta della qualità del refrattario è fatta in base al tipo di ghisa da fondere, in relazione alle sue reazioni chimiche ed in base alle caratteristiche fisiche del refrattario stesso relativamente al suo comportamento contro le sollecitazioni termiche e meccaniche.

Pertanto, per una certa valutazione sul comportamento del refrattario durante la costruzione ed il funzionamento del forno si devono tenere presenti le curve caratteristiche dei tre refrattari fondamentali relative al coefficiente di dilatazione lineare, in funzione della temperatura (fig. 82), e le curve della conducibilità termica in funzione anch'esse della temperatura (fig. 83).

Si vede che la silice ha un coefficiente di dilatazione relativamente basso e stabile al di sopra di 1.273 K (1.000 °C), mentre la sua conducibilità termica, pur essendo relativamente bassa, cresce con l'aumentare della temperatura cui è sottoposta. La magnesia ha un basso coefficiente di dilatazione al disotto di 1.273 K (1.000 °C), ma aumenta progressivamente dopo tale temperatura. Per contro la sua conducibilità termica molto elevata alle basse temperature diminuisce con il crescere della temperatura, ma risultando ancora elevata a 1.823 K (1.550 °C). Infine, l'allumina ha un coefficiente di dilatazione più basso della magnesia ed ha lo stesso andamento caratteristico in funzione della temperatura; la sua conducibilità termica, pur sempre superiore a quella della silice, è relativamente piccola alle basse temperature ed è crescente con la temperatura sino a superare quella della magnesite stessa.

Nel campo specifico dei forni per la fusione della ghisa il problema del refrattario presenta alcune esigenze per le elevate temperature cui è sottoposto (1.823 ÷ 1.873 K) (1.550 ÷ 1.600 °C), ma è relativamente facile dal punto di vista qualitativo e metallurgico.

Infatti, salvo qualche raro caso, i rivestimenti refrattari più adatti per la ghisa sono quelli acidi od alluminosi, cioè quelli a base di silice e quelli a base di allumina, a seconda anche del tipo del forno.

Per quanto concerne il sistema di costruzione mediante pigiate, si deve dire che la massa refrattaria, indipendentemente dalla qualità, deve avere una granulometria appropriata che generalmente è composta in parti

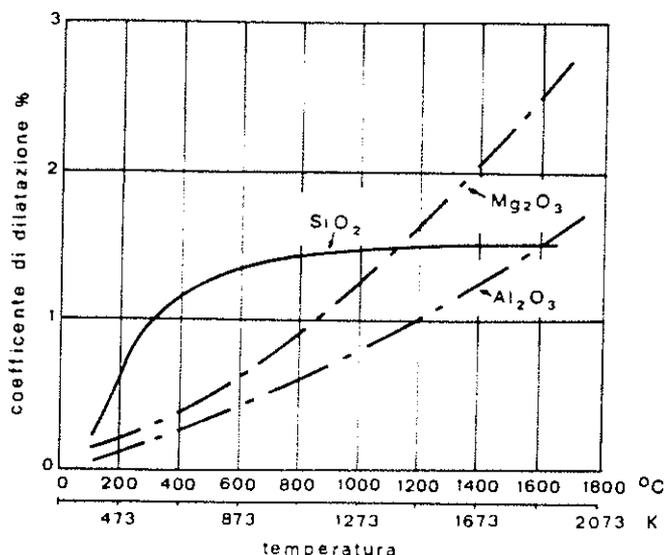


Fig. 82 - Curve caratteristiche del coefficiente di dilatazione in funzione della temperatura dei principali materiali refrattari.

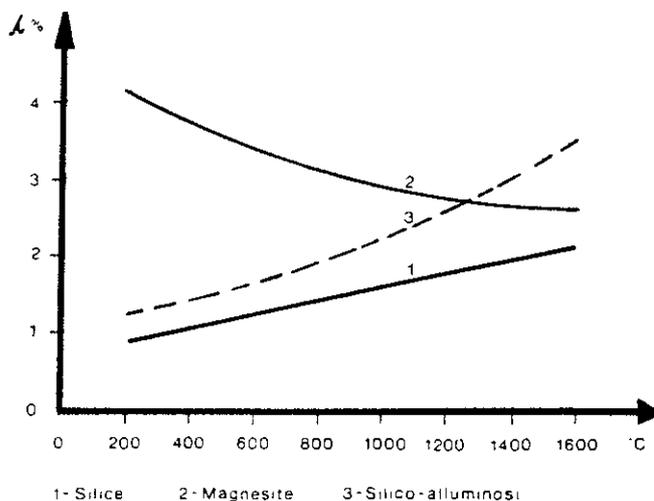


Fig. 83 - Curve caratteristiche della conducibilità termica in funzione della temperatura dei principali materiali refrattari.

uguali di 3 grandezze granulometriche: 0 mm, 2 ÷ 3 mm, 5 ÷ 6 mm; la sua conservazione, invece, riguarda strettamente la qualità. Le pigiate acide devono essere conservate in ambiente umido, quelle basiche in ambiente asciutto e le alluminose in ambiente normale.

Le pigiate acide vanno dalle quarziti (SiO<sub>2</sub>) alla silice ad alta purezza ed alla silice sinterizzata. Le pigiate basiche sono normalmente a base di magnesia e sono commercialmente conosciute come magnesia normale oppure magnesia sinterizzata od elettrofusa. Vi sono, infine, le pigiate silico-alluminose (+2% di Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e quelle ad alto contenuto di allumina (94 ÷ 99%).

Per la fusione della ghisa con forni ad induzione si usano quasi esclusivamente pigiate di SiO<sub>2</sub> oppure di Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Non vi è una regola per l'impiego dell'uno o dell'altro tipo, ma come indicazione generale si può dire che nei forni con canale si impiega più comunemente l'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e nei forni senza canale si impiega più comunemente la SiO<sub>2</sub>.

### Esecuzione dei rivestimenti refrattari

La pigiata refrattaria può essere eseguita ad umido od a secco a seconda del tipo di refrattario impiegato; entrambe le qualità richiedono una preparazione che deve essere eseguita prima della messa in opera.

Nel caso ad umido la preparazione consiste nell'omogeneizzare la granulometria della massa refrattaria nelle quantità già viste, utilizzando appositi setacci, quindi aggiungere l'acqua richiesta ed altri eventuali leganti, rimescolando la massa molto accuratamente, evitando il più possibile la concentrazione di umidità e la formazione di grumi; infine, lasciare macerare la massa così preparata per almeno 12 h, coprendola con panni umidi prima della sua utilizzazione.

Nel caso a secco la preparazione consiste nell'operazione di omogeneizzazione della granulometria e nell'aggiunta di leganti come l'acido borico (1,5 ÷ 1,7%) per la SiO<sub>2</sub> e gli additivi per abbassare il punto di sinterizzazione per il MgO e l'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Anche per queste pigiate deve passare un certo tempo dalla preparazione alla loro messa in opera.

Particolari istruzioni per la messa in opera delle pigiate sono normalmente fornite dai fornitori dei refrattari i quali spesso inviano specialisti per l'esecuzione diretta della pigiata stessa; ci si limita qui di seguito a fornire alcune indicazioni di carattere generale, compresa l'operazione di preparazione dei forni prima dell'esecuzione del rivestimento refrattario.

### Forni con canale

La preparazione dei forni con canale per ricevere la pigiata refrattaria consiste nell'esecuzione di un rivestimento isolante termico verso l'esterno, generalmente costituito da uno spessore di cartone d'amianto a contatto dell'involucro metallico del forno ed uno spessore di mattoni leggeri ad alto potere coibente, facilmente sagomabili alla forma voluta.

Per l'esecuzione della pigiata sono impiegate apposite sagome metalliche per il bacino e per i canali (vuote o piene) le quali possono essere recuperabili oppure fuse con la carica durante la fase di avviamento del forno. Particolari precauzioni devono essere adottate a seconda che gli induttori siano fissi oppure intercambiabili.

Nei forni con canale, i rivestimenti refrattari possono essere eseguiti con qualsiasi qualità e tipo di pigiata refrattaria. Per la fusione della ghisa in particolare è consigliabile la qualità alluminosa (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) per l'esecuzione ad umido.

Sia per la pigiata a umido che per quella a secco, per la loro esecuzione si procede in linea di massima con gli stessi metodi che ora si indicheranno.

Una volta posizionate le sagome, si forma un primo strato di refrattario pigiando con appositi pestelli a mano o con un martello pneumatico e si prosegue aggiungendo via via la massa refrattaria in piccole quantità, evitando la formazione di strati. Per questa ragione, una pigiata non deve essere interrotta sino alla sua completa esecuzione.

Completato il rivestimento refrattario, lo si spalma con speciali vernici refrattarie e quindi si passa alla fase di essiccazione che si differenzia alquanto tra pigiata umida e pigiata a secco. La prima richiede un tempo propor-

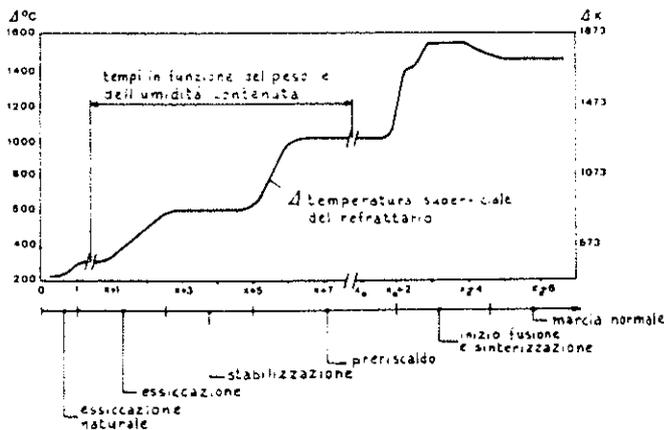


Fig. 84 - Curve di essiccazione della pigiata umida (in forni con canale).

zionale alla capacità del forno, ossia al peso del refrattario impiegato; la seconda, appena completata, permette l'immediato utilizzo del forno. Tuttavia un periodo di assestamento, ed un sia pur rapido preriscaldamento, è consigliabile anche per questa. Poiché i forni con canale impiegano una quantità rilevante di refrattario rispetto alla loro capacità, il tempo richiesto per l'essiccazione è assai lungo (fig. 84).

L'entrata e l'uscita della ghisa sono di estrema importanza, perché condizionano la vita del forno e lo giustificano dal punto di vista metallurgico.

Tutti i costruttori concordano su questo punto: l'entrata e l'uscita devono essere costruite in modo da impedire assolutamente all'aria di entrare nella camera del forno, qualunque sia la sua posizione, ossia, come oggi impropriamente si dice, devono essere costruite a sifone. Come l'esperienza — e d'altra parte basterebbe ricorrere ad alcune semplici considerazioni fisico-chimiche — ha ampiamente dimostrato, la causa prima e fondamentale del deterioramento del refrattario è la presenza di ossigeno nell'atmosfera, quindi è necessario evitare che esso vi penetri assieme all'aria atmosferica. Evidentemente ciò crea delle difficoltà di esercizio, soprattutto per quanto riguarda l'entrata della ghisa. Infatti è necessario un controllo costante e faticoso per eliminare le scorie, riparare le erosioni, sorvegliare il travaso del metallo. Ciò costa tempo, fatica e denaro. Ma se rifare la vasca di un forno da 10 t può essere considerato un normale fatto di manutenzione, rifare quella di uno da 100 t diventa un serio problema aziendale, sotto tutti i punti di vista.

Nei forni in cui l'entrata e l'uscita sono mantenute a sifone, e si bada a tener chiusa ogni apertura, il rivestimento dura anche 2 anni e più.

Ma questa non è la sola ragione, perché entrata ed uscita della ghisa siano a sifone. L'impiego del forno con canale trova una giustificazione anche dal punto di vista metallurgico: esso assicura ghisa omogenea, a temperatura costante e pulita. Esente cioè da scorie, anche da quegli elementi eterogenei in sospensione, che non è possibile eliminare scorificando il crogiolo o la vasca, e che pare siano la principale causa delle soffiature e di altri difetti di colata.

Ottenere la ghisa pulita è appunto il compito dei due sifoni. Quello dell'ingresso opera una prima separazione, tratteneendo quelle più grossolane e leggere, mentre il sifone d'uscita, pescando la ghisa al fondo del bagno, in

una zona possibilmente tranquilla, assicura l'ulteriore e definitiva decantazione.

### Forni senza canale

Come l'esecuzione della pigiata in forni senza canale, anche la loro preparazione per riceverla è molto più semplice di quella dei forni con canale; eseguito l'apposito strato isolante elettrico e termico nell'interno della bobina induttrice, si procede alla pigiatura del fondo nel modo indicato; si posiziona quindi la sagoma metallica circolare del bacino e si prosegue la pigiatura completando il fondo e la parete circolare del bacino, anche qui usando pestelli a mano o martelli pneumatici ed aggiungendo la massa refrattaria poco alla volta, usando le stesse precauzioni già raccomandate.

Anche in questi forni, come in quelli con canale, può essere impiegata qualsiasi qualità, e tipo, di refrattario, ma nel caso specifico della ghisa e, per ridurre i tempi morti di funzionamento del forno, oggi si usano pigiate a secco come  $\text{SiO}_2$  molto pura, oppure allumina ad alto tenore di  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

In questo caso, la fase di essiccazione è molto breve, potendo il refrattario ricevere il metallo di avviamento dopo un lieve periodo di 6 ÷ 10 h di prudenziale assestamento ed un rapido preriscaldamento (fig. 85).

L'esecuzione del rivestimento refrattario nei forni senza canale è molto più semplice in confronto a quella dei forni con canale, ed a pari potenza impiegano una minore quantità di massa refrattaria (fig. 86).

Un altro metodo per eseguire la pigiata nei forni senza canale è quello dell'assestamento della massa refrattaria a mezzo di appositi vibrator applicati alla sagoma metallica del bacino; anche con questo metodo si possono impiegare masse refrattarie ad umido ed a secco; il grado di assestamento della massa refrattaria con vibratore è più compatto di quello eseguito con martello pneumatico ed in generale a pari capacità si impiega una maggiore quantità di refrattario (12 ÷ 15%). Al momento attuale non vi sono statistiche sufficienti per affermare quale dei due metodi dia migliori risultati sulla durata del rivestimento refrattario.

Per forni di grande capacità (superiore a 20 t) sono stati eseguiti con buoni esiti anche rivestimenti refrattari acidi ed alluminosi, con mattoni prefabbricati. Anche per questi rivestimenti non vi sono statistiche dei risultati conseguiti.

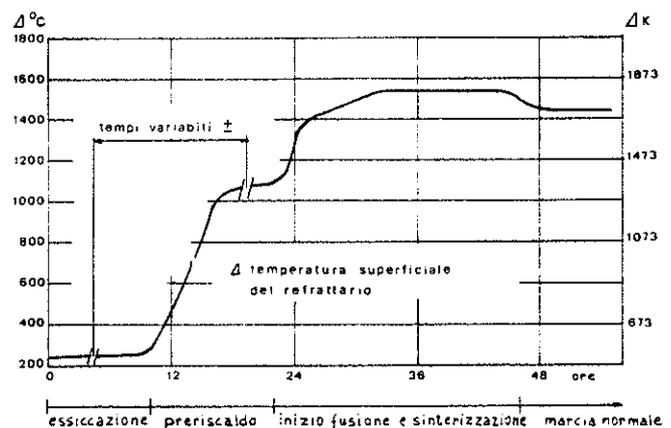


Fig. 85 - Curve di essiccazione della pigiata secca (in forni senza canale).

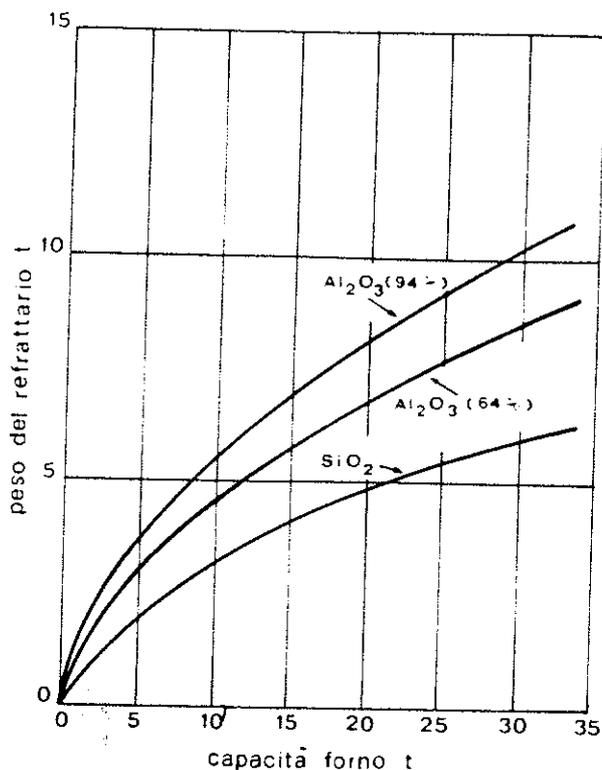


Fig. 86 - Peso del refrattario in funzione della capacità, in forni senza canale.

## INSTALLAZIONE E CONDOTTA

L'installazione dei forni ad induzione per ghisa, come per gli altri, è fatta in base alle esigenze di luogo, di produzione, di funzionamento, in relazione alle operazioni a monte (preparazione ed essiccazione delle cariche, caricamento ed altre) ed a quella a valle con la colata, le macchine a motta, i caroselli ed i ritorni di ghisa calda, delle materozze, dei boccamani e dei servizi vari annessi alla produzione, oltre che dalla ubicazione delle fonti di energia elettrica, dell'acqua, dell'aria compressa, dei relativi scarichi e dei servizi ausiliari. Pertanto, un progetto di installazione elaborato in collaborazione tra costruttore ed utilizzatore, è sempre necessario. Generalmente il progetto comprende: l'installazione del forno con le relative cabine elettriche di trasformazione e le apparecchiature di comando e di controllo, l'impianto di rovesciamento, gli impianti di preparazione e pesatura delle cariche, gli impianti di preriscaldamento o di essiccazione delle cariche, l'impianto di caricamento del forno, l'impianto di circolazione e raffreddamento dell'acqua, gli avanfori o receivers, i sistemi predisposti per la colata, gli impianti di aspirazione e di ventilazione, gli impianti accessori di protezione e di sicurezza.

Si vedrà come si presentano queste installazioni nei casi più tipici, per i forni fusori ed i forni di attesa nelle fonderie di ghisa, e ciò darà l'opportunità di descriverne anche la condotta.

### Forni fusori

L'installazione più semplice e classica di un impianto di forno ad induzione a B.F. senza canale è rappresentato in fig. 87 che mette in evidenza le sue caratteristiche fisiche e dimensionali. Nella fig. 88 si vede un'operazione di colata di un forno da 10 t.

Questa installazione, presentata nella sua più semplice espressione, richiede spesso, ed è prudente prevedere, un forno di riserva che assicuri la continuità della produzione in caso di incidente al forno in marcia; il caso è risolto in due modi:

- Con forno completo di riserva: in questo caso il forno è installato di fianco all'altro ed è comandato dalla stessa apparecchiatura elettrica mediante commutazione della linea di alimentazione, dando la possibilità di riprendere la marcia nel breve tempo di mezz'ora.
- Con induttore di ricambio: se il forno è costruito con questa particolare caratteristica (induttore intercambiabile), in caso di avaria al forno l'induttore è sostituito con quello di ricambio; questa sostituzione richiede un tempo di 3 ÷ 4 h di lavoro.

La prima soluzione è più costosa e più ingombrante della seconda, ma presenta il vantaggio della continuità della produzione, per cui è da ritenersi più conveniente.

In base alle condizioni di disponibilità e di qualità dell'acqua di raffreddamento (3 ÷ 15 m<sup>3</sup>/h) sarà disposto o meno un impianto di circolazione a circuito chiuso, scelto tra i tipi descritti precedentemente e di comune accordo tra costruttore ed utilizzatore.

Altri accessori, che possono completare un'installazione di questo tipo ed automatizzarla, sono: la pesatura elettronica delle cariche, il dosatore di energia, la misurazione rapida della temperatura ed altri automatismi.

Come noto, la pesatura elettronica può essere applicata alle cariche, al forno oppure alla siviera di colata, a seconda delle esigenze. Il dosatore di energia è un apparecchio elettronico che fornisce al forno l'energia elettrica sufficiente e necessaria alla fusione di una certa carica, regolandola nei suoi parametri di potenza e di tempo, evitando surriscaldi, ossidazioni, spreco di additivi, sprechi di energia e semplificando la condotta del forno.

Un'installazione completa di forno fusorio del tipo a B.F. senza canale comprende perciò: cabina elettrica di trasformazione, forno propriamente detto, forno di riserva oppure induttore di ricambio, apparecchiatura di comando e controllo, pesatura elettronica, caricatrice, refrigeratore e depuratore d'acqua, apparecchi di misura e controllo della temperatura ed altri accessori.

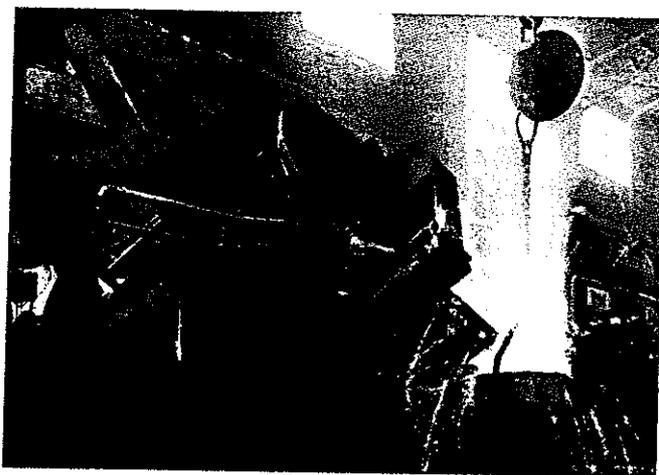


Fig. 88 - Forno ad induzione a B.F. senza canale, durante una colata di ghisa.

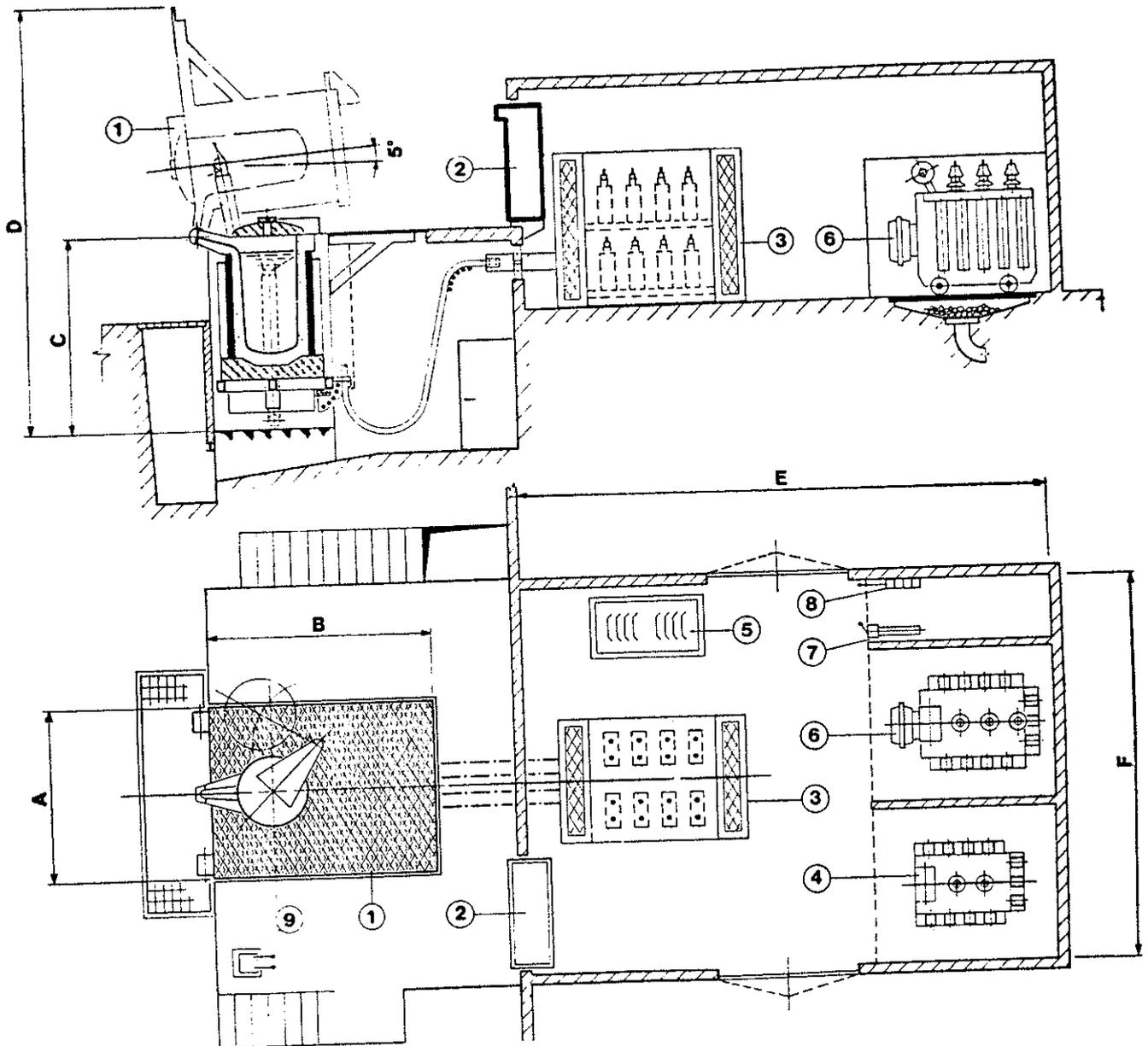


Fig. 87 - Installazione generica del forno ad induzione a B.F. senza canale.

- 1 - Forno
- 2 - Quadro di manovra
- 3 - Condensatori rifasatori
- 4 - Reattanza
- 5 - Gruppo pompa
- 6 - Trasformatore di potenza
- 7 - Interruttore M.T.
- 8 - Sezionatore M.T.
- 9 - Comando ribaltamento

La condotta di una di queste installazioni avviene più o meno in base alla meccanizzazione ed agli automatismi previsti ed, in linea di massima, è la seguente: premesso che si è già descritto come avviene l'essiccazione e l'avviamento del forno partendo da tale posizione di forno avviato, si proseguirà nella condotta della fusione.

Le cariche, pesate o meno, che sono preparate in appropriate pezzature e quantità, sono introdotte nel meccanismo di caricamento e da questo portate nel forno a tempi determinati; ad ogni caricamento, con manovra a distanza, il coperchio del forno si apre e, mentre la carica scivola nel bacino, una cappa di protezione prende

il suo posto per evitare la fuoriuscita di spruzzi di ghisa incandescente; ad ogni aggiunta (carica) è controllato l'assorbimento di potenza del forno e, corretto questo assorbimento schiacciando gli appositi pulsanti del quadro di comando (si ricorda che nei forni a M.F. con tiristori, la regolazione avviene automaticamente senza l'intervento dell'uomo), la regolazione del fattore di potenza e quella dell'equilibratura del carico elettrico avvengono automaticamente nei moderni impianti. Così procedendo si giunge al completo riempimento del forno ed alla fine dell'operazione di fusione. Segue un periodo di surriscaldamento, un controllo della temperatura e quindi l'operazione di scorificazione.

Dopo le correzioni ed i controlli metallurgici è nuovamente controllata la temperatura ed appena questa ha raggiunto il valore desiderato, si procede alla colata che è manualmente effettuata dall'apposita colonnina di manovra dei cilindri di rovesciamento. Tutti i forni sono muniti di un blocco elettrico che interrompe l'erogazione dell'energia al forno appena questo si solleva per la colata, ma è raccomandabile che tale operazione sia fatta dal manovratore con l'apposito pulsante a mano.

Normalmente i forni hanno il punto di colata fisso sull'asse di rotazione e la ghisa fusa passa dal forno alla siviera od all'avanforno in modo tranquillo e senza emettere eccessivi spruzzi.

Per una buona utilizzazione il forno non deve essere vuotato completamente, ma deve sempre avere una buona quantità di ghisa fusa nel bacino (dote) che gli consente una più rapida ripresa della successiva fusione. Infatti l'indice di utilizzazione del forno è espresso dalla

potenza media assorbita durante la fusione ( $W = \frac{Q}{T}$ )

e dipende appunto dalla potenza iniziale che è funzione della quantità del metallo di dote (fig. 89). Questo elemento è importante anche per la determinazione preventiva della capacità dei forni al momento dell'acquisto.

Infatti l'indice di utilizzazione  $\alpha$  della fig. 89 mostra che un forno con una produzione massima teorica di 1.000 kg/h può produrre 620 kg/h partendo con una dote del 25% e 680 kg/h partendo con una dote del 50%.

Dopo queste considerazioni si ritiene che il forno sia stato riportato nella sua posizione iniziale per procedere alla successiva fusione per la quale la prima carica sarà già stata posta nell'apposita caricatrice, e così via.

#### Forni con essiccazione della carica

Tale processo fusorio comporta l'aggiunta a monte dell'installazione completa del forno fusorio, di un essiccatore della carica, che può essere elettrico od a combustione, ma che in pratica è quasi sempre a combustione. Esso può essere statico o rotativo, del tipo continuo o discontinuo, e funziona alla temperatura di 523 ÷ 573 K (250 ÷ 300 °C). La sua funzione è quella di essiccare le cariche, bruciare gli oli ed altre parti combustibili,

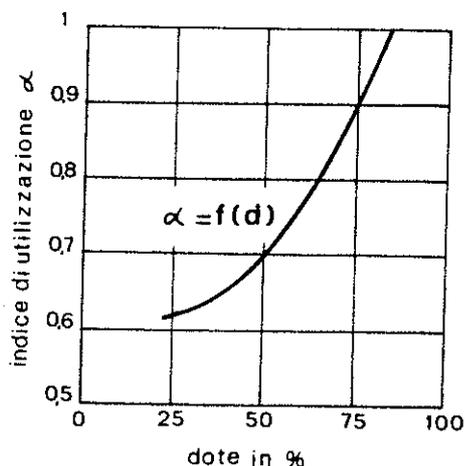


Fig. 89 - Indice di utilizzazione di un forno a B.F. senza canale, in funzione del metallo di dote.

rendere talvolta realizzabile il caricamento automatico continuo o discontinuo del forno. I vantaggi che ne derivano sono: migliore condotta del processo di fusione, aumento della produzione a pari potenza elettrica impegnata, risparmio di energia elettrica, riduzione dei costi di fusione.

Lo scopo fondamentale dell'impiego dell'essiccatore di carica non è quello economico, ma quello tecnologico e metallurgico, specialmente per la fusione di particolari materiali di carica che richiedono tale trattamento.

La condotta di questi impianti si differenzia dagli impianti fusori tradizionali per la parte della preparazione delle cariche e del caricamento che, come detto, in qualche caso può essere meccanizzato e continuo, con essiccatoi a coclea od a tavola a scosse a suola vibrante od altro. Interessanti applicazioni sono state realizzate anche in acciaieria con forni ad arco.

#### Esempio

Un impianto moderno con preriscaldatore a combustione del tipo discontinuo, per la fusione di ghise sintetiche per la produzione di ghisa sferoidale (fig. 90), è condotto nel modo seguente. Le cariche di rottami di lamierino sono pesate elettronicamente e caricate nell'essiccatore, il quale manovrato a distanza si chiude e funziona automaticamente alla temperatura di 523 K (250 °C). Finita l'essiccazione, sempre con comando a distanza, la carica è trasferita meccanicamente nella caricatrice che la trasporta nel forno con il sistema già noto. La bilancia elettronica in base al peso registrato trasmette al dosatore d'energia l'impulso equivalente perché al forno sia erogata l'energia necessaria alla fusione. Così operando, oltre ai vantaggi economici già menzionati, si evitano surriscaldi, ossidazioni e sprechi d'energia.

#### Forni con preriscaldamento della carica

Il processo fusorio con preriscaldamento della carica si distingue da quello di essiccazione della carica sia per gli scopi tecnologici, metallurgici ed economici, sia per gli apparati riscaldanti impiegati.

Il processo fusorio con preriscaldamento della carica ha per principale scopo l'economia di energia elettrica e l'economia sui costi di fusione, mentre non sono molto interessanti le questioni d'ordine tecnologico e metallurgico, come lo sono invece per il preriscaldamento. Infatti, la conve-



Fig. 90 - Forno ad induzione a B.F. senza canale con essiccatore di carica.

nienza del processo è strettamente legata alla disponibilità ed ai prezzi dell'energia elettrica e dell'energia termica.

Le installazioni di questo tipo sono realizzate in diversi modi, i due principali dei quali sono:

- Con preriscaldatore indipendente (fig. 91).
- Con preriscaldatore nello stesso laboratorio del forno fusorio.

La prima comporterà l'aggiunta, ad una normale installazione di forno ad induzione, di uno o più preriscaldatori, mentre la seconda non comporta tale aggiunta, ma richiede una modifica di base alla struttura ed alla costruzione del forno fusorio.

Il primo è più diffusamente impiegato nelle fonderie di ghisa ed è perciò quello che si prenderà in considerazione. Si tratta di un forno cilindrico verticale riscaldato ad olio od a gas, nel quale è introdotta la carica da preriscaldare contenuta in apposito cestello; la temperatura di preriscaldamento è di  $923 \div 1.023$  K circa ( $650 \div 750$  °C), cioè la massima temperatura raggiungibile senza provocare eccessiva ossidazione del metallo, e consumando energia a basso costo (combustibile); dal preriscaldatore la carica passa mediante operazioni meccaniche nel forno elettrico per la sua fusione, operando anche qui nel modo già noto.

Per dare un'idea dei vantaggi economici di questo processo fusorio, si passa ad un esempio pratico fatto sulla stessa base di quello dell'essiccatore di carica.

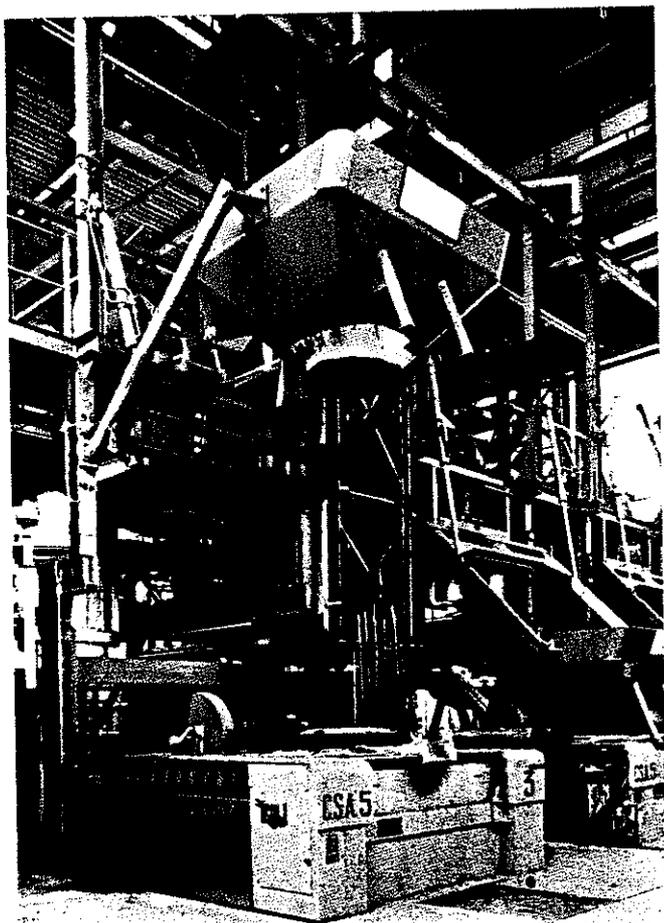


Fig. 91 - Forno ad induzione a B.F. senza canale con preriscaldatore di carica.

## Esempio

Tutto il complesso è composto da (fig. 92):

- Apparecchio per il preriscaldamento delle cariche (camera di combustione, contenitore, piattaforma di aspirazione).
- Carro di trasporto e rovesciamento del contenitore.
- Forno ad induzione a crogiolo a B.F. con speciale coperchio di apertura della bocca del forno e tramoggia pensile a comando oleodinamico.
- Benne di carico a comando pneumatico.

L'apparecchio è così formato:

- Complesso: camera di combustione, contenitore, piattaforma mobile di aspirazione, atto a preriscaldare una carica ferrosa costituita da rottami di acciaio o di ghisa, di ghisa in pani e materozze, alla temperatura di  $873 \div 1.023$  K ( $600 \div 750$  °C).
- La camera di combustione è tronco-conica fissa su apposita incastellatura, alla cui sommità è installato uno speciale bruciatore a fiamma lunga che può bruciare gas metano od altro combustibile gassoso.
- Il bruciatore funzionerà a portata costante per tutto il tempo di preriscaldamento e sarà munito di organi di regolazione a comando manuale ed automatico. Il bruciatore è munito di bruciatore-pilota con candela di accensione, miscelatore, riduzione di pressione a zero, accensione automatica mediante pulsante.
- Il contenitore mobile è di acciaio inossidabile contenuto in una armatura metallica la cui intercapedine è riempita di materiale isolante. È munito di opportune chiusure stagne con cordone di amianto o similare nei punti di accoppiamento.
- Il fondo del contenitore è forato e porta opportuni pioli di varia altezza ( $5 \div 10$  cm) saldati sul fondo in modo disuniforme, il cui scopo è di impedire che un qualche pezzo di rottame di forma piatta vada ad ostruire una parte dei fori di aspirazione.
- La piattaforma mobile di aspirazione, che sorregge e libera il contenitore, è collegata ad un proporzionato cilindro a comando oleodinamico che le permette di alzarsi ed abbassarsi.
- La suddetta, oltre ad avere il compito di sorreggere e guidare il contenitore, è eseguita in modo da formare con il fondo forato del contenitore, cui può essere collegata a tenuta stagna, una vera e propria camera di aspirazione dei prodotti della combustione che sono così costretti ad attraversare tutta la massa metallica da riscaldare.
- La camera di aspirazione è collegata con un potente aspiratore, la cui forza di aspirazione è opportunamente regolata. La regolazione è ottenuta a mezzo del tubo di aspirazione che collega la camera di aspirazione all'aspiratore. Il tubo è spezzato ed è di due diametri diversi collegati a cannocchiale. L'estremità del tubo a diametro maggiore è tronco-conica, per modo che, variando la profondità dell'innesto delle due tubazioni, si regola l'afflusso d'aria fredda aspirata. In tal modo, oltre che operare direttamente sul bruciatore, è possibile regolare l'aspirazione dei prodotti della combustione da un minimo ad un massimo. Questi prodotti, essendo tutto il complesso a tenuta stagna, sono, come detto innanzi, aspirati dal fondo del contenitore e, quindi, costretti ad attraversare tutta la massa metallica, cedendo alla medesima il calore.

- A ciclo termico completato (prelevata una corrispondente quantità di metallo dal forno ad induzione), operando sulla piattaforma collegata con il cilindro oleodinamico, che permette alla medesima di alzarsi ed abbassarsi, il contenitore è staccato dalla camera di combustione.
  - Nella sua discesa, sempre sorretto dalla piattaforma a comando oleodinamico, è inserito in un carro di translazione sul quale si appoggia con due pernotti speciali su appropriate sedi. La piattaforma continua, invece, nella sua discesa, lasciando libero il contenitore nel suo carro trasportatore.
  - Quest'ultimo, ricevuto l'appropriato consenso, trasporta il contenitore sopra la bocca del forno ed esegue il rovesciamento della carica.
- I presupposti erano (e sono stati raggiunti) i seguenti:
- Temperatura di preriscaldamento 1.023 K (750 °C).
  - Cariche di 2.000 kg legate alle dimensioni del forno ad induzione installato ed al peso spillato dal forno.
  - Brevissimi tempi di preriscaldamento.
  - Limitato uso di materiale pregiato (acciaio inossidabile).
  - Buon rendimento termico.
  - Bassi consumi specifici intorno a 837 MJ/t (200.000 Cal/r), cioè poco più di 32 m<sup>3</sup> di metano per tonnellata.
  - Nessun inquinamento dell'atmosfera.

È stato scelto il riscaldamento per convezione e conduzione, utilizzando una elevata velocità dei prodotti della

combustione ed alta temperatura per investire la carica da riscaldare, attraversarla e, quindi, essere espulsi avendo ceduto la maggior quantità possibile del loro contenuto termico.

La cesta di acciaio inossidabile contenente il materiale è resistente ai ripetuti sbalzi di temperatura ed ha il fondo opportunamente forato per lo sfogo dei fumi.

Il cestone è stato ovviamente isolato termicamente più per protezione del personale che per dispersione di calore.

Si è utilizzato un particolare bruciatore a fiamma lunga di elevata portata e capace di funzionare in difetto ed eccesso d'aria fino a valori dell'800% di eccesso d'aria.

In tal modo la temperatura di fiamma era variabile entro il campo da 2.073 K a 573 K (1.800 °C a 300 °C), permettendo una notevole flessibilità nella temperatura di preriscaldamento, dato che il volume dei prodotti della combustione poteva essere mantenuto pressoché costante: le temperature diverse dalla carica si ottenevano con la sola variazione della portata di gas. Risultava immediatamente evidente che il mantenere costante o quasi la portata dei prodotti della combustione permetteva di non abbassare mai la velocità di passaggio dei fumi e di tenere sempre elevato il coefficiente di scambio termico con il materiale.

Il bruciatore è montato in una camera di combustione entro cui poter sviluppare la fiamma prima di lambire il materiale: ecco la necessità di una camera di combustione di lunghezza opportunamente studiata.

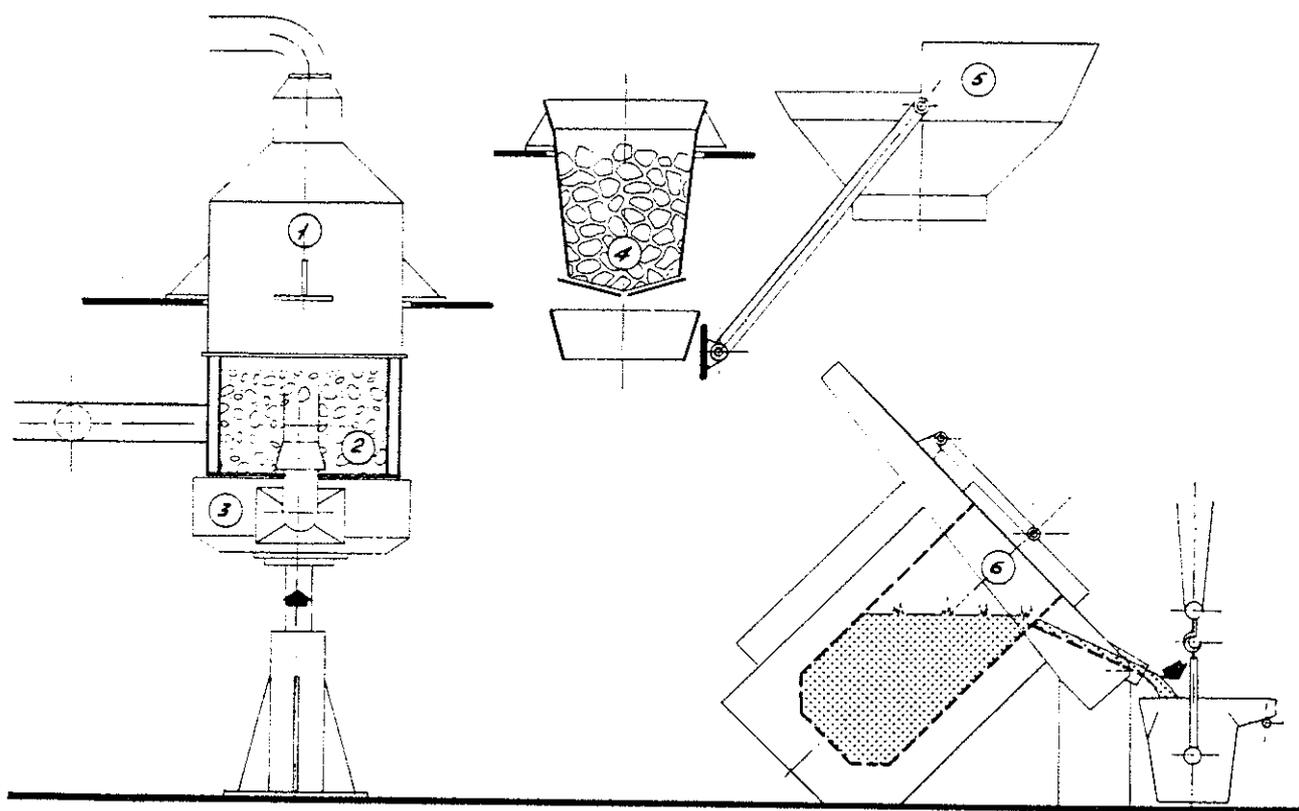


Fig. 92 - Complesso del forno con preriscaldatore di carica.

- 1 - Camera di combustione
- 2 - Contenitore
- 3 - Piattaforma
- 4 - Benna
- 5 - Tramoggia pensile
- 6 - Forno ad induzione a bassa frequenza

A questo punto le cose avrebbero potuto dare un primo risultato, ma per quanto capace, il bruciatore non aveva potenza sufficiente per superare le perdite di calore di uno strato di circa 800 mm di materiale accatastato alla rinfusa ed avente una densità di almeno 2 kg/dm<sup>3</sup> circa.

L'effetto del riscaldamento, anche se i fumi non avevano altra via d'uscita che il fondo del cestone, sarebbe stato molto disomogeneo, essendo concentrato a centro ed in superficie ed avrebbe creato una contropressione al bruciatore tale da provocare spegnimenti. Inoltre, nella zona di accoppiamento fra contenitore della carica e camera di combustione si sarebbe potuta avere fuoriuscita di gas caldi con pericolo di deformazioni e diminuzione del rendimento.

È stato, quindi, previsto il basamento raccoglitore e convogliatore dei fumi verso un aspiratore che, producendo una depressione fino all'accoppiamento contenitore-camera di combustione, ha permesso di costringere tutti i fumi ad attraversare completamente il materiale riscaldandolo uniformemente.

Dall'inizio al termine del riscaldamento con temperatura di fiamma attorno a 1.473 K (1.200 °C), questi stessi uscivano dal basamento ad una temperatura di 823 ÷ 873 K (550 ÷ 600 °C), avendo fornito al materiale il loro contenuto termico pari al salto di temperatura.

È con tale dato numerico che si regola, tramite termocoppia, pirometro e servomotore, l'apertura o la chiusura parziale della portata di gas per non superare nell'impianto la temperatura massima dei fumi in uscita di 873 K (600 °C).

Infatti, a fine riscaldamento, dopo circa 25 min, la temperatura di fiamma è ridotta a circa 973 K (700 °C) in modo da mantenere costante la temperatura della carica.

Il valore suddetto di 873 K (600 °C) è quello relativo alla temperatura dei fumi dopo il basamento.

Si è voluto appurare esattamente quali fossero le temperature all'interno della carica, disponendo sino a 10 termocoppie flessibili nell'interno della carica stessa.

Dopo 25 ÷ 30 min è stato verificato un valore medio di 1.023 K (750 °C) con scarti massimi, rispetto a tale valore, di non oltre 30 °C.

Il valore massimo si verifica in corrispondenza della camera di combustione ed il valore minimo alla base del contenitore. In ogni modo ciò che ha valore, agli effetti del bilancio termico, cioè delle calorie apportate al forno ad induzione, è la temperatura media che, come è detto, è risultata intorno a 1.023 K (750 °C).

Le prove sono state fatte con un rapporto aria-gas pari a circa il 100% di eccesso dell'aria e con il materiale immediatamente scaricato a fine riscaldamento.

Evidentemente, la carica si ossida leggermente qualora perduri la sua permanenza a 973 ÷ 1.023 K (700 ÷ 750 °C) per un certo tempo e ciò nell'eventualità della mancata richiesta del forno ad induzione per momentaneo arresto di produzione od altro.

Da prove fatte si è, però, verificato che l'ossidazione non è sentita, poiché la regolazione automatica interviene, in questi casi, a ridurre la portata di combustibile, abbassando la temperatura di fiamma.

È da tenere presente che preriscaldatori di questo tipo possono essere messi in funzione da freddo in pochi minuti con il solo azionamento di un pulsante. Nessun in-

conveniente ad arrestarne il funzionamento, ad esempio nelle ore notturne.

In merito ai consumi, essi sono stati registrati carica per carica. Sono rimasti nei limiti che erano prefissati (intorno a 32 ÷ 35 m<sup>3</sup> di metano per tonnellata).

È da notare che un impianto di questo tipo può marciare anche a propano (il cui prezzo per uso industriale oggi è assai ridotto) od eventualmente a nafta leggera.

## Forni di attesa

L'installazione dei forni di attesa è relativamente semplice, non richiedendo, di solito, cabine di trasformazione, impianti di raffreddamento d'acqua a circuito chiuso né importanti fondazioni murarie. Il loro posizionamento più o meno vicino al forno fusorio è definito in base al ciclo di produzione della fonderia ed all'ubicazione delle macchine a formare o dei caroselli, così come l'apparecchiatura elettrica di comando e controllo che sarà più vicina possibile al forno. La condotta di questi forni è semplice poiché non vanno eseguite manovre complesse né di carattere elettrico né di carattere meccanico né di carattere metallurgico.

Alcune precauzioni sono, tuttavia, da prendere per far sì che la durata del rivestimento refrattario sia la più lunga possibile. Le principali di esse sono: evitare i surriscaldi al di sopra della temperatura di lavoro, tenere la superficie del bagno fuso pulita da scorie, evitare aggiunta di additivi che aumentino la temperatura del metallo o che possano reagire chimicamente con il refrattario, evitare che l'acqua di raffreddamento in uscita superi i 303 ÷ 313 K (30 ÷ 40 °C), evitare gli assorbimenti di corrente superiori ai valori nominali, evitare di rovesciare il forno per la colata od altra manovra senza prima avere aperto l'interruttore di alimentazione dell'energia elettrica.

L'installazione di un avanforno ad induzione od un receiver in fonderia di ghisa ha diversi scopi e comporta notevoli vantaggi: mantenere e surriscaldare la temperatura della ghisa proveniente dal cubilotto omogeneizzandola e rimescolandola, avere sempre un polmone di ghisa fusa tra forno fusorio e zona di utilizzazione, poter fare aggiunte di ferroleghie, di rottami, di additivi ed altro e controllare così metallurgicamente la composizione della lega.

La disponibilità di uno o più forni di attesa consente una condotta più elastica di tutta la fonderia relativamente alla produzione quantitativa e qualitativa. Con una potenza elettrica impegnata relativamente limitata si possono fare grandi produzioni con i cubilotti e, trattando la ghisa fusa al forno elettrico di attesa, ottenere quei risultati tecnologici e metallurgici che si ottengono normalmente con i forni elettrici fusori.

## Marcia duplex

La marcia duplex è l'applicazione più caratteristica e più diffusa del forno ad induzione d'attesa. Il suo accoppiamento può avvenire con qualsiasi forno fusorio come: forno a combustione, forno ad arco, forno ad induzione, cubilotto. Quest'ultimo è quello che caratterizza la marcia duplex più comune nella fonderia di ghisa.

I tipi di forni ad induzione più usati, come componenti di sistemi duplex, sono quelli a frequenza di rete (B.F.) che si distinguono in due categorie:

- Forni ad induzione con canale chiuso.
- Forni ad induzione a crogiolo.

I vantaggi dei forni a canale su quelli a crogiolo sono i seguenti:

- Installazione meno costosa e meno ingombrante, riferita alla capacità, con conseguente minore incidenza di ammortamenti ed interessi del capitale sul costo della ghisa.

- Fattore di potenza più elevato, per cui non occorrono le grandi batterie di condensatori rifasatori indispensabili con i forni a crogiolo.

Ad esempio, nel caso dell'installazione del forno ad induzione a crogiolo da 1.500 kVA sono necessari 7.500 kVA<sub>r</sub> per rifasare a  $\cos \varphi = 0,9$  il fattore di potenza, mentre per rifasare a  $\cos \varphi = 1$  il fattore di potenza dei forni con canale, avente la potenza di 400 kVA, bastano 185 kVA<sub>r</sub>.

- Basse perdite e quindi rendimento elettrico più elevato (15 ÷ 20% superiore).

- Minori perdite a vuoto (fig. 93) con conseguente risparmio nella marcia notturna e festiva (a parità di capacità il consumo è circa la metà di quello dei forni a crogiolo).

Per contro, i vantaggi dei forni a crogiolo su quelli a canale sono i seguenti:

- Potenze massime applicabili, a parità di capacità, più elevate (circa doppie rispetto ai forni a canale chiuso). Si noti che già i forni ad induzione a crogiolo a frequenza di rete hanno potenze massime applicabili ridotte rispetto ai forni ad arco ed ai forni ad induzione ad alta frequenza (da ciò deriva la rapidità

di fusione di questi ultimi nei confronti dei forni ad induzione a frequenza di rete).

- Temperatura raggiungibile più elevata, superiore a 1.823 K (1.550 °C) contro i 1.773 K (1.500 °C) dei forni con canale. Tale diversità è dovuta allo svantaggio dei forni con canale di avere un notevole gradiente fra la temperatura del canale e quella del bagno, almeno 50 °C.

Nei più recenti tipi di forni con canale, ossia quelli con canale aperto, e con canale incorporato l'inconveniente è stato notevolmente ridotto.

- Minore costo del rivestimento refrattario e facilità di esecuzione dello stesso: in certi casi si riesce a rifare la pigiata dal venerdì sera al lunedì mattina, mentre nei forni con canale il rifacimento richiede almeno una settimana dalla messa fuori servizio alla ripresa del normale funzionamento. Di conseguenza, con i forni con canale è indispensabile avere un involucro di riserva, mentre con i forni a crogiolo può non essere necessario.

- L'intensa agitazione del bagno dei forni a crogiolo crea le migliori condizioni per effettuare le carburazioni e le desolforazioni che possono essere richieste.

Da un approfondito esame dei pregi dell'uno e dell'altro tipo di forno ad induzione deriva la scelta del tipo più conveniente per l'applicazione specifica.

In linea di massima si sceglie il forno a crogiolo quando è indispensabile raggiungere temperature oltre i 1.773 K (1.500 °C) e quando le operazioni di affinazione sono di entità tale da richiedere una forte potenza applicata ed una intensa agitazione: negli altri casi, per il minore costo di impianto ed economia di esercizio si ricorre ai forni con canale.

Per i vantaggi offerti dall'adozione del sistema duplex nella soluzione di problemi di fonderia sono presi in esame solo i problemi che, sia pure in misura diversa, sono comuni alla maggior parte delle fonderie: premettendo che è spesso la concomitanza di alcuni di essi che rende difficile la soluzione con il forno fusorio singolo e porta a ricorrere ad un sistema duplex.

#### Possibilità di effettuare la spillata e la scorificazione continua senza che la ghisa subisca perdite di temperatura

I moderni cubilotti sono a spillata continua con sifone per la scorificazione. È noto, però, che, dotando i cubilotti di avanfori freddi, si deve scontare una perdita di temperatura notevole che, nel caso dei cubilotti acidi a vento freddo, risulta spesso intollerabile.

Il duplex cubilotto-forno elettrico permette, in ogni caso, di usufruire dei vantaggi della spillata continua, data la possibilità di surriscaldare nel forno elettrico la ghisa proveniente dal cubilotto.

#### Possibilità di eseguire un rifornimento regolare ed elastico della ghisa alle linee di colata

Le linee di colata degli impianti meccanizzati necessitano di un rifornimento continuo e nello stesso tempo elastico.

Quando, poi, la fonderia è composta da diversi impianti di cui alcuni a richiesta continua ed altri a richiesta discontinua, si verificano notevoli oscillazioni nell'assorbimento di ghisa. Il fenomeno è esaltato allorché si devono colare saltuariamente anche getti di grande mole.

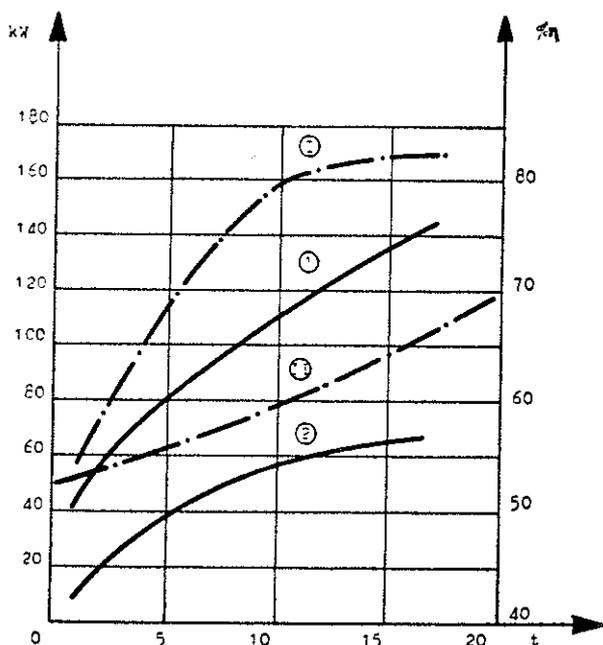


Fig. 93 - Rendimenti dei forni elettrici ad induzione in funzione della capacità.

I - Forni con canale  
II - Forni con crogiolo

Andamento delle perdite a vuoto in kW, per il funzionamento di attesa

1 - Forni con crogiolo  
2 - Forni con canale

In questi casi l'introduzione del sistema duplex permette, grazie al volano di ghisa liquida sempre pronta esistente nei forni elettrici, di fare fronte alle inevitabili discontinuità di assorbimento.

Nel caso dell'installazione di forni con canale si è anche ottenuto di passare da due coppie di cubilotti (di cui una serviva gli impianti meccanizzati a colata continua e l'altra la fonderia Sandslinger e la fonderia a mano), ad una sola coppia di cubilotti con avanfori elettrici. Il vantaggio economico derivante da questa concentrazione è rappresentato da un abbassamento del costo di fusione, attribuibile al cubilotto, del 10% circa. Il maggiore onere attribuibile agli avanfori elettrici presenti nella nuova soluzione è compensato da altri vantaggi.

Possibilità di surriscaldare la ghisa e distribuirla a temperatura costante

L'esigenza è particolarmente sentita dalle fonderie che producono in grande serie getti di spessore sottile e di grande superficie (vasche da bagno, radiatori, caldaie, ecc.).

In certi casi il duplex ha permesso di ridurre lo spessore e quindi il peso dei getti fino al 20%.

Anche le fonderie con impianti meccanizzati per getti vari possono avere buoni vantaggi da una costanza della temperatura di colata. Nel caso dell'installazione di forni con canale l'introduzione del sistema duplex ha permesso di ridurre dello 0,25% lo scarto totale solo per la diminuzione dei getti incompleti.

Importantissima risulta la costanza della temperatura nella produzione dei getti di ghisa sferoidale. Infatti, variazioni in più o meno della temperatura di trattamento portano a ghise sferoidali con basse percentuali di sferoidi od a residui di magnesio troppo elevati con i relativi difetti di fonderia.

La possibilità di surriscaldare la ghisa, attraverso un ciclo termico prestabilito, permette di migliorarne le caratteristiche meccaniche e fisiche, a parità di composizione chimica. La fig. 94 indica i risultati ottenuti in una nota fonderia italiana.

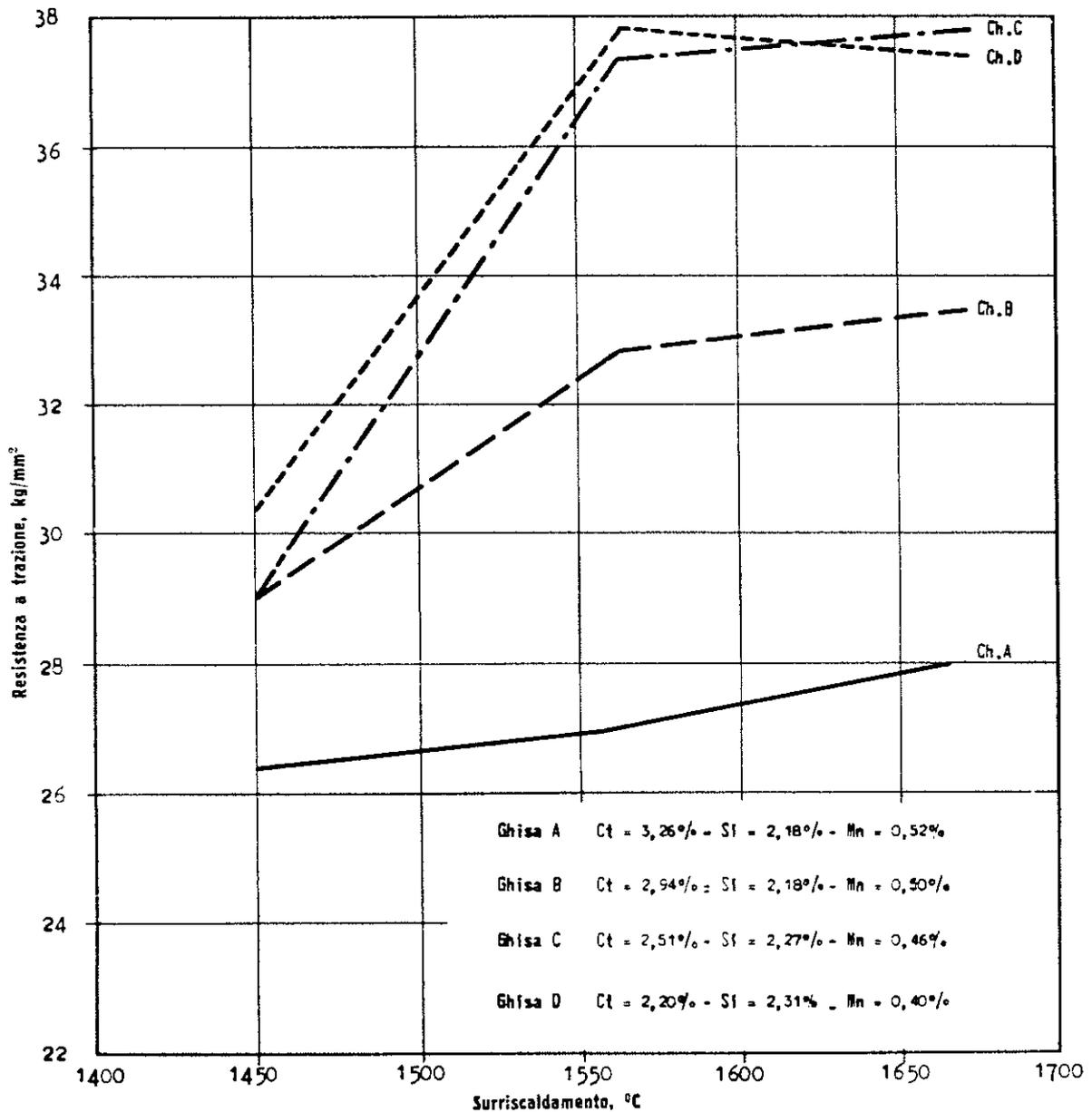


Fig. 94 - Influenza del surriscaldamento della ghisa in forno sulla resistenza a trazione.

### Possibilità di mantenere analisi e caratteristiche meccaniche costanti

Con l'introduzione di impianti meccanizzati sempre più spinti per le produzioni di grande serie e di prescrizioni di collaudo metallurgico sempre più rigorose, si acuisce la necessità di avere garantita la massima omogeneità di composizione della ghisa. Di conseguenza, deriva l'opportunità di un mezzo che abbia la prerogativa di miscelare la ghisa proveniente dal forno fusorio ed inoltre permetta di eseguire le dovute correzioni qualora la composizione stessa si scosti da quella desiderata.

Nel caso dell'installazione di forni con canale, l'introduzione del sistema duplex ha permesso di ridurre dello 0,65% lo scarto totale, solo per riduzione di getti scarti per analisi errata e per caratteristiche meccaniche insufficienti rispetto alla produzione precedentemente eseguita direttamente al cubilotto.

### Possibilità di carburare e decarburare la ghisa

Il processo duplex — mediante l'introduzione di elementi carburanti al forno di attesa quali: coke granulare, grafite di elettrodi e simili — permette di aumentare la percentuale di carbonio nel bagno di ghisa.

Per quanto possa sembrare che la massima carburazione si possa ottenere direttamente ai forni fusori sia cubilotti sia elettrici ad arco, per la presenza di coke in forti quantità e di scorie appropriate, è stato però dimostrato che al forno elettrico ad induzione a bassa frequenza si ottengono i migliori risultati.

Infatti, la bassa temperatura induce moti convettivi nel bagno tali da favorire il contatto liquido solido ed il tempo di permanenza può essere regolato convenientemente, date le basse potenze applicate.

Il caso inverso può essere la richiesta di una riduzione della percentuale di carbonio. L'operazione è molto più semplice della precedente e richiede solo la possibilità di regolare il controllo quantitativo delle correzioni alla miscela liquida disponibile.

In questo caso si deve garantire un sufficiente surriscaldamento.

Per quanto detto in questo paragrafo, si deve concludere che l'impiego nel duplex del forno elettrico ad induzione a bassa frequenza è da considerare il più idoneo.

### Possibilità di ottenere ghise con minimo contenuto di gas

È noto il vantaggio offerto dalla fusione in duplex forno ad arco-forno ad induzione per l'assenza di aria e combustibili generatori di gas. Anche nel caso del duplex cubilotto-forno ad induzione la permanenza della ghisa nel forno di attesa offre dei benefici agli effetti della degasificazione.

In certi casi l'introduzione del sistema duplex ha avuto una influenza decisiva sull'eliminazione delle *punte di spillo* sui getti di ghisa sferoidale: ciò è da attribuirsi soprattutto al surriscaldamento della ghisa nel forno ad induzione.

### Possibilità di effettuare la disossidazione e la desolfazione della ghisa

Questa possibilità, specialmente per ghise prodotte al forno elettrico, è già stata ampiamente illustrata e ne

sono stati dimostrati i benefici effetti sia sulla fluidità della ghisa che sulla struttura e sulle caratteristiche meccaniche riscontrate nei getti.

Si sottolinea l'importanza della possibilità di desolfurare, nel forno di attesa, la ghisa per la preparazione della sferoidale prodotta al cubilotto acido, sia attraverso una scoria desolforante (con aggiunta di carburo di calcio nel bagno metallico), sia con iniezioni, sotto corrente di azoto o di ossigeno, di carburo di calcio nel bagno metallico.

È stata anche sperimentata con qualche successo la desolfurazione eseguita con aggiunta di soda granulata sul canale di collegamento fra cubilotto ed avanforno, prima di un apposito sifone scorificatore.

### Possibilità di produrre simultaneamente allo stesso impianto fusorio più tipi di ghisa

Questa possibilità è ottenuta producendo ghisa unica al forno fusorio e, mediante correzione con aggiunte solide, modificarla nei forni ad induzione, per servire simultaneamente ghise di diverso tipo alle linee di colata. Tale procedura è molto conveniente, usando come forni fusori il forno elettrico ad arco od il cubilotto metallurgico ove si possono ottenere ghise uniche molto economiche, dato il basso costo delle cariche.

Molto frequente è il caso che si devano produrre nella stessa giornata ghise grigie e ghise sferoidali: se non risulta conveniente adottare impianti fusori separati, si può ricorrere ad un sistema duplex composto da una coppia di cubilotti basici con due forni ad induzione o, come ripiego e solo quando la produzione di sferoidale è limitata, una coppia di cubilotti acidi con due forni ad induzione.

L'installazione di uno o più avanfori ad induzione per funzionamento in duplex con cubilotto o cubilotti, può assumere disposizioni differenti a seconda se la colata è continua od alternata ed in ciascuno di questi due casi si può avere l'avanforno fisso o mobile su rotaie, con riempimento alternato da due cubilotti, con riempimento laterale o superiore, mediante appositi canali di alimentazione od altro sistema; alcune soluzioni sono riportate in fig. 95 (l'ultimo disegno rappresenta un receiver caricato a mezzo di sivera trasportabile). In riferimento a questi disegni si ha nel primo una condotta continua per l'avanforno che si sposta da un cubilotto all'altro con colata alternata. La colata della ghisa può avvenire in piccoli o grandi quantitativi. Il secondo si riferisce ad un duplex con colata continua dove i cubilotti alimentano alternativamente i due avanfori ad induzione con prelievo di piccole e grandi quantità. Infine la terza soluzione è quella di due cubilotti che alimentano, alternativamente con colata continua o discontinua, l'avanforno ad induzione del tipo fisso.

La condotta dei vari sistemi di duplex è intuibile dopo quanto si è detto precedentemente. Si può aggiungere soltanto che anche i canali di colata e di unione tra cubilotto ed avanforno hanno alcune esigenze costruttive e di manutenzione, così come il riscaldamento iniziale, la pulizia dalle scorie e la protezione termica per evitare cadute di temperatura.

La marcia duplex comporta apparentemente un aumento dei costi di fusione, ma l'aumento è largamente compensato se si valutano i vantaggi sopra esposti. Per

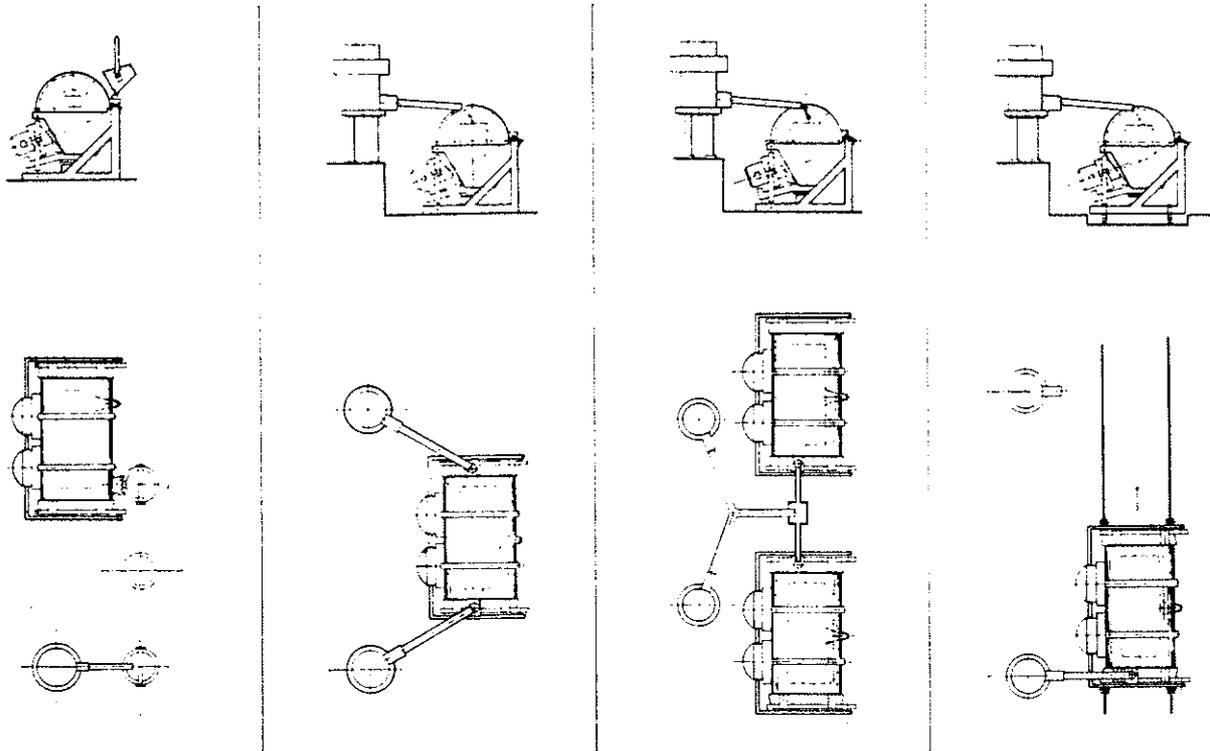


Fig. 95 - Vari metodi di installazione degli avanfori e receivers ad induzione in duplex con cubilotti.

dare un'idea del valore dell'aumento dei costi di fusione, si cita un caso concreto relativo ad un avanforno da 100 t di capacità accoppiato a cubilotti a vento caldo per una produzione di 200 t in 24 h (fig. 96).

Tenuto conto di: investimenti ed ammortamenti, manodopera, manutenzione e consumo di refrattario ed energia elettrica, si ha una spesa totale di circa 3.000 Lit/t di ghisa surriscaldata  $1.723 \div 1.823$  K ( $1.450 \div 1.550$  °C) e ciò conferma pertanto la previsione economica fatta.

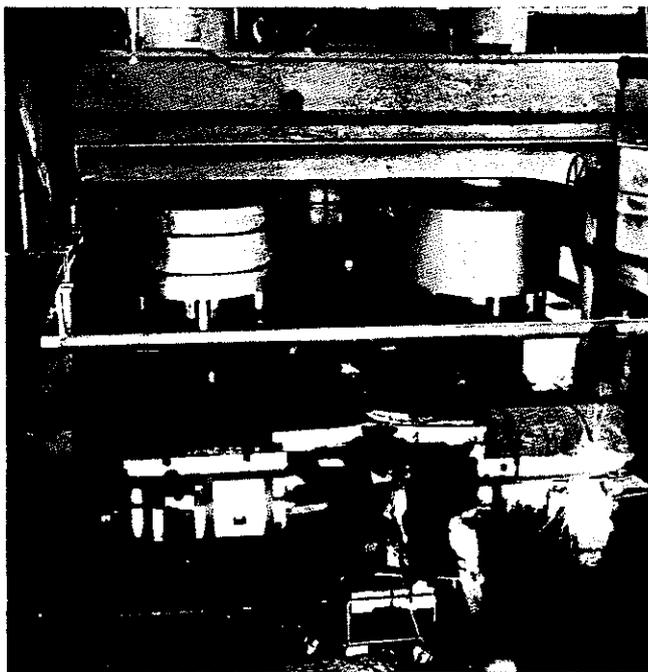


Fig. 96 - Duplex cubilotti-avanfori ad induzione da 6 t.

### Forni di colata

L'uso di forni di colata ad induzione nella fonderia di ghisa, pur risalendo agli anni '50, ha avuto un largo impiego con il diffondersi delle macchine a formare del tipo automatico e continuo, dei caroselli e delle linee di colata continua. La sua funzione è di effettuare la colata della ghisa fusa direttamente nelle staffe o nelle motte, mantenendo costante la temperatura. Pertanto essa riceve la ghisa liquida proveniente direttamente dal forno fusorio o dal forno di attesa, ed in quest'ultimo caso il funzionamento duplex diventa triplex. La principale prerogativa di un forno di alimentazione è quella di assicurare il più possibile una certa continuità di marcia.

Per la sua funzione, l'installazione di questo forno è fatta in base al tipo ed in base alla macchina cui deve essere accoppiata. Infatti, può essere del tipo a colata diretta, a colata con dosatore, a colata a tampone ed a colata per pressione di gas. Le prime due sono normalmente comandate a mano, mentre le seconde possono avere un funzionamento automatico, essendo controllate da un'apparecchiatura elettronica che regola la quantità della ghisa colata.

Il forno di colata diretta e quello di colata con dosatore sono normalmente montati su carrello mobile nel senso longitudinale e trasversale e sul quale è piazzata anche la cabina del manovratore. La loro postazione è fatta in base a tale caratteristica costruttiva, necessariamente vicina al punto di colata; esse sono adatte per l'accoppiamento a macchine formatrici automatiche (Disamatic e simili) (fig. 97) caroselli e linee continue di colata. Pur essendo in genere di piccola capacità ( $500 \div 2.000$  kg), i forni sono abbastanza ingombranti per cui è sempre necessario un progetto per la loro installazione. Per assicurare la continuità della colata, i moderni forni sono costruiti in modo da consentire un facile ricambio del bacino, tanto che è sempre opportuno avere uno di

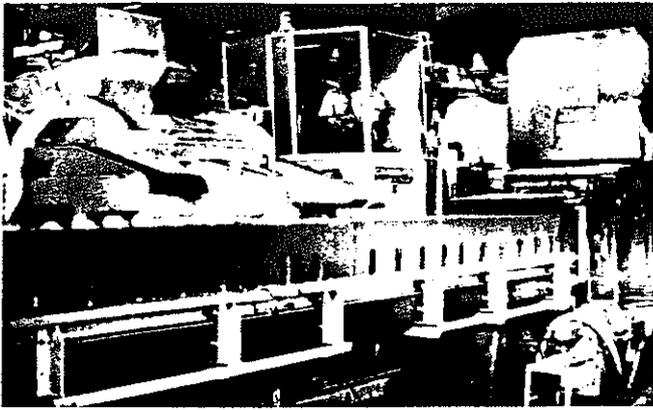


Fig. 97 - Siviera ad induzione accoppiata alla Disamatic durante la colata.

questi di riserva. Il riempimento può avvenire mentre i forni sono impegnati nelle operazioni di colata, come si richiede in questi casi. Con il forno di colata con dosatore è possibile anche effettuare l'inoculazione di elementi e di scorificanti durante la colata.

I forni di colata a tampone con funzionamento automatico sono montati in modo stazionario e possono alimentare formatrici automatiche ad avanzamento costante, con getto diretto; hanno un ingombro inferiore ai precedenti e sono facilmente governabili, ma la difficoltà di poter avere dei tamponi stabili e resistenti dà luogo a frequenti arresti della marcia automatica, con conseguenti arresti della produzione.

I forni automatici con colata a pressione (fig. 98) sono anch'essi meno ingombranti di quelli con comando manuale ed il loro funzionamento automatico è semplice e razionale, sia per il controllo della marcia sia per la condotta. L'unico inconveniente è che ad ogni riempimento è necessario interrompere l'operazione di colata. La loro postazione deve necessariamente essere più vicina possibile alla macchina a colare ed il suo accoppiamento al punto di colata è fatto normalmente a mezzo di appositi canali di colata.

Altre interessanti applicazioni dei forni di colata ad induzione sono: l'alimentazione di macchine per colata centrifuga, l'alimentazione di macchine per colata con-

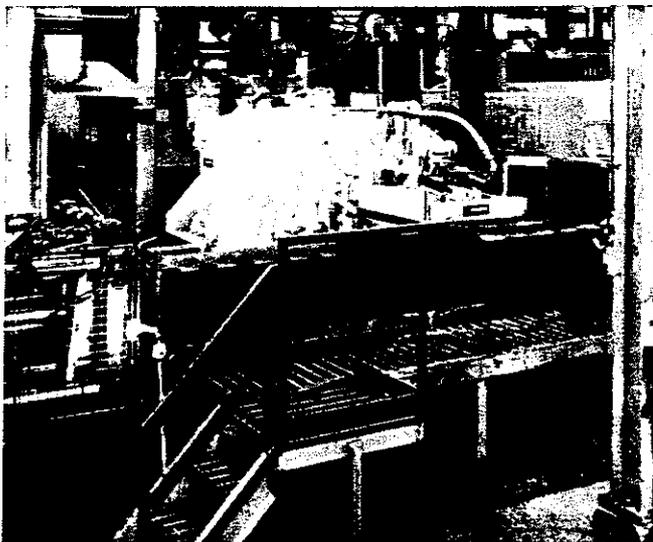


Fig. 98 - Siviera ad induzione con colata automatica, a pressione.

tinua e semicontinua di barrotti, placche, tubi ed altri sagomati di ghisa ed altre applicazioni più comuni.

La condotta di tutti i tipi di forni di colata è simile ai forni ad induzione di attesa con canale. Da controllare, ad evitare surriscaldi, è l'assorbimento di potenza che, per non distogliere il manovratore dal suo lavoro di colata, sarebbe opportuno controllare a mezzo di un dosatore d'energia.

Prima di decidere l'installazione di un forno di colata per la ghisa grigia, devono essere attentamente valutati i seguenti punti:

- Costo elevato dell'impianto.
- Difficoltà di cambiare tipo di ghisa nel corso di una giornata lavorativa.
- Rilevante effetto di evanescenza dell'inoculazione effettuata all'atto del travaso della ghisa nel forno stesso.
- A seguito della predetta evanescenza dell'inoculazione, necessità di installare un dispositivo di inoculazione all'atto del riempimento della forma.

## CONSIDERAZIONI METALLURGICHE

Dopo avere chiarito gli aspetti fondamentali della costruzione e del funzionamento dei forni ad induzione, si possono esaminare le considerazioni metallurgiche che ne consigliano l'impiego.

Si ricorda in proposito che le possibilità pratiche offerte al fonditore da questo tipo di forno sono:

- Il forno ad induzione è un mezzo pulito di fusione della ghisa. La carica iniziale e le aggiunte successive agiscono tra loro in funzione del tempo e del livello di temperatura.
- Il livello di temperatura ed il suo raggiungimento si possono regolare a seconda della necessità.
- Il livello della temperatura della superficie del bagno è, in fase di attesa e nel caso di piccola potenza applicata, inferiore al livello di temperatura del bagno.
- Le forze elettromagnetiche che si sviluppano con l'applicazione della potenza elettrica agiscono soltanto sul metallo.
- L'estensione della superficie del metallo rispetto alla quantità del metallo nel bagno si può scegliere liberamente. Però in pratica si adottano dimensioni economiche.
- La composizione chimica del refrattario si può scegliere a piacere, purché questo resista alle sollecitazioni termiche e meccaniche.
- L'influenza della composizione dell'atmosfera del forno può essere eliminata operando sotto vuoto.

Il comportamento metallurgico della ghisa nel forno ad induzione dipende da molti fattori comuni a tutte le reazioni chimiche ed essenzialmente da: temperatura, concentrazione, superficie di reazione, tempo di reazione, composizione della miscela, tonalità termica.

Le reazioni desiderate ed indesiderate che avvengono durante la fusione e l'attesa della ghisa si possono prevedere con l'aiuto della chimica-fisica sia qualitativamente che quantitativamente (in modo approssimato).

## Forni fusori

È fuori discussione che i forni elettrici fusori ad induzione sia a canale che senza canale (crogiolo) siano gli

apparecchi che più generosamente soddisfano le esigenze sempre crescenti dei metallurgisti di oggi. Con questi impianti, in effetti, si può elaborare qualunque tipo di ghisa (grigia, speciale, malleabile, sferoidale), eseguire sofisticate correzioni di oligoelementi, cambiare rapidamente i costituenti la carica metallica, regolare le temperature di colata più adatte alle necessità, senza provocare perdite di tempo al processo produttivo.

Per quanto si riferisce alla ghisa grigia, è consigliabile l'installazione di forni elettrici ad induzione quando per la produzione dei getti siano richieste una composizione chimica ed una temperatura di colata comprese entro stretti limiti.

L'esperienza pratica ha dimostrato che gli stessi getti fusi in ghisa grigia, a parità di analisi chimica, prodotti utilizzando cariche metalliche costituite da miscele di materiali diversi, presentano una scarsa tendenza alla fluttuazione delle caratteristiche fondamentali come durezza, resistenza alla trazione e struttura micrografica.

Contrariamente alle aspettative, però, l'impostazione esatta di queste caratteristiche unite alle misure necessarie per evitare difetti, quali risucchi e zone ricche di cementite sugli spigoli dei getti, procurano, non di rado, difficoltà non trascurabili.

È noto come il rimescolamento del metallo, il surriscaldamento e le attese prolungate distruggano progressivamente il numero dei germi di grafitizzazione, per cui una ghisa prodotta al forno elettrico tende ad essere più bianca, cioè avere una tendenza alla tempra maggiore, di una elaborata al cubilotto; la situazione può essere comunque superata, curando particolarmente i trattamenti di inoculazione da realizzare anche all'interno della staffa, quando necessario, sia con leghe tradizionali a base di ferro-silicio, che con altre nuove combinazioni di calcio, zirconio, bario, terre rare.

Per getti con spessori sottili o particolarmente ricchi di spigoli si può utilizzare nella carica metallica ghisa in pani in ragione del 10 ÷ 30%, e si dovranno contemporaneamente evitare inutili attese della ghisa ad alta temperatura.

Se non si applicano inoculazioni appropriate, in linea generale si può confermare che la qualità del materiale decresce in funzione della temperatura e del tempo di surriscaldamento.

Considerando che l'incremento di temperatura nei forni ad induzione a crogiolo avviene con discreta rapidità, è indispensabile controllare rigidamente questo parametro per evitare notevoli variazioni di temperature di colata.

In proposito può essere utile l'impiego del dosatore di energia, il quale provvede ad erogare al forno la giusta quantità di energia elettrica, evitando surriscaldi, ossidazioni, sprechi di additivi e di energia.

Una volta fissate le diverse caratteristiche produttive di un getto, per ottenere sempre, nel tempo, le stesse proprietà finali, occorre controllare, in maniera continua e scrupolosa, i seguenti parametri:

— Composizione chimica del metallo, il cui controllo deve essere esteso oltre gli elementi tradizionali quali C, Si, Mn, fino a considerare le influenze degli elementi che, anche in basse concentrazioni, possono alterare i rapporti perlite-ferrite, la tendenza alla tempra, la lavorabilità. Elementi chimici cioè come cromo, nichel, molibdeno, stagno, fosforo, rame,

titanio, presenti sempre più frequentemente nei rottami di acciaio che si utilizzano ed i cui contenuti rimangono quasi invariati durante la fusione elettrica.

— Temperatura di colata: deve essere la più costante possibile, sia per evitare gli inconvenienti di cui si è già parlato che inutili sprechi di energia elettrica. Ciò è pure ottenibile con l'impiego del dosatore di energia.

— Tempo di raffreddamento in staffa dopo la colata: questo tempo deve essere convenientemente lungo e tale da non distaffare i getti a temperature superiori a  $673 \div 723$  K ( $400 \div 450$  °C) in modo tale da evitare fenomeni di tempra superficiale con formazione di strutture sorbitiche dure e difficilmente lavorabili, e togliere le tensioni interne che si instaurano nel getto all'atto della solidificazione, e che lo rendano nelle zone critiche (per esempio nelle variazioni brusche di spessori) particolarmente fragile. Un buon raffreddamento in staffa può sostituire, in certi casi, successivi trattamenti termici di stabilizzazione.

Il controllo scrupoloso dei tre parametri suddetti consente di ottenere, oltre la costanza delle caratteristiche meccaniche e strutturali, un'altra proprietà che da esse direttamente discende, particolarmente ricercata ed apprezzata dalle officine meccaniche: identica lavorabilità per tutti i getti. Ciò significa mantenere costanti gli avanzamenti di taglio, il tipo di utensili, le velocità di lavoro e soprattutto riuscire a programmare preventivamente la sostituzione degli utensili; ciò comporta grandi vantaggi di produttività ed economie di lavoro.

Nel seguente esempio si cercherà di approfondire una applicazione particolare dei forni ad induzione a frequenze di rete e precisamente l'ottenimento, attraverso la carburazione dell'acciaio, di una vasta gamma di ghise, aventi caratteristiche meccaniche e metallurgiche superiori a quelle delle ghise analoghe fuse al cubilotto. Per semplicità ed in analogia con l'uso fattone nella letteratura tecnica anglosassone, si adotterà per la ghisa così prodotta il termine *ghisa sintetica*.

Perché un tale procedimento possa trovare la sua ragion d'essere, occorre che la sua validità sia confermata da una valutazione economica e metallurgica del problema. Considerata la varietà delle situazioni particolari di ogni fonderia, è difficile trovare un accordo o quanto meno una uniformità di giudizi sull'aspetto economico della carburazione dell'acciaio.

Tutti conoscono, infatti, la difficoltà di reperire sul mercato rottami di acciaio di qualità soddisfacente e soprattutto costante, in quantità sufficiente e ad un prezzo concorrenziale rispetto a quello della ghisa in pani.

Si verifica però per alcune fonderie, particolarmente per quelle collegate con industrie meccaniche, siderurgiche o cantieristiche, la disponibilità di forti quantitativi di sfridi di lamiera ovvero di boccame o di tornitura selezionata di acciaio; per cui il problema assume una validità ed un interesse notevoli.

Le stesse considerazioni valgono per l'inserimento di tale procedimento nel ciclo di produzione della fonderia. Anche in questo caso l'utilità del procedimento è legata e condizionata dalla situazione di impianti e di esercizio del reparto forni di ogni singola fonderia.

Relativamente all'aspetto metallurgico è, invece, più facile trarre conclusioni di validità generale.

Sotto questo punto di vista le esigenze da soddisfare sono essenzialmente:

- Ottenere, con garanzia di elevata qualità ed assoluta riproducibilità, tutta la gamma delle normali ghise.
- Rendere possibile e rapido il passaggio da un tipo di ghisa all'altro (entro determinati limiti) mediante correzione del bagno e senza totale svuotamento del forno.
- Inserire questa produzione nel problema più generale della scelta e dell'utilizzazione dei materiali metallici nella fonderia.

Sempre dal punto di vista metallurgico, le soluzioni possibili sono due: ghisa totalmente sintetica, in cui l'acciaio carburato sostituisce tutti i normali costituenti della carica, e ghisa parzialmente sintetica, in cui sostituisce la sola ghisa in pani.

I vantaggi della prima soluzione sono: semplificazione delle operazioni di pesata e di carica, facilità di modifiche al bagno metallico e sicurezza di analisi.

I vantaggi della seconda soluzione sono dati soprattutto dalla possibilità di utilizzare i ritorni ed il boccame di giro specie nel caso in cui questi o per il valore commerciale (ghisa sferoidale) o per la presenza di particolari elementi non possano essere destinati alla carica dei cubilorti.

Si può naturalmente prevedere anche una soluzione intermedia, con ghisa totalmente sintetica per alcuni tipi di metallo e ghisa parzialmente sintetica per altri, come ad esempio la ghisa sferoidale.

Prima di analizzare le singole reazioni metallurgiche che intervengono nell'elaborazione dei vari tipi di ghisa sintetica, si premette una breve descrizione del forno ad induzione servito per le prove di produzione, e dei materiali che costituiscono la carica, con un accenno alla preparazione delle cariche.

#### Forno ad induzione a bassa frequenza

Nell'esempio presente si tratta di un forno monofase a frequenza di rete con crogiolo della capacità di 6.000 kg (diametro 880 mm ed altezza 1.750 mm) e con le seguenti caratteristiche elettriche:

- Tensione massima di alimentazione del forno 500 V.
- Intensità di corrente massima assorbita dal forno 12.000 A.
- Intensità di corrente massima con linea rifasata 2.000 A.
- $\cos \varphi$  0,8 ÷ 0,9 ottenuto con 4 batterie di condensatori di cui una ad inserimento automatico.
- Potenza media assorbita 850 kW.
- Produzione oraria 1.200 kg di ghisa a 1.773 K (1.500 °C) con un consumo di circa 0,7 kWh/kg.
- Velocità di surriscaldamento del bagno metallico (a forno pieno) circa 276 K/min (3 °C/min).
- Raffreddamento con acqua (a circuito aperto) delle spire.

La potenza assorbita varia molto con il coefficiente di riempimento del forno e si riduce a meno di 200 kW nel caso di un fondo-bagno inferiore a 500 kg; in queste condizioni, le calorie dissipate equivalgono all'incirca a quelle assorbite ed il processo di fusione delle cariche solide è rallentato fortemente ed anche bloccato. Per questo motivo lo svuotamento del forno (a meno di successiva integrazione con carica liquida) non dovrebbe mai essere spinto oltre l'80% della capacità (fig. 99).

La resistenza del refrattario, nelle condizioni di marcia di circa 10 h giornaliere, corrisponde alla fusione di circa 1.000 ÷ 1.200 t di ghisa.

#### Materiali di carica

- Mezzi carburanti: inizialmente sono stati provati il polverino di coke ed i rottami di elettrodi di grafite, ma i migliori risultati sono stati ottenuti con una speciale grafite ad alto carbonio e con basso tenore di zolfo (0,20%) disponibile sul mercato in pezzatura 2 ÷ 5 mm.
- Acciaio: le prove sono state condotte su tre tipi di acciaio selezionato e su acciaio in monte di provenienza varia e qualità eterogenea. Le analisi medie dei materiali sono:

	C%	Si%	Mn%	S%
— Sfridi di lamiera	0,15	0,20	0,70	0,025
— Ritagli di molle	0,55	1,65	0,80	0,020
— Boccame di acciaio	0,12	0,40	0,70	0,025
— Rottame di acciaio in monte	—	—	—	—

- Ferroleghie: ferro-silicio 75 ÷ 80%; ferro-manganese 18 ÷ 20% e 75 ÷ 80%; ferro-cromo 55% e 60 ÷ 65%; ferro-vanadio 80%; ferro-molibdeno 60 ÷ 65%; rame in catodi.

Nel caso di una ghisa totalmente sintetica, l'esecuzione delle cariche è grandemente facilitata dal trasporto dell'acciaio in contenitori di tara conosciuta pesari all'atto stesso del rovesciamento e svuotamento mediante lettura diretta del dinamometro applicato al gancio della gru.

In questo modo, l'aggiunta della grafite e delle ferroleghie può essere calcolata con la massima precisione ed immediatezza; per la grafite, poi, fornita in sacchetti del peso di 20 kg, la pesata si riduce alle quantità che eccedono tale misura od un suo multiplo.

La valutazione del metallo presente nel forno può essere fatta da un occhio esercitato con un errore del 5 ÷ 10%; è anche possibile usare aste tarate di controllo che, però, non possono tener conto della variazione di capacità del forno dovuta al progressivo consumo del refrattario.

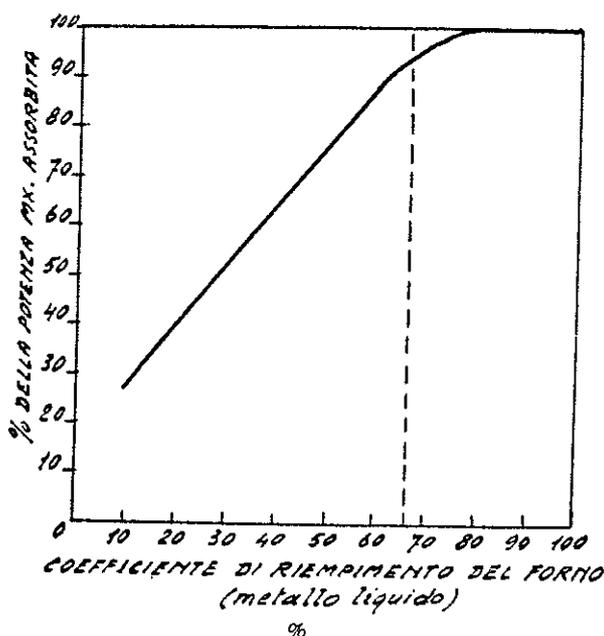


Fig. 99 - Relazione tra potenza assorbita ed altezza del bagno.

L'impiego di tornitura di acciaio, in sostituzione di una parte della carica, è sempre possibile ed economicamente conveniente; lo stesso dicasi per la tornitura di ghisa, a condizione che la raccolta e l'immagazzinamento diano la certezza di una perfetta separazione dei vari tipi di materiale.

Con il forno ad induzione e con i materiali ora descritti sono state prodotte sinora più di 100 t di ghisa sintetica: in via sperimentale per le ghise meccaniche ad elevata, media e bassa resistenza e per le ghise tipo lingottiera, e parallelamente alla normale produzione per le ghise a grafite sferoidale.

### Carbonio

La carburazione dell'acciaio può essere ottenuta in due modi:

- Aggiungendo il mezzo carburante sulla superficie del bagno fuso.
- Caricando il mezzo carburante insieme alla carica metallica fredda.

L'andamento della carburazione *in superficie* in funzione del tempo è rappresentato schematicamente dal diagramma di fig. 100. Inoltre, bisogna tenere presente che la velocità di carburazione è funzione anche della temperatura del metallo e della velocità di diffusione del carbonio presente (e quindi del movimento del bagno).

In generale, si può dire che la carburazione in superficie risulta un procedimento lento e dai risultati non soddisfacenti.

Appare invece molto più efficace l'aggiunta della grafite insieme all'acciaio durante la carica del materiale solido; la proporzione dei due materiali non richiede cure particolari ed eventuali squilibri in favore dell'uno o dell'altro sono annullati a fine carica ed a bagno totalmente fuso.

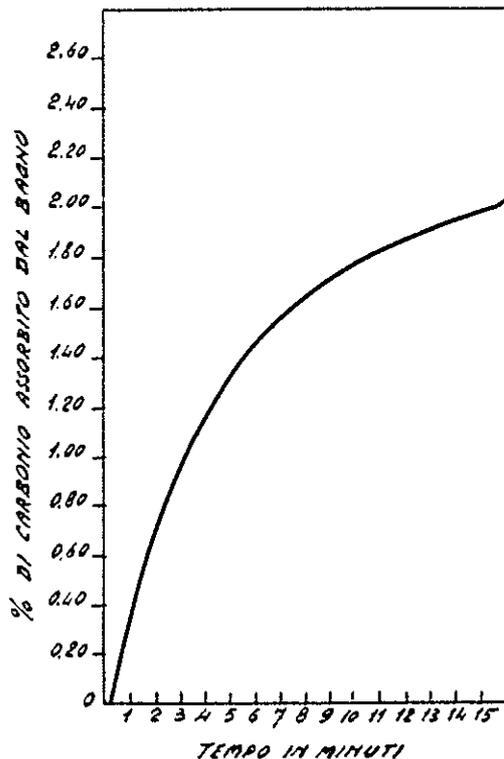


Fig. 100 - Carburazione in superficie. Carbonio iniziale del bagno 1%. Carbonio aggiunto 2,5%.

Si ha pure il vantaggio di proteggere maggiormente il rivestimento refrattario del forno dall'azione aggressiva dell'acciaio e non si corrono pericoli di surriscaldamento del bagno, sempre possibili con una massiccia aggiunta di grafite in superficie.

La carburazione in superficie è invece utile nel caso si richiedano variazioni in aumento della percentuale di carbonio dell'ordine di  $0,1 \div 0,3\%$ . In questo caso, le quantità di grafite sono relativamente piccole, l'assorbimento del carbonio richiede un tempo limitato ed il movimento del bagno è in grado di mantenere libera una certa porzione della superficie, per cui diventa possibile il controllo pirometrico della temperatura.

Le rese di carburazione riscontrate con l'aggiunta della grafite insieme alla carica solida sono molto elevate: non tenendo conto delle ceneri presenti nel mezzo carburante, si raggiungono facilmente e sicuramente rese dell'ordine del 90%.

Le rese di carburazione in superficie sono inferiori (intorno al  $60 \div 70\%$ ) ed occorre una certa cura nella scorificazione del bagno e nel controllo della temperatura per ottenere risultati costanti e riproducibili (tab. XXVII).

Partendo da un bagno di 4.700 kg con carbonio iniziale 2,68% ed aggiungendo ogni volta in superficie 20 kg di grafite, la resa è risultata successivamente pari al 74-55-74-74%, mentre il carbonio del bagno è passato rispettivamente a 2,96-3,17-3,45-3,73%. Entro certi limiti la resa di carburazione non è quindi influenzata dal carbonio presente.

Anche l'influenza del tenore di silicio non appare sensibile; applicando entrambi i sistemi di aggiunta della grafite e mantenendo il silicio nei limiti di analisi delle normali ghise, non si sono riscontrate variazioni significative.

L'abbassamento della percentuale di carbonio, ottenibile attraverso diluizione con acciaio, è una operazione semplicissima i cui risultati analitici sono facilmente ed esattamente prevedibili.

Tabella XXVII - Rese di carburazione.

$$\text{Resa} = \frac{C \text{ finale} - (C \text{ iniziale} + C \text{ acciaio})}{C \text{ aggiunto con la grafite}} \times 100$$

Carburazione diretta (introduzione della grafite a freddo insieme alla carica metallica solida)			
Acciaio molle %	Sfridi lamiera %	Acciaio in monte %	Boccame di acciaio %
94,5	88,5	80,5	84
90,0	96,0	—	—
90,0	94,0	—	—
92,5	95,5	—	—
Carburazione in superficie (introduzione della grafite per aggiunta al bagno già fuso)			
Acciaio molle %	Sfridi lamiera %	Acciaio in monte %	Boccame di acciaio %
66,0	59,0	—	55,5
58,0	61,5	—	—
69,5	72,0	—	—
—	65,5	—	—

## Silicio

L'introduzione di questo elemento non presenta difficoltà (fig. 101). Usando ferro-silicio al  $75 \div 80\%$ , la resa è praticamente del  $100\%$  e la dissoluzione nel bagno rapidissima.

Per abbassare il tenore di silicio senza ricorrere all'affinazione, l'unica possibilità è data dall'aggiunta calcolata di acciaio a basso tenore di silicio, oppure, volendo contemporaneamente innalzare il carbonio, di ghisa tipo canadese.

## Manganese

Per l'introduzione del manganese nel bagno, non si hanno difficoltà anche se le rese non sono così elevate come per il silicio (fig. 102).

L'abbassamento del tenore di manganese è reso difficile dalla presenza di questo elemento in tutti i tipi normali di acciaio.

Tuttavia, il problema non si pone per le normali ghise in cui generalmente il manganese richiesto ( $0,5 \div 0,8\%$ ) è superiore o dello stesso ordine di grandezza di quello dell'acciaio.

L'aggiunta di altri elementi (Cr, Cu, V, Mo) non presenta difficoltà, dato che tutte le relative ferroleghie si prestano all'introduzione nel forno ad induzione (ed in qualche caso anche direttamente in siviera).

## Zolfo e fosforo

Le ghise sintetiche contengono entrambi questi elementi in tenori non superiori a quelli dell'acciaio di partenza.

Usando rottami di acciaio di qualità, è facile scendere per lo zolfo a meno dello  $0,03\%$  e per il fosforo a meno dello  $0,04\%$ .

Questa caratteristica rende le ghise sintetiche particolarmente adatte alla produzione delle ghise sferoidali.

## Variazioni di analisi nel bagno fuso

Durante il surriscaldamento del bagno od in genere

nel periodo di permanenza ad elevate temperature, si può prevedere una certa variazione degli elementi più facilmente soggetti a fenomeno di ossidazione e riduzione.

Le possibili reazioni avvengono tra metallo ed atmosfera e tra metallo e rivestimento refrattario; sono favorite dalle alte temperature, dal movimento del bagno e da un elevato rapporto superficie/volume del bagno stesso.

Fino a  $1.623\text{ K}$  ( $1.350\text{ }^\circ\text{C}$ ), nel caso di rivestimento acido, non si hanno reazioni apprezzabili.

Al di sopra di questa temperatura, il carbonio inizia a ridurre la silice del refrattario e si può quindi verificare, al limite, non una diminuzione, ma un aumento del silicio presente nel bagno accompagnato da un corrispondente calo del carbonio.

Evidentemente, le condizioni sperimentali (temperatura, permanenza in forno, quantità di metallo, rapporto superficie/volume del bagno) non erano tali da permettere il verificarsi delle reazioni sopra accennate.

Infatti, mantenendo per 2 h a  $1.743\text{ K}$  ( $1.470\text{ }^\circ\text{C}$ ) il forno pieno, sono state riscontrate le seguenti variazioni di analisi:

— Carbonio:	da $3,24\%$ a $3,23\%$
— Silicio:	da $1,62\%$ a $1,56\%$
— Manganese:	da $0,83\%$ a $0,78\%$
— Rt:	da $290$ a $290\text{ N/mm}^2$ (da $29$ a $29\text{ kgf/mm}^2$ )

Analogamente, per 14 h ad una temperatura di circa  $1.573\text{ K}$  ( $1.300\text{ }^\circ\text{C}$ ) si sono avute le seguenti variazioni:

(I) Carbonio:	da $3,57\%$ a $3,52\%$
Silicio:	da $1,74\%$ a $1,66\%$
Manganese:	da $0,41\%$ a $0,40\%$
(II) Carbonio:	da $3,57\%$ a $3,54\%$
Silicio:	da $1,87\%$ a $1,80\%$
Manganese:	da $0,52\%$ a $0,49\%$

In definitiva, non sono da prevedersi variazioni sensibili di analisi durante la permanenza del metallo allo stato liquido; comunque, le variazioni non sono diverse da quelle che si verificano nell'elaborazione al forno ad induzione delle normali ghise. L'importanza pratica di

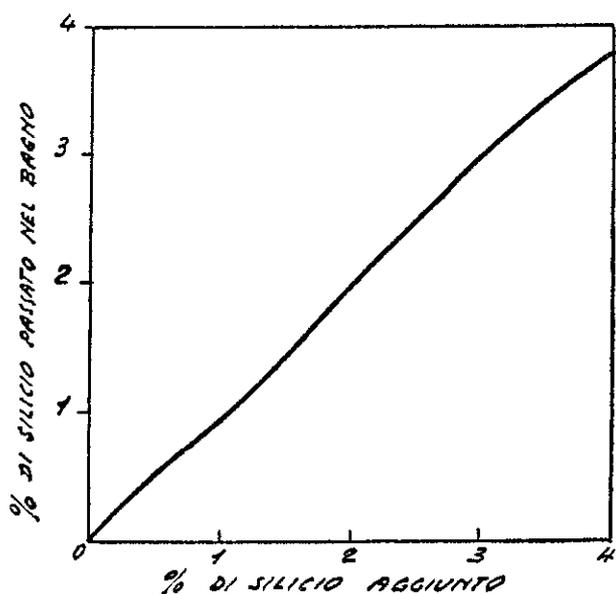


Fig. 101 - Rese di introduzione del silicio nel bagno.

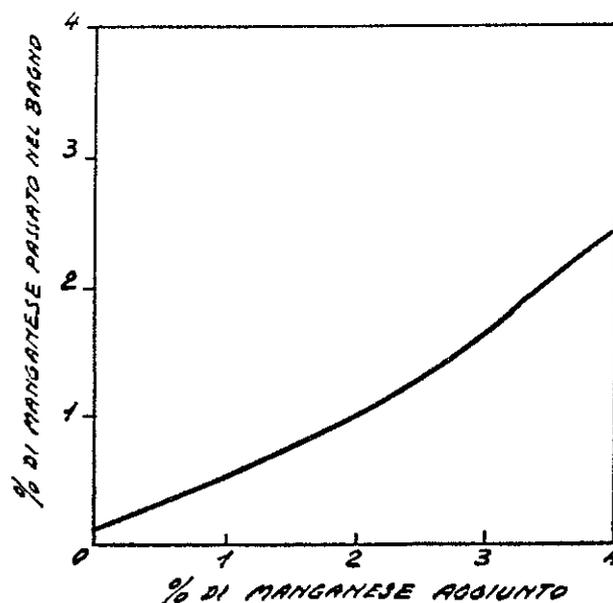


Fig. 102 - Rese di introduzione del manganese nel bagno.

queste variazioni di analisi diventa trascurabilissima nel caso che la spillata avvenga non appena il metallo arriva alla temperatura desiderata, come è sempre consigliabile sia dal punto di vista economico che metallurgico.

Carburando i vari tipi di acciaio disponibili e correggendo il bagno con aggiunte calcolate di grafite e ferro-leghe, sono stati prodotti vari tipi di ghise sintetiche, da quelle ad alta resistenza alle normali ghise meccaniche, dalle ghise tipo lingottiera alle ghise adatte alla trasformazione in sferoidale.

Di alcune ghise sintetiche si riporta, a titolo di esempio, analisi chimica e caratteristiche meccaniche (tab. XXVIII).

#### Caratteristiche meccaniche delle ghise sintetiche

Nella maggioranza dei casi, le caratteristiche meccaniche delle ghise sintetiche risultano notevolmente superiori a quelle delle ghise di composizione analoga fuse al cubilotto, mentre le durezza, e quindi in prima approssimazione anche la lavorabilità, sono dello stesso ordine di grandezza.

#### Suscettibilità alla tempra

Contrariamente all'opinione corrente in merito, la suscettibilità alla tempra, all'atto della colata dei getti, risulta normale se non inferiore alla media; le provette a cuneo appaiono adatte per i tipi di ghisa considerati.

#### Comportamento alla colata

Grazie anche alla possibilità di colare a temperature elevate ed al basso tenore di zolfo, le ghise sintetiche appaiono di facile colabilità.

I getti colati in ghisa sintetica sono sani e compatti e l'alimentazione da parte delle materozze è normale.

#### Struttura metallografica

Il raggiungimento di valori di resistenza a trazione, in alcuni casi elevatissimi ed in genere di un indice di qualità molto soddisfacente, è giustificato pienamente dalla struttura metallografica delle ghise sintetiche.

La matrice risulta sempre (su provette di diametro 30) costituita dal 100% di perlite compatta e regolare e solo parzialmente risolta a 500 ingrandimenti con esclusione assoluta di carburi e di ferrite; questo vale anche per tenori di carbonio elevati (fino a 3,55%).

La forma della grafite, e la sua distribuzione, si presenta diversa nei vari casi considerati.

Si va, quindi, da disposizioni perfette di grafite tipo A a distribuzioni buone fino a forme deteriori tipo B e D.

Nessuna correlazione si può, invece, stabilire tra forma della grafite e durezza relativa.

Circa l'influenza del materiale di partenza, si può ripetere quanto già affermato per le caratteristiche meccaniche; le ghise sintetiche ottenute per carburazione degli sfridi di lamiera e del boccale di acciaio sono migliori di quelle ottenute per carburazione dell'acciaio per molle (che contiene già in partenza una percentuale sensibile di carbonio).

A parità, poi, di acciaio caricato, i migliori risultati si hanno effettuando la carburazione durante la fusione della carica piuttosto che carburando in superficie durante la fase di surriscaldamento.

#### **Forni d'attesa**

Si è già visto come i forni ad induzione trovino la loro applicazione più razionale in fonderia come forni d'attesa, cioè come unità in grado di fornire alle linee di colata una ghisa già pronta, sia come temperatura che come composizione chimica, per le successive operazioni metallurgiche.

#### *Forni senza canale*

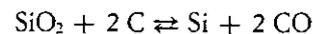
Si prende in considerazione innanzi tutto il caso di un forno ad induzione senza canale.

Durante il surriscaldamento del bagno od in genere nel periodo di permanenza ad elevate temperature, si può prevedere una certa variazione degli elementi più facilmente soggetti a fenomeni di ossidazione e riduzione.

Le reazioni avvengono tra metallo ed atmosfera e tra metallo e rivestimento refrattario e metallo e scoria e sono favorite dalle alte temperature, dal movimento del bagno e da un elevato rapporto superficie/volume del bagno stesso.

In fig. 103 è illustrato l'effetto del tempo di attesa sulla composizione chimica di un bagno con C = 3,52% e Si = 2,11% per una temperatura di surriscaldamento di 1.773 K (1.500 °C) ± 20 °C ed accesso dell'aria al bagno.

In pratica gli elementi manganese, fosforo e zolfo restano invariati, mentre il silicio ed il carbonio presentano un calo di ossidazione minimo per il primo, ma notevole per il secondo. È particolarmente importante la relazione del carbonio presente nel bagno e la temperatura di equilibrio della reazione



che è illustrata in fig. 104 (temperatura di inversione).

Tabella XXVIII - Analisi chimica e caratteristiche meccaniche di alcune ghise sintetiche.

Descrizione	C %	Si %	Mn %	P %	Cr %	Rt	HB
						N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	
Ghise non legate ad elevata resistenza .	2,95	1,70	0,58	0,04	0,23	460 (47)	262
Ghisa meccanica ad alta resistenza . .	3,09	1,55	0,57	0,04	—	400 (41)	229
Ghisa meccanica a media resistenza . .	3,22	1,94	0,49	0,035	—	290 (30)	223
Ghisa meccanica a bassa resistenza . .	3,39	1,71	0,58	0,04	—	260 (26)	217
Ghisa tipo lingottiera oppure base per ghisa sferoidale . . . . .	3,60	1,68	0,66	0,04	—	200 (20)	163

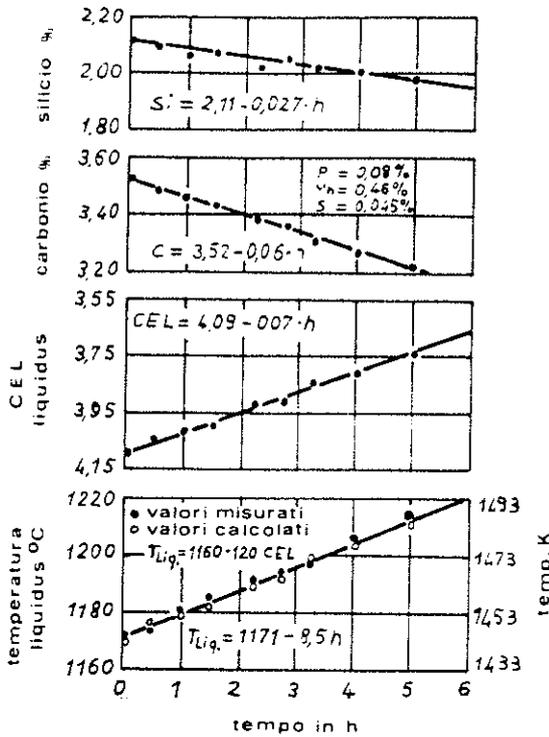


Fig. 103 - Effetto del tempo di attesa sulla composizione chimica.

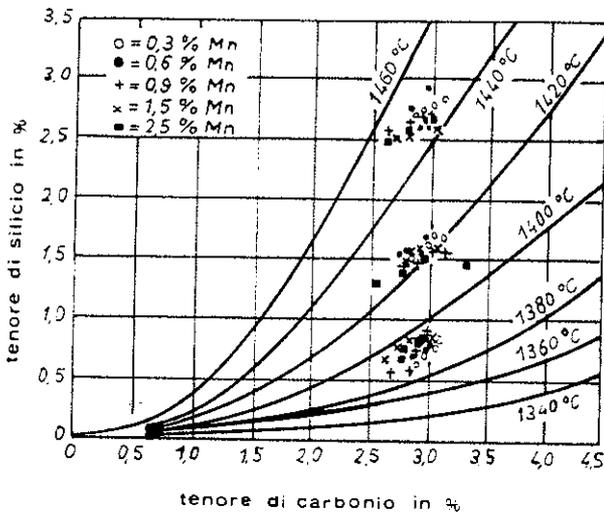


Fig. 104 - Temperature di equilibrio della reazione  $SiO_2 + C \rightleftharpoons Si + 2CO$ .

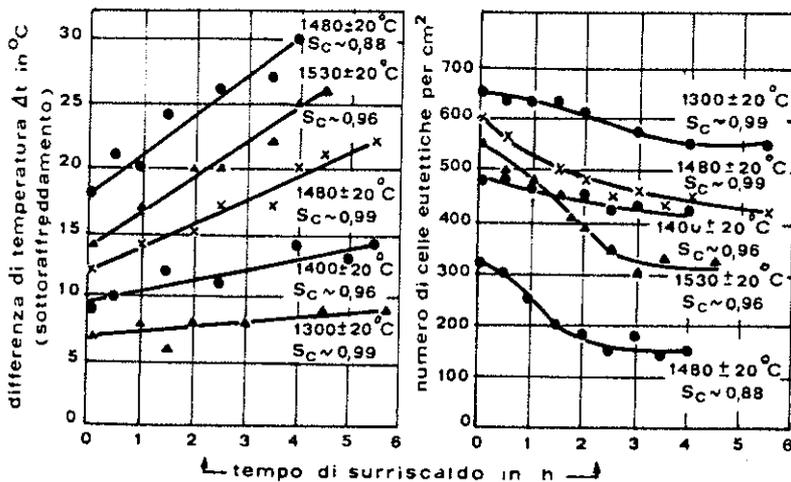


Fig. 105 - Influenza dei tempi e temperature di surriscaldamento sulla tendenza alla sovraraffusione e sul numero delle celle eutettiche.

Quando la suddetta temperatura è superata, la  $SiO_2$  presente nella scoria e nel rivestimento refrattario così come i germi estranei in sospensione nella ghisa ( $SiO_2$ ), sono ridotti ad opera del carbonio: questo significa che il tenore di silicio può aumentare ed il numero di germi presenti nel bagno può essere influenzato.

### Tendenza alla sovraraffusione e numero di germi di grafitizzazione

La temperatura del bagno ed il tempo di attesa influenzano anche il numero di germi di grafitizzazione della ghisa. Questo si manifesta attraverso il numero delle celle eutettiche e della configurazione della grafite (figg. 105 e 106).

### Tempra ledeburitica nella provetta a cuneo

La tendenza alla tempra ledeburitica aumenta con l'aumentare del tempo di permanenza in forno di attesa alla temperatura di surriscaldamento (fig. 107).

### Percentuale di gas ed elementi in traccia

Uno dei particolari vantaggi del forno ad induzione è quello di potere impiegare materiali a basso prezzo come rottami di acciaio e trucioli di ghisa. I suddetti materiali contengono impurezze delle più diverse specie, quantità e provenienze che possono causare sia una modificazione sfavorevole della struttura, sia un improvviso aumento dello scarto.

La determinazione quantitativa dei gas o degli elementi in traccia nella ghisa è difficile e richiede tempo e mezzi adeguati ed è facile che il fonditore sia trascinato a collegare a questi fattori le sue difficoltà.

Il surriscaldamento e l'attesa nei forni ad induzione non modificano sostanzialmente il contenuto di gas e non portano apprezzabili variazioni nella percentuale degli elementi in tracce.

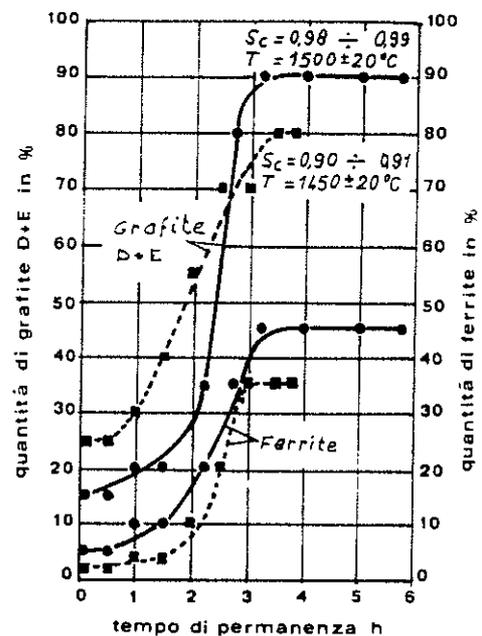


Fig. 106 - Influenza del tempo di attesa sulle configurazioni della grafite e della matrice.

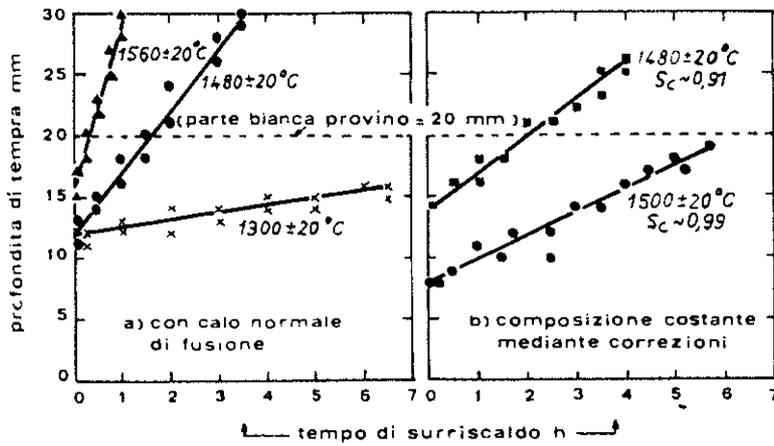


Fig. 107 - Andamento della tempra bianca per temperature e tempi di surriscaldamento differenti.

### Resistenza a trazione e durezza Brinell

L'influenza del surriscaldamento sulla resistenza a trazione e sulla durezza Brinell è rappresentata in fig. 108.

#### Forni con canale

Il forno con canale, grazie alle sue caratteristiche costruttive, consente il mantenimento della temperatura del bagno entro limiti molto ristretti, e comporta piccole variazioni della composizione analitica della ghisa, anche durante le attese del fine settimana.

Per un confronto si riportano i risultati di uno studio sul comportamento della ghisa grigia nei forni di attesa ad induzione con e senza canale.

La ghisa, fusa al forno elettrico ad arco, era destinata alla colata di getti automobilistici.

Le prove sono state effettuate allo scopo di esaminare quale variazione il grado di nucleazione eutettica della ghisa subisca nei forni di attesa in funzione del tempo e del tipo di forno di attesa.

Per l'esame sono state impiegate le provette di tempra a cuneo, di analisi e di trazione, colate a travaso avvenuto dal forno fusorio al forno di attesa, dopo aver spillato una siviera.

La stessa operazione è stata ripetuta dopo 20 min e dopo 40 min dal travaso, sempre colando le provette dopo aver spillato una siviera.

Dalle due provette di trazione colate per ciascuna prova, una è stata utilizzata per ricavare il grado di nucleazione eutettica, l'altra per ricavare mediante tornitura la provetta UNI di trazione.

Il provino micrografico è stato sempre ricavato a cuore ed a metà delle provette di trazione in modo da poter effettuare un confronto attendibile fra le varie prove. Il grado di nucleazione eutettica è stato determinato per ogni prova osservando, su una micrografia con ingrandimento  $\times 15$ , le celle eutettiche su una superficie di  $22,5 \text{ cm}^2$  secondo la seguente relazione:

$$\text{n}^\circ \text{ celle/cm}^2 = \frac{\text{n}^\circ \text{ di celle rilevate} \times (\text{ingrandimento lineare})^2}{\text{superficie osservata (cm}^2\text{)}}$$

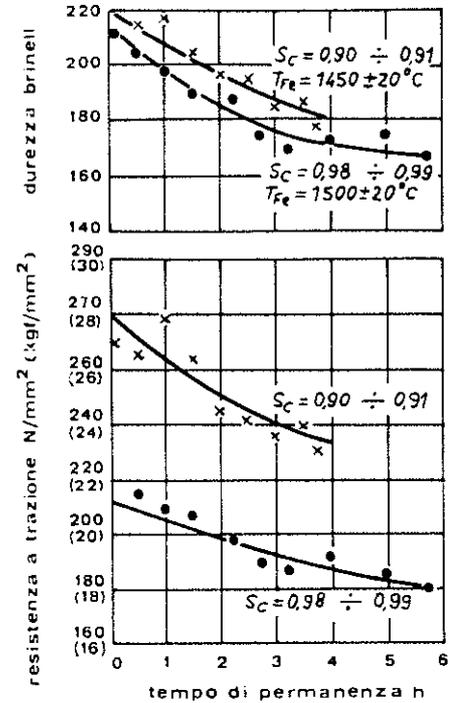


Fig. 108 - Influenza dell'attesa sulla durezza Brinell.

Nella tab. XXIX sono riportati i valori di spessore di tempra sulle provette a cuneo, i valori di resistenza a trazione, le durezza riscontrate sulle provette corrispondenti ed il numero di celle eutettiche/cm<sup>2</sup> della ghisa: subito dopo il travaso, dopo 20 min e dopo 40 min.

La ghisa proveniente dal forno fusorio ad arco ad 1 h circa dal travaso (nel forno di attesa con canale) è stata spillata per essere colata previa inoculazione.

Con ghisa della quarta e dell'ultima siviera del forno, rispettivamente a 90 min circa ed a 120 min circa dal travaso, sono state colate altre provette alla temperatura di 1.693 K (1.420 °C) circa con le stesse modalità usate per le prove precedenti impiegando però ghisa inoculata. I risultati ottenuti sono raccolti nella tab. XXX.

Su un basamento motore colato con ghisa dell'ultima siviera sono stati eseguiti su un provino micrografico gli esami della microstruttura e del grado di nucleazione eutettica.

La struttura del getto è risultata costituita da: grafite tipo A5 e B in matrice perlitica (fig. 109) ed il grado di nucleazione eutettica è risultato di 550 celle/cm<sup>2</sup> (fig. 110).

Dagli esami effettuati risulta molto evidente quale influenza sia esercitata sul grado di nucleazione eutettica dal tempo e dal tipo di forno adottato.

I diagrammi di figg. 111-112 illustrano i dati raccolti nella tab. XXIX e mettono in evidenza come la ghisa prodotta nel forno ad arco e travasata nel forno di attesa con canale mantenga per 40 min un grado di nucleazione eutettica pressoché costante, confermato anche dai valori di spessore di tempra.

Tabella XXIX - Ghisa grigia in attesa in forno ad induzione senza e con canale.

Descrizione	Forno senza canale			Forno con canale		
	Al travaso	Dopo 20 min	Dopo 40 min	Al travaso	Dopo 20 min	Dopo 40 min
Composizione chimica %						
Ct	3,23	3,31	3,27	3,29	3,27	3,30
Si	1,96	1,93	1,93	2,04	1,99	1,98
Mn	0,80	0,73	0,72	0,78	0,73	0,75
Ni	0,15	0,13	0,12	0,13	0,10	0,10
Cr	0,20	0,23	0,18	0,21	0,20	0,18
Sn	0,98	0,04	0,03	0,084	0,077	0,08
Al	0,022	0,018	0,018	0,023	0,017	0,013
Tectip %	3,91	3,92	3,91	3,94	3,93	3,96
CE %	3,88	3,95	3,91	3,97	3,93	3,96
Caratteristiche fisico-meccaniche						
Spessore di tempra mm	4,4 4,6 provino trattato	3,7 3,9 provino trattato	4,5 5,0 provino trattato	3,3 3,4 3,6	3,2 3,7 4,0	3,2 3,1 3,6
Temperatura di colata K (°C)	~ 1.723 (~ 1.450) ~ 1.723 (~ 1.450) ~ 1.723 (~ 1.450)	~ 1.723 (~ 1.450) ~ 1.723 (~ 1.450) ~ 1.723 (~ 1.450)	~ 1.723 (~ 1.450) ~ 1.723 (~ 1.450) ~ 1.723 (~ 1.450)	~ 1.723 (~ 1.450) ~ 1.723 (~ 1.450) ~ 1.723 (~ 1.450)	~ 1.723 (~ 1.450) ~ 1.723 (~ 1.450) ~ 1.723 (~ 1.450)	~ 1.723 (~ 1.450) ~ 1.723 (~ 1.450) ~ 1.723 (~ 1.450)
Resistenza a trazione N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	320 (33) 300 (31) 370 (28)	300 (31) 310 (32) 280 (29)	290 (30) 280 (29) 280 (29)	280 (29) 290 (30) 280 (29)	290 (30) 280 (29) 280 (29)	260 (27) 270 (28) 270 (28)
HB (10/3.000/15)	232 235 255	232 241 247	229 235 241	220 229 220	226 220 223	217 220 217
No. celle/cm <sup>2</sup>	300 200 110	280 210 100	260 180 80	350 320 250	320 290 260	310 280 250



Fig. 109 - Struttura del getto costituita da grafite tipo A5 e B in matrice perlitica.

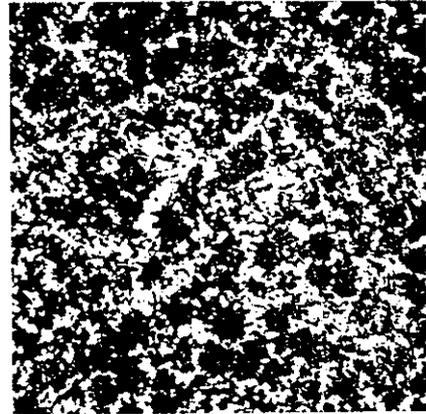


Fig. 110 - Struttura del getto costituita da grafite tipo A5 e B in matrice perlitica e grado di nucleazione eutettica di 550 celle/cm².

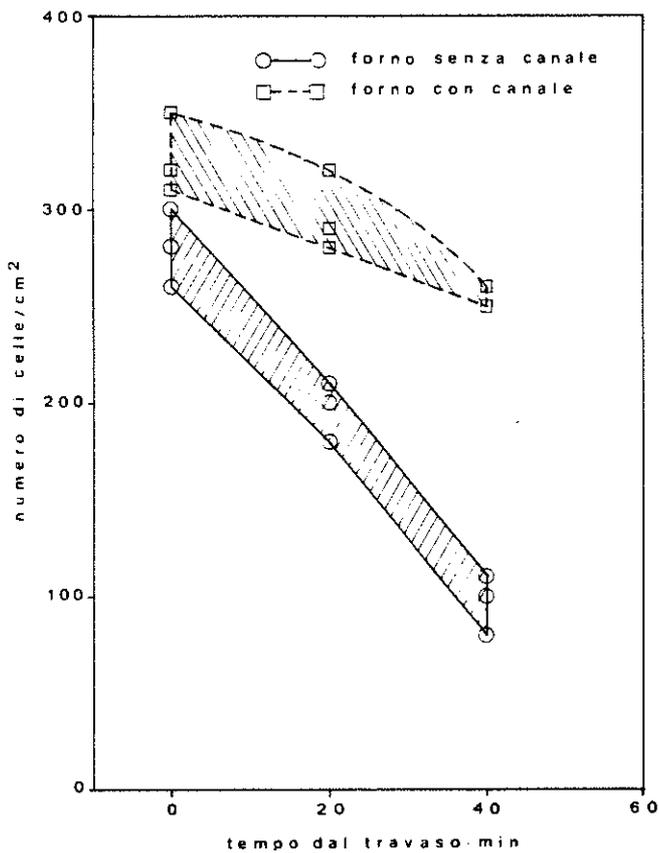


Fig. 111 - Variazione del grado di nucleazione eutettica di una ghisa in forno di attesa in funzione del tempo.

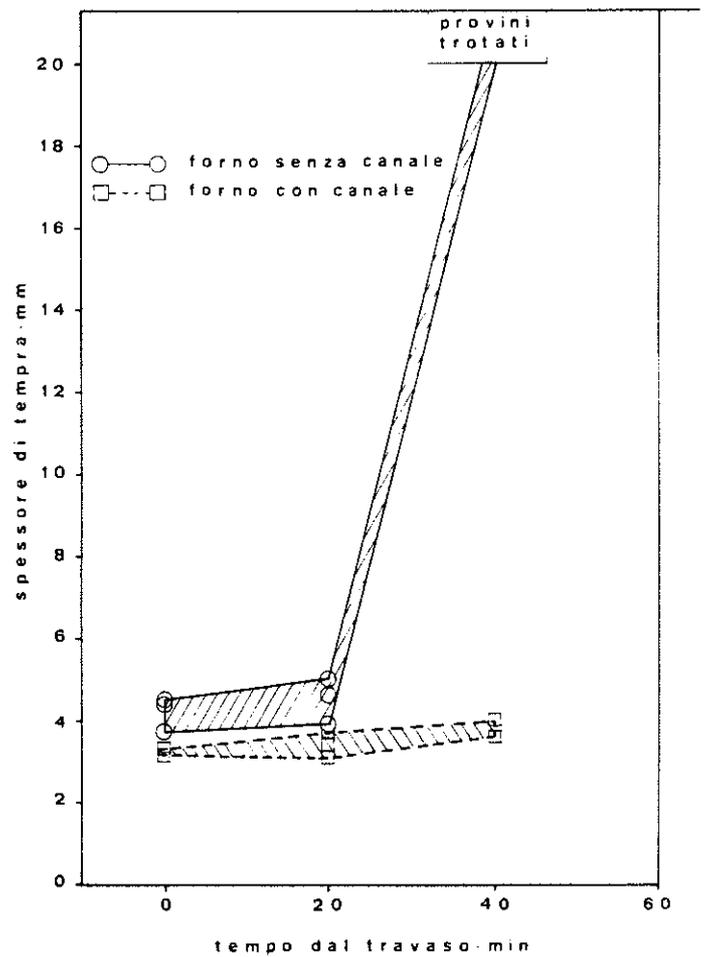


Fig. 112 - Spessori di tempera su provette a cuneo di una ghisa in forno di attesa in funzione del tempo.

Tabella XXX - Ghisa grigia in attesa in forno con canale dopo 90 min e 120 min.

Descrizione	A 90 min dal travaso	A 120 min dal travaso
Inoculazione in siviera da 1.400 kg	Fe-Si 75% (2 ÷ 10 mm): 2 kg Granulite: 2 kg	Fe-Si 75% (2 ÷ 10 mm): 2,5 kg Granulite: 2 kg
Composizione chimica della ghisa inocolata %		
Ct	3,40	3,38
Si	2,11	2,13
Mn	0,80	0,79
Ni	0,12	0,12
Cr	0,20	0,20
Sn	0,084	0,083
Al	0,019	0,017
Caratteristiche fisico-meccaniche		
Spessore di tempra mm	2,2	2
Resistenza a trazione N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	250 (25)	260 (27)
HB (10/3.000/15)	212	220
Celle/cm <sup>2</sup>	380	450

Diverso è, invece, il comportamento della ghisa prodotta al forno ad arco e travasata nel forno di attesa a crogiolo, per la quale il grado di nucleazione eutettica diminuisce rapidamente nel tempo fino ad assumere valori molto bassi; analoga tendenza si osserva per gli spessori di tempra fino ad ottenere in 40 min provini completamente trotati.

Sono evidenti quindi i pericoli che si possono presentare se si impiegano forni ad induzione a crogiolo senza le dovute cautele.

### Forni di colata

Come è già stato detto, quando si utilizzano i forni in questione per la colata della ghisa grigia, i problemi metallurgici derivanti sono più complessi. Essi non sono tanto quelli che discendono dall'aver una massa di ghisa notevolmente superiore a quella presente in linea di colata quando si utilizzano le normali siviere, che deve mantenere caratteristiche di inoculazione abbastanza costanti per tutto il tempo di colata, quanto quelli derivanti da tempi d'attesa non voluti, durante i quali l'effetto inoculante decrescerà più o meno rapidamente, a seconda delle condizioni di esercizio. Problematico è, quindi, il ripristino delle condizioni metallurgiche ottimali mediante l'introduzione di inoculante nel forno di colata, sia per questione di dissoluzione, di omogeneizzazione, che per formazione di scorie.

L'uso del forno di colata, per non avere sorprese qualitative, richiede la realizzazione dell'inoculazione in una fase successiva, quindi tra l'impianto di colata e la staffa o motta.

### Operazioni metallurgiche

Vale il concetto che non è prevista l'utilizzazione del forno elettrico in fonderia di ghisa come strumento di raffinazione, per cui occorre tener presente, nel calcolo delle cariche metalliche, sia di fusione che di correzione, che per abbassare il contenuto di qualunque elemento chimico, occorre aggiungere nel bagno rottame di acciaio che, evidentemente, deve avere nella sua composizione quantità piccolissime dell'elemento la cui concentrazione si vuole abbassare.

Il forno ad induzione è il mezzo ideale per l'elaborazione di ghise particolarmente legate con nichel, rame, cromo, molibdeno, vanadio, titanio. Si possono utilizzare per l'alligazione o gli elementi puri o sotto forma di ferroleghie e l'assorbimento decorre con facilità e buone rese.

È da tener presente, quando possibile, che è bene non aggiungere gli elementi di lega nel forno fusorio assieme alla carica metallica, bensì nella siviera di spillata quando si ha a che fare con elementi basso-fondenti, o nel forno di attesa per gli altri; questo per evitare inutili sprechi di leghe, in genere particolarmente costose, e soprattutto per non inquinare con elementi dannosi od aventi effetti contrari, la ghisa che bisogna preparare per le produzioni successive.

### Conclusioni

Concludendo queste considerazioni, si può affermare che non esistono grossi problemi circa la metallurgia del forno ad induzione, ma che piuttosto occorre tenere presente una serie di accorgimenti per ottenere sempre ottima qualità di ghisa e costanza di risultati metallurgici, corredando gli impianti di adeguati strumenti di manovra e di registrazione al fine di sottrarre al massimo possibile questi accorgimenti dall'intervento manuale dell'uomo.

# FORNI AD ARCO

## ORIGINI E SVILUPPI

Traendo spunto dalla lampada ad arco dell'inglese Hemphrey Davy, già un secolo fa si pensò di utilizzare l'arco voltaico quale mezzo di erogazione del calore che, grazie alle alte temperature raggiungibili, poteva essere impiegato in molte applicazioni, tra le quali la siderurgia. Passarono alcuni decenni di prove ed esperienze fino a quando, verso il 1900, l'italiano Ernesto Stassano realizzò il suo primo forno ad arco indiretto per la fusione e la fabbricazione dell'acciaio; un forno dove l'arco scoccava tra due elettrodi nell'interno del laboratorio e trasmetteva il calore alla carica per irraggiamento (fig. 113).

Pochi anni dopo il francese Héroult realizzava il forno ad arco diretto, dove l'arco scoccava tra l'elettrodo e la carica, trasmettendo il calore alla carica stessa, per irraggiamento ed in piccola parte per convezione ed effetto Joule (fig. 114).

A questi due tipi di forni (ad arco indiretto e ad arco diretto) seguirono molte varianti studiate da altri inventori e da altri costruttori, sino ad arrivare al tipo di forno ad arco oggi impiegato nelle fonderie di acciaio e nelle fonderie di ghisa, che è il forno Héroult trifase ad arco diretto.

Si ritiene perciò utile riepilogare in una breve classificazione i principali tipi di forno ad arco, nel modo seguente:

- Forno ad arco indiretto - Tipo Stassano, dove l'arco scocca tra gli elettrodi.
- Forno ad arco diretto - Tipo Héroult, dove l'arco scocca tra elettrodo e carica, e carica ed elettrodo.
- Forno arco-resistenza - Dove il calore è generato, oltre che per effetto dell'arco tra elettrodo e carica, anche per effetto Joule della corrente che attraversa la carica stessa.

I primi (arco indiretto) hanno avuto un grande interesse storico, ma non sono quasi più impiegati in nessun genere di fonderia.

I secondi (arco diretto) sono quelli generalmente usati nella fonderia di acciaio e nella fonderia di ghisa del giorno d'oggi.

I terzi (arco-resistenza) sono impiegati per la fabbricazione elettrotermica di prodotti metallurgici come il carburo di calcio, le ferroleghe, la ghisa da ceneri di pi-

rite ed altro, e non interessano perciò direttamente la fonderia. Sia il forno ad arco indiretto che quello ad arco diretto sono stati realizzati in diverse soluzioni come il forno rotativo ad elettrodi assiali, per il primo, il forno a suola conduttrice a centro stella sulla suola, per il secondo, ma sono soluzioni ormai abbandonate.

Si ritorna al forno tipo Héroult, il quale nel corso del secolo ha subito molti perfezionamenti di carattere costruttivo, tecnologico e funzionale.

I progressi si riferiscono alla costruzione meccanica del forno, ai rivestimenti refrattari, agli elettrodi, ai sistemi di rovesciamento, ai sistemi di regolazione, ai metodi di conduzione ed altri ancora, sino ai moderni forni cosiddetti UHP (Ultra High Power), i quali si distinguono

per il loro rapporto Potenza/Capacità ( $\frac{\text{kVA}}{t}$ ) molto elevato rispetto ai forni ad arco normali e che sono impiegati per più elevate produzioni.

Secondo la recente nomenclatura UIE, sono considerati forni UHP quei forni ad arco che hanno una potenza di 400 kVA/t per capacità sino a 60 t, e dell'ordine di 250 ÷ 300 kVA/t per capacità superiori.

## COSTRUZIONE ED INSTALLAZIONE

La forma geometrica classica dei moderni forni ad arco è quella del tino cilindrico ad asse verticale, chiuso superiormente da una volta a cupola, attraverso la quale passano gli elettrodi in posizione verticale, disposti a triangolo equilatero. Il tino è munito di sistemi elettromeccanici, idraulici od oleodinamici che gli consentono di basculare nei due sensi; sullo stesso tino o su supporti separati, sono montati i porta-elettrodi. La volta, sempre asportabile, può essere fissa e rotante ed in quest'ultimo caso un braccio di rotazione a bandiera è predisposto al lato del tino (fig. 115).

Pertanto, si può dire che un forno ad arco moderno è sostanzialmente costituito dalle seguenti parti principali: tino, volta, elettrodi, cavi di alimentazione, trasformatore elettrico, apparecchiatura di regolazione, comando di manovra, accessori.

- Tino: è costituito da un involucro metallico cilindrico a fondo bombato o tronco-conico, munito di

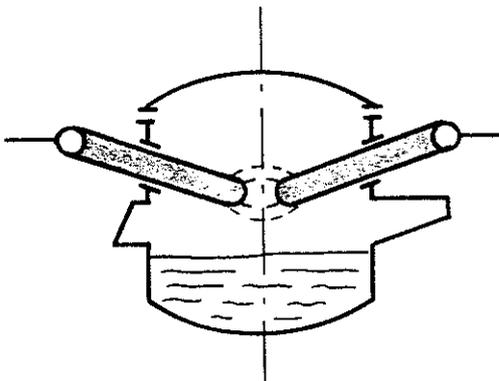


Fig. 113 - Forno Stassano ad arco indiretto.

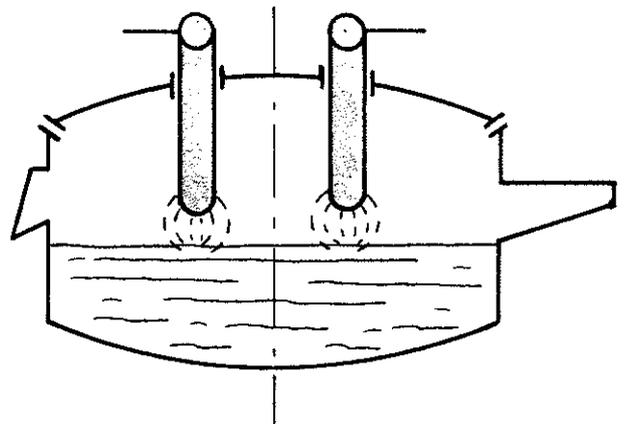


Fig. 114 - Forno Héroult ad arco diretto.

porta di lavoro e bocca di colata e talvolta di porta di ispezione, rivestito internamente di refrattario, costituente il bacino di fusione o laboratorio (fig. 116).

Il diametro e l'altezza del tino sono legati alla potenza elettrica del forno ed alla sua capacità.

La parte superiore dell'involucro è munita di canale circolare contenente sabbia o raffreddato ad acqua, per accogliere il giunto di tenuta della volta.

- Volta: anche la volta del forno ad arco costituisce un elemento molto importante sia per la sua funzione sia per il rivestimento refrattario; è circolare come il tino e, come esso, è munita di contro-giunto di chiusura a sabbia o di raffreddamento ad acqua. Tre fori disposti a triangolo equilatero (fig. 117) rispetto al suo asse centrale, muniti di apposite guide raffreddate ad acqua, consentono l'introduzione verticale ed il movimento degli elettrodi. Nei forni superiori a 10 t di capacità, la volta è girevole per permettere il caricamento del forno dall'alto; un cavalletto a bandiera, al quale la volta è applicata, la solleva e la ruota fuori del bacino. Nei forni di grande capacità il cavalletto a bandiera è sostituito da un cavalletto a rulli scorrevole su rotaie, longitudinalmente lungo la direttrice principale dell'impianto.
- Elettrodi: sono montati in apposite morse portacorrente e raffreddate ad acqua. Essi sono gli elementi conduttori della corrente elettrica nell'interno del forno e costituiscono i poli tra i quali si genera l'arco voltaico attraverso la carica metallica; devono, perciò, rispondere a speciali requisiti caratteristici come: conducibilità elettrica, dilatazione, conduttività del calore, refrattarietà, resistenza meccanica e termica, ed altre. Sono, perciò, costruiti di grafite o carbone amorfo (fig. 118 e 118 bis) con giunzione a nipple conico.
- Cavi di alimentazione: sono parte integrante del circuito elettrico che, per le sue particolari caratteri-

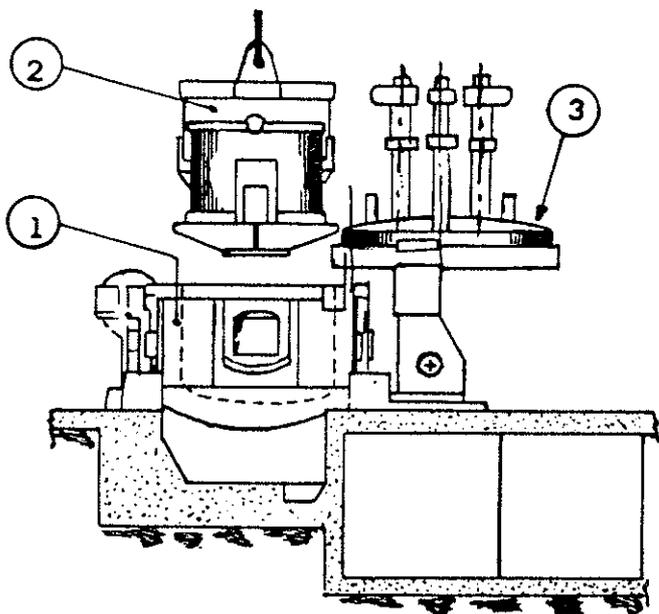


Fig. 115 - Forno ad arco trifase con volta girevole e caricamento con benna.  
1 - Bacino  
2 - Caricatrice a benna  
3 - Volta girevole

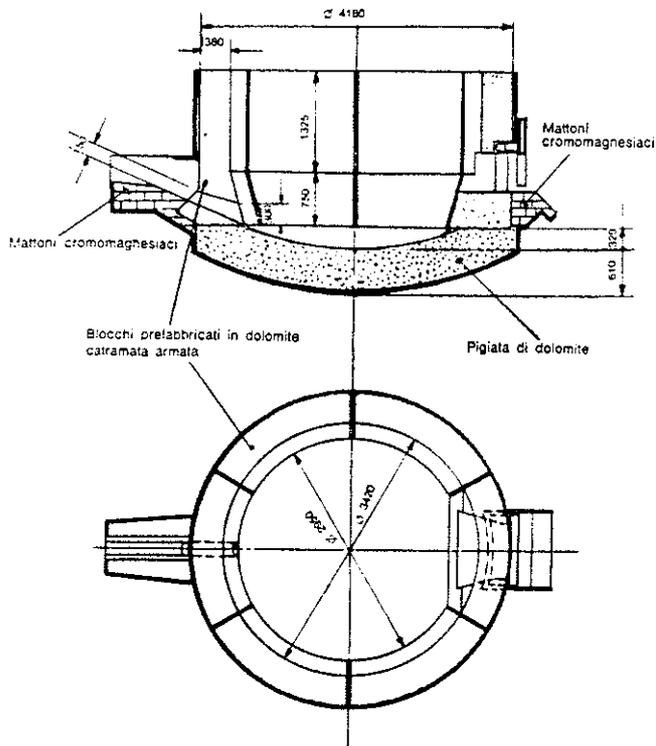


Fig. 116 - Tino (esecuzione costruttiva) di forno ad arco da 25 t.

stiche (alte intensità di corrente), impone rigorosi accorgimenti costruttivi. Oltre che le esigenze elettriche, essi devono soddisfare esigenze meccaniche, termiche ed idrauliche; infatti i moderni cavi di alimentazione sono con raffreddamento ad acqua per tutta la loro lunghezza (fig. 119). L'esecuzione comporta vantaggi di sezione e peso del conduttore, oltre che il miglioramento dell'impedenza del circuito *spira-forno*.

- Trasformatore di potenza: anche i più piccoli forni ad arco per fusione della ghisa superano i 1.000 kVA di potenza, per cui la loro alimentazione è sempre fatta in M.T.; così i trasformatori elettrici sono sempre a M.T. Per le particolari caratteristiche del carico elettrico (alte correnti in gioco e forti variazioni di corrente) il trasformatore del forno ad arco richiede

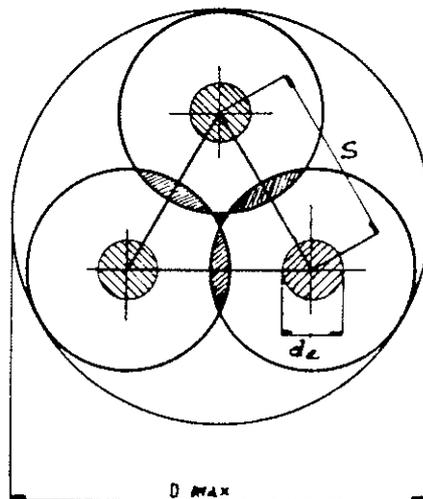


Fig. 117 - Zona di influenza ideale dell'arco in forno trifase e relativo diametro massimo del bacino.

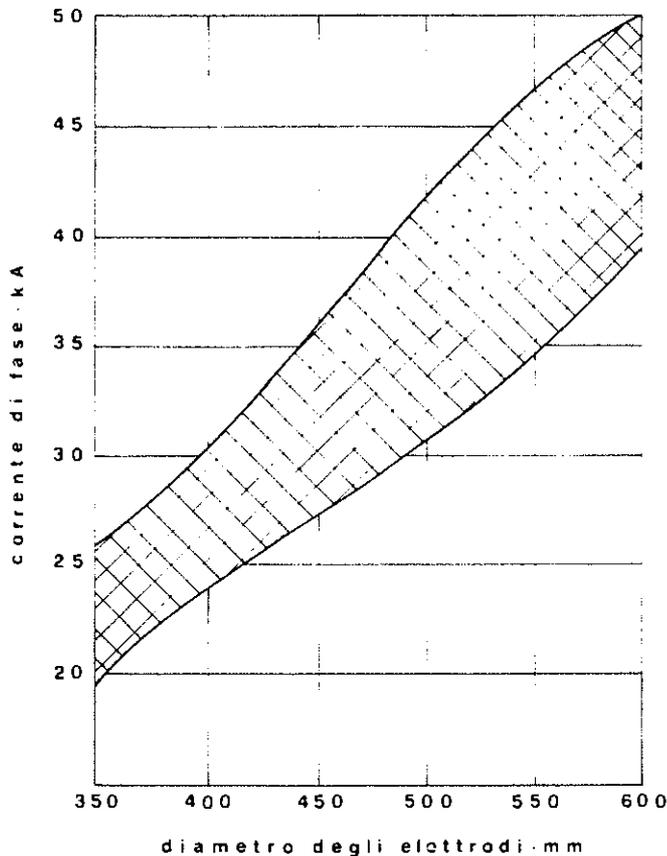


Fig. 118 - Diametro degli elettrodi in funzione della corrente di fase.



Fig. 118 bis - Innesto a vite di elettrodi prefabbricati.

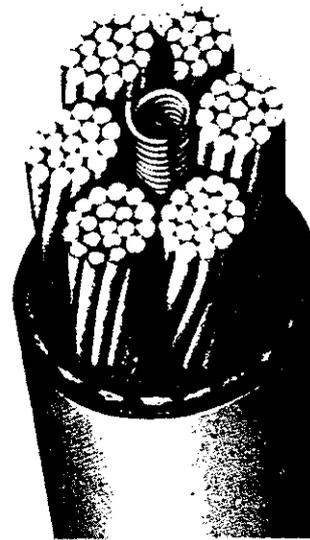


Fig. 119 - Cavo elettrico con raffreddamento ad acqua.

particolari caratteristiche costruttive che lo differenziano da un normale trasformatore elettrico di potenza. Oltre ai particolari requisiti elettrici, esso deve rispondere a precise norme di sicurezza, affidabilità e robustezza. La tensione in uscita è a B.T. (dell'ordine di  $60 \div 500$  V) ed è variabile, mediante speciale commutatore comandato a distanza, sul circuito primario.

- Apparecchiatura di regolazione: per regolazione nei forni ad arco si intende la regolazione automatica della potenza, cioè la regolazione della distanza degli elettrodi dalla carica dalla quale dipende la corrente assorbita. Una volta fissata sul trasformatore la tensione di alimentazione degli elettrodi, è appunto l'apparecchiatura automatica che agisce su questi, alzandoli ed abbassandoli, in funzione della potenza passante, mantenendola il più possibile costante al valore prestabilito.

Di sistemi di regolazione ve ne sono molti, ma tutti appartengono a due categorie: amperometrici oppure wattometrici. Nei primi la regolazione avviene in funzione della corrente; nei secondi la regolazione avviene in funzione della corrente e della tensione ad arco, cioè in funzione della potenza assorbita. Essi possono essere a comando meccanico, pneumatico, idraulico, elettromeccanico od elettronico. I più moderni sistemi di regolazione sono quelli elettronici, ma sono molto diffusi quelli elettromeccanici a controllo elettronico, come quelli ad amplidyne (fig. 120) od a rotodyne. La regolazione è indipendente per le 3 fasi di alimentazione e tutto è predisposto in modo che, in caso di mancanza di energia, gli elettrodi si alzino.

- Comandi di manovra: sui forni di media e grande capacità i comandi di manovra sono raccolti su un pulpito di comando, almeno per le principali manovre, come: caricamento, basculamento del crogiolo, variazione di potenza, comando manuale degli elettrodi ed altre.
- Accessori: gli organi accessori di un forno ad arco sono numerosi e, prescindendo dagli impianti di captazione dei fumi, si possono citare i principali, come: motori, pompe, ventilatori, idrostatii, serbatoi, conduttori elettrici ed altri.

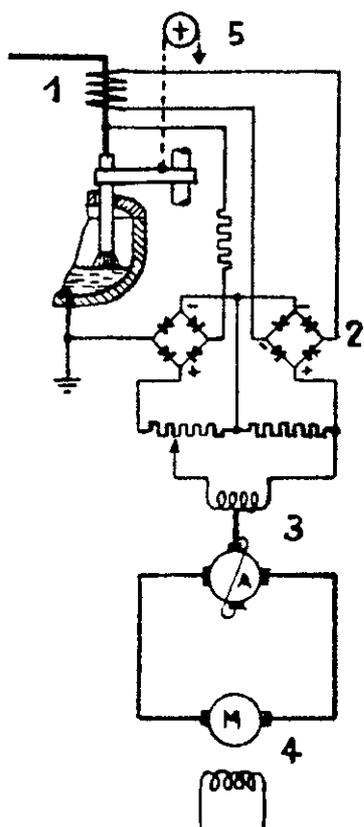


Fig. 120 - Schema di regolatore elettrico automatico per forno ad arco.

- 1 - Riveleratore amperometrico
- 2 - Raddrizzatore di corrente
- 3 - Amplidyne
- 4 - Motore a c.c. azionatore del meccanismo di regolazione dell'elettrodo (2).

I forni ad arco per la fusione della ghisa sono finora impiegati con capacità da 5 a 70 t.

Una installazione completa di forno ad arco è perciò costituita da: cabina di trasformazione, linea di collegamento tra trasformatore e forno, forno propriamente detto, apparecchiatura elettrica di controllo e regolazione, servizi ausiliari (fig. 121).

Se il forno ad arco è installato in zone soggette al rispetto delle leggi antinquinamento, si dovrà provvedere ad installare anche adeguati impianti di captazione dei fumi e delle polveri inquinanti ed, in certi casi, prendere delle precauzioni contro i disturbi acustici.

## RIVESTIMENTI REFRAATTARI

Come per tutti gli altri forni elettrici, anche per il forno ad arco il rivestimento refrattario è di primaria importanza per il buon funzionamento, sia dal punto di vista metallurgico che dal punto di vista dell'affidabilità. Questa parte costruttiva del forno che, per la sua particolarità ed importanza, è considerata a sé, costituisce la parte interna del forno e si divide in due parti: bacino o laboratorio e volta.

Per l'esecuzione di queste due parti, in passato erano usate delle tecniche ben studiate ed appropriate al tipo ed all'uso dei forni. Le tecniche sono andate modificandosi con il tempo in seguito alle migliorate qualità dei

materiali refrattari, alle tecniche costruttive dei forni ed alle loro diverse conduzioni tecnologiche. Conseguentemente si è resa necessaria l'unificazione delle miscele refrattarie, l'unificazione dei prefabbricati ed una certa standardizzazione dei metodi di esecuzione dei rivestimenti refrattari in genere, almeno nei Paesi industrializzati.

### Rivestimento refrattario del bacino

Il rino in lamiera di ferro è rivestito internamente di materiale refrattario. Un tempo il rivestimento era di materiale refrattario verso l'interno e di materiale isolante a contatto della lamiera, poiché si cercava di limitare le perdite termiche del forno, ma l'impiego di materiale isolante è stato attualmente abbandonato, perché la dissipazione del calore del materiale refrattario ne aumenta la durata.

I refrattari del bacino possono essere acidi e basici e l'impiego di una o dell'altra qualità di materiale condiziona, entro certi limiti, la marcia del forno e le operazioni metallurgiche possibili, nonché i materiali di carica impiegabili (fig. 122).

I refrattari acidi sono costituiti da silice sotto forma di quarzite. Per le pareti si impiegano mattoni di silice posti in opera con malta refrattaria silicea. Per la suola si impiega quarzo macinato di granulometria adatta, mescolato ad acido borico in percentuale variante da 1,5 ÷ 1,8% a seconda della temperatura massima di esercizio del forno. L'acido borico ha funzione di legante a caldo, diminuendo la temperatura di sinterizzazione del materiale. La suola si mette in opera, costipando la miscela quarzo-acido borico preparato almeno 12 h prima, a mano o con vibratori meccanici, a dosi successive di materiale, evitando gli urti.

Il rivestimento acido di un forno è di costo inferiore al rivestimento basico e non si deteriora per lunghi periodi di inattività del forno stesso, senza dovere ricorrere a particolari accorgimenti, ma è sensibile alle brusche variazioni di temperatura che si verificano con l'introduzione in forno delle cariche fredde e, a causa della minore temperatura di fusione del quarzo, si ha minore durata alle elevate temperature indotte dall'arco voltaico sulle pareti. I principali inconvenienti del rivestimento acido, dal punto di vista metallurgico, sono di:

- Reagire con le scorie basiche. Quindi non è possibile desolfurare la carica con calce (operazione particolarmente interessante nella produzione di ghisa sferoidale). A contatto di scorie basiche la suola si taglia al livello delle scorie.
- Reagire con l'ossido di ferro del rottame di acciaio e delle torniture con forte consumo di rivestimento della suola.
- Reagire con il carbonio della ghisa, aumentando il tenore di silicio del bagno. Questa reazione è praticamente incontrollabile per attesa in forno della ghisa a basso silicio e carbonio (ghisa malleabile) a temperature elevate.

I refrattari basici sono costituiti da dolomite, da magnesite e da cromomagnesite. Negli U.S.A. trova largo impiego la magnesite, in Italia invece è largamente diffuso l'uso di dolomite, che si trova in molte località ad elevato grado di purezza.

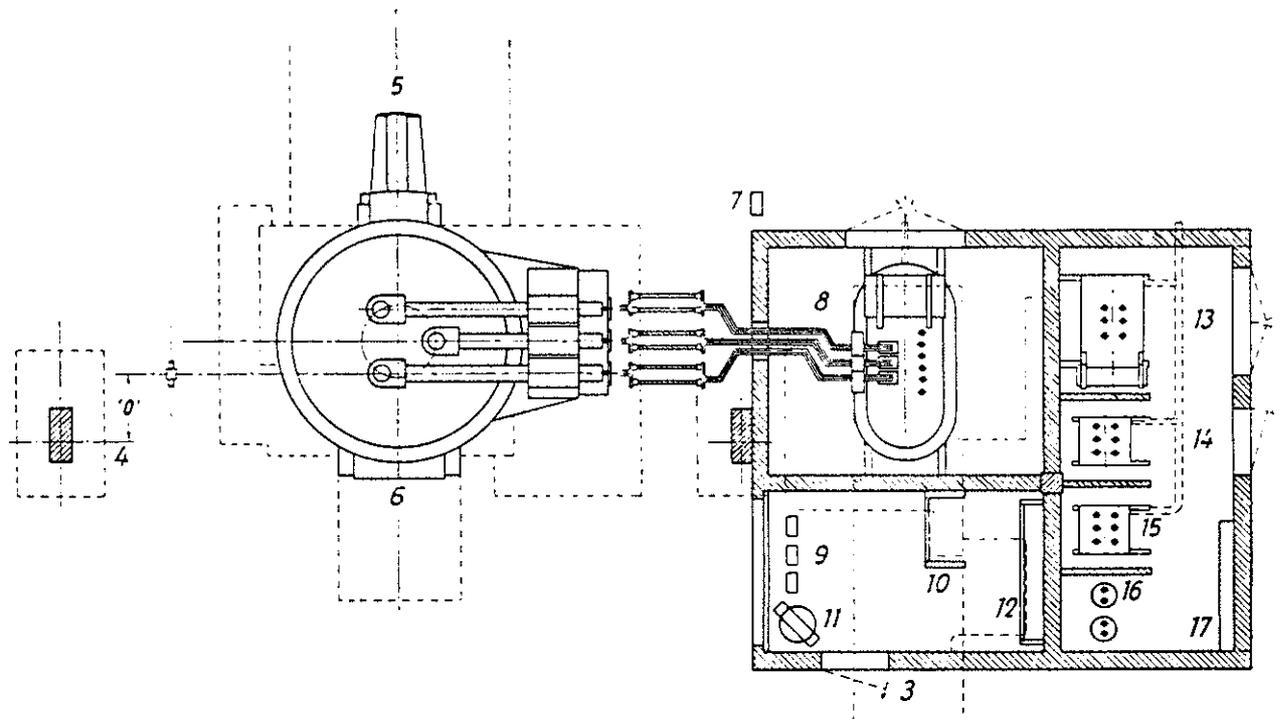
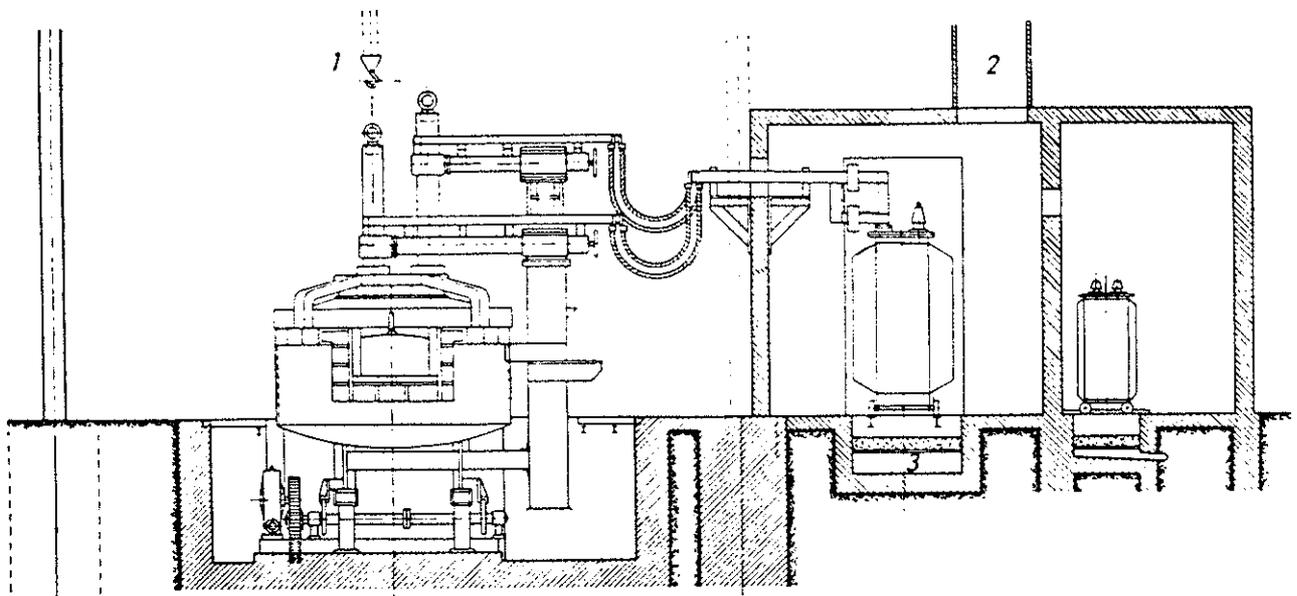


Fig. 121 - Disposizione generale d'impianto dei forni elettrici ad arco.

- 1 - Carro ponte
- 2 - Condotto di aspirazione aria
- 3 - Condotto di immissione aria
- 4 - Distanza « 0 » minima gancio carro ponte
- 5 - Becco di colata
- 6 - Porta per scorifica
- 7 - Leva per il rovesciamento del forno
- 8 - Cabina del trasformatore
- 9 - Leve per il movimento elettrodi
- 10 - Quadro elettrico di manovra
- 11 - Quadro di strumentazione
- 12 - Pannello per il controllo automatico del movimento elettrodi
- 13 - Bobina di reattanza
- 14 - Interruttore sott'olio per la bobina di reattanza
- 15 - Interruttore generale sott'olio
- 16 - Cunicolo arrivo cavi
- 17 - Quadro elettrico di arrivo

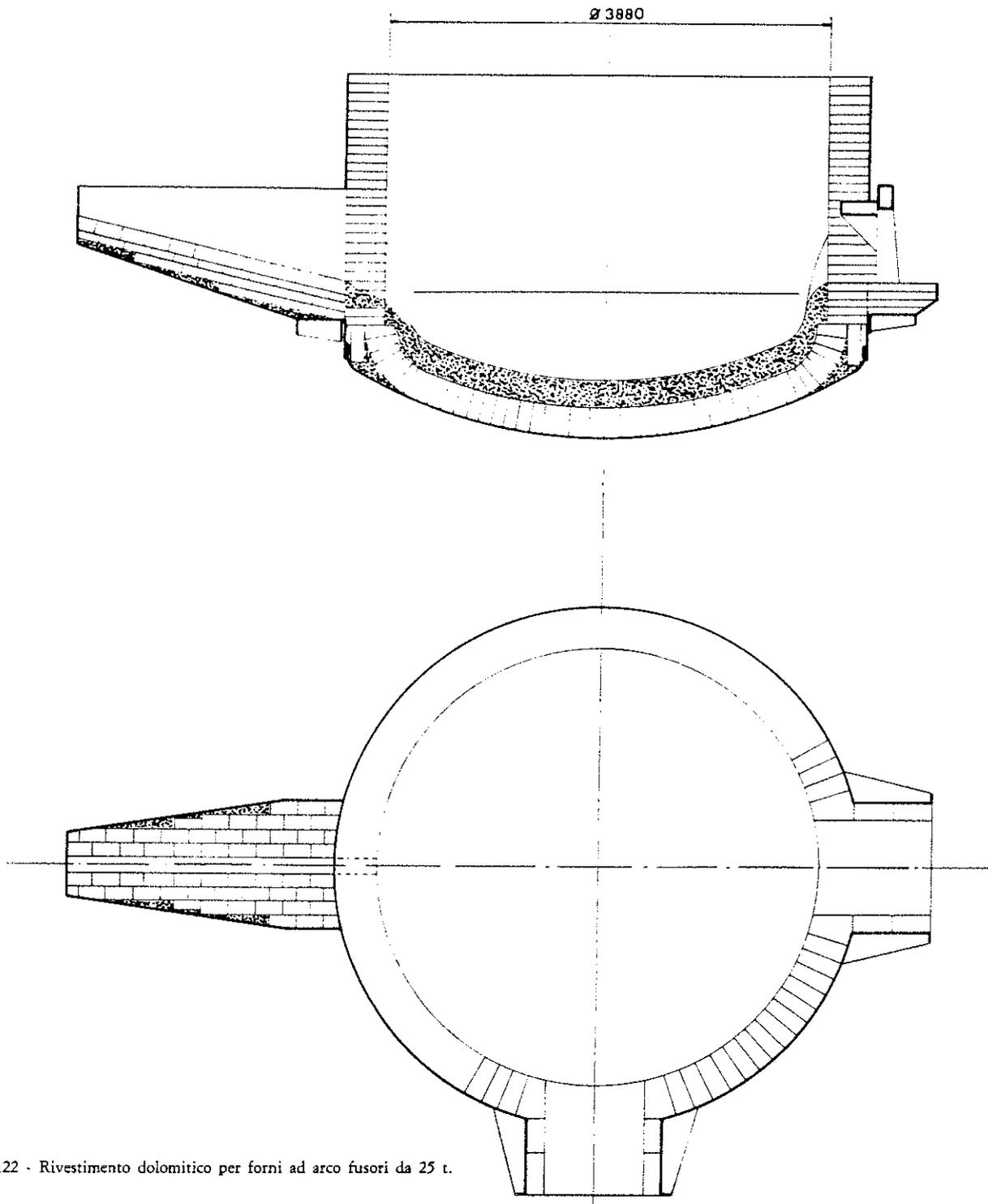


Fig. 122 - Rivestimento dolomitico per forni ad arco fusori da 25 t.

La dolomite è carbonato doppio di calcio e magnesio che si trova in natura come minerale. Essa è trasformata in ossido doppio di calcio e magnesio per calcinazione in forni analoghi ai forni per la fabbricazione della calce viva. Residui di carbonati non sono ammessi nei prodotti impiegati per rivestimenti refrattari, poiché provocano facili sgretolamenti dovuti alla liberazione di anidride carbonica alle elevate temperature di esercizio dei forni.

Per costruire la suola e le pareti un tempo si mescolava la dolomite con un'opportuna percentuale di catrame (8 ÷ 9%), si effettuava la pigiata in sito a dosi successive costipate con pilette a mano e ciò richiedeva un tempo notevole. Attualmente i tempi di allestimento della suola e delle pareti sono stati notevolmente ridotti anche

per merito di procedimenti brevettati in Italia dall'ing. Crespi jr.

Per la costruzione delle pareti sono impiegati blocchi prefabbricati, opportunamente armati con elementi metallici, di dolomite impastata con catrame. A seconda delle dimensioni dei forni si impiegano da 4 a 8 elementi: l'altezza di questi è uguale all'altezza della parete, la larghezza da  $\frac{1}{4}$  a  $\frac{1}{8}$  della circonferenza del crogiolo, lo spessore varia da 20 a 50 cm.

Tali blocchi possono sia costituire solo la parete, cioè non venire a contatto con la ghisa fusa, sia costituire parzialmente la suola. Nella superficie di contatto fra

blocchi e parete non si verificano infiltrazioni di ghisa anche a temperature di lavoro elevate. La messa in opera di una serie di blocchi richiede, impiegando per i movimenti il carroponete, da 1 a 3 h.

Per la costruzione della suola occorre precisare che, precedentemente all'applicazione dell'ing. Crespi, non era possibile affinare la ghisa su suola basica. Infatti alla temperatura di affinazione la fluidità della ghisa è tale che si infiltrava facilmente in suole preparate diversamente e provocava il distacco di vaste porzioni di materiale con pericolo di foratura del crogiolo.

Il sistema Crespi consiste nel costipare con vibratore meccanico strati successivi di dolomite pezzatura arancio e dolomite macinata impalpabile.

Con questo sistema le infiltrazioni di ghisa sono notevolmente contenute e la durata della suola ha raggiunto valori accettabili. È bene rammentare che non si raggiunge, però, ancora la durata che si rileva nei forni per acciaio che è di 1.000 ÷ 2.000 colate. Nei forni per ghisa è utile, ogni qualvolta si sostituiscono i blocchi delle pareti, asportare lo strato di suola interessato dalle infiltrazioni e riportare la suola al profilo originale.

Sono attualmente in corso le prime prove nelle fonderie di acciaio con suola in mattoni di dolomite e tali prove saranno in seguito estese ai forni ad arco per la fonderia di ghisa.

Il rivestimento basico del crogiolo non è adatto per forni ad esercizio intermittente, poiché la dolomite sfiorisce facilmente, a freddo, per azione dell'umidità atmosferica. Nel caso di fermate del forno per parecchi giorni, come nel caso delle ferie estive, è bene predisporre il rifacimento o, se la campagna del rivestimento non è stata sufficiente, introdurre nel crogiolo una notevole quantità di calce viva in zolle e sigillare tutte le aperture.

I vantaggi del rivestimento basico su quello acido sono:

- Possibilità di operare con scorie basiche e, quindi, ottenere desolfurazione della carica metallica.
- Possibilità di caricare nel forno rottame anche notevolmente ossidato.
- Stabilità della composizione della ghisa e, pertanto, possibilità di mantenere il bagno alla temperatura di spillata anche per tempi lunghi, senza temere variazioni non correggibili.

Vi è attualmente la tendenza, allo scopo di ridurre il consumo di refrattario delle pareti, di raffreddare le lamiere del tino in corrispondenza degli archi, mediante circolazione forzata d'aria o d'acqua.

La durata dei rivestimenti refrattari è variabilissima ed è influenzata fortemente, oltre che dalla qualità dei materiali impiegati, dalla condotta del forno, cioè da tutte le operazioni necessarie per trasformare la carica solida in ghisa liquida atta alla colata dei getti.

A titolo indicativo si possono fornire le seguenti cifre:

- Rivestimento in blocchi dolomitici Crespi:
  - solo fusione: 150 ÷ 300 colate
  - fusione ed affinazione: 100 ÷ 180 colate
  - solo affinazione (duplex con cubilotto): 10 ÷ 30 d (18 h di marcia cad.)
- Suola di pigiata dolomitica Crespi:
  - solo fusione: 300 ÷ 600 colate
  - fusione ed affinazione: 100 ÷ 180 colate
  - solo affinazione (duplex con cubilotto): 10 ÷ 30 d (18 h di marcia cad.)

— Volte sillimanite silico-alluminose ad elevato titolo di allumina:

solo fusione:	300 ÷ 600 colate
fusione ed affinazione:	100 ÷ 150 colate
solo affinazione (duplex con cubilotto):	12 ÷ 36 d (18 h di marcia cad.)

### Rivestimento refrattario della volta

La copertura del crogiolo dei forni ad arco è costituita, in genere, da mattoni sagomati disposti, nelle volte tradizionali, in cerchi concentrici. I parametri principali, che condizionano il comportamento in esercizio delle volte, sono:

- la geometria della volta
- il sistema di montaggio
- la qualità dei materiali.

#### La geometria della volta

Le volte alluminose hanno ormai sostituito quasi totalmente le volte in silice; le sempre più severe condizioni di esercizio dei moderni forni ad arco hanno, infatti, evidenziato la necessità di utilizzare volte che consentano durate sempre maggiori.

Con il materiale è variata anche la conformazione delle volte, con aumento della freccia passata dal 6 ÷ 7% delle volte in silice al 10 ÷ 13% delle alluminose.

Per una perfetta equilibratura statica della copertura, che si traduce in una distribuzione ottimale delle sollecitazioni meccaniche dovute alle dilatazioni termiche del materiale, per ogni diametro dell'anello metallico portante sarebbe teoricamente necessario adottare un ben determinato raggio sferico, in funzione anche della qualità del materiale (peso specifico) e dello spessore dei mattoni.

In pratica, per limitare il numero dei formati dei mattoni, si usano normalmente per le volte alto-alluminose (70 ÷ 90% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 4 raggi sferici e quindi 4 serie di mattoni a più raggi unificati (fig. 123).

Diametro dell'anello metallico	Raggi sferici
Da 2.400 a 3.300 mm	3.400 mm
Da 3.300 a 4.600 mm	4.700 mm
Da 4.600 a 6.400 mm	6.500 mm
Da 6.400 a 8.400 mm	9.000 mm

Per diametri inferiori a 2.400 mm, è possibile costruire le volte con pigiate plastiche alluminose, che danno buone garanzie di comportamento e durata.

Per una volta costruita ad anelli concentrici, si utilizzano i *mattoni a più raggi* per gli anelli ed i *coltelli per alveoli* per tre fori di passaggio degli elettrodi e per il foro di aspirazione dei fumi (limitatamente per acciaio), generalmente sono sufficienti da 4 a 7 posizioni di mattoni e precisamente:

- 1 formato speciale per l'imposta (quando necessario)
- 3 o 4 posizioni per gli anelli
- 1 o 2 posizioni per gli alveoli (a seconda dei diametri dei fori).

Per la congiunzione tra volta ed alveoli sono disponibili sul mercato adeguati calcestruzzi alluminosi che evitano l'utilizzo di altri formati speciali o di pigiate da applicare per battitura.

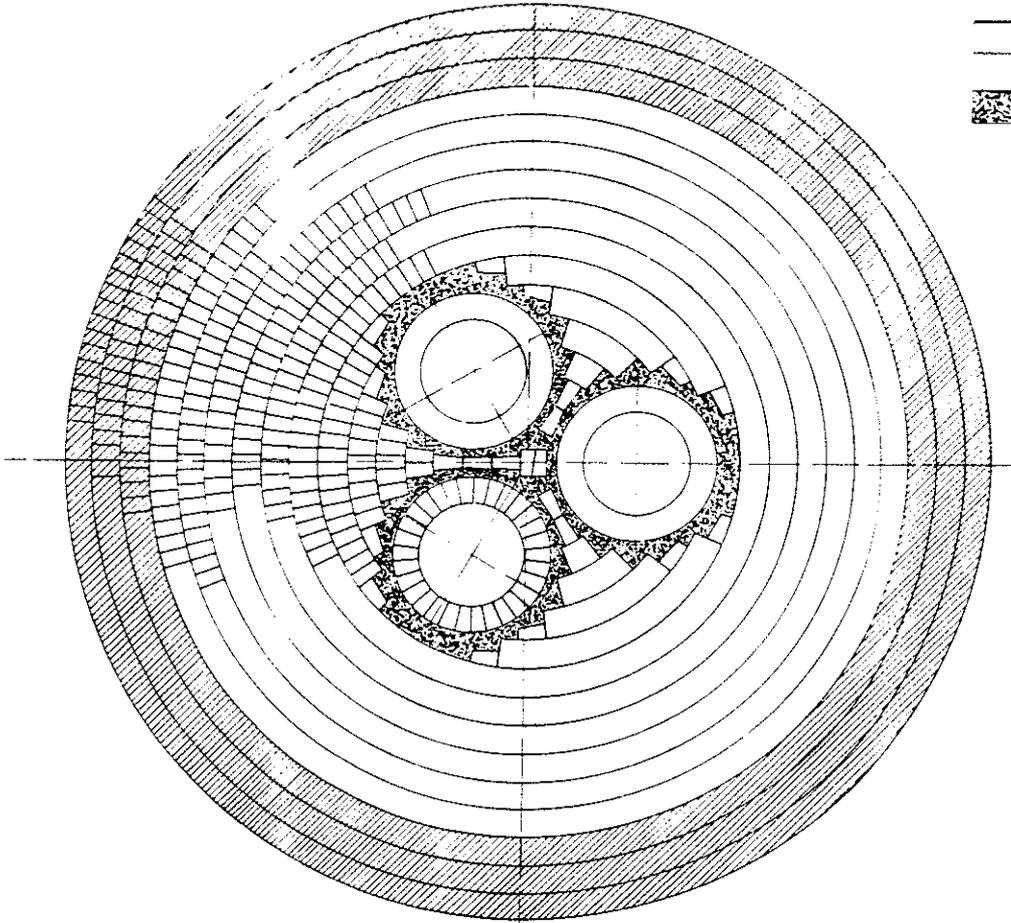
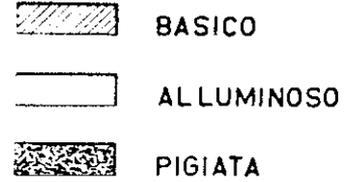
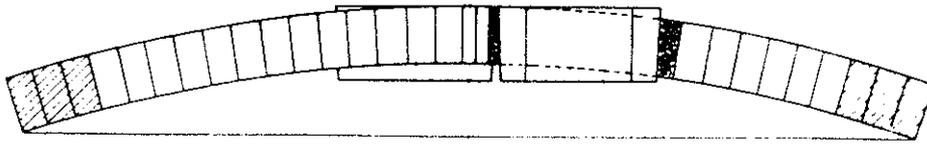


Fig. 123 - Rivestimento refrattario della volta di un forno ad arco per ghisa.

È da ricordare che è disponibile sul mercato un tipo di volta che utilizza un solo formato (nell'ambito di ogni raggio sferico) di forma tronco-piramidale a base quadrata: la volta, anziché ad anelli concentrici, è costruita per file parallele. I vantaggi di tale volta si traducono in facilità di montaggio ed in un minore numero di formati a magazzino.

#### Le modalità di montaggio

Le volte alluminose, a differenza delle siliciose, non necessitano di giunti di dilatazione (cartoncini o simili), si possono montare a secco o con malta, a seconda dei tipi di materiali; con mattone al 90%, ad esempio, è consigliabile l'impiego di malta che funge da giunto di dilatazione, diminuendo le tensioni all'intradosso della volta che potrebbero causare fenomeni di scagliature.

#### La qualità dei materiali

Sono consigliabili mattoni alto alluminosi: sono disponibili mattoni cotti al 72%, all'80%, all'85% ed al 90% di  $Al_2O_3$ ; per forni elettrici per ghisa, oltre ai materiali ora elencati, sono consigliabili mattoni alluminosi crudi chimicamente legati: mattoni all'80% di  $Al_2O_3$  possono raggiungere rese di circa il 40% superiori ai mattoni cotti al 62% e del 10 ÷ 15% superiori ai mattoni cotti all'80%.

Si ricordano anche le volte *bilanciate*, che utilizzano due o più tipi di materiali (ad esempio basico ed alluminoso) per equilibrare le usure in zone preferenziali.

L'utilizzatore, nella scelta del tipo di copertura, potrà avvalersi della collaborazione dei fornitori di refrattari che, in funzione delle particolari esigenze dell'esercizio, forniranno i suggerimenti e le indicazioni necessarie per ottenere i migliori risultati.

## FUNZIONAMENTO E CONDOTTA

Senza entrare in particolari dettagli, si ritiene importante vedere come si comporta elettricamente un forno ad arco durante il funzionamento, poiché queste conoscenze servono di guida alla corretta condotta del forno stesso.

Per semplicità ci si riferisce ad una sola fase del circuito di un forno trifase ad arco diretto che comprende: trasformatore elettrico, linea di alimentazione, forno. Questi elementi compongono il circuito *spira-forno* del forno ad arco (fig. 124), il cui schema elettrico equivalente, espresso nella sua forma più semplice, è quello di una resistenza ed una induttanza in serie (fig. 125).

Pertanto, un circuito di questo tipo, percorso da una corrente elettrica, rivela in base al noto diagramma circolare delle macchine elettriche, curve caratteristiche particolari che servono a determinare le caratteristiche tecniche e costruttive del forno ed a controllare il buon andamento del funzionamento del forno stesso (fig. 126).

Osservando queste curve, si possono fare le seguenti considerazioni di massima.

- Potenza attiva: cresce con il crescere della corrente sino a raggiungere il suo massimo valore nel punto in cui le potenze attiva e reattiva sono uguali. Questo è il massimo valore di corrente cui deve funzionare il forno. Aumentando oltre questo limite il valore della corrente, la potenza attiva tende a diminuire sino al valore zero, quando la corrente raggiunge il massimo valore (corrente di corto circuito, che corrisponde ad elettrodo abbassato a contatto della carica). Si capisce, perciò, che il forno deve lavorare nell'ultimo tratto crescente della curva di potenza,

$$\text{sia in prossimità del valore di corrente } I = \frac{E}{\sqrt{2} X_e}$$

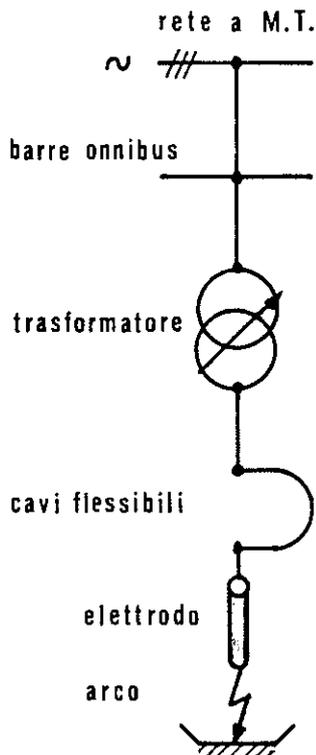


Fig. 124 - Schema « spira-forno » del forno ad arco.

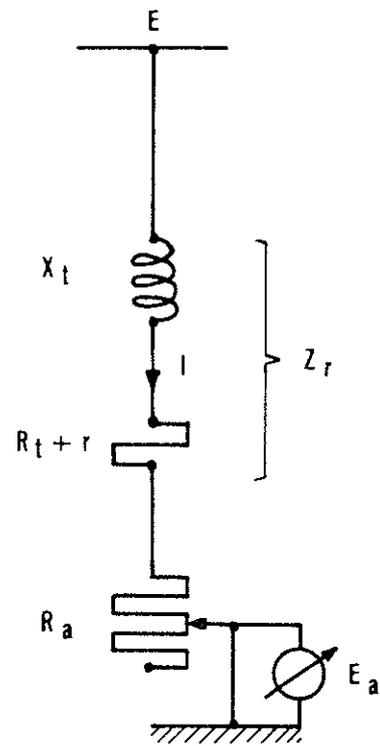


Fig. 125 - Schema equivalente semplificato del circuito « spira-forno ».

- Potenza reattiva: la potenza reattiva aumenta con l'aumentare della corrente sino a raggiungere il suo massimo valore per corrente massima (corrente di c.c.). Per una condotta corretta del forno non si dovrebbe mai assorbire potenza reattiva in quantità superiore a quella attiva, e ciò soddisfa la condizione di funzionamento dianzi visto, per la potenza attiva.

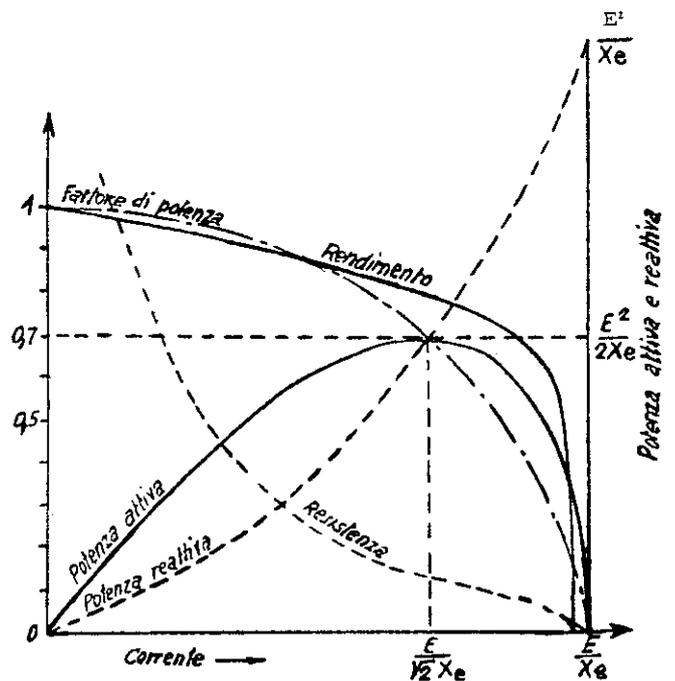


Fig. 126 - Curve caratteristiche di un forno ad arco, in funzione della corrente assorbita.

— Fattore di potenza: in un circuito come quello della *spira-forno* ( $X + R$ ) si sa che il fattore di potenza ( $\cos \varphi$ ) è  $= 1$  per corrente zero ed  $= 0$  per corrente di c.c., mentre per  $X = R$  (Potenza attiva = potenza reattiva) il suo valore è di  $0,707 \cdot \left(\frac{E^2}{2Xe}\right)$ . Pertanto,

$$\cos \varphi = \frac{E^2}{2Xe}$$

nel tratto di potenza in cui lavora il forno, il fattore di potenza oscilla tra  $0,85 \div 0,707$ . Perciò il forno ad arco non richiede batterie di condensatori rifasatori.

— Rendimento: il rendimento elettrico nel tratto di lavoro del forno ad arco, come si vede, oscilla grosso modo tra  $0,80$  e  $0,85$ ; esso è espresso dal rapporto dell'energia dell'arco voltaico e l'energia assorbita dalla rete elettrica di alimentazione ( $\eta_e = \frac{Pa}{P}$ ).

$$\eta_e = \frac{Pa}{P}$$

È da osservare che questo valore è naturalmente più elevato del valore del rendimento termico, riferito al forno ed espresso dal rapporto tra energia utilizzata ed energia assorbita ( $\eta_t = \frac{Eu}{Ea}$ ).

$$\eta_t = \frac{Eu}{Ea}$$

Il rendimento elettrico dipende da un buon dimensionamento elettrico delle varie parti dell'impianto che costituiscono la *spira-forno*. Il rendimento termico dipende, invece, oltre che dal dimensionamento elettrico, dalla costruzione del forno e specialmente dal suo rivestimento refrattario.

— Resistenza: la resistenza elettrica, che trasforma l'energia elettrica in calore a scopo di riscaldamento, è costituita dallo spazio che intercede tra carica metallica ed elettrodo, cioè dalla lunghezza dell'arco; essa diminuisce man mano che l'elettrodo si avvicina alla carica e raggiunge valore prossimo allo zero, per corrente di c.c.

Le curve caratteristiche esaminate si riferiscono ad un caso generale di forno ad arco costruito per una data potenza nominale, relativa ad una data tensione di alimentazione. Ovviamente, per ciascun tipo di forno vi saranno altrettante curve simili con relativi valori differenti di tensione.

A titolo di esempio si riportano le curve caratteristiche di funzionamento di un forno ad arco da  $12,5$  MW di potenza (fig. 127). Dalle osservazioni delle curve caratteristiche sopra esaminate, si possono trarre le seguenti conclusioni:

— Un forno ad arco non dovrebbe mai assorbire una corrente superiore a quella di massima potenza, che generalmente è indicata sugli appositi strumenti di misura.

— Il trasformatore di potenza deve avere caratteristiche speciali a causa delle punte di corrente che purtroppo sono inevitabili, per cui deve essere costruito secondo le specifiche di progettazione e da un costruttore specializzato.

— Il dimensionamento, il montaggio e la disposizione delle sbarre di alimentazione, ivi compresi gli elettrodi, hanno molta importanza al fine del rendimento elettrico dell'impianto, per cui nel progetto sono considerati come parti integranti della *spira-forno*.

— Altre osservazioni relative alle caratteristiche funzionali e di rendimento del forno sono le relazioni tra il diametro del bacino e la capacità nominale del forno (fig. 128) e la potenza elettrica del trasformatore (fig. 129).

— Di fondamentale importanza è l'apparecchiatura di regolazione automatica dell'arco, poiché da essa dipende la più o meno buona stabilità dell'arco stesso, da cui deriva la corrente assorbita e, quindi, l'andamento di tutte le curve caratteristiche esaminate.

Il funzionamento teorico-pratico di massima di un forno ad arco può essere sommariamente riassunto come segue. Dopo avere introdotto la carica nel bacino normalmente dall'alto e predisposte tutte le apparecchiature al loro intervento, sono abbassati gli elettrodi nella carica stessa cortocircuitando la *spira-forno*. Regolato il trasformatore sul valore di tensione voluto, si chiude l'interruttore di M.T. che, normalmente, si effettua a distanza schiacciando un pulsante o manovrando una leva. La corrente, passando attraverso il circuito, agisce sul regolatore automatico il quale interviene alzando gli elettrodi e regolando la lunghezza dell'arco (valore della resistenza) al giusto valore di corrente cui corrisponde la rispettiva massima potenza. In certi avviamenti si calano gli elettrodi sulla carica predisposta, arrestandoli all'altezza dovuta indicata al regolatore automatico. La fig. 130 rappresenta la potenza assorbita per cariche successive.

Per quanto riguarda l'apparecchiatura automatica di regolazione degli elettrodi sia sensibile ed intervenga rapidamente, le oscillazioni della potenza assorbita dal forno sono piuttosto ampie, per cui la potenza media utilizzata per la fusione è piuttosto bassa rispetto alla potenza massima nominale del forno stesso. Alla fase fusoria del forno seguono le operazioni di scorificazione che è effettuata da apposita portina e con utensili manuali, facendo basculare verso la porta di scorifica. Si travasa la ghisa fusa in apposite siviere portate dalla gru per colare direttamente in staffe od altro, oppure attraverso appositi canali, in forni di attesa, in caso di funzionamento duplex.

La marcia del forno ad arco è sempre controllata da apparecchi registratori che consentono la verifica della potenza assorbita.

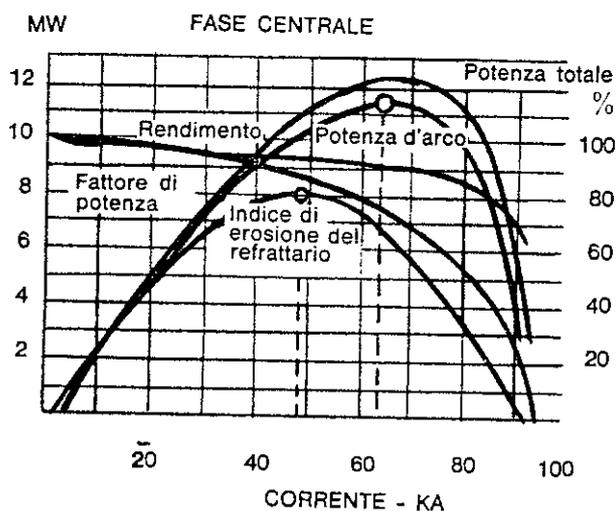


Fig. 127 - Curve caratteristiche di un forno ad arco da  $12,5$  MW di potenza.

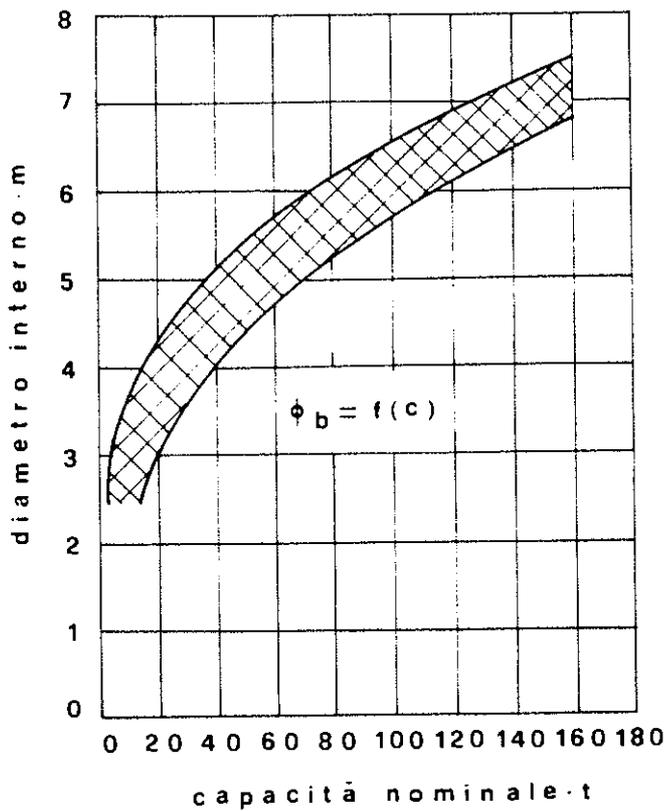


Fig. 128 - Relazione tra diametro del bacino e capacità nominale dei forni ad arco.

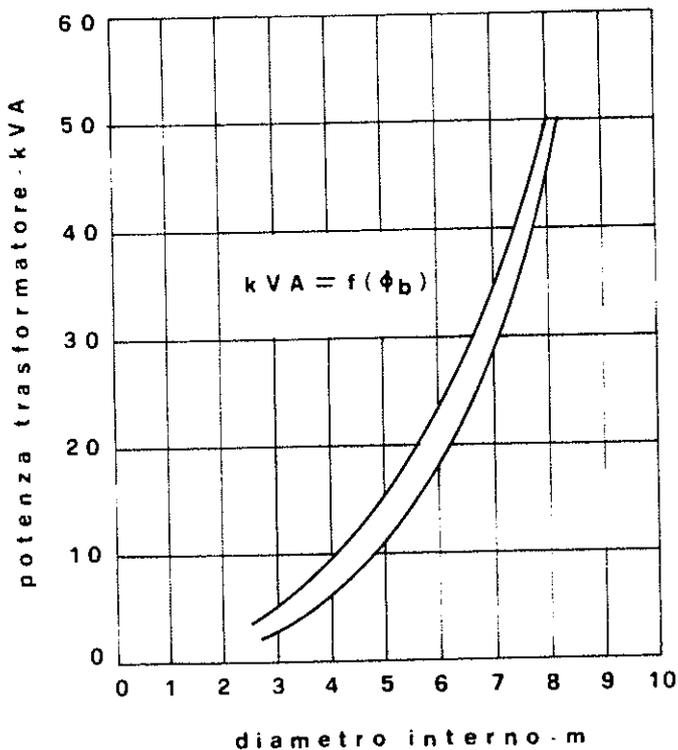


Fig. 129 - Relazione tra diametro del bacino e potenza elettrica del trasformatore.

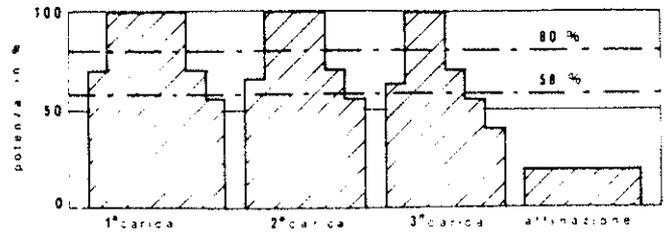


Fig. 130 - Utilizzazione della potenza massima in un forno ad arco durante una fusione di ghisa.

A titolo largamente indicativo, la ripartizione delle spese per effettuare una fusione in un forno ad arco della potenza di circa 25 MkVA è distribuita come segue (fig. 131):

- 17,5% energia elettrica
- 7,75% aggiunte di materiali additivi
- 4,85% elettrodi
- 4% carbone
- 3% manodopera
- 1,8% refrattario
- 1% manutenzione.

Il costo della carica corrisponderebbe così a circa il 60% del costo della ghisa fusa.

### CONDOTTA DELLA FUSIONE

Da tutte le considerazioni precedentemente esposte, risulta ora la possibilità di indicare delle norme generali per la condotta pratica della fusione della ghisa con il forno ad arco.

Nella condotta della fusione si distinguono 4 fasi:

- 1 - Dall'inizio dell'assorbimento dell'energia sino a fusione completa della carica nella zona fra elettrodi e parete del crogiolo.
- 2 - Completamento della fusione.
- 3 - Surriscaldamento della carica fusa sino alla temperatura stabilita per la colata.
- 4 - Attesa della colata.

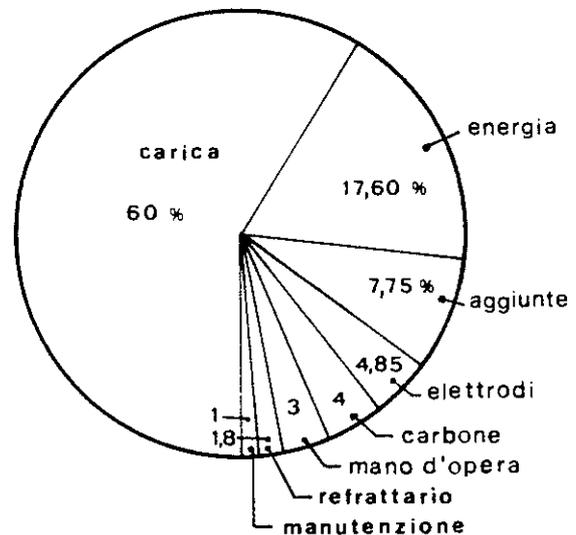


Fig. 131 - Spese, ripartite percentualmente, in un forno ad arco da 25 kVA per la fusione della ghisa.

### 1ª fase

Ad inizio dell'assorbimento di energia il bacino è occupato dalla carica solida. Essa, essendo caricata dall'alto con cestoni a fondo apribile, ha la forma di cono con il vertice all'altezza del bordo superiore del bacino stesso, cioè poco al di sotto della volta.

Si dispone il forno per la marcia automatica e si assorbe energia alla massima tensione disponibile. Si sceglie la massima tensione disponibile per adescare più facilmente gli archi, anche se il materiale di carica, freddo e talvolta sporco, non conduce la corrente in modo regolare.

Quale valore di corrente si sceglie quello inferiore, per l'adescamento degli archi, e si aumenta progressivamente in modo da raggiungere in pochi minuti (1 o 3 min) il valore necessario per la potenza totale stabilita, che normalmente risulta quella corrispondente a fattore di potenza di circa 0,85.

Gli elettrodi, discendendo, incontrano la carica ed iniziano a fondere il materiale metallico, scavando in esso tre camini verticali sino a raggiungere la suola del forno. Proseguendo nell'assorbimento dell'energia, i camini si allargano sino a formare un unico cratere con la base approssimativamente triangolare, con i vertici in corrispondenza degli elettrodi. Ad un certo punto il cratere diventa così ampio che, in corrispondenza dei vertici, non vi è più materiale solido fra elettrodi e parete. Sino a questo punto l'energia degli archi era prevalentemente assorbita dalla carica solida che fondeva, mentre il refrattario non era praticamente sollecitato. Infatti, se si scoperchia il bacino, si osserva che volta e pareti non risultano termicamente sollecitate, cioè non sono ancora arroventate.

Non si può stabilire a priori il termine della prima fase; per poterlo determinare, occorre, per molte fusioni, scoperchiare il bacino ed osservare la carica parzialmente fusa, provvedendo a correggere opportunamente la condotta della fusione successiva. Per un forno da 20 ÷ 40 t si può all'incirca prevedere che la prima fase termini dopo l'assorbimento di 300 kWh/t, ma questo valore è fortemente influenzato sia dal peso specifico apparente della carica, sia dalla distanza fra elettrodi e parete, sia dalla temperatura di fusione corrispondente al tenore di carbonio equivalente della ghisa.

Se la carica è costituita da materiali a basso peso specifico apparente, quali ritagli di lamiere sottili o tornitura, ed il caricamento completo del forno è effettuato in più di una volta, al termine della prima fase per la prima carica si scoperchia il crogiolo e si introduce la seconda carica, e così via per le successive.

### 2ª fase

Gli archi iniziano ad irradiare il loro calore sul refrattario della parete che a loro volta lo riverberano, ed occorre quindi modificare le modalità di assorbimento di energia di base alle curve caratteristiche del forno, in modo da operare con archi corti.

Si riduce quindi la tensione ad un livello per cui, assorbendo la massima potenza disponibile, si opera con un fattore di potenza di 0,707. Con i forni attualmente installati, tale tensione è di poco inferiore ai due terzi di quella massima. La quantità di energia, che si può somministrare alla carica nelle prime due fasi, deve essere

quella necessaria per ottenere la fusione completa, che varia in funzione del tenore di carbonio della ghisa. Si può anche proseguire la seconda fase sino a surriscaldare il bagno fuso di un certo numero di gradi, tenendo ben presente che, assorbendo energia ad un livello elevato di potenza, anche operando con archi sufficientemente corti, si surriscalda notevolmente la parete e la volta del forno, riducendo il rendimento termico e consumando refrattario.

In questa seconda fase, a causa delle elevate intensità di corrente impiegate, l'utilizzazione elettrica del forno non è migliore, ma si tollera questa minore utilizzazione per ottenere una maggiore durata del refrattario.

### 3ª fase

Tutta la carica si trova allo stato fuso e, quindi, in nessun punto del forno vi è materiale che protegga la parete dall'irraggiamento dell'arco, che è fortemente sollecitata.

Occorre lavorare con archi corti, ma ad un livello di potenza ancora inferiore a quello adottato nella seconda fase.

Lavorando con potenze elevate, le calorie erogate vanno non a surriscaldare il bagno, ma a surriscaldare le pareti. Si ha, come conseguenza, la formazione anormale di scoria, che si aggiunge in modo non controllato a quella caricata ad inizio fusione per esigenze metallurgiche ed a quella proveniente dal materiale metallico, peggiorando lo scambio termico fra bagno fuso ed archi.

### 4ª fase

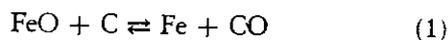
Il bagno si trova alla temperatura stabilita per la colata e, quindi, la somministrazione di energia deve essere quella strettamente necessaria per compensare le perdite termiche del forno. È da notare che la temperatura dei refrattari è, durante questa fase, al livello massimo e, pertanto, le perdite per conduzione sono notevoli, specie se il loro spessore è ridotto. In particolare le zone maggiormente sollecitate sono quelle in corrispondenza alla fase *selvaggia* e le *spallette* del forno, oltre, naturalmente, alla volta.

L'energia assorbita nella quarta fase è normalmente ottenuta con arco molto corto, impiegando la giusta tensione disponibile e corrente tale da ottenere fattore di potenza 0,707. Occorre attentamente evitare l'immersione di uno o di tutti gli elettrodi per non assorbire valore di corrente di cortocircuito. Nella produzione di ghisa l'immersione delle colonne nel bagno difficilmente giunge ad elevare il tenore di carbonio, ma sovente determina effetto di inoculazione di grafite che talvolta, come per esempio nella ghisa malleabile, produce effetti nocivi per la qualità dei getti.

## Reazioni di deossidazione e desolfurazione nel forno ad arco con rivestimento basico

### Deossidazione

- a) Nel bagno si effettua la deossidazione essenzialmente per reazione tra l'ossido di ferro ed il carbonio disciolti nel ferro liquido, secondo la reazione reversibile:



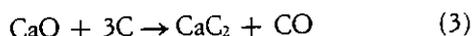
Il valore della concentrazione del FeO nell'equilibrio è funzione della concentrazione degli altri costituenti il sistema, e quindi della pressione parziale del CO, nonché della temperatura del bagno. Ritenendo costanti la concentrazione del ferro e la pressione parziale del CO, risulta costante il seguente prodotto: conc. C x conc. FeO = costante (funzione della temp.). In assenza di fattori influenzanti il sistema, si avrà quindi che, per un dato tenore di C e per una data temperatura, la concentrazione del FeO non sarà che una, e pertanto, se la sua concentrazione iniziale superava tale valore, esso deve combinarsi con il carbonio come indicato dalla reazione (1); ed il tenore di C e di FeO si riduce contemporaneamente sino al valore di equilibrio, per quella data temperatura.

- b) Fra bagno e scoria: l'FeO, in equilibrio nel bagno con il rispettivo tenore di carbonio, tende a sciogliersi in parte nella scoria, cioè l'ossido tende a ripartirsi fra bagno e scoria. Tale ripartizione non è semplicemente di natura fisica, bensì di natura prevalentemente chimica, cioè prodotta dalla reazione fra l'FeO ed il CaO della scoria:



Il ferrito di calcio che si origina è un composto labile, facilmente dissociabile nei suoi costituenti. Maggiore è la concentrazione del ferrito nella scoria, minore sarà la tendenza della scoria ad estrarre FeO dal bagno. In assenza di fattori alternanti il sistema, si ha quindi la necessità di un notevole volume di scoria per estrarre dal bagno la massima quantità di FeO.

- c) Nella scoria, alla elevatissima temperatura dell'arco, risulta possibile la reazione fra calce e carbone contenuti nella scoria:

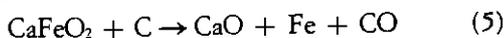


Il carburo di calcio originatosi agisce da energico riducente a temperature inferiori a quelle della sua formazione; così mentre esso si forma dal punto di contatto dell'arco, reagisce con la scoria, riducendone i componenti, nelle zone in cui questa è a temperature inferiori. È di interesse la reazione del carburo di calcio con il ferrito di calcio sciolto nella scoria:



Risultando così diminuito il tenore di FeO nella scoria, questa sarà ancora in grado di estrarre dal bagno di ghisa fusa.

Indipendentemente dalla reazione dovuta al carburo di calcio, si giungerebbe ugualmente alla riduzione dell'ossido di ferro della scoria, sebbene in modo meno energico, ad opera del carbone in essa contenuto, secondo la reazione:



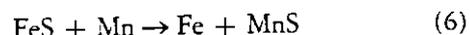
reazione che si sfrutta praticamente nella fase di deossidazione, durante l'affinazione al forno Martin con processo basico.

\* \* \*

Riassumendo: ad opera del C disciolto nel ferro fuso si raggiunge un tenore di equilibrio fra FeO e C, con sviluppo di CO, e riduzione del FeO in eccesso. Il FeO residuo è poi estratto dal bagno a mezzo della scoria costituita da CaO e C, nella quale è ridotto per mezzo del C e principalmente del CaC<sub>2</sub> originatosi alla temperatura dell'arco.

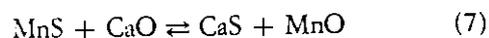
## Desolfurazione

- a) Poiché nel bagno è sempre presente, in tenori più o meno forti, manganese metallico, questo reagisce con il solfuro di ferro secondo la reazione:

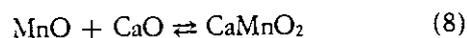


Il solfuro di manganese originatosi è praticamente insolubile nella ghisa fusa, e pertanto, essendo più leggero in questa, sale alla superficie del bagno.

- b) Reazione tra bagno e scoria. Il solfuro di manganese si ripartisce fra bagno e scoria ed il tenore della concentrazione nella ghisa fusa raggiunge un valore di equilibrio. Tale ripartizione non è di natura unicamente fisica, ma di natura prevalentemente chimica, cioè frutto di una reazione fra il MnS ed il CaO della scoria:

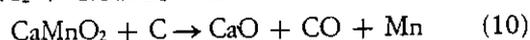


l'ossido di manganese così formatosi si combina con il CaO, con reazione analoga alla (2), dando un manganese:



Sia la reazione (7) che la (8) sono reversibili, ed il valore della costante di equilibrio non è tale da assicurare completa desolfurazione del bagno, se non si intervenisse a spostarle decisamente verso destra.

- c) Reazione nella scoria. Il carburo di calcio ed il carbonio contenuti nella scoria agiscono, come si è già visto, da energici riducenti, e pertanto riducono anche il MnO a Mn; con reazioni analoghe alla (4) ed alla (5):



In particolari tipi di ghisa il tenore di Mn desiderato è molto basso, stechiometricamente inferiore al necessario per la reazione (6). In questo caso la scoria non estrae dal bagno solfuro di manganese, ma solfuro di ferro che, con meccanismo del tutto analogo alle reazioni (7) ed (8), origina solfuro di calcio e ferrito di calcio, il quale ultimo viene poi ridotto dal carburo di calcio e dal carbonio.

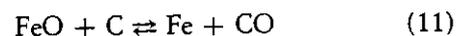
\* \* \*

In conclusione, lo zolfo, presente nel bagno metallico generalmente come solfuro di manganese, originatosi per reazione con il Mn metallico presente, oppure, in assenza di questo, come solfuro ferroso, è estratto dal bagno ad opera della scoria costituita da CaO e da C e qui è trasformato in CaS per mezzo del C e del CaC<sub>2</sub> originatosi alla temperatura dell'arco.

## Reazioni di deossidazione in forno elettrico ad arco con rivestimento acido

### Deossidazione

- a) Reazioni nel bagno. Nel bagno si effettua la deossidazione, analogamente a quanto avviene con l'impiego di forni a rivestimento basico, secondo la reazione reversibile:



da cui si ha:

conc. C x conc. FeO = costante (funzione della temp.).

Pertanto ad una determinata temperatura, in presenza di un certo tenore di carbonio, la concentrazione dell'ossido di ferro si ridurrà ad un certo valore, in assenza di fattori influenzanti il sistema.

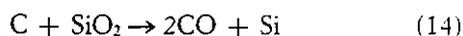
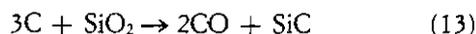
- b) Reazioni fra bagno e scoria. Poiché la scoria è costituita da silicato di calcio con elevato rapporto  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$ , l'ossido ferroso disciolto nel bagno tende a combinarsi con la silice per dare origine al silicato ferroso, composto poco dissociabile, secondo la reazione:



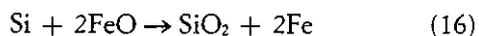
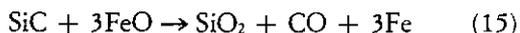
la quale alle temperature di lavoro è praticamente spostata a destra. La particolare stabilità del silicato ferroso è il motivo per cui, nella scoria dei forni a rivestimento acido, l'ossido ferroso libero è sempre contenuto in quantità inferiori che non nella scoria dei forni a rivestimento basico, in cui il ferrito di calcio è notevolmente più instabile e quindi più dissociato.

A mano a mano che l'ossido di ferro disciolto nella scoria è sottratto come composto stabile, dovendo rimanere costante il coefficiente di ripartizione dell'ossido fra bagno di ferro fuso e scoria considerata come massa diluente chimicamente inerte, si giunge all'eliminazione praticamente completa del  $\text{FeO}$  dal bagno fuso.

- c) Reazione nella scoria. Essendo la scoria costituita prevalentemente da silice, fra essa ed il carbone aggiuntovi con funzione di riducente sono possibili, alle elevatissime temperature prodotte dall'arco elettrico, le seguenti reazioni:



Il carburo di silicio ed il silicio originatisi possono entrambi agire come energici riducenti del  $\text{FeO}$  libero, secondo le reazioni:



Si ha cioè una tendenza della  $\text{SiO}_2$  della scoria a passare nel bagno come  $\text{Si}$  metallico; sino a che nel bagno è presente ossido ferroso, il  $\text{Si}$  ossida a sue spese ritornando  $\text{SiO}_2$ . Quando il bagno è completamente deossidato, il  $\text{Si}$  si discioglie, portando a tenori di  $\text{Si}$  della ghisa più elevati e sovente non controllabili, specie ad elevate temperature di lavoro. Per ridurre tale tendenza all'aumento del tenore di  $\text{Si}$  nel bagno metallico, si aggiunge alla scoria una quantità ben determinata di calce, la quale sottrae una parte di  $\text{SiO}_2$  combinandola come silicato di calcio, il quale non può essere ridotto ad opera del carbone.

### Reazione di carburazione nel forno ad arco

Per carburazione della ghisa o dell'acciaio si intende l'aumento del tenore di carbonio.

Normalmente è ottenibile il tenore di carbonio richiesto dai tipi commerciali di ghise ovvero il 4%.

La carburazione si ottiene provocando l'assorbimento del carbonio contenuto in materiali non metallici ad elevato tenore di carbonio (coke e grafite sintetica).

La carburazione avviene secondo la reazione:



La tonalità termica della reazione a 873 K (600 °C) è di 1.674 J (400 cal) per ogni kg di carbonio assorbito (in unità elettriche: 0,46 kWh).

La velocità di carburazione è influenzata dai seguenti fattori:

- 1° - Temperatura: aumenta con l'elevarsi della temperatura del bagno.
- 2° - Superficie di contatto: aumenta con l'aumentare della superficie di contatto fra bagno metallico e materiale carburante.
- 3° - Grado di saturazione della ghisa: diminuisce con l'aumento del tenore di carbonio del bagno per ridursi a 0 per C = 6,67%.

Sulla carburazione della ghisa non ha influenza la natura del rivestimento del forno.

Nella pratica industriale si impiegano i seguenti procedimenti:

- 1° - Per carburazioni importanti (superiori a 0,5%): il materiale carburante si dispone sulla suola del forno ed in parte si mescola al materiale di carica. Le gocce di metallo, che si originano nella fusione, incontrano, suddivise, il materiale carburante e, allorché si forma il bagno, il materiale carburante galleggia su di esso e l'assorbimento è favorito dalle elevate temperature raggiunte in prossimità degli archi.
- 2° - Per carburazioni limitate (inferiori a 0,5%) quali necessarie per la messa a punto finale della composizione, si cosparge il bagno ben scorificato e a temperatura superiore a 1.723 K (1.450 °C) con materiale carburante, e si effettua il mescolamento a mezzo di marre.

### Condotta del forno ad arco partendo da cariche solide

La preparazione della ghisa, fusa al forno ad arco adatta alla colata di getti, comporta il seguente ciclo produttivo:

- preparazione della carica solida
- fusione
- affinazione
- travaso in siviera di colata od in forno di attesa.

### Considerazioni generali

Nel forno ad arco la carica è fusa in condizioni neutre o riducenti, cioè in condizioni adatte ad ottenere il tenore di carbonio della ghisa fusa uguale o superiore a quello della carica di partenza; non si effettua alcuna reazione di ossidazione a mezzo scoria od ossigeno, tipiche della produzione dell'acciaio con il processo basico.

La composizione della carica deve essere calcolata con difetto di tutti gli elementi caratteristici; la composizione finale voluta è raggiunta mediante addizione di ferroleghie ed elementi integrativi.

Nel forno ad arco con rivestimento basico è possibile, con condizioni di marcia riducente e con formazione di scoria opportuna, eseguire la desolfurazione della ghisa. Tale processo è particolarmente importante per la fabbricazione di ghisa sferoidale.

Nel forno elettrico la carica, nel corso della fusione e dell'affinazione, non viene a contatto di alcun genere di

combustione e, pertanto, non si verificano gli assorbimenti di gas o di zolfo che sono tipici del cubilotto e del forno a riverbero.

Le reazioni, che avvengono nel forno ad arco, sono complesse e non tutte note in modo quantitativo e, quindi, è necessario, quando nella produzione di un certo tipo di ghisa si sono raggiunti livelli soddisfacenti di qualità, di costo e di produttività, normalizzare tutte le operazioni del ciclo.

#### *Preparazione della carica*

Nello stabilire la composizione della carica, occorre tenere presenti alcune considerazioni di carattere generale:

- La miscela di carica deve risultare la più economica, compatibilmente con le qualità richieste al prodotto finale.
- Fra i materiali di carica occorre scegliere quelli la cui reperibilità sul mercato sia continuativa, per evitare variazioni troppe frequenti di materiali, con tutte le incognite di carattere metallurgico che essi comportano.
- Nella scelta dei materiali di carica occorre tenere presente, oltre il tenore degli elementi principali — carbonio, silicio, manganese, zolfo, fosforo — anche il tenore delle impurezze o degli elementi accidentali, poiché sovente le caratteristiche dei getti sono fortemente influenzate da tale presenza. Tali elementi si possono trovare sia nei rottami di acciaio, sia nei rottami di ghisa e nelle torniture, sia nelle ghise in pani.  
Occorre sempre determinare il tenore delle impurezze dei materiali disponibili per le cariche; quando le partite non sono omogenee, occorre predisporre una opportuna mescolazione preventiva.
- Quando possibile, è conveniente effettuare una miscela di carica la cui densità consenta di caricare il forno con una sola cesta. Se possibile, è bene che la carica riempi completamente il crogiolo, ad evitare che l'arco, durante la fusione, riverberi troppo sulla parete.
- Nella disposizione dei vari materiali nella cesta di carica occorre ricordare che sul fondo vanno collocati i rottami più pesanti e meno facilmente fusibili; successivamente, quelli con pezzatura e fusibilità media, per ultimo i materiali minuti, quali le torniture.
- Uno dei requisiti richiesti alla carica è di condurre facilmente la corrente; quindi, occorre evitare il caricamento di materiali isolanti, quali refrattari, terra, materiali ferrosi eccessivamente sporchi o mescolati con scorie. La buona conducibilità delle cariche è facilitata dall'impiego di torniture e di grafitizzanti carboniosi, quali coke e grafite.
- Le cariche, come detto, sono sempre calcolate con tutti gli elementi in difetto, poiché se si può sempre aumentarne il tenore, è quasi sempre difficoltosa la riduzione. Anche il tenore di carbonio, che è pure riducibile con facilità a mezzo di addizioni di acciaio, è da evitare perché tali aggiunte devono essere effettuate nel bagno liquido con pericolo di spruzzi di metallo e con perdita di calore (apertura della porta) ed aumento del tempo (ciclo di fusione).
- Le ferroleghie sono collocate sulla suola del forno prima di introdurre la carica solida oppure sulla carica metallica, preferibilmente sul fondo per ridurre i cali per ossidazione.

#### *Materiali di carica*

Come già detto, nel forno ad arco si possono caricare tutti i tipi di materiali ferrosi ed in qualsiasi pezzatura. Nella produzione di ghisa sono impiegati:

- Boccame
- Ferrino
- Fondi di fossa
- Ghisa in pani
- Rottami di ghisa
- Tornitura di ghisa
- Rottami di acciaio
- Tornitura di acciaio

#### *Boccame*

L'aliquota di boccame può variare dallo zero al 70% della carica. È un materiale prezioso, poiché è noto sia il tenore degli elementi principali, che delle impurezze.

Alcune fonderie usano pulire il boccame, cioè eliminare le aderenze di sabbia, provenienti dalla formatura in terra dei getti (in peso 1 ÷ 2%). Questa è una operazione raccomandabile per due motivi: primo, si migliora la conducibilità della carica con minore pericolo di rottura degli elettrodi e con più pronto adescamento dell'arco; secondo, si evita di fondere della sabbia silicea che può risultare dannosa sia al rivestimento del forno, specialmente se è basico, sia alla composizione della scoria e che, comunque, comporta per la fusione un consumo di energia elettrica supplementare.

#### *Ferrino*

Si intende per ferrino il materiale ferroso recuperato dalla terra di formatura mediante separatori magnetici. Nelle fonderie, che producono un solo tipo di ghisa, il ferrino ha la stessa composizione del boccame, mentre nelle fonderie, che producono più tipi di ghisa, esso ha una composizione media proporzionale alle quantità dei vari tipi di ghisa prodotte. Non è normalmente possibile, in questo caso, separare il ferrino dei vari tipi di ghisa e, pertanto, occorre impiegarlo solo nelle cariche per determinati tipi di ghisa. Ad esempio, in una fonderia che produca contemporaneamente ghisa malleabile, sferoidale e grigia, il ferrino si potrà impiegare solo nelle cariche per ghisa grigia, poiché le impurezze di zolfo lo rendono dannoso alle cariche di ghisa sferoidale e le impurezze di cromo lo rendono dannoso alle cariche di ghisa malleabile.

Il ferrino, ottenuto dai separatori magnetici della terra di formatura, contiene normalmente ancora troppa terra di formatura e, prima del suo impiego in carica, occorre sottoporlo ad una seconda selezione mediante magneti e vibrovagli. Quando è sufficientemente pulito, può essere impiegato in carica anche in proporzioni rilevanti, dell'ordine del 50 ÷ 70%, poiché conduce bene la corrente e fonde facilmente.

#### *Fondi di fossa*

Si intendono per fondi di fossa i colaticci di ghisa prodotti durante la scorificazione dei forni ad arco, o durante il travaso in siviera, o nell'eliminazione della scoria dalle siviere di colata. Normalmente, i fondi di fossa contengono troppi materiali estranei e scoria, per essere impiegati in carica tali e quali. Essi devono essere smi-

nuzzati con mezzi meccanici e devono essere separati i pezzi di materiali ferrosi dai pezzi di materiale estraneo.

Circa la composizione dei fondi di fossa, vale quanto già detto per il ferrino. Quando tali fondi sono sufficientemente puliti, possono essere impiegati in carica, ma in modeste proporzioni, in genere non superiori al  $5 \div 10\%$  poiché conducono male la corrente e formano eccessiva scoria.

#### *Ghisa in pani*

Circa l'impiego in carica di ghisa in pani occorre, in Italia, tenere presente un altro importante fattore: la variazione del tipo di ghisa in pani impiegato. In Italia è difficile potere impiegare sempre ghise della stessa provenienza e di costante qualità. Le impurità giocano un ruolo molto importante sulle caratteristiche della ghisa, cosicché al variare della qualità della ghisa in pani, si possono riscontrare tendenze a difetti nei getti prodotti e differenti caratteristiche meccaniche.

Il fonditore ritiene, perciò, buona norma impiegare sempre una miscela di tre tipi di ghisa in pani, cosicché al variare, per esempio, di un tipo, il prodotto finale ne risenta l'influenza solo per un terzo.

#### *Rottami di ghisa*

Sono impiegabili in qualsiasi percentuale nella carica, a condizione di conoscerne la composizione e che la pezzatura consenta l'uso di benne a fondo mobile.

#### *Tornitura di ghisa*

È un ottimo materiale da impiegare nel forno ad arco, quando la composizione è nota ed idonea. Presenta il vantaggio di condurre bene la corrente e, quindi, di agevolare l'adescamento degli archi ed un lavoro più dolce degli elettrodi. Se impiegata in percentuale elevata, superiore al  $20\%$ , presenta lo svantaggio di richiedere per la fusione maggiore consumo di energia elettrica e tempo superiore per la fusione.

Occorre, inoltre, tenere presente due importanti elementi negativi delle torniture di ghisa: lo stato di ossidazione che, se elevato, provoca, durante la fusione, diminuzione del tenore di carbonio, di silicio e di manganese ed il contenuto di olio, proveniente dai lubrificanti e dagli oli emulsionabili impiegati per la refrigerazione degli utensili di lavorazione meccanica che, durante la fusione, genera fumi acri e forte sviluppo di fiamme. Per evitare tutti gli inconvenienti, alcune fonderie eseguono l'essiccazione preventiva delle torniture. È comunque difficilmente reperibile sul mercato una tornitura esente da ossidi e con analisi costante.

#### *Rottame di acciaio*

Sul vantaggio di ottenere ghisa, mediante carburazione di rottame di acciaio in percentuale più o meno elevata nella carica, si è già accennato. Comunque, una aliquota di rottame di acciaio è quasi sempre necessaria in carica anche perché, come già detto, l'affinazione si giova dell'aggiunta di elementi integrativi della composizione. Occorre disporre di diversi tipi di rottame di acciaio classificati secondo i tenori di impurezze, principalmente zolfo, nichel, cromo, molibdeno, ed impiegarli opportunamente. A differenza di quanto richiesto dal cubilotto, i

rottami di acciaio impiegati nelle cariche del forno ad arco non devono essere preventivamente tagliati con il cannello ossiacetilenico o con la cesoia. La dimensione dei rottami è condizionata solo dalla dimensione del forno o meglio della benna di carica.

Si ricorda che, in particolare nei forni ad arco, è possibile e spesso vantaggioso l'impiego dei pacchi compressi di lamierino di acciaio, di ogni dimensione. È bene segnalare, però, che pacchi di dimensioni eccessive ( $> 300$  kg) durante il franamento della carica nel corso della fusione possono determinare la rottura degli elettrodi.

#### *Correttivi - ferroleghe - metalli puri*

##### *Carburazione*

Per la carburazione si impiega normalmente polvere di coke, che ha resa del  $40 \div 50\%$ , per coke avente meno del  $10\%$  di ceneri. Sono anche in commercio granulati carboniosi (sfrido di lavorazioni diverse, fra le quali quella degli elettrodi per forni ad arco e di parti in grafite per impianti chimici), che hanno una resa in C più elevata, circa il  $70\%$ , ma di costo notevolmente superiore al coke.

##### *Ferro-silicio*

Si impiega preferibilmente il tipo al  $50\%$ , che presenta normalmente una resa in Si del  $45\%$ . Circa il  $10\%$  di Si si perde per ossidazione anche in cariche fortemente carurate. Ha dato buoni risultati anche il Fe-Si  $80\%$  nonostante la tendenza a galleggiare sul bagno.

Non si impiega il tipo al  $20\%$  perché, in questo caso, l'apporto di silicio viene normalmente a costare di più.

##### *Ferro-manganese*

Si impiega il tipo all' $80\%$ ; di peso specifico più elevato, si immerge completamente nel bagno.

##### *Ferro-cromo e ferro-molibdeno*

Si impiegano le leghe al  $60\%$ .

##### *Ferro-fosforo*

Si possono impiegare sia le ghise fosforose che le leghe ferro-fosforo a basso titolo in fosforo.

##### *Nichel-rame-stagno*

Si impiegano allo stato metallico.

Tutti i materiali di lega nel forno ad arco devono essere impiegati in pezzatura piuttosto grossa. Allo stato di polvere sovente restano incorporati nella scoria e, quindi, la loro resa è ridotta.

##### *Fusione*

La fusione comprende il complesso delle operazioni che servono a trasformare la carica dallo stato solido a quello liquido.

La condotta della fusione è uguale nel forno con rivestimento acido e basico. Unica differenza è che nei forni basici si introduce calce viva in zolle sulla suola per formare la scoria, mentre nei forni acidi questa si forma con materiali silicei, sempre presenti nella carica e nel refrattario oppure anche aggiunti.

Si elencano le operazioni da effettuarsi durante le successive fusioni al forno ad arco.

- a) Terminata una colata, cioè svuotato completamente il forno, si procede alla riparazione della suola: nel caso di suola basica, cospargendo alcune palate di dolomite o magnesite con distribuzione uniforme, se non si hanno particolari zone di usura, o livellando eventuali avvallamenti formatisi.
- b) Si procede alla regolazione delle colonne elettrodiche sulla suola, aprendo le morse portaelettrodi posizionate a filo volta e lasciando discendere le colonne appese al carroponte sino a contatto della suola. Se una o più colonne sono troppo corte, sono sostituite con le colonne di riserva o si procede alla giunzione di elettrodi sulle colonne corte direttamente sul forno, a mezzo degli appositi nipple di raccordo in grafite.
- c) Si scopercia il crogiolo e si introduce la carica metallica dall'alto. La carica contiene l'aliquota maggiore del materiale carburante.
- d) Si dispone il forno su marcia automatica e si inizia l'erogazione di corrente, secondo i principi illustrati precedentemente.
- e) Terminata l'erogazione di energia calcolata come sufficiente ad ottenere la fusione completa, si disinserisce il forno per qualche minuto e si procede attraverso alla porta di lavoro a distaccare dalle pareti, mediante marre, eventuali materiali non ancora fusi ed a sospingerli nel centro del bacino.

#### Affinazione

Si intende per affinazione il complesso delle operazioni necessarie ad elevare la temperatura della ghisa al valore stabilito perché la scoria sviluppi le reazioni richieste. L'affinazione comprende, inoltre, l'aggiunta dei correttivi per ottenere la composizione desiderata.

Il valore massimo raggiungibile della temperatura è limitato solo dalla resistenza del refrattario. Per la ghisa si superano difficilmente i 1.873 K (1.580 °C). Tale valore è normalmente sufficiente all'elaborazione di qualsiasi tipo di ghisa speciale.

La formazione della scoria nei forni, sia acidi che basici, ha lo scopo di desossidare il bagno, cioè ridurre a valori minimi il tenore di ossido di ferro disciolto. Nei forni basici la scoria ha, inoltre, talvolta la funzione di ridurre il tenore di zolfo.

Si elencano le operazioni da effettuarsi durante l'affinazione:

— Terminato il distacco di residui solidi dalle pareti, si prosegue ad assorbire energia per elevarne la temperatura sino al valore stabilito per l'eliminazione della scoria cosiddetta di fusione.

Durante tale fase, capita con frequenza che il forno *soffia*, cioè sviluppa fiamme molto chiare attraverso la porta di lavoro. Ciò è causato da una quantità di scorie eccessive, prodottasi od a causa di anormali quantità di terra di formatura o di anime contenute nel bocchame o da consumo eccessivo di refrattario

del rivestimento durante la fusione. Se la quantità di scorie è eccessiva, il calore prodotto dall'arco si ripartisce fra bagno e refrattario in modo diverso dal previsto e, invece di elevare la temperatura del bagno, si giunge ad un indesiderato surriscaldamento delle pareti del forno. Tale condotta è assolutamente da evitarsi; quando si verificano le condizioni accennate, occorre procedere all'eliminazione di una parte della scoria di fusione prima di giungere alla temperatura stabilita.

Come conseguenza, risulta un decorso differente dal previsto e la composizione della ghisa ne risulta influenzata.

— Raggiunta la temperatura di scorificazione, che deve essere rigorosamente stabilita e mantenuta costante per ogni tipo di marcia e di carica, si procede alla totale eliminazione della scoria, a mezzo di marre; nei grossi forni raffreddati ad acqua, la si fa attraverso la porta di lavoro. Scopo dell'eliminazione della scoria di fusione è quello di impedire che le reazioni scoria-metallo avvengano in modo incontrollato dopo il prelievo del campione per analisi, provocando variazioni di composizioni imprevedute nel bagno metallico.

— Appena eliminata la scoria di fusione, si invia un campione di ghisa al laboratorio per la determinazione della composizione e si ricopre il bagno con la scoria di affinazione. La composizione di questa varia a seconda che il forno di affinazione è acido o basico.

In forno acido si aggiunge come scorificante sabbia silicea secca mescolata in un determinato rapporto con calce viva che, formando dei silicati di calcio, abbassa la temperatura di fusione della scoria e, quindi, ne aumenta la fluidità. Come desossidante della scoria acida si impiega polvere di coke o ferro-manganese in polvere. La quantità di scoria nel forno deve essere tale da ricoprire tutta la superficie del bagno con uno strato di 1 ÷ 3 cm. Il peso delle aggiunte deve essere rigorosamente mantenuto costante per ogni ciclo. In forno basico si aggiunge come scorificante calce viva in zolle di pezzatura noce, mescolata in determinato rapporto con polvere di coke. Anche in questo caso le quantità da introdurre devono essere mantenute rigorosamente costanti. Ricevuti dal laboratorio i dati della composizione della ghisa, si procede alla correzione, secondo i tenori stabiliti.

#### Diminuzione del tenore di carbonio

Si ottiene la riduzione del tenore di carbonio mediante aggiunte di acciaio, calcolate con la formula di diluizione:

$$P_g \cdot C_g + p_a \cdot C_a = (P_g + p_a) C_v$$

in cui:

$P_g$  = Peso della ghisa da correggere.

$C_g$  = Tenore di carbonio risultante dall'analisi.

$p_a$  = Peso di acciaio da aggiungere.

$C_a$  = Tenore di carbonio dell'acciaio di correzione.

$C_v$  = Tenore di carbonio richiesto.

Come acciaio di correzione occorre impiegare un tipo che non contenga elementi di lega indesiderabili: per esempio, impiegare acciaio esente da cromo per la correzione di ghisa malleabile, ed acciaio povero di zolfo per correzione di ghisa sferoidale.

### Aumento del tenore di carbonio

Si ottiene mediante aggiunta di grafite in granuli dopo completa asportazione della scoria di affinazione e, quindi, immediatamente prima della colata operando alla temperatura massima per rendere più veloce la carburazione. La resa e la velocità di carburazione dipendono dalla temperatura della ghisa, dall'entità della carburazione, dal livello di carbonio equivalente della ghisa da correggere. La carburazione è una reazione lenta e tanto più difficile quanto più elevato è il carbonio equivalente della ghisa.

### Variatione degli altri elementi di lega

Si effettua mediante aggiunte di metalli puri (rame, stagno, nichel) o di ferroleghe (silicio, manganese, cromo, molibdeno, fosforo, vanadio, titanio) o di minerali (zolfo).

### Desolforazione

Mentre è raro il caso di cicli metallurgici che comportano aumento nel tenore di zolfo della ghisa, è invece molto frequente la necessità di dovere ridurre il tenore di zolfo. Ciò è possibile solo nei forni basici, nei quali si opera con scoria di calce viva che ha un energico potere desolforante addizionata a polvere di coke o di grafite.

La desolforazione della carica avviene già durante la fusione, procede durante il surriscaldamento del bagno sino alla prima scorificazione ed è completata mediante la scoria di affinazione. La desolforazione spinta della ghisa richiede scorie molto basiche, molto carburate e molto fluide e, pertanto, talvolta si ricorre all'impiego anche di fluorite in aggiunta alla calce viva: è necessario, però, ricordare che la fluorite va impiegata con cautela, poiché la scoria basica con fluorite corrode fortemente il rivestimento di dolomite (fig. 132).

### Attesa precedente il travaso

Terminate tutte le operazioni descritte, la ghisa dovrebbe essere travasata o nei forni di attesa (procedimento duplex) o nelle siviere di colata. Si è, quindi, a questo punto realizzato un ciclo metallurgico completo, in cui le varie operazioni e le varie aggiunte rigorosamente calcolate e condotte hanno portato alla preparazione di ghisa fusa con caratteristiche determinate. Ma ora interviene un altro fattore influente sulle caratteristiche della ghisa prodotta: l'attesa in forno prima della colata. Al variare del tempo di attesa in forno, varia una delle caratteristiche fondamentali della ghisa: il grado di nucleazione. Mentre la ghisa elaborata al cubilotto è impiegata poco dopo l'uscita dal cubilotto stesso ove il carbone di dote agisce da energico inoculante, la ghisa elaborata al forno ad arco in masse notevoli può subire delle attese anche prolungate in forno e, quindi, può

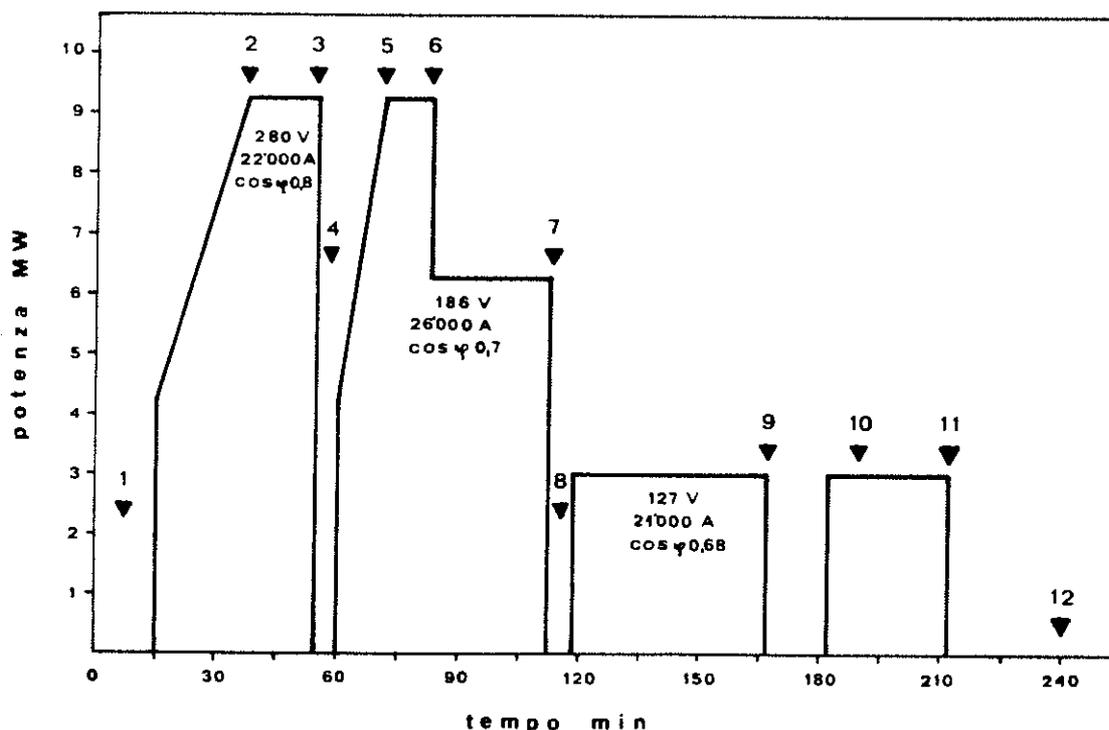


Fig. 132 - Diagramma operativo di una colata di ghisa grigia.

- 1 - Riparazione suola e caricamento additivi - regolazione elettrodi - apertura volta e introduzione 1<sup>a</sup> carica, 18 t
- 2 - Carica forata, 1.100 kWh
- 3 - 5.500 kWh - 305 kWh/t
- 4 - Introduzione 2<sup>a</sup> carica, 7 t
- 5 - Carica forata, 6.600 kWh
- 6 - 8.100 kWh - 325 kWh/t
- 7 - Carica fusa, temperatura 1.593 K (1.320 °C) - 11.000 kWh - 440 kWh/t
- 8 - Rimescolazione scoria
- 9 - Temperatura 1.723 K (1.450 °C) - prelievo provini per analisi - scorificazione completa - 13.500 kWh - 540 kWh/t
- 10 - Aggiunta correttivi
- 11 - Temperatura 1.803 K (1.530 °C) - prelievo provini per analisi - scorificazione completa - travaso in forno di attesa - 15.000 kWh - 595 kWh/t
- 12 - Fine operazioni - forno predisposto per la colata successiva

variare il grado di nucleazione della grafite. È noto che attese prolungate in forno provocano importanti variazioni strutturali che si rendono evidenti con l'esame dei provini di tempra: l'altezza della zona temprata tende ad aumentare ed il grano di frattura della parte grigia tende a serrarsi, pur non variando la composizione della ghisa: gradualmente, infatti, la concentrazione dei germi di formazione della grafite si riduce sensibilmente.

Per modificare la tendenza della ghisa a variare di struttura durante l'attesa in forno, si ricorre, perciò, alla tecnica dell'inoculazione in siviera, la quale, nella produzione di ghisa con il forno ad arco e ad induzione, assume importanza ben maggiore che non nella produzione di ghisa con il cubilotto.

È però indispensabile programmare il ciclo di fusione per ridurre al minimo l'attesa in forno prima della colata. Questo, oltre che per ragioni metallurgiche, anche per ragioni economiche (consumi di elettrodi, refrattari, ecc.).

### Forno ad arco per fusione di cariche solide

Il seguente esempio riporta la marcia al forno elettrico ad arco per ghisa grigia, in funzione della colata di getti destinati alla produzione automobilistica.

Il forno ad arco ha capacità nominale di 25 t. Il rivestimento è basico, con pareti in blocchi prefabbricati di dolomite catramata e la suola è pure in dolomite, allestita secondo il procedimento Crespi. La volta è in mattoni silicoalluminosi al 62% di allumina. Il forno è alimentato con un trasformatore da 10.000 kVA, con tensione massima al secondario di 280 V e corrente nominale di 20.000 A.

Le cariche sono effettuate in 2 dosi per ogni fornata: la prima di 17 ÷ 18 t, la seconda di 7 ÷ 8 t, per raggiungere complessivamente la carica di 25 t.

La ghisa, ottenuta con i requisiti di composizione e temperatura stabiliti, è travasata in 2 forni ad induzione di attesa, dai quali, al momento dell'impiego, è prelevata mediante le siviere destinate alla colata dei getti. Il forno è in marcia giorno e notte per 6 d/settimana. La produzione media nelle 24 h è di 5 colate su tre tipi di ghisa, come indicato. A seconda delle esigenze produttive, variabili ogni giorno, varia il numero di colate per ogni tipo di ghisa.

### Elementi del costo di esercizio

- Mano d'opera: per la condotta del forno (preparazione delle cariche, caricamento, scorificazioni, correzioni, regolazione delle colonne elettrodiche): 40 min/t.
- Mano d'opera per la manutenzione dei refrattari: 4 min/t.
- Energia elettrica: variabile in funzione del tonnellaggio prodotto, nonché delle attese passive o dei periodi a forno fermo e del tipo di ghisa prodotto. A titolo indicativo: 500 ÷ 800 kWh/t.
- Elettrodi: variabile come l'energia elettrica. A titolo indicativo: 4 ÷ 7 kg/t.
- Mattoni silicoalluminosi per le volte: 3 kg/t.
- Dolomite totale per suola, pareti e riparazioni: 10 kg/t.

### GHISA GRIGIA

Calcolo della carica (vedi tab. XXXI)

Ruolino di marcia del forno ad arco

- Ore 0 - Riparazione della suola con dolomite (circa 100 kg)  
Regolazione della lunghezza delle colonne elettrodiche  
Caricamento sulla suola del forno: 100 kg di calce viva + 150 kg di Fe-Si 45%
- Ore 0,10 - Apertura della volta ed introduzione della prima carica:  
Boccame di ghisa grigia 6.000 kg  
Lamierino in pacchi 6.000 kg  
Tornitura di ghisa sciolta 6.000 kg  
Polvere di coke 300 kg
- Ore 0,15 - Inizio dell'assorbimento di energia
- Ore 0,55 - Arresto dell'assorbimento di energia; apertura della volta; introduzione della seconda carica:  
Boccame di ghisa grigia 2.300 kg  
Lamierino in pacchi 2.300 kg  
Tornitura di ghisa sciolta 2.300 kg  
Polvere di coke 150 kg
- Ore 1 - Ripresa dell'assorbimento di energia
- Ore 1,50 - Carica completamente fusa: mescolazione della scoria mediante marre
- Ore 2,45 - Misura della temperatura = 1.723 K (1.450 °C); prelievo del provino per analisi; scorificazione completa e quindi colata

Tabella XXXI - Calcolo della carica per la fusione di ghisa grigia.

Descrizione	kg	%	C %		Si %		Mn %		Cr %	
Boccame di ghisa grigia . . . . .	8.300	33,3	3,30	1,10	1,90	0,63	0,60	0,20	0,20	0,07
Lamierino di acciaio in pacchi . . . . .	8.300	33,3	0,10	0,03	0,10	0,03	0,25	0,08	0,02	0,007
Tornitura di ghisa . . . . .	8.300	33,3	3,00	1,00	2,00	0,67	0,60	0,20	0,15	0,05
Totale . . . . .	24.900	99,9	—	2,13	—	1,33	—	0,48	—	0,127
Coke . . . . .	450	1,8	50,00	0,90	—	—	—	—	—	—
Fe-Si 45% . . . . .	150	0,6	—	—	45,00	0,27	—	—	—	—
Composizione colcolata . . . . .	—	—	—	3,03	—	1,60	—	0,48	—	0,127
Composizione finale . . . . .	—	—	—	3,20	—	1,80	—	0,60	—	0,20

- Ore 3 - Ripresa dell'assorbimento di energia
- Ore 3,05 - Ricevuta analisi: C = 2,90%; Si = 1,54%;  
Mn = 0,43%; Cr = 0,10%
- Aggiunta sul bagno: grafite  
(tornitura elettrodi)
- |           |        |
|-----------|--------|
|           | 120 kg |
| Fe-Si 45% | 140 kg |
| Fe-Mn 75% | 55 kg  |
| Fe-Cr 65% | 40 kg  |
- Ore 3,30 - Misura della temperatura = 1.803 K (1.530 °C); prelievo del provino per analisi; scoriificazione; travaso nei forni di attesa
- Ore 4 - Fine del travaso: il forno è pronto per iniziare la colata successiva
- Ricevuta l'analisi di colata pronta:  
C = 3,22%; Si = 1,75%; Mn = 0,65%;  
Cr = 0,18%.

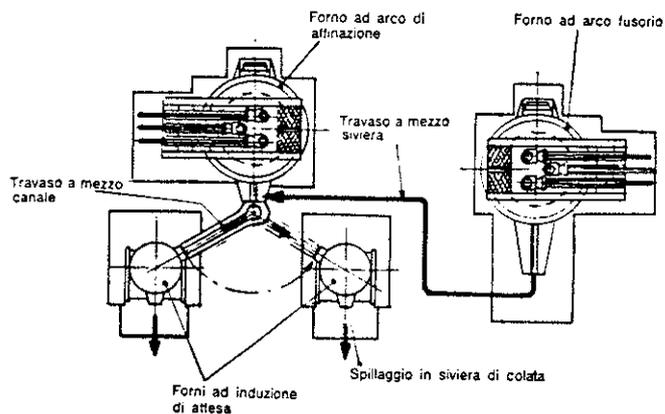


Fig. 133 - Disposizione di due forni ad arco e due forni ad induzione in marcia duplex.

#### Calcolo dei rendimenti

Energia complessiva assorbita: 15.000 kWh  
Peso della carica metallica: 25.285 kg  
Consumo di energia: 595 kWh/t

Carbonio assorbito dalla carica per carburazione: (3,22% - 0,53%)  
x 25.285 = 680 kg (3,22% è il tenore finale di C come Fe<sub>3</sub>C della ghisa pronta alla colata; 0,53% è il tenore di C come Fe<sub>3</sub>C della carica metallica, poiché la differenza a 2,13% si trova come carbonio grafítico).

Energia necessaria per l'assorbimento di 680 kg di carbonio = 680 x 0,46 = 310 kWh.

Energia per carburazione riferita a 1 t di caricato = 17,5 kWh/t

Energia teorica per fondere e surriscaldare 1 t di ghisa a 1.803 K (1.530 °C) = 340 kWh/t

Energia teorica complessiva = 352,5 kWh/t

Rendimento dell'operazione =  $\frac{352,5}{595} = 0,60$

#### Forno ad arco in duplex con forni ad induzione

Il forno ad arco, più che un forno di attesa e di affinazione, è soprattutto un forno fusorio per le sue alte qualità produttive, specialmente per forni UHP; pertanto, un accoppiamento assai diffuso nelle grandi produzioni è il duplex forno ad arco-forni ad induzione (fig. 133). Questi ultimi possono essere del tipo con canale o tipo senza canale, ma sempre con caratteristiche di forno di attesa; cioè: rapporto capacità/potenza piuttosto elevato.

Lo scopo del funzionamento in duplex è ben conosciuto e così pure i vantaggi tecnologici, metallurgici ed economici.

Mentre il duplex cubilotto-forno ad arco è raramente impiegato e solo per casi speciali, il duplex forno ad arco-forno ad induzione va sempre più sviluppandosi nelle grandi fonderie quando non si trova conveniente il duplex cubilotto-forno ad induzione che è il più diffuso in ogni ordine di fonderia di ghisa.

## FORNI FUSORI D'ALTRO TIPO

### GENERALITA'

Accanto ai forni fusori già descritti — cubilotto e forni elettrici (ad induzione e ad arco), di gran lunga i più diffusi — sono pure impiegati nella fonderia di ghisa altri tipi di forni molto adatti per piccole produzioni o per certe caratteristiche del metallo oppure per il loro basso costo d'impianto.

Di questi forni, quelli fissi a combustibile (a crogiolo, a riverbero) si possono considerare al momento attuale di scarsa importanza, mentre i tipi rotativi hanno tuttora interessanti applicazioni nelle fonderie di piccole e medie dimensioni. I recenti perfezionamenti apportati a quelli rotativi a fiamma ne hanno sviluppato l'impiego.

Il forno a crogiolo, con o senza preriscaldamento dell'aria (fig. 134), è un perfezionamento del vecchio forno fisso a crogiolo di grafite, ancora in uso in piccole fonderie.

Il crogiolo è inclinabile per facilitare il prelievo continuo del metallo liquido: l'aria di combustione solita-

mente è preriscaldata a 623 ÷ 673 K (350 ÷ 400 °C) dal calore sensibile dei fumi, consentendo un risparmio di coke del 30 ÷ 35%.

Si possono ottenere ghise di qualsiasi tipo, comuni od alto-legate, fino al peso massimo di 1.000 kg circa.

Il forno a riverbero od a suola (fig. 135) ha rappresentato un importante progresso in fonderia di ghisa per la produzione di getti pesanti in ghise non legate e medio-legate.

È costituito da un focolare e da un laboratorio con volta e suola, che contiene la carica riscaldata per convezione dalla fiamma che la lambisce e per irraggiamento dalla volta e dalle pareti.

Può essere alimentato con fossile grasso a lunga fiamma (sostanze volatili 30%) oppure a nafta o gas con o senza preriscaldamento dell'aria; è molto vantaggioso l'impiego di fossile magro polverizzato finissimo.

Il rivestimento refrattario è acido, siliceo e silico-alluminoso.

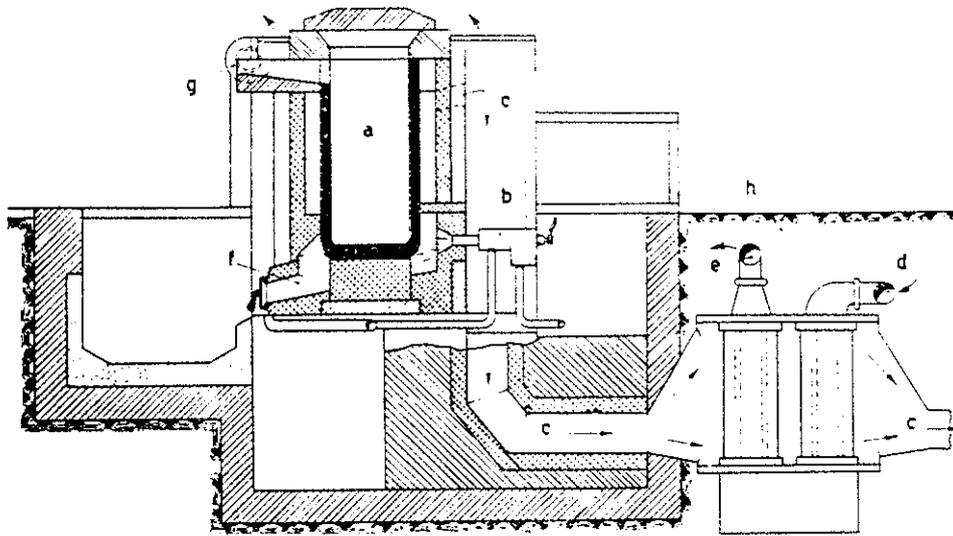


Fig. 134 - Forno a crogiolo inclinabile, a nafta, con preriscaldamento dell'aria: (a) è il crogiolo, (b) il bruciatore a nafta alimentato dalla condotta d'aria (d-e) che passa in una camera di preriscaldamento investita dai prodotti della combustione che percorrono il condotto (c); (f) è un canale per la pulizia, e (g) una coppia di perni intorno ai quali il forno, per esempio idraulicamente, può essere fatto ruotare, nel senso delle frecce in alto, per la colata.

Questi forni di grossa capacità, fino a 50 t, permettono un'ottima elaborazione di leghe anche di analisi complessa. Sono stati adottati, in esercizio duplex con carica liquida oppure con carica solida, nelle fonderie di metalli non ferrosi, nelle fonderie di ghisa malleabile, di ghise legate per cilindri di laminatoio.

Il rendimento senza preriscaldamento dell'aria è molto basso:  $350 \div 400$  kg di fossile per tonnellata di carica; si può migliorare tale rendimento, preriscaldando energeticamente l'aria di combustione.

Detti forni sono praticamente sostituiti o in via di sostituzione con forni elettrici ad induzione a canale od a crogiolo o con cubilotto in duplex con forno elettrico.

### FORNI ROTATIVI PER LA FUSIONE DELLA GHISA

Il forno rotativo è da considerarsi un mezzo pienamente valido, in quanto consente l'esecuzione di tutte le operazioni metallurgiche richieste, inoltre permette il ricupero, per conduzione, del calore immagazzinato nel rivestimento.

Per piccole produzioni di ghise alto-legate o speciali può essere tuttora raccomandabile il forno rotativo elettrico; per medie produzioni di ghisa comune o legata, steroideale o malleabile, il forno rotativo a combustibile, che ha maggiore capacità produttiva e può essere una valida alternativa al cubilotto.

### FORNI ROTATIVI ELETTRICI

I forni rotativi elettrici si dividono, secondo il sistema di riscaldamento, nei seguenti 2 tipi:

- Ad arco indiretto.
- A resistore di grafite.

Fatta eccezione per la particolarità del sistema elettrico di riscaldamento, i 2 tipi di forni elettrici rotativi hanno costruttivamente poca differenza tra loro.

La fig. 136 mostra un esempio di forno a resistore radiante (barra di grafite) della capacità di 500 kg.

Le capacità di tali forni sono normalmente comprese nella gamma da 100 a 1.500 kg e le potenze installate sono comprese tra 50 e 700 kVA, con tensioni molto basse da 20 a 80 V.

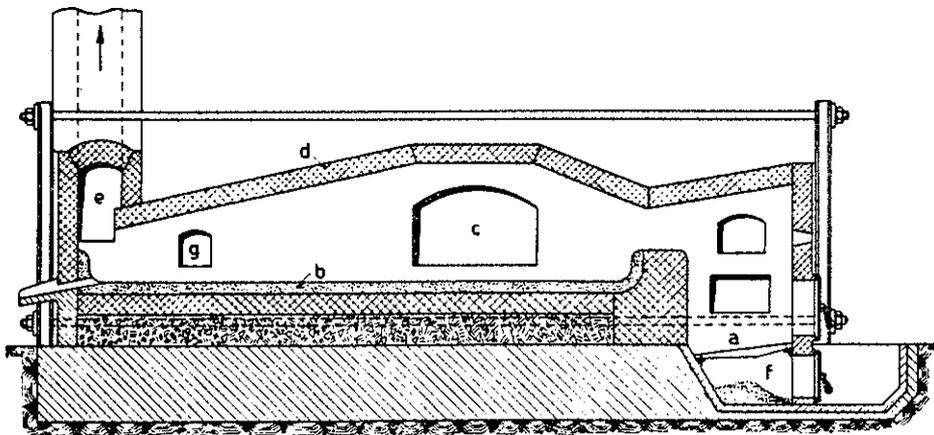


Fig. 135 - Forno a riverbero per ghisa: (a) è il focolare a griglia (fossile a lunga fiamma) o per la nafta, o per il gas; (b) è la suola o bacino in pigiata refrattaria; (c) è la porta di carica; (d) è la volta in refrattario (silice); (e) è il canale dei gas combusti al camino; (f) è il cenerario; (g) è la porta di lavoro: il muretto rialzato che separa il bacino dal focolare si chiama altare.

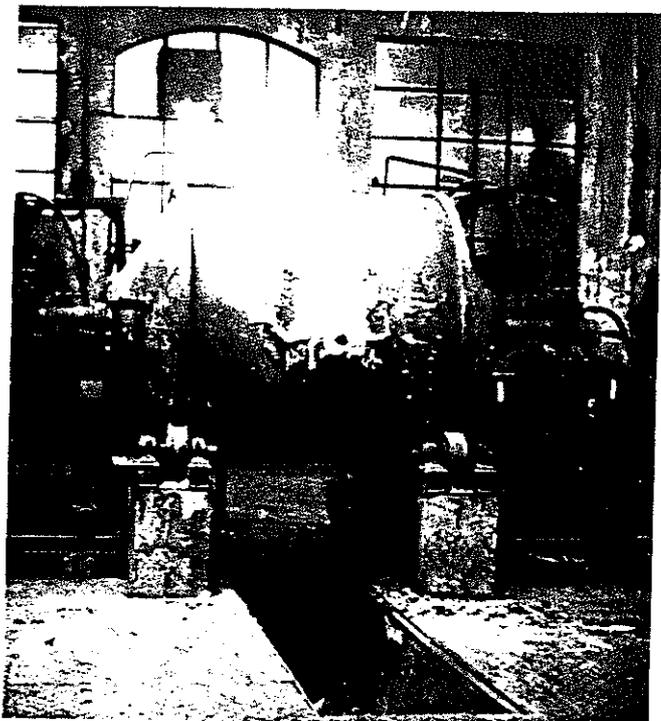


Fig. 136 - Forno ad elettrodo radiante della capacità di 500 kg.

### Caratteristiche costruttive

Entrambi i tipi di forni sono costituiti da un involucro esterno cilindrico, con due estremità a tronco di cono, rivestito di refrattario e provvisto di anelli di rotolamento e di ruote-supporto, che ne permettono l'oscillazione e la rotazione lungo un asse orizzontale. All'estremità dell'asse di rotazione sono praticati dei fori che lasciano penetrare nell'interno del forno gli elettrodi, nel caso del forno ad arco, od i porta resistore, raffreddati ad acqua, nel caso del forno a resistore radiante.

Nel tipo ad arco radiante il riscaldamento è effettuato per azione di irraggiamento di un arco elettrico che scocca tra i due elettrodi e che penetrano nel forno coassialmente all'asse di rotazione orizzontale, mentre nel tipo a resistore il riscaldamento avviene sempre per irraggiamento, da una barra di grafite del diametro variabile da 30 a 90 mm, a seconda della dimensione dei forni, disposta all'interno del forno lungo l'asse di rotazione dello stesso.

Per quanto riguarda le caratteristiche funzionali, entrambi i tipi di forni si prestano egualmente bene all'elaborazione di qualsiasi tipo di ghisa speciale particolarmente ad elevato punto di fusione.

Da un punto di vista pratico il forno a resistore è preferibile al forno ad arco indiretto, dato che il suo carico elettrico è costante ed il suo fattore di potenza è vicino all'unità, mentre il forno ad arco, oltre ad avere un fattore di potenza piuttosto basso, provoca un notevole disturbo sulla rete di distribuzione dell'energia elettrica.

### Consumi

Nella produzione di ghise speciali o legate il consumo normale a regime va da 700 kWh/t per i forni più pic-

Tabella XXXI/1 - Tempi di colata e consumi di energia per un forno ad elettrodo radiante da 100 kg di carica impiegato per la fabbricazione di ghise legate.

No. progressivo di colata	Durata della colata in h	Consumi di energia in kWh/t
1	1.80	1.400
2	1.25	1.000
3	1.10	800
4	0.80	750
5	0.75	700

coli a 550 kWh/t per i forni più grandi: a forno freddo e nelle prime colate i consumi risultano evidentemente maggiori (tab. XXXI/1).

Per la fabbricazione di ghise speciali è impiegato normalmente un rivestimento refrattario in pigiata acida od in sillimanite, con il quale si possono raggiungere, ed in qualche caso anche superare, le 200 colate.

Il consumo complessivo di elettrodi e porta elettrodi di grafite è poco diverso tra i due tipi di forno e varia da 2,5 a 4 kg/t di metallo fuso.

Nell'elaborazione di ghise speciali, e ciò particolarmente al forno a resistore, la fusione può essere effettuata senza l'aggiunta di elementi scorificanti, poiché il forno per sua natura si presta a mantenere nell'interno un'atmosfera neutra, dovuta alla lenta combustione a CO della barra di grafite.

Si hanno, pertanto, dei valori di calo di fusione molto limitati, che normalmente si aggirano intorno a 0,5 ÷ 1%.

Il principale inconveniente di questi forni è costituito dal fatto che, essendo alimentati in monofase, vengono a squilibrare la linea di distribuzione dell'energia elettrica cui sono allacciati. Per limitare tale inconveniente, è consigliabile l'installazione di due unità con trasformatore primario collegato a Scott.

Un ulteriore inconveniente deriva dalla fragilità degli elettrodi, per cui è necessaria una buona attenzione dell'operatore durante il caricamento dei materiali metallici e durante la fusione, al fine di evitare la rottura degli elettrodi stessi.

### FORNI ROTATIVI A FIAMMA

Sono caratterizzati da capacità di carica solida molto più estese, da un minimo di 0,5 ad un massimo di oltre 10 t e, come forni d'attesa e surriscaldamento per esercizio in duplex, fino a 100 t di ghisa liquida.

Questi forni, sino ad oggi poco diffusi in Italia, mentre hanno avuto e stanno avendo crescente applicazione nelle piccole e medie fonderie di altri Paesi industrializzati (Inghilterra, Germania, Francia e Svizzera), stanno ora suscitando un attivo interesse anche da parte delle fonderie di ghisa italiane.

Si sa che una importante industria metalmeccanica olandese nella sua nuova e moderna fonderia, che produce getti di ghisa lamellare e sferoidale del peso massimo rispettivamente di 24 e 16 t, ha installato un centro fusorio costituito da 4 forni rotativi a fiamma, ciascuno della capacità di 8 t, del tipo a basculazione.

Le possibilità di scorificazione, correzione e riscaldamento del bagno consentono di elaborare qualsiasi tipo di ghisa.

La resa termica di questi forni viene notevolmente migliorata variando opportunamente l'ampiezza e la velocità di rotazione durante il periodo di fusione e di surriscaldamento.

### Caratteristiche funzionali e costruttive

I forni rotativi a fiamma impiegati per la fusione della ghisa si distinguono in vari tipi, in base alle loro caratteristiche funzionali e costruttive.

In base alle caratteristiche funzionali, si hanno i seguenti tipi:

- A carbone polverizzato.
- A nafta (olio combustibile).
- A gas.
- Misti (a gas + olio combustibile).

In base alle caratteristiche costruttive, si distinguono in:

- Forno senza recuperatore.
- Forno con recuperatore.
- Forno a rotazione semplice.
- Forno a rotazione + basculazione.

Nella fig. 136/1 è illustrato schematicamente un forno da 5 t nel quale il calore, contenuto nei gas di scarico, è impiegato per il preriscaldamento dell'aria di combustione.

Tutti questi tipi di forni rotativi hanno la parte principale costituita da un involucro cilindrico di lamiera,

con estremità tronco-coniche, provvisto di anelli di rotolamento e di ruote che ne permettono la rotazione lungo l'asse orizzontale.

Il rivestimento è generalmente acido in pigiata silico-alluminosa.

Questi forni, una volta portato il materiale di carica a circa 1.173 K (900 °C), sono fatti prima oscillare e poi ruotare intorno all'asse orizzontale per migliorare gli scambi termici tra il metallo ed il rivestimento refrattario, la sollecitazione termica del quale risulta di conseguenza ridotta, e per assicurare, con il rimescolamento del bagno, che progressivamente si forma, la sua omogeneizzazione.

I forni moderni, impiegati per la fusione della ghisa, almeno quelli di capacità superiori a 0,5 t. sono ormai nella generalità corredati di recuperatore del calore sensibile dei gas combusti. Questi gas, che escono dalla bocca di scarico del forno, prima di essere immessi nell'atmosfera, lambiscono il fascio tubiero dello scambiatore di calore entro il quale passa, in corrente inversa, l'aria di combustione alla quale essi cedono anche il 50% del loro calore, riscaldandola sino a 673 K (400 °C).

Questo apparecchio favorisce anzitutto l'optimum delle condizioni di combustione e, conseguentemente, la riduzione del consumo di combustibile; migliora sensibilmente il rendimento termico globale del forno che raggiunge così il 25% circa; consente, infine, di abbreviare i tempi di fusione e di riscaldamento normale (1.723 K = 1.450 °C) e quelli di surriscaldamento sino a 1.823 K (1.550 °C), temperatura massima generalmente raggiungibile

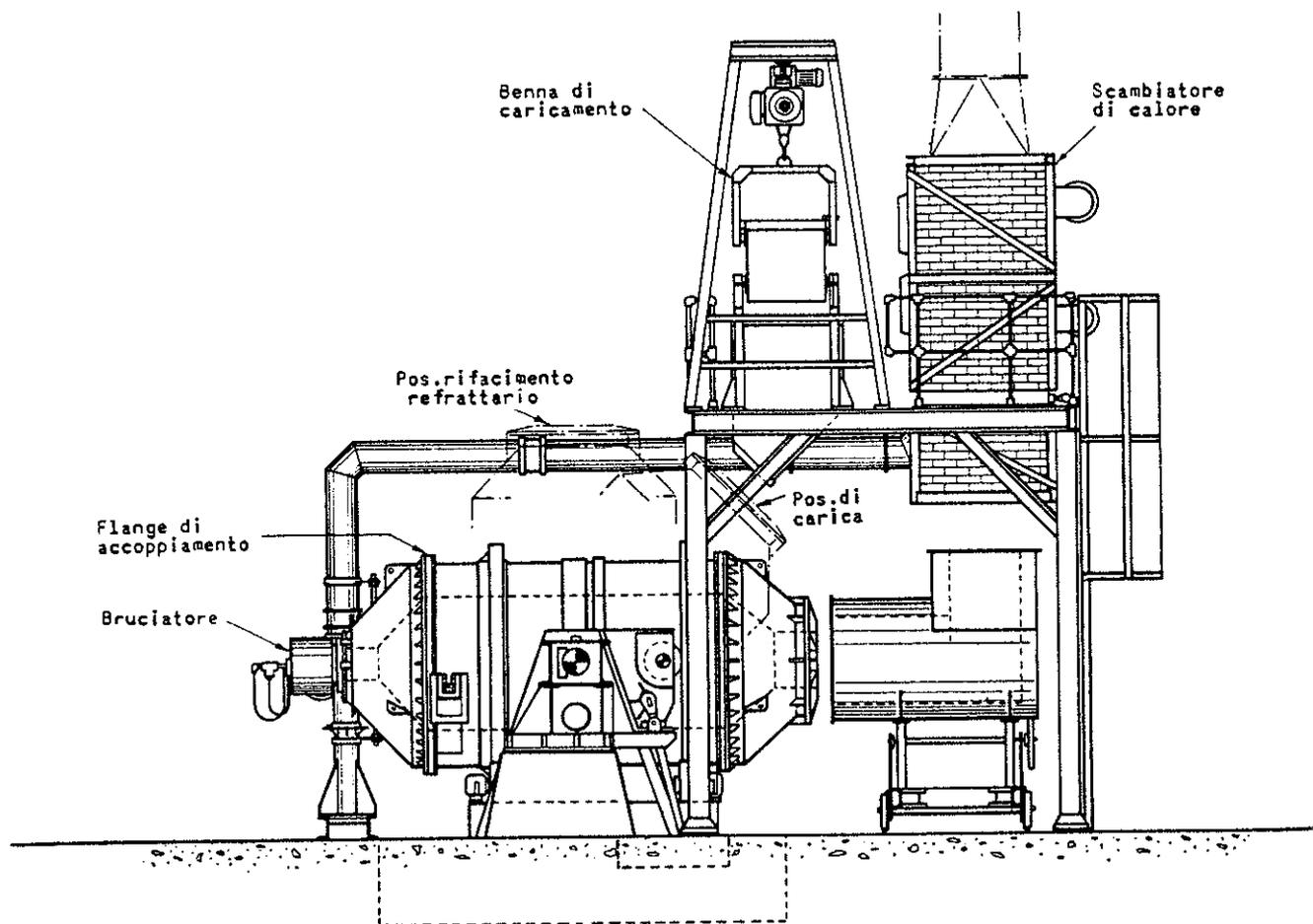


Fig. 136/1 - Rappresentazione schematica di un forno rotativo da 5 t.

senza compromettere la durata del rivestimento refrattario.

Tutti i dati, che saranno indicati in questo capitolo, si riferiscono ai forni con recuperatore.

Ciascuna delle due estremità del forno presenta una apertura circolare; una serve per l'introduzione e l'alloggiamento del bruciatore, il quale è amovibile; l'altra serve da bocca di caricamento, oltre che di uscita dei gas combusti. Per questa seconda funzione, il collegamento fra bocca e recuperatore-camino è ottenuto, in tutti i tipi di forno, per mezzo di un gomito a 90° rivestito di refrattario; questo raccordo è montato su un carrello scorrevole su binario per rendere accessibile la bocca del forno per l'operazione di caricamento.

Nei tipi a rotazione semplice il caricamento è fatto generalmente mediante una pala di lamiera, semicilindrica e di adeguata lunghezza, montata su un carrello, che introduce il materiale nel forno e, ribaltandosi, ve lo scarica.

I tipi a rotazione + basculazione sono appunto anche basculanti intorno all'asse mediano-orizzontale, ortogonale a quello di rotazione; in tal modo essi possono essere gradatamente portati con l'asse di rotazione disposto verticalmente.

Il caricamento avviene con l'asse di rotazione disposto a 45°; la scorificazione, operata eventualmente attraverso la bocca lato bruciatore e dopo aver prelevato tutto il metallo liquido, viene ottenuta portando in posizione verticale tale asse; in questa posizione viene eseguito anche il rifacimento del rivestimento refrattario.

In questo tipo di forni, dopo la rimozione del bruciatore, si sistema al suo posto un apposito tampone metallico; il caricamento avviene conseguentemente con il forno disposto con l'asse di rotazione a 45° sull'orizzontale e con la bocca di caricamento in alto. Il materiale è introdotto mediante skip, od altro sistema di elevatore a benna, con l'ausilio di una apposita tramoggia a scivolo (fig. 136/2).

Il materiale costituente la carica totale, corrispondente in genere alla capacità massima del forno, è introdotto di norma in 3 ÷ 5 volte successive.

Per il loro svuotamento, i forni rotativi a fiamma sono generalmente muniti di due canali. In quelli a rotazione semplice, i due canali sono situati diametralmente opposti, sull'involucro cilindrico, o nella zona mediana o verso l'estremità del lato bruciatore. Nei forni a rotazione + basculazione i due canali sono invece disposti, tangenzialmente ed a 180° fra loro, sul fondo troncoconico dal lato bruciatore.

Nella prima disposizione, uno dei due canali serve per la spillatura del metallo liquido e quello opposto per lo scarico della scoria; questa operazione si compie dopo avere prelevato dal forno tutta la ghisa fusa. Nella seconda disposizione, invece, entrambi i canali sono generalmente usati per la spillatura (uno resta però, di emergenza); infatti nei forni a rotazione + basculazione la scorificazione è eseguita, di norma, attraverso la bocca del lato bruciatore; se è fatta prima della spillatura del metallo, si opera manualmente con un normale scrematore dopo avere inclinato leggermente in avanti il forno per facilitare l'operazione; se, invece, è eseguita dopo avere prelevato tutto il metallo fuso da uno dei due appositi canali, la si ottiene, senza alcun intervento diretto di personale, facendo ruotare gradatamente il forno intorno all'asse di basculazione fino alla posizione verticale, con la bocca lato bruciatore in basso.

Per i forni rotativi a fiamma è più proprio parlare di *tempi operativi e per ciclo* che non di *produzione oraria*, in quanto, di norma, il loro svuotamento avviene, in modo totale, dopo che la carica metallica, generalmente corrispondente alla loro massima capacità, ha raggiunto la temperatura ritenuta necessaria per la colata ed ha la composizione chimica desiderata.

Le fasi, che determinano il *tempo operativo* di ciascun ciclo, sono le seguenti:

— Prima fase = Preriscaldamento: l'interruzione di attività del forno può essere di durata tale da procurare una caduta di temperatura del refrattario. Se questa temperatura scende al di sotto di 1.073 K (800 °C), è necessario riportarla almeno a tale livello, mediante l'operazione di preriscaldamento, prima di introdurre una nuova carica di materiale.

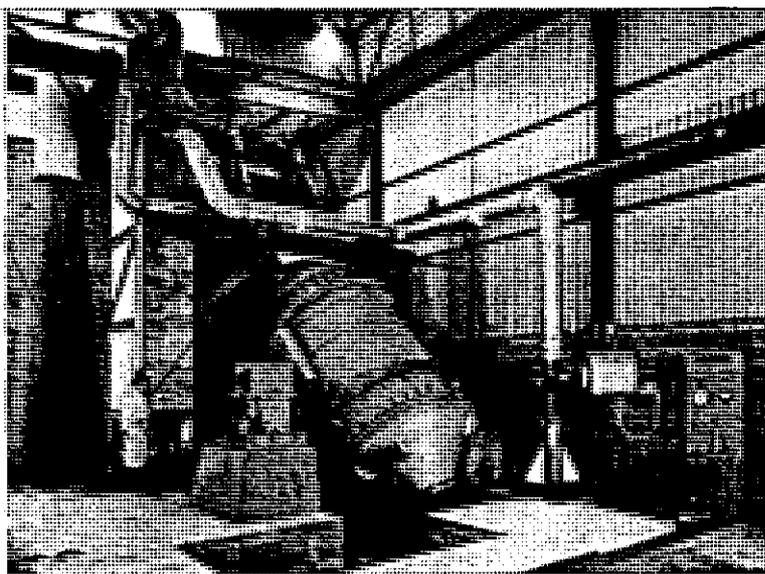


Fig. 136/2 - Forno a fiamma da 5 t a rotazione + basculazione, dotato di recuperatore di calore, in fase di caricamento.

I tempi necessari per l'operazione di preriscaldamento sono indicativamente i seguenti:

— dopo una inattività di 24 h: 30 ÷ 60 min;

— dopo una inattività di 12 ÷ 14 h: 15 ÷ 45 min.

Questi valori sono in rapporto diretto con la capacità del forno.

— Seconda fase = Caricamento totale: si è accennato precedentemente che la carica totale è frazionata in 3 ÷ 5 parti che si introducono successivamente nel forno.

Se si dispone di mezzi meccanici di caricamento del materiale, precedentemente pesato e preparato in altrettanti cassoni o pale, l'operazione richiede 5 ÷ 15 min, sempre in funzione della capacità del forno.

— Terza fase = Fusione, riscaldamento a 1.723 K (1.450 °C) e messa a punto della composizione chimica (ricarburazione, aggiunte varie): nella tab. XXXI/2 sono riportati i tempi di fusione e di riscaldamento a 1.723 K (1.450 °C), partendo da forno a regime (cioè dopo la prima fusione), corrispondenti ad alcuni forni di capacità normalizzate.

La rotazione del forno è parziale all'inizio (oscillazione) e diventa completa a fusione iniziata (da 0,5 a 1 giro/min).

— Quarta fase = Surriscaldamento oltre 1.723 K (1.450 °C) (eventuale): l'operazione di surriscaldamento del metallo fuso al di sopra della temperatura considerata normale, richiede 1 min per ogni 276 ÷ 278 K (3 ÷ 5 °C); in pratica, un surriscaldamento di 50 gradi richiede 10 ÷ 15 min, in funzione diretta della capacità del forno e di una appropriata velocità di rotazione.

— Quinta fase = Scorificazione (prima o dopo la spillatura) da 5 a 7 min.

— Sesta fase = Spillatura con svuotamento totale: è evidente che quanto più rapidamente si compie questa operazione, tanto migliore risulta, sotto ogni aspetto, l'utilizzazione del forno: consumo di combustibile, alterazione della composizione chimica del bagno, consumo di refrattario riferito alle tonnellate prodotte, numero di fusioni eseguibili nella giornata di lavoro.

D'altra parte, non si possono ignorare i problemi, altrettanto evidenti, connessi con la possibilità di assorbimento del metallo fuso da parte delle linee o dei posti di colata.

Per questi motivi, nel caso di tempi di svuotamento relativamente lunghi, può determinarsi, in molti casi, la convenienza di disporre anche di un forno di attesa, o di attesa e surriscaldamento, nel quale travasare, dal forno fusorio di pari capacità, la ghisa pronta per la spillatura e mediante il quale distribuire poi il metallo alle linee od ai posti di colata, con i ritmi adeguati e nel tempo necessario.

L'operazione di travaso del metallo dal forno fusorio in quello di attesa può essere fatta sia direttamente mediante un canale che collega i due apparecchi, oppure con siviera in una o più volte a seconda della capacità della stessa; in questo caso si verificherà, però, una diminuzione di temperatura della ghisa che può raggiungere anche i 50 °C.

Con questi forni il prelievo parziale del metallo liquido, seguito dal caricamento della quantità di materiale corrispondente a quella spillata, è fatto occasionalmente; è ovvio che, per operare in tal modo, è necessaria la pala

Tabella XXXI/2 - Principali dati indicativi concernenti alcuni forni fusori rotativi a fiamma.

Capacità t	Tempo di fusione a 1.723 K (1.450 °C)	Consumo di combustibile			
		Olio denso		Gas naturale	
		Totale l	l/t	Totale m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /t
1	1 h 45 min	200	200	225	225
2	2 h 15 min	360	180	420	210
5	3 h 15 min	710	142	720	145
10	5 h	1.350	135	1.500	150

di caricamento per forno orizzontale anche per i forni con basculazione.

### Combustibile

Per quanto riguarda i combustibili impiegati, il più comune è l'olio pesante da forni opportunamente preriscaldato prima di raggiungere il bruciatore. Esso deve avere, di norma, viscosità 3 ÷ 5 gradi Engler a 323 K (50 °C), zolfo in peso 3%, potere calorifico superiore pari a  $43.524 \cdot 10^3$  J (10.400 kcal). L'impiego di gas di cokeria per la fusione della ghisa presenta notevoli difficoltà, data la bassa emissività delle fiamme ed il ridotto contenuto di idrocarburi e la considerevole quantità di idrogeno abbinata ai prodotti di combustione.

L'impiego di gas naturale della serie  $C_nH_{(2n-2)}$ , contenente oltre il 90% di  $CH_4$ , e con potere calorifico inferiore pari almeno a  $34.317 \cdot 10^3$  J (8.200 kcal), dà invece gli stessi risultati dell'olio combustibile del quale ha essenzialmente simili i prodotti di combustione. La soluzione risiede soprattutto nella concezione del bruciatore, il quale deve rispondere a particolari requisiti.

Si ha notizia di un forno rotativo basculante alimentato a gas naturale (della capacità di 50 t) installato in Inghilterra ed impiegato per la fusione continua di spugne di ferro; questo forno ha una produzione di 8 t/h. Il caricamento del materiale avviene attraverso lo stesso bruciatore mediante propulsione pneumatica continua.

Nel caso di impiego di combustibili gassosi, si può anche ricorrere all'adozione di bruciatori misti, in cui l'80% delle calorie è apportato dal gas ed un 20% circa dall'olio combustibile, in modo da migliorare il potere emissivo della fiamma e quindi gli scambi termici per irraggiamento tra la fiamma da una parte ed il rivestimento del forno e la carica metallica dall'altra.

Il sistema di riscaldamento a carbone polverizzato, ormai abbandonato a causa dei problemi di inquinamento ambientale che procura, prevede comunque l'impiego di carboni magri finemente polverizzati in modo da assicurare un passaggio del 90 ÷ 95% attraverso un setaccio da 10.000 maglie/cm<sup>2</sup>.

Il carbone polverizzato, oltre alla suddetta finezza, deve presentare le seguenti caratteristiche:

— Non superare il 10% di ceneri.

— Non superare il 2% di zolfo.

— Avere un contenuto di materie volatili dall'8 al 10%.

— Essere completamente asciutto.

L'avviamento dei forni a carbone polverizzato non può però, essere effettuato con il tipo di carbone suddetto, ma occorre impiegare un fossile grasso polverizzato con il 30 ÷ 35% di materie volatili.

Tutti i forni rotativi a combustione hanno i bruciatori conformati in modo tale da assicurare una intima ed omogenea ripartizione del combustibile nell'aria di combustione e da mantenere la fiamma stessa la più corta e concentrata possibile.

Si cura, inoltre, in modo particolare che la fiamma segua nell'interno del forno una traiettoria elicoidale lungo le sue pareti interne, al fine di migliorare sensibilmente le possibilità di scambi termici.

Con il ricupero parziale del calore sensibile dei fumi si giunge solitamente a preriscaldare l'aria di combustione a 573 ÷ 673 K (300 ÷ 400 °C): in tal modo la temperatura del rivestimento refrattario del forno può giungere fino a 2.073 K (1.800 °C) avvicinandosi quindi alla sua temperatura di fusione, mentre il metallo può essere riscaldato fino ad un massimo di 1.823 K (1.550 °C).

### Rivestimento refrattario

Il rivestimento refrattario dei forni rotativi è generalmente eseguito in pigiata acida con spessori fino a 300 mm, disponendo eventualmente tra la pigiata ed il fasciame del forno uno strato di mattoni refrattari isolanti.

Per la fusione della ghisa è correntemente impiegato, per il rivestimento refrattario, del caolino magro in pi-

giata leggermente umida, accuratamente costipato con pestelli pneumatici sulla carcassa di lamiera.

Il rivestimento refrattario è la parte più delicata del forno e la sua accurata essiccazione e sinterizzazione hanno una grande importanza ai fini della durata. La pigiata va sottoposta ad una prima lenta essiccazione con un piccolo bruciatore a gas o con fuoco di legna, fino a che è completamente eliminata l'umidità, in essa contenuta, attraverso i fori praticati nel fasciame. Soltanto a questo punto è possibile riscaldare l'interno del forno a temperatura elevata.

Il primo riscaldamento è spinto fino oltre 1.873 K (1.600 °C), in modo da fare sinterizzare e vetrificare in superficie la pigiata. Soltanto dopo questa operazione è possibile introdurre, a forno caldo, la carica metallica senza pericoli di danneggiamento della pigiata (fig. 136/3).

### Consumi

La durata normale di un rivestimento refrattario va da 200 colate, in caso di impiego saltuario del forno, fino a 600 o più colate con impiego continuato e con riparazioni parziali durante la campagna.

I tipi di forni più diffusi e maggiormente consigliabili sono quelli ad olio combustibile, od a gas naturale, con recuperatore di calore per il preriscaldamento dell'aria a circa 673 K (400 °C). Per questi tipi di forni i consumi di tali combustibili per la produzione di ghisa a 1.723 K (1.450 °C) considerati con forno a regime sono riportati nella tab. XXXI/2.

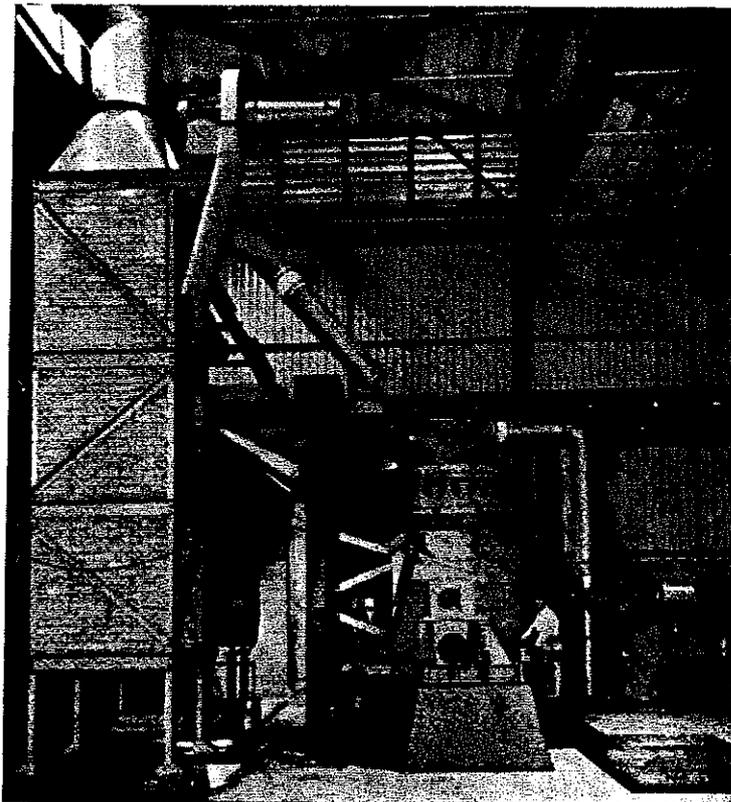


Fig. 136/3 - Forno a fiamma da 5 t a rotazione + basculazione, dotato di recuperatore di calore, disposto in posizione verticale per l'operazione di rifacimento del rivestimento refrattario.

Partendo, invece, a forno freddo, i consumi sono comunque sensibilmente maggiori, in conseguenza del necessario preriscaldamento.

Ulteriori maggiori consumi possono essere richiesti nel caso di elaborazione di ghise altamente legate e, comunque, nel caso di tempi lunghi per lo svuotamento e/o per il surriscaldamento del metallo fuso nel forno.

Per il noto forno tedesco Brackelsberg a polvere di carbone, sono denunciati consumi dell'ordine del 15% per ghisa malleabile e del 12% per ghisa grigia.

### Condotta del forno

Come si è accennato precedentemente, nei forni rotativi la carica è effettuata di norma in 3 ÷ 5 volte; insieme al materiale ferroso si carica circa il 2 ÷ 5% di calcare con funzione di scorificante.

In alcuni casi, come fluidificante della scoria può essere aggiunto fluoruro di calcio in percentuale variabile da 0,1% a 0,2% oppure del carbonato di sodio sempre in piccola percentuale.

La composizione della carica può essere uguale a quella del cubilotto con l'impiego di torniture anche non bricchettate e con tutte le aggiunte e correzioni possibili nella carica solida o liquida, tenendo presente la tendenza del forno a decarburare se in atmosfera ossidante (per tanto, si ha una certa limitazione nell'impiego di rottami di acciaio); zolfo e fosforo rimangono, invece, pressoché inalterati.

L'atmosfera interna del forno può essere facilmente regolata in modo da risultare riducente, neutra od ossidante.

Però, per eseguire il più rapidamente possibile la fusione del metallo ed il suo riscaldamento alla temperatura di spillatura di 1.723 K (1.450 °C), è necessario che questa atmosfera sia leggermente ossidante (massima quantità di calore di combustione, massima emissività irraggiante del calore).

Il metallo liquido è coperto da un leggero strato di scoria che lo protegge dall'immediato contatto con l'atmosfera del forno. In pratica si può eseguire un controllo delle condizioni dell'atmosfera interna del forno, sia osservando il colore dei fumi all'uscita del camino che possono essere bianchi se ossidanti o neri se riducenti, sia osservando i gas caldi al loro passaggio nell'intervallo tra il forno e la testa mobile di convogliamento dei gas al recuperatore.

In questo caso l'atmosfera è neutra quando attraverso i gas si scorgono abbastanza distintamente i giunti dei mattoni od i particolari superficiali della pigiata attraverso il velo dei gas caldi.

L'atmosfera è, invece, riducente se i gas risultano opachi e la visione attraverso di essi è alquanto difficile.

In condizioni ossidanti i gas sono completamente trasparenti. Una ulteriore prova delle condizioni ossidanti dei gas si ha introducendo nella fessura tra forno e gomito di adduzione al recuperatore un tondino d'acciaio; se le condizioni sono ossidanti, l'estremità calda del tondino si ossida, proiettando delle scintille bianche.

Il calo totale di fusione si mantiene nei valori di 2 ÷ 3% sul peso caricato. I tenori di carbonio, di fosforo e di zolfo si mantengono inalterati rispetto al materiale di carica e ciò vale in particolare per il carbonio,

se l'atmosfera è neutra. Nel caso più generale di atmosfera leggermente ossidante, si verifica per il carbonio un calo del 10 ÷ 12%. La ricarburazione è perciò quasi sempre necessaria, specialmente quando la carica contiene anche rottami di acciaio; essa può essere fatta mediante grafite o coke di petrolio granulati, introdotti nel forno, di norma, quando il materiale ha raggiunto lo stato pastoso; in questo caso la resa difficilmente supera il 30%. Si può invece eseguire l'operazione, iniettando grafite in polvere nel bagno liquido mediante l'apposito apparecchio ad aria compressa; in questo caso la resa è del 50 ÷ 60%. Comunque il costo della ricarburazione, calcolato in base al prezzo attuale di tali ricarburanti, va da 1 a 5 Lit/0,1% C riportato nella composizione della ghisa.

La perdita del silicio e del manganese è intorno al 10% e quella del cromo del 2% per i bassi tenori, fino ad un massimo del 10% per le ghise al 30% di cromo.

Il calo del nichel è praticamente nullo, mentre quello del molibdeno è compreso tra il 10 ed il 15%.

Le ferroleghie vengono aggiunte, con ottima resa, preferibilmente nel metallo liquido anche prima della scoriificazione ed in qualsiasi pezzatura.

In definitiva questo tipo di forno, pur avendo costi di impianto, di esercizio e di manutenzione relativamente bassi, offre questi vantaggi:

- Grande flessibilità anche per i materiali di carica e versatilità operativa anche per la soluzione di particolari problemi organizzativi.
- Semplicità di conduzione, ridotto fabbisogno di mano d'opera, possibilità di surriscaldamento e di messa a punto relativamente facile della composizione chimica della ghisa fusa prima della sua colata nelle forme, e perciò possibilità di elaborare anche ghise speciali: sferoidali, malleabili e tutta la gamma delle ghise basso od alto-legate.
- Quantità di polveri emesse al camino notevolmente inferiore rispetto ai cubilotti di corrispondente produzione oraria; quindi riduzione od eliminazione dei problemi ecologici.
- Ridotto costo di impianto nei confronti dei forni elettrici di uguale capacità, sia come forno fusorio che di attesa o di attesa e surriscaldamento.
- Metallo a temperatura elevata.
- Possibilità di mantenere il metallo liquido anche durante i periodi di interruzione della colata.
- Eliminazione della manutenzione giornaliera del rivestimento.
- Impiego di olio combustibile, senza eccezionali doti di qualità, e di gas naturale; facilità di preriscaldamento dell'aria.

Il forno rotativo a fiamma è, quindi, particolarmente adatto alle piccole e medie fonderie che vogliono o sostituire od integrare il tradizionale cubilotto con un mezzo più elastico, meno costoso, con risultati metallurgici qualitativamente superiori.

## SCELTA DEL FORNO FUSORIO

### INTRODUZIONE

La fonderia di qualsiasi metallo o lega richiede uno strumento idoneo per portare allo stato fuso una carica metallica e per conferire al liquido così ottenuto un certo grado di surriscaldamento. Il metallo potrà essere elaborato ed infine travasato direttamente o mediante appositi recipienti nelle forme predisposte per la produzione dei getti.

In ogni tipo di fonderia, ferrosa e non ferrosa, la fusione costituisce una fase importantissima sia dal punto di vista tecnologico, come elemento decisivo agli effetti della buona riuscita del getto, sia dal punto di vista economico, come fattore determinante del suo costo finale.

Nella moderna fonderia di ghisa i mezzi fusori sono assai diversi a seconda della dimensione e della qualità della produzione richiesta ed hanno subito una sensibile evoluzione soprattutto in questo dopoguerra.

Nelle tabb. XXXII e XXXIII sono indicati i principali forni fusori, compresi quelli impiegati nelle piccole fonderie e per produzioni particolari.

Nelle fonderie di ghisa, a seconda delle quantità e tipi di ghisa prodotta, i forni fusori più frequentemente adottati sono: il cubilotto a vento freddo o caldo ed il forno elettrico ad induzione singolo od in duplex; per casi particolari il forno ad arco; nelle piccole fonderie il piccolo cubilotto a vento freddo ed il forno rotativo a fiamma, oppure per modeste produzioni di ghisa speciale alto-legata il forno rotativo a resistenza a barra di grafite. Infine per certi getti (lingottiere e tubi) è utilizzata, ove possibile, la ghisa ottenuta direttamente dall'altoforno.

### PREMESSA

Prima di iniziare il vero confronto fra i principali mezzi di fusione, occorre fare alcune considerazioni.

Allo stato attuale dell'arte non è possibile paragonare il cubilotto con il forno elettrico. Il cubilotto deve essere abbinato ad un forno di attesa (per esempio, scaldato ad induzione) se si vuole migliorare la costanza della qualità dei getti. L'industria meccanica esige getti

con lavorabilità sempre maggiore e, pertanto, occorre lavorare in una fascia molto ristretta di durezza. Per ottenere ciò, occorre ghisa con composizione chimica e tendenza alla tempra molto costante, il che si ottiene dal cubilotto se la sua marcia è costante.

Con questo non si vuole affermare che per getti meccanici di media resistenza non si possa, nelle piccole-medie fonderie, ottenere dal cubilotto a vento freddo, con o senza impiego di ossigeno, dei getti tecnicamente ed economicamente validi; però la tendenza al trattamento duplex della ghisa liquida si sta sempre più confermando anche nei medi impianti.

Nella fonderia di ghisa si vanno sempre più affermando le linee meccanizzate di formatura e di colata. L'impossibilità di sincronizzare forni e linee genera sempre perdite di efficienza. Per ridurre tali perdite, occorre introdurre un polmone di ghisa fra i forni fusori, sia si tratti del cubilotto che dei forni elettrici e le linee. Con l'adozione di questo polmone, raggiungono la loro piena efficienza sia i forni che le linee di colata.

Pertanto, si confronteranno essenzialmente i sistemi duplex, pur mettendo in evidenza i costi derivati dal forno di attesa.

Sono stati presi in esame i seguenti sistemi fusori:

- Cubilotti a vento freddo con forni di attesa con canali.
- Cubilotti a vento caldo tradizionali con forni di attesa con canali.
- Cubilotti a marcia continua con forno di attesa con canali.
- Forni ad induzione a crogiolo a marcia diurna con forni di attesa con canali.
- Forni ad induzione a crogiolo a marcia notturna senza forni di attesa.
- Forni ad arco con due forni di attesa con canali.

Si è assunto come standard un potenziale fusorio di 10 t/h, cioè capace di erogare 160 t su due turni di produzione della fonderia. Si è stimata una perdita di produ-

Tabella XXXIII - Forni elettrici.

Descrizione	Impiego in fonderia di ghisa	Osservazioni
Forno rotativo a resistore non metallico (barra di grafite)	Fino a 1.500 ÷ 2.000 kg	Per ghise speciali alto-legate
Forno ad induzione a B.F. con canale	Prevalentemente come forno di attesa; da 1 fino a 100 t	Accoppiato in duplex al cubilotto od altri forni fusori
Forno ad induzione a B.F. a crogiolo	Prevalentemente come forno fusorio; da 1 fino a 60 t per tutti i tipi di ghisa	Può essere impiegato anche come forno di attesa
Forno ad induzione a M.F. a crogiolo	Come forno fusorio per ghise e leghe speciali	Per piccole produzioni particolari
Forno trifase ad arco	Forno fusorio da 5 ÷ 10 fino a 25 t ed oltre: per tutti i tipi di ghisa	Utilizzo di rottame d'acciaio leggero, torniture anche ossidate

Tabella XXXII - Forni a combustibile (solido, liquido, gassoso).

Descrizione	Impiego in fonderia di ghisa	Osservazioni
Forno a crogiolo di grafite o metallico	Capacità fino a 500 ÷ 1.000 kg; per tutti i tipi di ghisa	Solo per modeste applicazioni
Forno a riverbero	Fino a 50 t per la produzione di cilindri di laminatoio e di ghisa malleabile	Attualmente in via di sostituzione con il cubilotto in duplex o forno elettrico
Forno rotativo a tamburo	Da pochi quintali fino a 10 ÷ 20 t per tutti i tipi di ghisa	Per piccole e medie fonderie
Cubilotto a vento freddo o caldo (combustibile mescolato alla carica)	Forno continuo da 3 ÷ 4 a 100 t/h per tutti i tipi di ghisa, tranne quelle alto-legate e speciali	È il forno fondamentale della fonderia di ghisa

zione del 10% e pertanto si considera una produzione media effettiva di 144 t/d.

Il confronto fra i mezzi fusori, che è qui esaminato, prende in considerazione capacità produttive (10 t/h) che interessano di solito le medie e grandi fonderie.

Tuttavia, i criteri di scelta, per stabilire la convenienza tecnico-economica del mezzo fusorio anche per le piccole fonderie, non si discostano da quelli adottati per gli impianti esaminati e cioè il livello di investimento, i consumi di manodopera, energia, ferroleghie e carburanti, la flessibilità per i materiali di carica, la quantità e la qualità di ghisa richiesta e così via.

Per le piccole fonderie non sarà sempre possibile risolvere tutti i problemi di una produzione diversificata con una sola unità fusoria.

Si potrà prevedere, ad esempio, in certi casi un piccolo cubilotto a vento freddo (con possibilità di impiego di ossigeno) per getti da colare su vie a rulli in piccola serie accanto ad un forno ad induzione per getti più grossi: occorrerà tenere presente che un cubilotto a vento freddo non può essere di capacità inferiore alle 3 ÷ 4 t/b per una marcia di almeno 4 ÷ 5 h; per il forno ad induzione o ad arco la capacità di caricato dovrà raggiungere almeno 1 t o 4 ÷ 5 t rispettivamente.

Ritornando al caso in esame, si considerano 220 giorni lavorativi/anno e pertanto la ghisa fusa erogata risulta di 31.680 t/anno. Per i corrispondenti getti di ghisa grigia (resa del 60%) si ha una produzione di circa 20.000 t/anno.

Per calcolare gli ammortamenti si è considerata una obsolescenza degli impianti di 10 anni (costo del denaro 10% annuo).

I prezzi dei materiali sono aggiornati ai primi di maggio 1977. Per la manodopera si è considerato il costo di 10.000.000/anno per operaio presente e pertanto il fabbisogno di operai non è stato aumentato della maggiorazione per operai assenti.

Non si sono presi in esame i costi della manutenzione elettrica e meccanica, in mancanza di dati effettivi e confrontabili.

## CONSIDERAZIONI ECONOMICHE

Dall'esame delle tabb. XXXIV e XXXV risulta che per gli esempi considerati in questi paragrafi si realizza il minore costo di trasformazione, adoperando il cubilotto a vento caldo acido a marcia continua, seguito dal cubilotto a vento caldo tradizionale e dal cubilotto a vento freddo.

I forni elettrici determinano un costo di trasformazione superiore ed in ordine crescente si ha: forni ad induzione a fusione notturna, forni ad induzione a fusione diurna e forni ad arco.

Ciò, evidentemente, è valido con i prezzi del coke e dell'energia elettrica al maggio 1977.

Il rapporto tra il costo del coke per tonnellata di ghisa al cubilotto ed il costo dell'energia elettrica per tonnellata di ghisa al forno ad induzione o ad arco varia da Paese a Paese in modo talvolta sostanziale.

Si possono, però, fare alcune considerazioni energetiche che possono servire per orientamento in un futuro di crisi.

I rendimenti termici totali specifici dei vari mezzi fusori sono all'incirca i seguenti:

- Cubilotto a vento freddo: 0,30
- Cubilotto a vento caldo (a ricupero): 0,40
- Forno ad induzione a fusione diurna: 0,60
- Forno ad induzione a fusione notturna: 0,60
- Forno ad arco: 0,65

Occorre precisare che si nota una ripresa del cubilotto a vento freddo, dovuta all'impiego di ossigeno e di vento secondario. Entrambi questi sistemi sono caratterizzati da basse spese di impianto e consentono qualche riduzione di costo di trasformazione.

Molto interessante per i forni elettrici ad induzione a crogiolo è l'impiego delle cariche preriscaldate. Ciò costituisce una riduzione del costo di trasformazione, ma impone a vincoli nella scelta del materiale di carica, riducendo una delle caratteristiche positive del forno elettrico.

Un tipo di installazione che sta diffondendosi è quello dei forni ad induzione a crogiolo di grande capacità e di

Tabella XXXIV - Confronto fra cubilotto e forni elettrici nella produzione di ghisa grigia. Confronto dei costi della ghisa liquida con vari sistemi fusori (Lit/kg).

Descrizione	Cubilotto a vento freddo	Cubilotto a vento caldo	Cubilotto a vento caldo continuo	Forno ad induzione a fusione diurna	Forno ad induzione a fusione notturna	Forno ad arco
Ammortamento dell'impianto fusorio e spese finanziarie . . . . .	4,35	5,40	5,40	7,72	10,40	9,51
Manodopera per la condotta . . . . .	2,05	2,05	2,05	2,05	1,90	2,84
Manutenzione del refrattario del forno fusorio	2,04	3,54	1,00	1,00	1,00	2,00
Elettrodi . . . . .	—	—	—	—	—	9,00
Combustione od energia elettrica per la fusione . . . . .	18,50	14,00	14,00	21,29	20,00	19,84
Ammortamento del forno di attesa e spese finanziarie . . . . .	0,28	0,28	0,28	0,28	—	0,66
Manutenzione del refrattario del forno di attesa . . . . .	0,63	0,63	0,63	0,63	—	1,00
Energia elettrica per il forno di attesa . . . . .	2,10	2,10	2,10	2,10	—	3,00
<b>Totale delle spese di trasformazione . . . . .</b>	<b>29,95</b>	<b>28,00</b>	<b>25,46</b>	<b>35,07</b>	<b>33,30</b>	<b>47,85</b>
Carica metallica . . . . .	133,55	122,50	113,25	102,37	102,37	102,37
Carburazione . . . . .	1,20	1,82	2,46	5,06	5,06	7,00
<b>TOTALE . . . . .</b>	<b>164,70</b>	<b>152,32</b>	<b>141,17</b>	<b>142,50</b>	<b>140,73</b>	<b>157,22</b>

bassa potenza specifica, calcolati per fondere nelle ore notturne e funzionare di giorno come forni di attesa. I forni devono logicamente essere di grande capacità, ma non occorre più il forno di attesa e si risparmia inoltre la perdita di temperature per il travaso. Questi grandi forni hanno delle perdite contenute nei periodi di attesa, ove è impiegata la tariffa elettrica diurna, e godono di notte delle agevolazioni per l'impegno dell'energia elettrica notturna.

Esaminando ulteriormente la tab. XXXIV, si nota che, se al costo di trasformazione si aggiunge il costo della carica metallica e del materiale per carburare, le cose vanno diversamente.

Si presentano praticamente a pari costo il cubilotto a vento caldo a marcia continua ed il forno ad induzione a fusione notturna, seguiti dagli altri sistemi.

Che cosa ha portato a questa variazione? Essenzialmente la presenza nelle cariche di ghisa in pani, come si vedrà nell'apposito paragrafo.

### Flessibilità di esercizio

Allorché una fonderia decide di installare un nuovo mezzo fusorio, normalmente lo prevede con potenza superiore a quanto necessario in un primo tempo; in un secondo tempo raggiunge i valori di contratto ed in un terzo tempo si trova nella necessità di ottenere dal forno qualcosa in più del convenuto. È bene quindi che i forni siano in grado di potere sia ridurre che aumentare l'erogazione nominale di ghisa.

Per i forni elettrici il problema non esiste, poiché è possibile ridurre l'erogazione di corrente in modo continuo dal valore zero al massimo. Se si vuole aumentare l'erogazione, si può ricorrere al preriscaldamento delle cariche.

Per il cubilotto la riduzione è possibile immediatamente con l'introduzione delle false cariche di coke. Se la riduzione è programmabile in anticipo, si possono ridurre le sezioni degli ugelli ed anche il loro numero. Se si desidera aumentare la portata, è possibile sostituire la soffiante. Per incrementi maggiori si ricorre all'immissione di ossigeno. In entrambi i casi, se si opera con

un cubilotto a vento caldo, il recuperatore non sarà più sufficiente e si avrà vento a temperatura inferiore.

Un caso particolare di flessibilità è quello relativo alla possibilità di fermare il forno per tempi lunghi, a causa di guasti agli impianti di formatura o, più spesso, a causa di fermate delle maestranze. Per i forni elettrici non è un problema. Per i cubilotti è possibile una fermata massima di 4 h, dopo di che o si sfonda la suola (ove è costruita sfondabile) o si congela tutta la colonna di carica nel forno.

### Produzione di tipi diversi di ghisa

Anche se si considera solo il caso di produzione di ghisa grigia, occorre ricordare che non tutti i tipi sono ottenibili per inoculazione di un'unica ghisa base. Con il forno ad induzione è possibile superare l'ostacolo, naturalmente spillando il tipo di ghisa speciale dal forno fusorio e non dal forno di attesa. Ciò provoca perdita di produttività.

Con il forno ad arco, che parte sempre da cariche solide, il problema non sussiste quando si dispone di due forni di attesa.

Con il cubilotto è possibile variare il tipo di ghisa, ma l'avere interposto il forno di attesa ad induzione, utilissimo per altri aspetti, ostacola questa pratica; se si prevede questa necessità, occorre porre davanti al cubilotto anche un avanzcrogiolo non riscaldato.

Un caso particolare è quello in cui si desidera produrre, oltre alla ghisa grigia, anche ghisa sferoidale:

— Con il forno ad arco non si hanno complicazioni di marcia, salvo una leggera diminuzione di produttività.

— Con il forno ad induzione si hanno costi superiori dovuti allo zolfo superiore (non è da prendere in considerazione la desolfurazione con carburo).

Per produrre ghisa sferoidale con il cubilotto è, invece, tassativo desolfurare. Ciò, oltre ad una spesa, è anche una complicazione impiantistica: necessità di un secondo forno per ripristinare la temperatura persa durante la desolfurazione.

Tabella XXXV - Confronto fra cubilotto e forni elettrici nella produzione di ghisa grigia. Elementi di costo per produzione di 31.680 t/anno di ghisa liquida. Composizione: Ct = 3,3%; Si = 2,2%; Mn = 0,6%.

Descrizione	Cubilotto a vento freddo	Cubilotto a vento caldo	Cubilotto a vento caldo continuo	Forno ad induzione a fusione diurna	Forno ad induzione a fusione notturna	Forno ad arco
Investimento (000 Lit)	1.000.000	1.200.000	1.200.000	1.700.000	2.200.000	2.150.000
Manodopera per la condotta (N° operai)	6½	6½	6½	6½	6	9
Combustibile: kg di coke per la fusione di 100 kg di ghisa	13,2	10	10	—	—	—
kWh per la fusione di 100 kg ghisa	—	—	—	65	75	55
Prezzo di 1 kWh (Lit)	—	—	—	32,76	27,53	36,00
Carburante: fabbisogno (kg) per 100 kg di ghisa	0,86 coke	1,30 coke	1,76 coke	2,20 grafite 230 Lit/kg	2,20 grafite 230 Lit/kg	3 grafite 230 Lit/kg
Carica metallica per 100 kg ghisa (%)						
— boccame Lit/kg	—	40	40	40	40	40
— ghisa ematite Lit/kg	160	30	20	—	—	—
— rottame di acciaio Lit/kg	94	27,34	36,91	55,42	55,42	55,42
— Fe-Si 45% Lit/kg	360	1,6	1,73	2,48	2,48	2,48
— Fe-Mn 75% Lit/kg	334	0,2	0,18	0,12	0,12	0,12
Costo dell'energia per il forno di attesa per 100 kg/ghisa kWh (1 kWh = 30 Lit)	7	7	7	7	—	10

## Considerazioni sul costo della manodopera

Mentre per i vari tipi di forni elettrici la manodopera è praticamente in funzione del volume di produzione, per i cubilotti essa è praticamente costante in un ampio intervallo (da 4 a 40 t/h).

## Flessibilità nella scelta del materiale di carica

Nelle tabelle di confronto fra i costi della ghisa ottenuta con i diversi tipi di forni, si nota che la voce con le variazioni più elevate è la carica, intendendo per carica la somma della carica metallica e del materiale carburante.

Si nota che il costo della carica diminuisce con l'aumentare della percentuale di rottame di acciaio in carica, mantenendo fissa la percentuale di ritorni e con il diminuire la percentuale di ghisa in pani.

Si è considerato un solo tipo di acciaio, di buona qualità, di composizione omogenea, con basso tenore di cromo e di pezzatura  $30 \div 40$  cm con spessore superiore a 5 mm.

Come ghisa in pani si è considerata l'ematite con 4% di carbonio e 2,5% di silicio.

A questa composizione di carica si possono muovere molte obiezioni, poiché ogni fonderia ha sue particolari condizioni di esercizio e poiché ogni mese ha particolari condizioni di mercato del rottame. Si ritiene che si possa fare un confronto solo con rottame e ghisa in pani di qualità buona, costante e di continua reperibilità. Ogni fonderia devia da questa norma ogni qualvolta può disporre di materiale più conveniente, compatibilmente con le esigenze dei getti da produrre.

È bene richiamare alcune considerazioni che dovrebbero essere note a tutti.

Nei cubilotti a vento freddo si raggiungono temperature inferiori agli altri mezzi fusori, pertanto è meglio disporre di materiale più selezionato, meno ossidato, con spessore più uniforme.

Nei cubilotti a vento caldo è possibile in parte caricare rottame di acciaio selezionato per cubilotti con pacchi di lamierino da profonda imbutitura, normalmente di costo inferiore (nel 1977 84 Lit/kg anziché 94).

Nei cubilotti, meglio se a vento caldo, si può anche caricare tornitura di ghisa non essiccata (la somma di acqua più olio nella tornitura commerciale non centrifugata raggiunge anche il 18% del peso). La tornitura è introdotta in bricchetti o con il sistema ad iniezione, in entrambi i casi si realizza un sensibile risparmio anche considerando un calo del 10% di fusione del materiale già considerato secco.

Attualmente (1977) si trova sul mercato tornitura di ghisa umida a 60 Lit/kg, considerando un calo del 10% per umidità ed olio e del 10% come calo di fusione, si ottiene un costo di 72 Lit/kg, ancora notevolmente inferiore al prezzo di 94 Lit/kg del rottame di acciaio.

Quando si carica tornitura è bene limitarsi nella percentuale, tenendo conto che è difficile disporre di tornitura selezionata e ci sono frequenti inquinamenti di zolfo, di torniture di acciaio al piombo, di torniture di alluminio. Normalmente non si supera la percentuale di carica del 20%.

Nei forni ad induzione si può normalmente caricare tornitura, ma deve essere preventivamente essiccata e disoleata, per la quale operazione occorre un impianto adatto, per esempio il passaggio delle torniture in un forno rotativo; ciò comporta, però, una notevole ossidazione della tornitura e, quindi, un maggiore calo di fusione. Inoltre la carica più ossidata determina maggiore aggressione del refrattario del forno, se acido, e perciò minore durata.

Alcune fonderie impiegano ghisa in pani nella carica dei forni ad induzione, anziché carburare rottame di acciaio. Indubbiamente questo modo di operare è più sicuro, ma decisamente più caro. Sarebbe bene cercare di sfruttare le ottime possibilità di carburazione del forno ad induzione a frequenza di rete. Un forno con sufficiente potenza elettrica ha moti convertibili tali da realizzare carburazioni con ottime rese in un tempo accettabile. Se il forno è in bassa potenza specifica, si effettua la supercarburazione in eccesso con livello del bagno basso e poi si aggiunge acciaio.

I forni ad induzione, soprattutto fondendo su piede di bagno a bassa temperatura, si prestano a caricare grossi rottami senza procedere alla preventiva frantumazione, cioè risparmiando  $10 \div 20$  Lit/kg di frantumazione. Occorre prendere l'accorgimento di effettuare il riscaldamento lentamente, in caso contrario possono originarsi brusche dilatazioni dei pezzi massicci con spruzzi di ghisa liquida.

Il forno ad arco è il classico divoratore di tornitura, anche umida, che arriva agevolmente a caricare sino in ragione del 30% della carica, cioè in ragione del 50% del materiale nuovo. Ciò significa ridurre sensibilmente il costo della carica.

Il difficile è trovare sul mercato la tornitura di composizione nota necessaria ad alimentare il forno ad arco, per cui questo mezzo è più diffuso presso fonderie integrate.

Un altro vantaggio di caricare tornitura di ghisa, anziché rottame di acciaio nel forno ad arco, è rappresentato dalla minore carburazione necessaria; infatti, il forno ad arco non è un buon carburatore di acciaio; il bagno è quasi completamente immobile; la carburazione avviene solo in superficie e, quindi, oltre ad un basso rendimento, comporta tempi lunghi di affinazione che riducono la produttività del forno rispetto alle sue possibilità elettrotermiche.

## Affidabilità dei rivestimenti refrattari

Per i cubilotti e per i forni ad arco l'affidabilità dei refrattari è decisamente buona, le fermate dei forni, per guasti non previsti al refrattario, sono rare.

Per i forni elettrici con canale, usati come forni di attesa, la durata della campagna è molto lunga, 1 ÷ 2 anni, l'incidenza del costo del refrattario sul costo della ghisa liquida è basso e pertanto se si limitano le pretese, si ha un discreto grado di affidabilità.

Non così si può dire dei forni a crogiolo. Accanto a fonderie che hanno campagne molto buone e limitate dispersioni di valori di durata, vi sono fonderie che lamentano alcune volte campagne inspiegabilmente limitate. In parte queste minori durate sono spiegate con errori umani di conduzione, in parte con l'impiego di materiali di carica molto ossidati, ma in parte sono ancora inspiegabili.

Per contro, mentre nei forni con canale il costo del rivestimento ed il tempo per l'allestimento e la sinterizzazione sono notevoli, nei forni a crogiolo la demolizione, la ricostruzione e la sinterizzazione sono contenute nella fine settimana e comunque, disponendo di un forno di riserva, si può effettuare la sostituzione con la fermata del forno di sole 24 h.

In fatto di rivestimenti per forni ad induzione a crogiolo è ancora in corso una messa a punto di qualità e di applicazione; si ricorda che nel 1958 si è iniziato l'impiego dei quarzi selezionati, nel 1965 si è iniziato l'impiego di vibratorii meccanici per la costipazione e nel 1975 si sono fatte le prime prove di estrazione, anziché fusione delle dime.

### **Affidabilità meccanica ed elettrica**

Nessun mezzo è così semplice e quindi sicuro come il cubilotto a vento freddo. Molto più complicati sono i cubilotti a vento caldo ed ancora più lo sono i forni elettrici. Ciò inevitabilmente comporta l'impiego di manodopera per la condotta e la manutenzione di un livello qualitativo superiore e la disponibilità di parti di ricambio di valore non indifferente. Chiaramente non tutti dispongono di trasformatori di riserva, anche se, facendo bene i conti, quasi certamente non conviene correre il rischio di fermare la fonderia per un guasto al trasformatore.

### **Affidabilità di composizione chimica**

Premesso che non sono stati presi in esame i cubilotti senza il forno di attesa proprio perché non sempre sono in grado di assicurare costanza di composizione, tutti i sistemi fusori esaminati forniscono uguale sicurezza, naturalmente posto che siano condotti in modo corretto e che sia disponibile un sistema di analisi chimica sufficientemente rapido.

È anche da notare che mentre il cubilotto con cariche ben pesate e con marcia costante, cioè senza interruzioni o variazioni di condizioni di marcia, fornisce ghisa con una composizione abbastanza costante, in un mezzo discontinuo, quale ad esempio il forno ad arco, le variazioni di analisi da colata a colata sarebbero inaccettabili se non si ricorresse alle correzioni necessarie sui dati forniti dal laboratorio.

### **Tendenza alla tempra**

Uno dei vantaggi dei cubilotti senza forni elettrici di attesa è quello di fornire ghisa con buona costanza di tendenza alla tempra, in condizioni di marcia normale. La caratteristica, derivata dal potere inoculante del coke e della scoria, sovente rende superflua l'inoculazione.

Tutti i sistemi duplex esaminati ed anche il forno a crogiolo con fusione notturna determinano nella ghisa notevoli anomalie di tempra dovute, a composizione costante, al surriscaldamento del bagno ed al tempo di attesa in forno. Per ovviare a questo grave inconveniente, occorre standardizzare le varie fasi della fusione e della carburazione e soprattutto studiare a fondo la tecnica delle inoculazioni in secchia od in forma.

### **Condizioni di lavoro**

#### *Gravosità del lavoro degli addetti alla condotta*

Delle varie operazioni quella gravosa è la scorificazione sia dei forni ad arco che dei forni ad induzione, anche se con opportuni schermi è possibile migliorare le condizioni. Esistono anche forme di meccanizzazione di tale operazione per forni a crogiolo sufficientemente grandi (maggiori di 10 t) che però deve essere sempre completata a mano.

Nei cubilotti la scorificazione è ottenuta per separazione automatica nel sifone e l'evacuazione mediante granulazione in acqua e pertanto non è più una operazione manuale.

#### *Rischio di infortuni*

Lavorare a stretto contatto di ghisa fusa rappresenta un potenziale rischio, ma tutti i forni esaminati, se si osservano le elementari norme antinfortunistiche, non sono affatto pericolosi.

Occorre precisare che, nel caso di cariche in forno ad induzione a crogiolo su ghisa liquida, occorre avere la certezza che la carica non contenga acqua, il che si ottiene preriscaldando la carica ad una temperatura media superiore a 373 K (100 °C) con bruciatori a metano. Si è calcolato che il calore speso per questa operazione è recuperato come energia di fusione.

#### *Rumorosità dell'ambiente*

Cubilotti e forni ad induzione sono abbastanza silenziosi. In entrambi la rumorosità è data dalla movimentazione del materiale metallico di carica e dalle soffianti e dalle pompe.

Nei forni ad arco la rumorosità è elevata (100 decibel) e la sua insonorizzazione per il momento è risolta solo isolando il forno dagli altri reparti della fonderia e dotando gli addetti di mezzi di protezione individuale.

#### *Inquinamento esterno ed interno da polveri*

Il D.P.R. 15.IV.1971 n. 322 (Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale n. 145 del 9.VI.1971) ha pubblicato il regolamento per l'esecuzione della legge relativa ai provvedimenti contro l'inquinamento atmosferico.

In base a tale regolamento vige l'obbligo per tutti gli impianti, facenti parte degli stabilimenti industriali e che possono contribuire all'inquinamento atmosferico, di possedere impianti di abbattimento rispondenti alle prescrizioni di legge.

In ogni caso, per i cubilotti ed i forni ad arco è consigliabile l'impianto di captazione e di depolverazione dei fumi originati nella fusione; nello studio effettuato sono state comprese negli investimenti le relative spese di acquisto e di installazione di detti impianti.

Per i forni ad induzione l'emissione di fumi durante la fusione è molto limitata e pertanto non si è prevista la loro captazione, è sufficiente la normale ventilazione di una campata forni appositamente costruita. Tale aspirazione è invece necessaria se si carica tornitura di ghisa non essiccata e non disoleata.

## BIBLIOGRAFIA

### CUBILOTTI

I forni fusori nella fonderia di ghisa - Assofond, 1967.

W. DONIKE, C. A. ESSER, M. CAVARRETTA, L. SITIA - La fusione nella moderna fonderia di ghisa - Teknos, 1965.  
The cupola and its operations - American Foundryman's Society, 1965.

A. MAL - I punti chiave di una buona fusione al cubilotto - La Fonderia Italiana, n. 11, 1972, pp. 387-413 - n. 12, 1972, pp. 435-446.

M. DECROP - Le fonctionnement du cubilot - Fonderie, febbraio 1966, pp. 53-63. Considerations pratiques sur la carburation de la fonte dans le cubilot - Fonderie, giugno 1963, pp. 215-218.

H. W. LOWNIE JR. - Foundry 95, 1967, n. 12, pp. 76-79. Giesserei, n. 955, 1968, p. 216.  
Metals Handbook - American Society for Metals, Metals Park, Ohio (USA), Vol. 5, 1970.

E. PIWOWARSKY - Hochvertiges Gusseisen, Berlino, 1951.

R. G. WARD - Introduzione alla chimica-fisica siderurgica - Milano, 1969.  
Grundlager des Schmelzens in Kupolofen - Duesseldorf, 1975.  
Iron Castings Handbook - Cleveland, 1971.  
The Metallurgy of Cast Iron - St. Saphorin, 1974.

### FORNI AD INDUZIONE

E. CALAMARI - Mezzo secolo di progresso dei forni ad induzione in Italia - Congresso Internazionale di Fonderia, Firenze, settembre 1977.

E. CALAMARI - Nuovo forno ad induzione a frequenza industriale per leghe ferrose - Congresso Internazionale di Fonderia, Firenze, settembre 1954.

W. SOTCKAR - Evoluzione dei forni ad induzione - Fonderia, n. 7-8, 1976.

E. CALAMARI - L'induttore intercambiabile - Novità in Fonderia, A.I.M., ottobre 1974.

CERETTI - Procedimento BBC/Brusa per l'elaborazione dell'acciaio - Atti del Congresso Internazionale di Fonderia, Liegi, 1975. Journal du Four Electrique, n. 1, 1976.

E. PADOVA - Nuove tecnologie per la fusione e la colata della ghisa - La Fonderia Italiana, n. 7-8, 1972.

E. CALAMARI - Mantenimento e surriscaldamento della ghisa in siviera elettrica - La Fonderia Italiana, n. 6, 1954.

L. HALLOT - Fusione della ghisa - 38° Congresso Internazionale di Fonderia, Parigi, 1965.

### FORNI AD ARCO

G. VIOLI - La fabbricazione dell'acciaio per getti al forno elettrico ad arco - La Fonderia Italiana, n. 2, 1958.

W. E. SCHWABE - Utilizzazione della potenza - La Metallurgia Italiana, n. 4, 1965.

M. BARBERO, D. FORTINO - Il forno elettrico nella fonderia di ghisa - La Fonderia Italiana, n. 4, 1952.

M. MEINARDIS - I forni elettrici - Ed. Hoepli, 1953.

A. T. BARNABA - Fabbricazione dell'acciaio - Ed. Hoepli, 1960.  
Tecnomasio Italiano Brown-Boveri.  
Siemens Demag.

### FORNI FUSORI D'ALTRO TIPO

E. PIWOWARSKY - Hochvertiges Gusseisen, Berlino, 1951, pp. 945-948 e pp. 954-955.

O. BADER, D. GODOT - Les fontes spéciales - Ed. Eyrolles, Parigi, 1953, pp. 226-232.

W. GOEDECHE - Die metallurgischen Moeglichkeiten des Induktionsschmelzofens im Vergleich zu anderen Ofensystemen - Giesserei, n. 16, 1954, pp. 405-410.

G. GOEDECHE - Die Metallurgie im Graphitstabofen - Giesserei, n. 8, 1951, pp. 169-174.

A. OBERTHUER - Einige Betriebswerte von Graphitstab Schmelzofen - Elektrowaerme, Agosto, 1960, pp. 250-257.

W. DONIKE, C. A. ESSER, M. CAVARRETTA, L. SITIA - La fusione nella moderna fonderia di ghisa - Teknos, 1965.

W. J. ROSCROW - The use of rotary furnaces for melting and superheating grey and alloyed irons - The British Foundryman, n. 2, 1971.

W. J. ROSCROW - Production of high duty irons (including spheroidal graphite) in the rotary furnace - The British Foundryman, n. 2, 1974.

W. J. ROSCROW - Melting and superheating iron in rotary furnaces - The British Foundryman, n. 4, 1976.

**Volume II: Ghise grigie**

**Capitolo IV**

## **Proprietà fisiche**

- PREMESSA
- DENSITA'
- ESPANSIONE TERMICA
- CALORE SPECIFICO
- CALORE SPECIFICO TOTALE
- CALORE LATENTE DI FUSIONE
- CONDUCIBILITA' TERMICA ED ELETTRICA
- PROPRIETA' MAGNETICHE
- EFFETTO DEGLI ELEMENTI DI LEGA
- TENSIONE SUPERFICIALE
- BIBLIOGRAFIA

A cura di: Giovanni Magistrali  
Giovanni Riccio



## PREMESSA

Nel decidere l'impiego della ghisa grigia per un qualsiasi particolare, è importante che siano note le proprietà fondamentali della medesima.

I costituenti della struttura dell'acciaio possono essere tutti presenti nella ghisa, ma vi sono due importanti costituenti non normalmente presenti nell'acciaio, che determinano le caratteristiche più importanti della ghisa stessa. Questi costituenti sono la grafite ed il fosforo.

In particolare, la presenza della grafite è caratteristica della ghisa grigia. L'effetto della grafite sulle caratteristiche puramente meccaniche è sostanzialmente quello di un vuoto. Cioè una matrice acciaiosa, contenente un numero notevole di vuoti distribuiti come la grafite nella ghisa grigia, presenterebbe le stesse caratteristiche meccaniche.

L'effetto del fosforo è meno sentito, in quanto vi sono molti tipi di getti prodotti, in cui il tenore di fosforo è tenuto di proposito molto basso e precisamente sotto lo 0,15%.

Tuttavia, la maggior parte dei getti contengono fosforo nella percentuale di  $0,2 \div 1,2\%$  e poiché il fosforo forma un eutettico a basso punto di fusione, tende a dare segregazioni.

Allo stesso tempo, nel getto l'eutettico fosforoso tende a formare un reticolo fragile, per cui, quando è importante la resistenza all'urto o la tenuta idraulica, il tenore di fosforo è generalmente mantenuto il più basso possibile.

I principali costituenti della struttura della ghisa e dell'acciaio sono i seguenti:

- Ferrite: HB =  $70 \div 150$  - duttile
- Perlite: HB =  $175 \div 330$  - moderatamente duttile
- Perlite aperta: HB =  $130 \div 180$  - duttile
- Cementite: HB =  $800 \div 1.100$  - fragile
- Eutettico fosforoso: HB =  $400 \div 600$  - fragile
- Grafite: fragile

Si è spesso immaginato che la presenza di grafite nella ghisa rendesse necessariamente poroso un getto anche di notevole spessore. Questo, tuttavia, non si verifica, in

quanto le lamelle di grafite in ogni cella eutettica sono separate da quelle delle celle vicine e non esiste un reticolo continuo.

Prove di tenuta hanno dimostrato che le celle eutettiche sono più piccole delle pareti dei getti di normale produzione ed una perfetta tenuta idraulica può essere prevista in un getto completamente sano. Tutte le porosità, rivelate con i comuni sistemi di prova nei getti, devono essere attribuite a cavità di risucchio e non ad un reticolo continuo di grafite.

Poiché la grafite non ha praticamente resistenza alla trazione, la sua presenza agisce come una discontinuità nella matrice. Quindi si può prevedere che la resistenza di una ghisa sarà inversamente proporzionale alla quantità di grafite libera presente e questo è sostanzialmente giusto, anche se le caratteristiche della matrice influiscono per conto loro sulla resistenza.

La ghisa grigia non legata presenta resistenze alla trazione, che variano in funzione dello spessore del getto e della quantità di grafite presente.

Poiché la resistenza dipende in misura notevole dalla quantità di grafite libera presente, si deve prevedere che — avendo la grafite il peso specifico di circa 2,2 — le ghise più resistenti avranno un peso specifico più elevato di quello delle ghise meno resistenti.

Quanto sopra vale soprattutto per la ghisa grigia con grafite lamellare.

Tuttavia, la grafite può avere altre forme, come la forma floculare nella ghisa malleabile americana o la forma sferoidale nella ghisa omonima.

Modificando la forma della grafite, e cioè passando dalle lamelle ai floculi ed agli sferoidi, non solo si ottiene una maggiore resistenza, ma si può ottenere anche un alto grado di duttilità e di resistenza all'urto.

Oltre alle caratteristiche meccaniche delle ghise, numerose altre caratteristiche hanno una notevole importanza e sono: densità, espansione termica, conducibilità termica, calore specifico, conducibilità elettrica, ecc.

Queste caratteristiche sono dette *fisiche*.

## DENSITÀ

La densità, o peso specifico dei vari tipi di ghisa, dipende dalla densità dei costituenti della microstruttura e dalla temperatura. La densità dei vari costituenti è la seguente:

- Ferrite: 7,86 g/cm<sup>3</sup>
- Perlite: 7,76 g/cm<sup>3</sup>
- Cementite: 7,66 g/cm<sup>3</sup>
- Grafite: 2,25 g/cm<sup>3</sup>
- Eutettico fosforoso: 7,32 g/cm<sup>3</sup>
- Austenite: 7,84 g/cm<sup>3</sup>
- Martensite: 7,63 g/cm<sup>3</sup>

I diversi elementi di lega influenzano queste densità. Per esempio, aumentando il tenore di silicio da 0 a 13,5% la densità della ferrite si riduce da 7,86 a 7,23.

Così le aggiunte di cromo e di molibdeno aumentano la densità del carburo di ferro.

Considerando i vari tipi di ghisa, la densità rispecchia i vari costituenti e la loro composizione. La densità della ghisa grigia aumenta con la resistenza a trazione a causa della ridotta quantità di grafite. Per esempio, si ha un aumento da 7,05 ÷ 7,15 a 7,25 ÷ 7,30 della densità quando la resistenza a trazione passa da 150 ÷ 220 N/mm<sup>2</sup> (15 ÷ 22 kgf/mm<sup>2</sup>) a 300 ÷ 390 N/mm<sup>2</sup> (31 ÷ 40 kgf/mm<sup>2</sup>).

In generale, quanto maggiore è il carbonio, tanto minore è la resistenza a trazione della ghisa e la densità cresce con il crescere della resistenza a trazione e della durezza.

La ghisa grigia perlitica, completamente ricotta, ha una densità inferiore di 0,1 ÷ 0,2 rispetto alla stessa non ricotta, a causa dell'ulteriore separazione della grafite proveniente dalla scissione della perlite.

## ESPANSIONE TERMICA

Il grado di espansione termica lineare aumenta con l'aumentare della temperatura, per cui nell'enunciare i coefficienti di espansione termica, è importante dichiarare l'intervallo di temperatura al quale si riferiscono.

Ad una temperatura compresa tra 473 ÷ 573 K (200 ÷ 300 °C), il grado di espansione o contrazione della ghisa grigia subisce un cambiamento. In questo intervallo il carburo di ferro della matrice metallica perde od acquista le sue proprietà magnetiche rispettivamente durante il riscaldamento od il raffreddamento e, al di sopra di questo intervallo, vi è un aumento del grado di espansione.

L'effetto sull'espansione termica reversibile dei normali elementi (carbonio, silicio, manganese, zolfo e fosforo) nelle percentuali che si riscontrano nella ghisa grigia è molto scarso.

Una ghisa perlitica con composizione: C = 3,13%; Si = 2,31%; Mn = 0,69%; Ni = 0,12%; Cr = 0,12%; P = 0,67%; S = 0,14% presenta coefficienti di espansione termica che vanno da  $10 \times 10^{-6}$  nell'intervallo 293 ÷ 373 K (20 ÷ 100 °C) a  $13,6 \times 10^{-6}$  nell'intervallo 293 ÷ 973 K (20 ÷ 700 °C).

Un'altra ghisa avente composizione: C = 3,02%; Si = 1,57%; Mn = 0,87%; Ni = 0,16%; Cr = 0,10%; Mn = 0,57%; Cu = 0,11%; P = 0,17%; S = 0,10% ha coefficienti di espansione termica compresi tra  $6,6 \times 10^{-6}$  per l'intervallo di temperatura 173 K (—100 °C) 198 K (—75 °C) e  $13,7 \times 10^{-6}$  per l'intervallo 273 ÷ 973 K (0 ÷ 700 °C).

Quando il ferro  $\alpha$  (ferrite) si trasforma in ferro  $\gamma$  (austenite), si ha una contrazione a causa della maggiore densità dell'austenite. Viceversa si ha un'espansione nel passaggio dall'austenite alla ferrite.

Questa espansione può contribuire alla formazione di cricche durante il rapido raffreddamento da alte temperature.

La variazione del coefficiente di espansione termica con la temperatura, per quattro ghise in confronto con l'acciaio, è riportato in fig. 137.

Alle basse temperature, 262 ÷ 293 K (—11 ÷ 20 °C), il coefficiente di espansione termica di una ghisa grigia con il 4% di carbonio è di  $8,5 \times 10^{-6}/K$ , un valore notevolmente inferiore a quello di intervalli superiori di temperatura.

L'influenza della composizione chimica sul coefficiente di espansione termica è relativamente scarsa, eccetto che per forti percentuali di nichel.

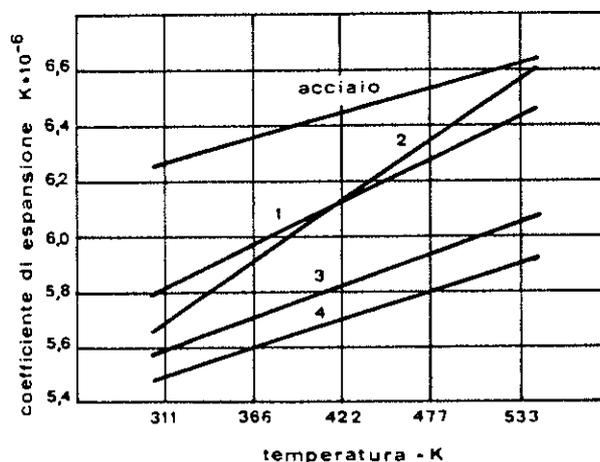


Fig. 137 - Influenza della temperatura sul coefficiente di espansione termica dell'acciaio e di 4 ghise grigie.

## CALORE SPECIFICO

Il calore specifico della ghisa grigia (e della ghisa sferoidale) è circa 0,54 J/g/K a temperatura ambiente ed aumenta rapidamente con la temperatura (fig. 138).

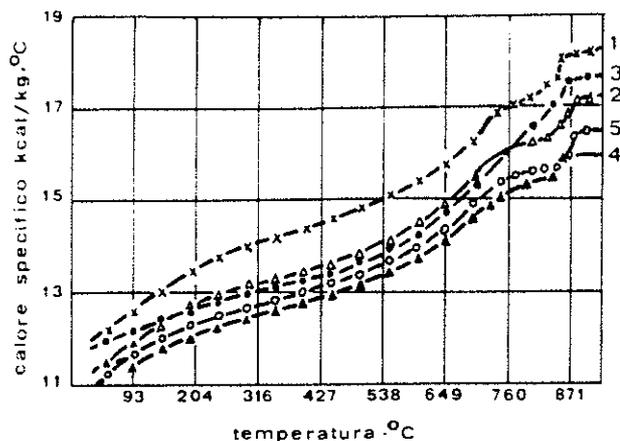


Fig. 138 - Effetto della temperatura sul calore specifico di alcune ghise.

## CALORE SPECIFICO TOTALE

Le curve del calore totale per il ferro puro e per due ghise grigie sono riportate in fig. 139.

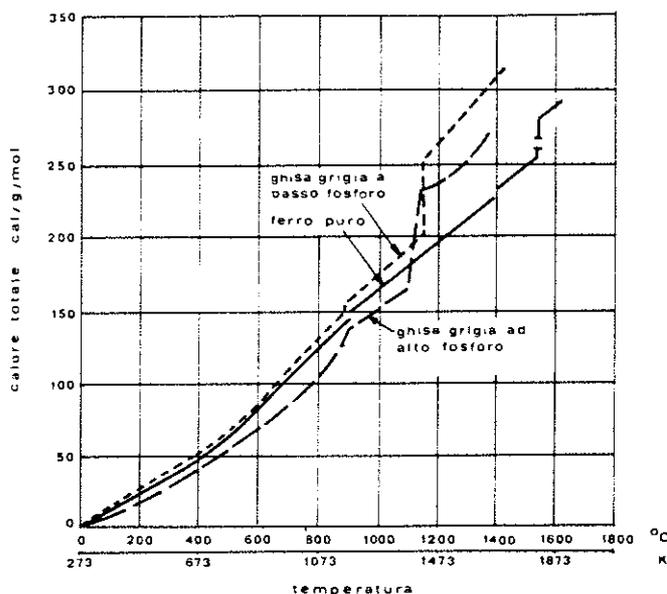


Fig. 139 - Calore totale di 2 ghise confrontate con il ferro puro.

## CALORE LATENTE DI FUSIONE

Vi sono alcune discrepanze nei vari dati a disposizione:

- Ferro puro: 272 J/g (65 cal/g)
- Ghisa ad alto carbonio: 197 J/g (47 cal/g)

- Ghisa bianca ad alto carbonio: 195 J/g (46,6 cal/g)
- Ghisa bianca ad alto carbonio: 247 J/g (59 cal/g)
- Ghisa grigia: 209 ÷ 230 J/g (50 ÷ 55 cal/g)
- Ghisa malleabile: 96 J/g (23 cal/g)

## CONDUCIBILITÀ TERMICA ED ELETTRICA

Le conducibilità termiche ed elettriche di molti metalli sono legate tra loro da una relazione fissa. Tuttavia la forma della grafite nelle ghise influenza notevolmente questa relazione, come rappresentato in fig. 140.

La fig. 140 mostra che la conducibilità termica è più elevata e la conducibilità elettrica è più bassa per la ghisa grigia in confronto con l'acciaio.

La grafite sferoidale riduce questa differenza tra le due conducibilità. Di conseguenza, la ghisa sferoidale ha una conducibilità elettrica maggiore ed una conducibilità termica minore della ghisa grigia.

La *conducibilità termica* della ghisa grigia alla temperatura ambiente è all'incirca la stessa di altri materiali ferrosi e va da 0,46 ÷ 0,57 J/cm<sup>2</sup>/s/cm/K (0,110 ÷ 0,137 cal/cm<sup>2</sup>/s/cm/°C) in funzione della struttura e della composizione.

La microstruttura, come anche la temperatura, influisce sulla conducibilità. La ghisa grigia ferritica e la ghisa sferoidale hanno conducibilità termiche più elevate di quelle con matrice perlitica. Le ghise bianche hanno una conducibilità termica molto minore, la quale diminuisce rapidamente con l'aumento del tenore di carburi.

La conducibilità termica della ghisa grigia e della ghisa sferoidale può essere influenzata notevolmente dalla composizione chimica.

Il silicio, il nichel e l'alluminio abbassano notevolmente la conducibilità. Il fosforo ed il manganese riducono leggermente la conducibilità termica. Le aggiunte di rame al 2% abbassano leggermente la conducibilità termica, una percentuale più elevata non esercita alcuna influenza.

Gli elementi stabilizzatori dei carburi (cromo, molib-

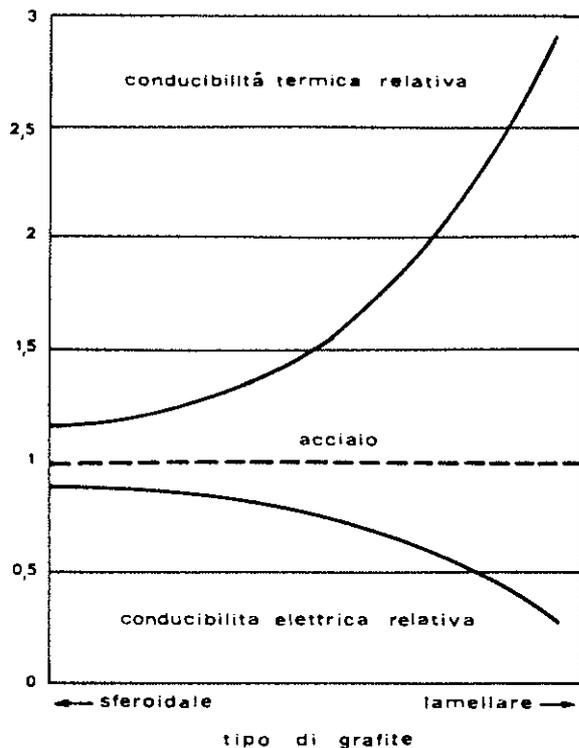


Fig. 140 - L'effetto della forma della grafite sulla conducibilità termica relativa ed elettrica della ghisa grigia e sferoidale in confronto con l'acciaio.

deno, vanadio) hanno un'influenza non chiara sulla conducibilità.

La conducibilità termica diminuisce con l'aumento della temperatura sia nel caso delle ghise legate che non legate.

La *conducibilità elettrica* di alcune ghise è rappresentata in fig. 141 in funzione della temperatura come resistività che è il reciproco della conducibilità.

La resistenza specifica di tutte le ghise aumenta con la temperatura. Il coefficiente di temperatura della resistività elettrica è di circa  $1,908 \cdot 10^{-3}/K$  per la ghisa ferritica e perlitica ed è circa  $4,5 \cdot 10^{-4}/K$  per la ghisa austenitica a temperatura ambiente.

La resistività elettrica varia notevolmente da ghisa a ghisa in dipendenza della composizione e della microstruttura.

Tabella XXXVI - Resistività elettrica di alcune ghise.

Composizione chimica %				Resistenza specifica $\mu\Omega/cm$ (1)	
Carbonio totale	Carbonio grafítico	Silicio	Manganese	Grezzo di fusione	Ricotto
3,66	2,00	1,33	0,02	78	—
3,06	1,71	2,54	0,02	86	75
2,97	1,72	2,87	0,03	90	79
2,97	1,80	3,41	0,03	108	99
2,76	1,88	4,76	0,05	188	131
2,61	2,52	6,04	0,09	192	191
2,40	2,30	7,38	0,10	218	214

$$(1) \text{ Resistenza in } \mu\Omega = \frac{\text{Resistenza specifica}}{\text{Area in cm}^2} \cdot \text{Lunghezza in cm}$$

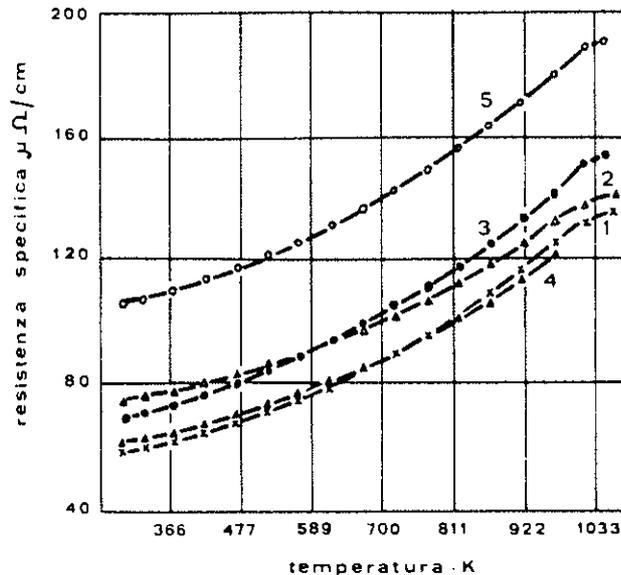


Fig. 141 - Effetto della temperatura sulla resistenza elettrica di alcune ghise.

La forma compatta della grafite, come quella che si trova nella ghisa sferoidale, fornisce una conducibilità elettrica notevolmente più alta di quella che si ha con la grafite lamellare nella ghisa grigia.

Aumentando il tenore di carbonio e di silicio, aumenta la resistenza elettrica. La ghisa grigia con lamelle più grossolane ha una resistività elettrica più elevata e cioè  $104 \mu\Omega/cm$  invece dei  $78 \mu\Omega/cm$  delle ghise con lamelle di grafite più fini.

Ogni unità percentuale di carbonio riduce la conducibilità elettrica del  $10 \div 20\%$ , in quanto la grafite ha una elevata resistività ( $3.000 \mu\Omega/cm$ ).

Nella tab. XXXVI sono esposti i valori di resistività elettrica relativi ad alcune ghise.

La resistività elettrica aumenta con la diminuzione della distanza tra le lamelle di perlite e con più fini prodotti di trasformazione dell'austenite.

Le ghise bianche, con forti percentuali di carburi massicci a matrice perlitica, hanno una bassa conducibilità elettrica.

La presenza di elementi di lega, sia per l'effetto nella microstruttura, sia per la loro soluzione nella ferrite, influenza la conducibilità elettrica.

Nichel, alluminio e silicio aumentano la resistività elettrica sciogliendosi nella ferrite, eccetto quando piccole quantità diminuiscono gradualmente la quantità di carbonio combinato nella matrice.

L'alluminio, il manganese ed il nichel, compresi fra  $0,5 \div 1\%$ , diminuiscono la resistività in varie ghise; maggiori quantità aumentano la resistività.

Quando la matrice diventa austenitica, quest'aumento di resistività è mascherato e sale fino a  $130 \div 160 \mu\Omega/cm$ .

Il cromo, il cobalto ed il vanadio aumentano leggermente la conducibilità elettrica. Il rame fino all'1% ed elevati tenori di fosforo aumentano leggermente la resistività.

L'elevata resistività delle ghise ad alto alluminio rendono queste adatte per resistenza.

## PROPRIETÀ MAGNETICHE

Benché le proprietà magnetiche della ghisa non si avvicinino a quelle degli acciai per magneti permanenti o degli acciai al silicio, la ghisa è largamente impiegata quando le sue proprietà magnetiche sono notevoli.

A favore della ghisa in confronto con l'acciaio giocano i seguenti fatti:

- 1 - I getti di ghisa possono essere ottenuti con forme molto complicate.
- 2 - Le proprietà magnetiche della ghisa sono meno influenzate dalla resistenza a trazione.
- 3 - Quando la ghisa è magnetizzata permanentemente, il coefficiente di temperatura dell'intensità di magnetizzazione è molto più piccolo.
- 4 - Le ghise non magnetiche hanno una parte importante per la produzione di particolari di macchine elettriche e riducono le perdite magnetiche dovute alla loro bassa permeabilità.

Si ricordano alcune definizioni:

Un *campo magnetico* è una regione dello spazio in cui esiste uno stato magnetico e le linee di direzione di questo campo, detto linee di forza o di flusso, si chiudono tra loro.

La *forza magnetica*, tensione magnetica o forza magnetomotrice, è l'azione magnetica totale che agisce su una parte del circuito magnetico. L'unità di misura è il gilbert (Amperspire ovvero Asp).

L'*intensità magnetica*, o forza magnetizzante (H) in un punto di un circuito magnetico, è definita come la forza magnetomotrice per unità di lunghezza del fascio di flusso magnetico.

Essa è indicata come H e l'unità di misura è l'ostersted, che equivale ad un gilbert/cm (Amperspire/metro ovvero Asp/m).

L'*induzione magnetica* (B) o densità di flusso è il flusso per unità di area normale alla direzione del flusso. Esso è indicato con B e l'unità usata è il gauss che è equivalente ad un maxwell/cm<sup>2</sup> (Weber/m<sup>2</sup>).

La *permeabilità magnetica* è la proprietà di un mezzo isotropo che determina, in condizioni specificate, la gran-

dezza della relazione tra induzione magnetica e forza magnetizzante nel mezzo. Essa è indicata con  $\mu$  ed è

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Il *magnetismo residuo*  $B_0$  è l'induzione magnetica che rimane in un circuito dopo la rimozione della forza magnetica applicata. L'intensità della forza magnetica opposta, che deve essere applicata per rimuovere questo magnetismo residuo, è una misura della forza con la quale il materiale trattiene il suo magnetismo ed è nota come forza coercitiva  $H_0$  (fig. 142).

Quando una provetta di ghisa è sottoposta ad una magnetizzazione alternata, la relazione tra B ed H è differente per valori crescenti e decrescenti della intensità magnetica. Questo fenomeno è dovuto a processi irreversibili che portano a dissipazione di energie e produzione di calore.

Questa perdita di energia è denominata *perdita per isteresi* (fig. 143).

La struttura della ghisa ha una marcata influenza sulle grandezze sopracitate.

La ferrite dà una bassa perdita per isteresi ed elevata permeabilità, mentre la perlite dà un'elevata perdita per isteresi ed una bassa permeabilità. La presenza di cementite libera causa bassi valori di induzione magnetica, permeabilità e magnetismo residuo, insieme con una aumentata forza coercitiva e perdita per isteresi (fig. 144).

Le ghise con struttura austenitica sono non-magnetiche e la presenza di martensite rende la ghisa debolmente magnetica.

Come regola generale, le proprietà magnetiche della ghisa dipendono largamente dal tipo della sua struttura e l'influenza degli elementi di lega, sia allo stato grezzo, sia dopo ricottura, è indiretta e dipende dal modo con cui questi elementi influenzano la struttura del materiale.

La *dimensione del grano* di una ghisa ferritica influisce

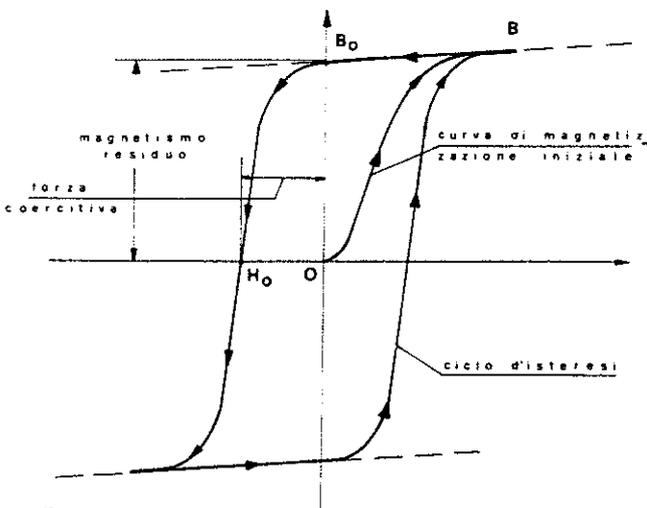


Fig. 142 - Curva di prima magnetizzazione e ciclo d'isteresi.

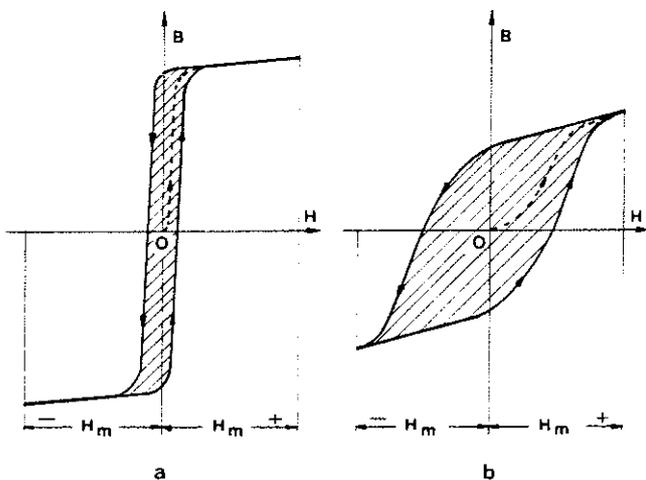


Fig. 143 - Ciclo di isteresi di materiali avente differente permeabilità magnetica.

a - materiale ad alta permeabilità, ciclo d'isteresi molto stretto, piccola area (bassa perdita).

b - materiale a bassa permeabilità, ciclo d'isteresi molto largo, grande area (alta perdita).

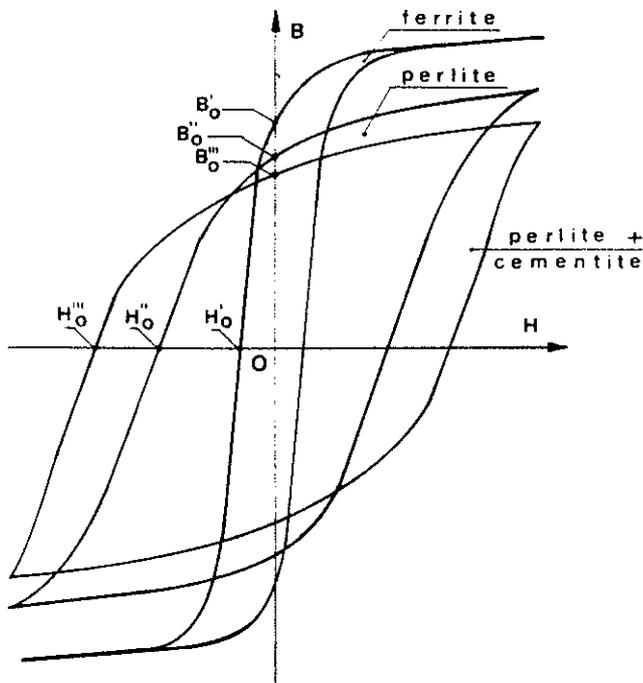


Fig. 144 - Raffronto indicativo di vari cicli d'isteresi.

sulla perdita di isteresi, la quale diminuisce quando questo aumenta.

Un aumento della temperatura provoca un notevole aumento della permeabilità fino al punto critico.

Quando questo punto è raggiunto, l'induzione diminuisce rapidamente a zero e la ghisa diventa non-magnetica.

Il *punto di Curie* è la temperatura alla quale un materiale cessa di essere ferromagnetico e diventa paramagnetico.

Nel caso di ferro puro, questo avviene alla temperatura di trasformazione  $\alpha \rightarrow \gamma$  a 1.043 K (770 °C). Questa temperatura diminuisce leggermente con l'aumentare del tenore di silicio e con il 5% di silicio il punto di Curie è a circa 1.003 K (730 °C).

Per la cementite esente da silicio, il punto di Curie è nella regione di 478 ÷ 493 K (205 ÷ 220 °C). La cementite nella ghisa è sostanzialmente esente da silicio fino al 4,8% di silicio nella composizione chimica.

## EFFETTO DEGLI ELEMENTI DI LEGA

Il manganese in generale è pregiudizievole per ottenere un'elevata induzione e permeabilità magnetica, sia allo stato grezzo di fusione che allo stato ricotto. Allo stato ricotto aumentano la forza coercitiva e la perdita per isteresi, ma diminuisce il magnetismo residuo.

Lo zolfo, quando è presente come solfuro di manganese, ha scarsa influenza sulle proprietà magnetiche.

Il silicio ha scarso effetto sulle proprietà magnetiche della ghisa perlitica. Nel caso di matrici completamente ferritiche, un aumento del silicio tende ad aumentare la permeabilità massima e riduce leggermente la perdita per isteresi.

La presenza dell'eutettico fosforoso in una matrice

La smagnetizzazione della ghisa può essere effettuata con un riscaldamento a 823 K (550 °C), una permanenza a questa temperatura per 2 h ed un raffreddamento lento fino a 373 K (100 °C).

La presenza della grafite grossa, a differenza della grafite fine, abbassa il magnetismo residuo sia con matrice ferritica che perlitica. Non è ben chiara l'influenza delle dimensioni della grafite sulla forza coercitiva.

Man mano che la grafite diventa più fine, emerge la tendenza ad aumentare l'isteresi magnetica e questo è più evidente nel caso di matrice perlitica.

L'effetto delle dimensioni della grafite sulla permeabilità massima nella ghisa perlitica non è ben determinato, benché la presenza di grafite fine tenda ad abbassarne il valore nel caso di matrice completamente ferritica.

La forma della grafite ha scarso effetto sulla forza coercitiva ed il magnetismo residuo.

La grafite sferoidale aumenta di poco le perdite per isteresi con matrice perlitica, mentre con matrice ferritica la perdita per isteresi è notevolmente ridotta.

È possibile ottenere un'elevata permeabilità ed una bassa perdita di isteresi quando la grafite è sotto forma di aggregato o di sferoide in una matrice completamente ferritica. Il carbonio combinato deve essere il più basso possibile (perlite assente): la cementite libera deve essere assente ed il tenore di fosforo deve essere tenuto al di sotto dello 0,1%.

I valori più alti di induzione magnetica e di permeabilità magnetica sono riscontrati in ghise che sono state ricotte fino ad ottenere una matrice ferritica.

Nel caso della ghisa con grafite lamellare a basso fosforo, per esempio, la permeabilità massima può essere aumentata di quattro volte mediante la ricottura.

Sia il magnetismo residuo che la forza coercitiva tendono a presentare valori più bassi dopo ricottura.

I vantaggi di una matrice più continua, come nel caso della ghisa sferoidale, possono essere perduti se sono presenti elementi di lega.

La presenza di elevate percentuali di elementi di lega in grado di produrre una matrice austenitica rende la ghisa non-magnetica e fornisce una permeabilità massima di  $\geq 2$ .

ferritica con un tenore di fosforo dell'ordine dell'1% aumenta la perdita per isteresi e riduce la permeabilità massima. L'effetto del fosforo sugli altri fattori non è ben determinato e, in presenza di una matrice perlitica, il suo effetto è mascherato.

Il nichel diminuisce la permeabilità ed aumenta la perdita per isteresi. Se presente in quantità sufficiente da formare austenite, la ghisa diventa non-magnetica.

Il cromo riduce l'induzione magnetica, la permeabilità ed il magnetismo residuo ed aumenta la forza coercitiva e la perdita per isteresi.

Il rame riduce la permeabilità ed aumenta la perdita per isteresi.

## TENSIONE SUPERFICIALE

La tensione superficiale della ghisa liquida è stata misurata ottenendo valori varianti da  $900 \cdot 10^{-5}$  a  $2.100 \cdot 10^{-5}$  N/cm.

Lo zolfo riduce la tensione superficiale come pure il

fosforo benché l'azione di quest'ultimo sia soltanto 1/6 dello zolfo.

Aggiunte al silicio comprese tra 0,4% e 1,5% producono soltanto una riduzione della tensione superficiale di circa  $70 \cdot 10^{-5}$  N/cm.

## BIBLIOGRAFIA

H. T. ANGUS - Physical and Engineering Properties of Cast Iron - Birmingham, 1960.

Gray and Ductile Iron Castings Handbook - Cleveland, 1971.  
E. PIWOWARSKY - Hochwertiges Gusseisen, Berlino, 1951.



## **Proprietà meccaniche e tecnologiche**

- CHE COSA SI INTENDE PER MASSIVITA'
- STUDI SULLA MASSIVITA'
- IL DIAGRAMMA DI COLLAUD
- DUTTILITA' E TENACITA' DELLE GHISE
- CAPACITA' DI SMORZAMENTO
- CAPACITA' DI ADATTAMENTO
- RESISTENZA A FATICA
- RESISTENZA ALL'USURA - L'ATTRITO E L'USURA
- GENERALITA' SULLA LAVORABILITA'
- INTRODUZIONE SULLE PROVE IMMEDIATE
- CORRELAZIONE TRA TEMPERATURA DI INIZIO SOLIDIFICAZIONE ED IL CARBONIO EQUIVALENTE (CE)
- CORRELAZIONE FRA CEL E COLABILITA' - TEMPI DI COLATA - SEZIONE DEGLI ATTACCHI
- VALUTAZIONE DEL C E SI MEDIANTE ANALISI TERMICA E LA PROVETTA DI TEMPRA
- IL RISUCCHIO E LA SUA VALUTAZIONE - L'ALIMENTAZIONE DEI GETTI - CENNO SUI DIFETTI IMPUTABILI AL RISUCCHIO ED AL RITIRO
- SINTESI GRAFICA DELLE PROPRIETA' TECNOLOGICHE DELLE GHISE - NOMOGRAMMA MULTIPLO
- ESEMPIO
- BIBLIOGRAFIA

A cura di: Giorgio Cola



## CHE COSA SI INTENDE PER MASSIVITÀ

Si può definire la massività come la causa di un tipo di *anisotropia* cui sono soggetti i metalli colati; un'anisotropia, quindi, del tutto particolare e relativa alle diverse caratteristiche meccaniche riscontrabili nei vari spessori di uno stesso pezzo.

Tutti i metalli colati ne sono affetti: il bronzo, l'ottone, le leghe leggere, l'acciaio, ma soprattutto la ghisa è la lega più soggetta al fenomeno.

Se si colano delle provette di ghisa con diametri differenti in forme aventi la stessa conducibilità termica e se ne esaminano le proprietà nella direzione dell'asse di simmetria, ci si accorge che le proprietà sono in funzione delle condizioni di raffreddamento espresse dal diametro della provetta (fig. 145).

Pertanto, è la massa che gioca la massima influenza sulla velocità di raffreddamento e, quindi, sulla struttura da cui dipende il comportamento meccanico della ghisa.

Di qui il termine di massività per indicare l'effetto della massa nella determinazione della struttura.

Nella ghisa, poi, la massività gioca un doppio ruolo nel determinare la struttura; infatti, la ghisa è stata definita come *acciaio frammisto a grafite*, quindi le due variabili, grafite e matrice, risentono della velocità di raffreddamento. Mentre la grafite non è più suscettibile di modificarsi dopo la solidificazione, la matrice, invece, può subire tutte le trasformazioni allo stato solido come l'acciaio. Pertanto, la massività comporta due tipi di anisotropie: quella primaria (grandezza del grano, grandezza e distribuzione della grafite, ecc.) e quella secondaria (distribuzione dei carburi, loro quantità, ecc.).

La prima è direttamente influenzata dalla velocità di solidificazione, la seconda dalla velocità di raffreddamento allo stato solido.

La struttura primaria ha certo un'importanza notevole nel decidere la qualità di una ghisa; è, infatti, possibile raggiungere resistenze pari all'acciaio solo diminuendo, affinando, modificando la forma e la distribuzione della grafite. Tuttavia, non bisogna sopravvalutare l'influenza dell'anisotropia primaria; infatti, una ghisa liquida, colata in forme di masse diverse, mostra differenze di struttura secondarie altrettanto importanti. Si possono così ottenere tutte le strutture, dalla ferrite sino alla sorbite, passando per tutti i gradi di finezza della perlite.

A parità di velocità di raffreddamento e di ripartizione della grafite, tutte le variazioni della struttura secondaria si accompagnano ad una variazione di resistenza meccanica; è, quindi, indispensabile tenere conto anche dell'anisotropia secondaria nel comportamento meccanico delle ghise grigie. Queste variazioni di resistenza, riscontrate su barre di diametri diversi, si rilevano naturalmente in getti aventi spessori molto diversi.

Se si colano delle barre di diametri diversi, ad esempio da 6 a 150 mm di diametro, colati con ghisa G 30 e se si osservano al microscopio — anche con debole in-

grandimento ( $\times 25$ ) — le varie sezioni, si possono vedere tutti i tipi di grafite presentati dalla Norma UNI 3775 relativi alla ghisa grigia; nella barra di 6 mm di diametro, a causa del rapido raffreddamento, la lega solidifica dando l'eutettico carburo-austenite. Nella barra di 150 mm di diametro la lega solidifica dando l'eutettico grafite-austenite e la grafite si forma durante la solidificazione dell'eutettico, producendo grafite tipo A.

Osservando i diametri intermedi, si possono notare anche i tipi D, E, B che sono distribuzioni di transizione derivanti dai diversi gradi di sottoraffreddamento, inoltre da un certo diametro in su, ad esempio 30 mm, le lamelle di grafite, pur conservando la distribuzione di tipo A, presentano lunghezze sempre più grandi. La genesi di queste diverse lunghezze può essere così interpretata: allorché appare un nucleo di grafite in una cellula eutettica globulare che solidifica, questo è circondato tutt'intorno dall'austenite secondaria e, quindi, non può crescere gran che in larghezza, ma può crescere radialmente all'estremità che è a contatto con il liquido, in misura tanto più grande quanto più è lento l'avanzamento del fronte di solidificazione; pertanto, nella ghisa sperimentata, mano a mano che lo spessore cresce, l'avanzamento del fronte di solidificazione diventa più lento, permettendo la crescita dei germi a spese del carbonio deputato alla formazione di nuovi nuclei nelle parti immediatamente adiacenti al fronte.

Perciò, negli spessori grandi si avranno meno lamelle, ma più lunghe; in quelli più piccoli più lamelle, ma più corte (fig. 146).

Questo meccanismo è favorito od ostacolato da molteplici altri fattori: stabilità dei carburi, temperatura, velocità di cristallizzazione della grafite, velocità di nucleazione, ecc. Notevoli sono pure le modifiche strutturali della matrice, che avvengono con il variare della legge

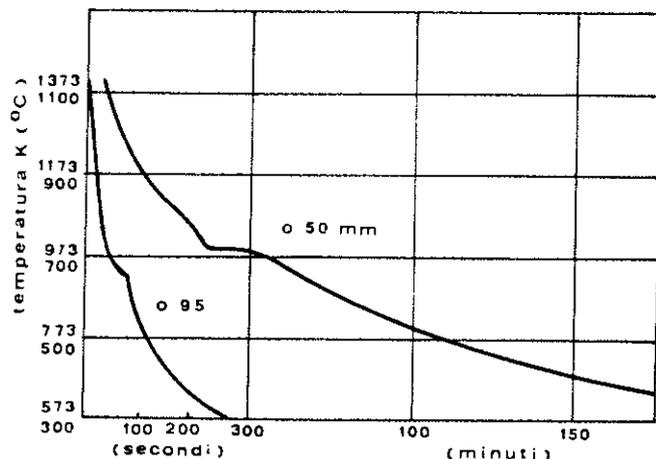


Fig. 145 - Curve di raffreddamento di due barre con diametri diversi, colate con ghisa G 30.

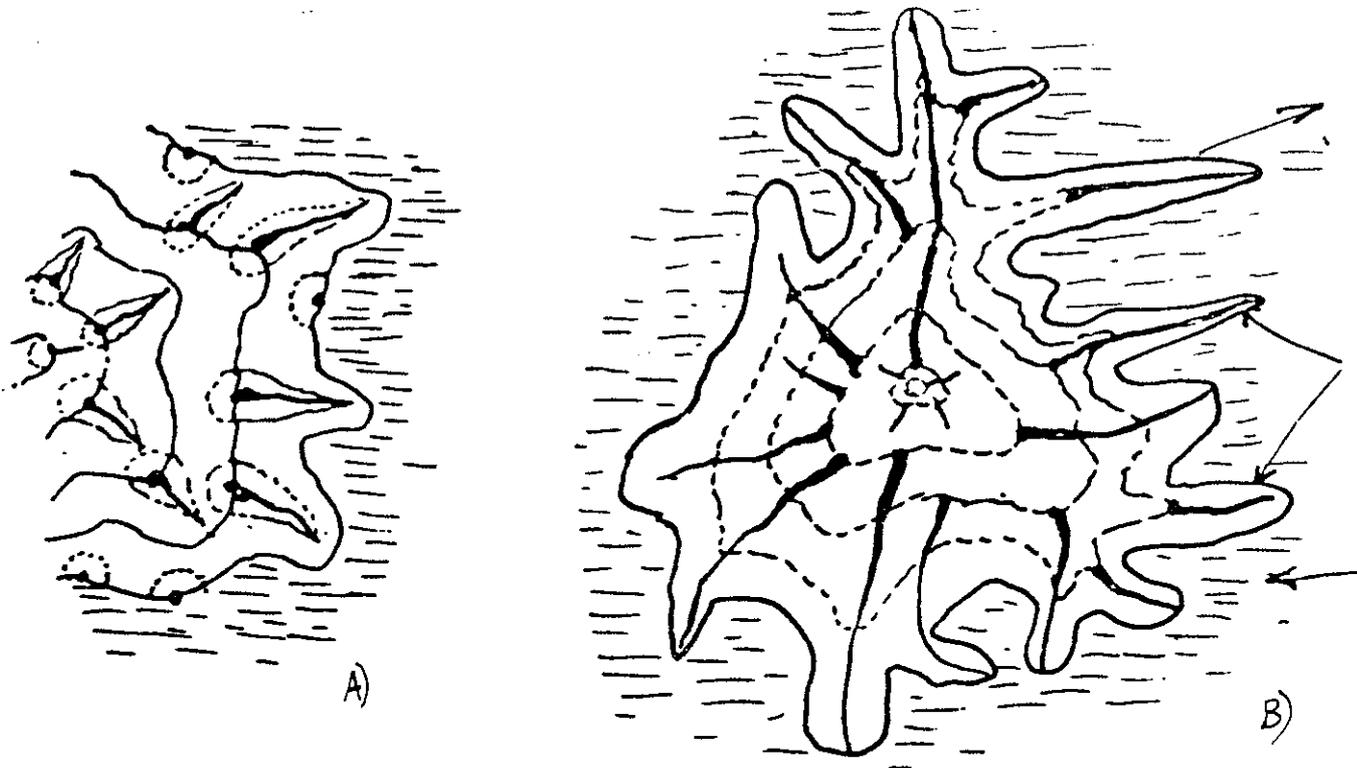


Fig. 146 - A) Blocco delle lamelle di grafite quando la velocità d'avanzamento del fronte di solidificazione è superiore alla velocità di crescita della grafite. B) Crescita delle lamelle quando le due velocità sono confrontabili (?).

di raffreddamento. Oltre all'influenza sulla grandezza del grano, si può osservare che ad ogni tipo di distribuzione grafica corrisponde una matrice particolare. Così, alla grafite puntiforme corrisponde una matrice ledeburitica, alla grafite D corrisponde spesso ferrite, e mano a mano che il sottoraffreddamento diminuisce, subentra la massività e si ha perlite a stratificazione sempre più aperta sino ad avere di nuovo ferrite per raffreddamenti lenti. Secondo R. F. Mehl e C. Welles<sup>1</sup> esiste una relazione tra la distanza interlamellare nella perlite e la sua temperatura di formazione, la quale, nelle ghise grigie, è una funzione (inversa) della velocità di raffreddamento nel dominio critico (fig. 147).

Come in tutte le cinetiche, la struttura di una nuova fase è tanto più fine quanto più rapido è il raffreddamento, perché questa struttura si forma a più bassa temperatura. Al di sotto di una certa temperatura lo spessore delle lamelle di cementite è prossimo alla sua dimensione cristallina, pertanto  $Fe_3C$  cessa di essere il costituente direzionale della trasformazione e si formano strutture intermedie (sorbite, bainite). Inoltre il carbonio reso libero dalla diminuita solubilità (0,05% al massimo nel ferro  $\alpha$ ) può combinarsi con il ferro per dare la cementite di costituzione della perlite e può depositarsi sotto forma di grafite libera. Siccome la perlite si forma sotto i 1.033 K (760 °C) tanto più facilmente quanto più rapido è il diminuire della temperatura, nei getti massicci, per opera del silicio si avrà una ferritizzazione proporzionale alla grafitizzazione.

Viceversa, un raffreddamento rapido nel dominio  $\alpha + \gamma + g$  impedisce la ferritizzazione diretta dell'austenite.

Getti con forte massività possono essere sede di autoricottura ed allora alla ferrite diretta si aggiunge quella di decomposizione della perlite (ferritizzazione indiretta).

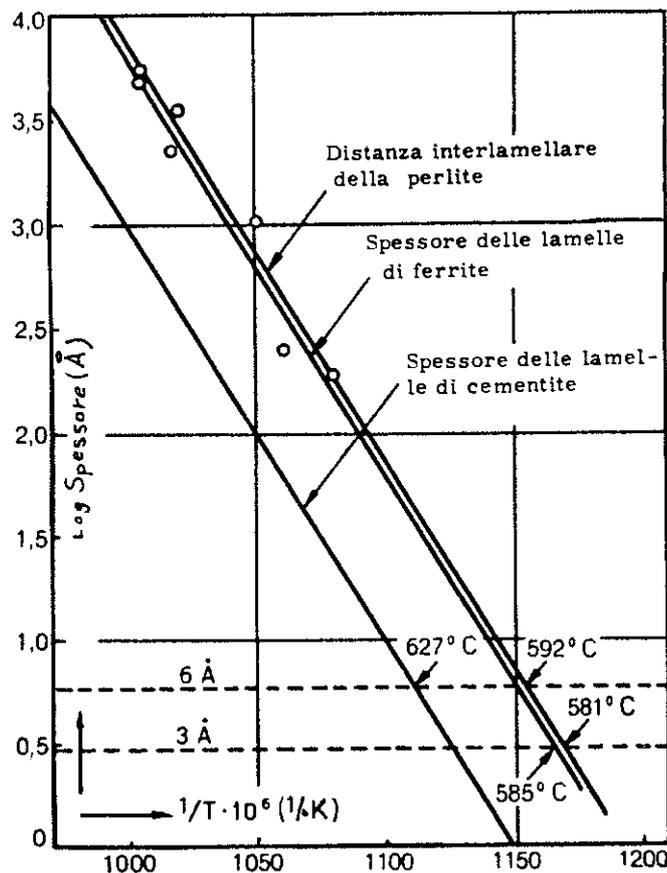


Fig. 147 - Variazione della distanza interlamellare della perlite con l'inverso della temperatura di formazione (°K).

Agli stessi risultati strutturali si può giungere tenendo costante il diametro della barra di prova e variando la composizione chimica (diagramma di Laplanche<sup>3</sup>). In definitiva, la struttura metallurgica di un getto dipende da tre fattori:

- La composizione chimica ( $S_c \rightarrow c_0$  eutettico).
- La nucleazione (grandezza delle celle eutettiche).
- La massività (stratificazione della perlite, lunghezza delle lamelle di grafite).

Dopo quanto si è detto, appare evidente che è illusorio pretendere di rappresentare la qualità e le proprietà di un getto, la cui legge di raffreddamento è sconosciuta, per mezzo di una provetta normalizzata colata separatamente nelle condizioni sempre identiche. Solo se la velocità di raffreddamento di un getto sarà determinata con una certa precisione, sarà possibile trovare una relazione tra barretta e getto.

Schwartz e Vāth hanno mostrato che le resistenze ottenute in un lungo cilindro ed in una piastra, colati con la stessa ghisa, si possono stabilire con la seguente relazione:  $D = 2 T$ , dove  $D$  è il diametro della barra tonda e  $T$  lo spessore della lamiera. La sottrazione del calore da un getto è ritenuta generalmente proporzionale al modulo di raffreddamento:

Volume/Superficie

purché gli altri fattori rimangano costanti.

Confrontando i rapporti  $V/S$  per differenti profilati e per barre, i due Autori hanno trovato un buon accordo con la formula citata, cioè ad eguali rapporti  $V/S$  corrispondono resistenze eguali alla trazione.

Dalla fig. 148 si può desumere che un cilindro, una barra quadrangolare, una piastra avranno una stessa re-

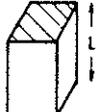
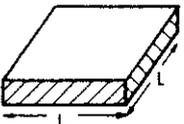
		volume prima della solidificazione	superficie raffreddante	rapporto $V/S$	$(\frac{V}{S})^2$	durata relativa di solidificazione
	a	$\pi D^3/6$	$\pi D^2$	$D/6$	$D^2/36$	1
	b	$\pi D^2 L/4$	$\pi D L$	$D/4$	$D^2/16$	2,25
	c	$T^2 L$	$4 T L$	$T/4$	$T^2/16$	2,25
	d	$L^2 T$	$2 L^2$	$T/2$	$T^2/4$	9

Fig. 148 - Rapporto geometrico  $V/S$  (Volume/Superficie) per diversi profili semplici.

- a - Sfera
- b - Cilindro lungo  $L > 3 D$
- c - Barra lunga  $L > 3 T$
- d - Grande piastra  $L > 3 T$

sistenza a trazione quando: diametro della barra = lato della barra =  $2 \times$  spessore della piastra.

Si ricorda anche che quando il modulo di un getto aumenta, il modulo della formatura (a parità di staffa) diminuisce perché diminuisce il suo volume rispetto alla superficie, sede dell'assorbimento termico espresso dall'equazione:

$$1,28 b S (T_1 - T_2) \sqrt{t_c} = \rho_1 V [L + C_1 (T_c - T_s)]$$

calore assorbito = calore ceduto

$$da\ cui\ si\ ottiene\ t_c = K \cdot \left(\frac{V}{S}\right)^2 = K \cdot M^2 \quad (K = \text{costante metallo-formatura}).$$

La quantità  $1,28 b (T_1 - T_2)$  è chiamata *costante di formatura* ed è una misura del potere raffreddante, proporzionale a,  $b = \sqrt{k \rho C} =$  diffusività termica. Quindi, anche il tipo di formatura ha il suo effetto sulla massività.

Per le ghise ipoeutettiche ( $T_c = 1.643 K$ ) ( $1.370^\circ C$ ) colate in sabbia, i tempi di fine della solidificazione sono

$$t_c \approx 4,5 M^2 \left(\frac{t_{min}}{M\ cm}\right).$$

I simboli hanno il seguente significato:

- $S$  = superficie del getto.
- $V$  = volume del getto.
- $T_1$  = temperatura dell'interfaccia.
- $T_2$  = temperatura della forma.
- $t_c$  = tempo di fine della solidificazione.
- $\rho_1$  = densità del metallo.
- $L$  = calore latente di solidificazione.
- $C_1$  = calore specifico del metallo.
- $T_c$  = temperatura di colata.
- $T_s$  = temperatura di fine della solidificazione.
- $k$  = conducibilità termica.
- $\rho$  = densità del materiale di formatura.
- $C$  = calore specifico del materiale di formatura.
- $M$  = Modulo di raffreddamento ( $V/S$ ).

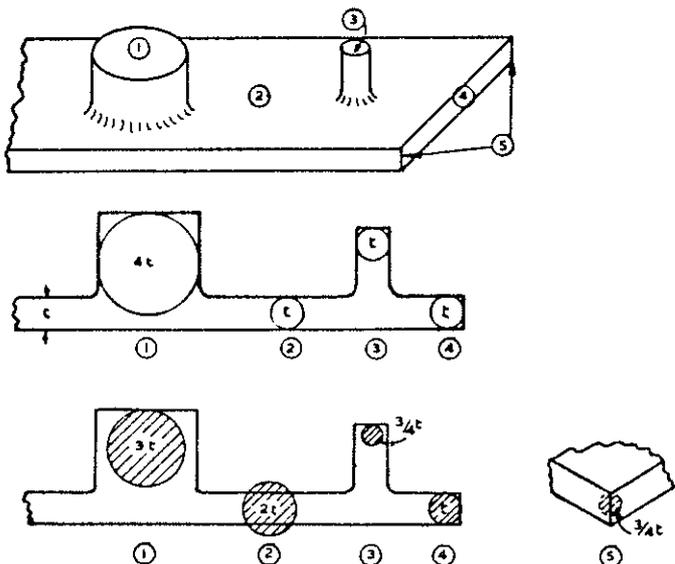


Fig. 149 - Diametro equivalente di barre che hanno la stessa velocità di raffreddamento in punti particolari di un getto tipo (1).

L'argomento è molto complesso, in quanto anche se i getti sono delle combinazioni di forme semplici (fig. 149), rimangono da considerare gli effetti di queste forme, ad esempio due piastre ad L hanno un tempo di solidificazione eguale a 1,5 volte quello della piastra isolata, se unite a T, il tempo diventa 1,7 e così via. La fig. 149 mostra anche come sia possibile risalire ai tempi di soli-

dificazione mediante il metodo dei cerchi inscritti.

Generalmente, nella pratica della fonderia di ghisa la massività si valuta nelle sezioni del getto più impegnative, a differenza della fonderia d'acciaio ove le esigenze della solidificazione direzionale impongono una *modulizzazione* rigorosa.

## STUDI SULLA MASSIVITÀ

Sostanzialmente, la questione di sapere se la resistenza nei differenti spessori di parete di un getto offre più interesse della resistenza di una barretta collegata od isolata, si riallaccia al problema della sensibilità allo spessore, che è sviluppato per tappe nella storia della metallografia della ghisa: nel 1888 C. V. Bach studia per primo la sensibilità allo spessore della ghisa con memorabili esperienze.

Nel 1906 W. J. Keep conclude i suoi studi, dichiarando che non gli è stato possibile formulare espressioni matematiche che permettessero di risalire alla resistenza di una parete, conoscendo la resistenza di una provetta.

Nel 1929 F. B. Coyle dimostra che la relazione cercata da Keep esiste:

$$1 - R_{ix} = R_{i30} \times d^m$$

$$2 - HB_x = HB_{30} \times d^n$$

ove  $d$  = diametro;  $m, n$  = costanti.

Nel 1932 Jungbluth ed Heller criticano le equazioni di Coyle, dimostrando che  $m$  ed  $n$  non sono 2 costanti, ma variano da ghisa a ghisa (—  $a$  e —  $c$ ) e caratterizzano la diversa sensibilità allo spessore.

Nel 1935 E. Dübi introduce un concetto del tutto nuovo nei sistemi di collaudo in fonderia: la *caratteristica di durezza*, che può essere così espressa: esiste una relazione lineare tra i valori coniugati di  $R_i$  ed  $HB$ , determinati su getti della stessa colata.

In pratica colando due barre di due diametri diversi (ad esempio 30 e 60 mm) e determinando  $R_i$  ed  $HB$ , si individua la retta che permetterà, attraverso il saggio Brinell, di risalire alla resistenza di qualunque getto, purché colato con la stessa ghisa delle barre.

Nel 1944 A. Collaud<sup>4</sup>, riprendendo i lavori di Dübi e collegandoli con quelli di Coyle e di Jungbluth ed Hel-

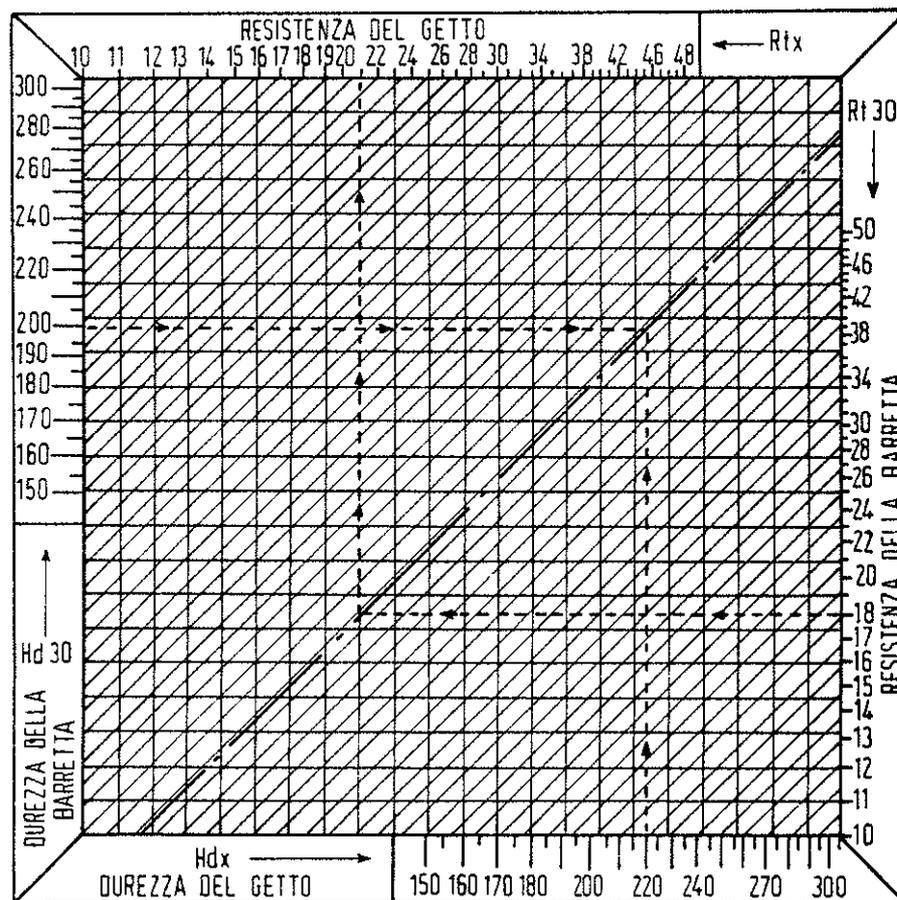


Fig. 150 - Nomogramma dell'equazione  $\frac{R_{ix}}{R_{i30}} = \left(\frac{H_{dx}}{H_{d30}}\right)^{1.57}$

ler, riesce, eliminando d dalla 1ª e 2ª e passando ai logaritmi, a formulare la seguente equazione logaritmica:

$$\log. R_t = \log. R_{t30} + 1,57 (\log. HB_x - \log. HB_{30}) \quad (1)$$

ove 1,57 è la media dei rapporti dei coefficienti di Jung-

bluth ed Heller  $\frac{c}{a}$  sperimentati su 34 tipi di ghisa.

Per facilitare l'uso pratico dell'equazione logaritmica, Cola ha costruito diversi nomogrammi, con i quali è possibile la risoluzione immediata dell'equazione (uno di questi nomogrammi è riprodotto in fig. 150) e, quindi, risalire con buona approssimazione alla resistenza del getto stesso<sup>5</sup>.

Per calcoli pratici si può utilizzare il coefficiente 1,57 ed allora l'equazione logaritmica si può esprimere semplicemente con

$$\frac{R^2}{HB^3_x} = \frac{R^2_{30}}{HB^3_{30}} = \text{costante}$$

Si è così aggirato l'ostacolo della massività: infatti, l'equazione (1) non contempla né spessori né V/S né dT/dt e consente di collaudare ogni getto di ghisa attraverso la durezza Brinell e la barretta come un comune getto di acciaio.

Ma il problema è risolto solo per metà; che dire, poi, del collaudo di un getto qualunque, sprovvisto di barretta?

Nel caso di un getto di acciaio al carbonio, la sola durezza Brinell può informare sulla resistenza a trazione, attraverso la relazione

$$R_t = 0,35 HB \quad (2)$$

Infatti, HB dipende direttamente dal tenore in C, cioè dalla superficie occupata dalla cementite, e per un dato tenore in carbonio, dipende dalla finezza di ripartizione dei carburi perlitici, finezza che varia al variare della velocità di raffreddamento a partire dalla temperatura di ricottura.

Belaiew ha constatato che negli acciai perlitici HB varia con l'inverso della distanza interlamellare L della perlite:

$$L \times HB = 80 \quad (3)$$

Le relazioni (2) e (3) mostrano che la resistenza alla trazione nell'acciaio dipende dal tenore in carburi e dalla loro ripartizione.

Che accade allorché si passa a considerare la ghisa che è acciaio frammisto a grafite? La durezza dipende unicamente dalla matrice, oppure è influenzata anche dalla presenza delle lamelle di grafite?

A questa domanda risponde Collaud, affermando che, confrontando ghise con 0,8% di carbonio combinato (ghisa perlitica), si può mettere in relazione la loro durezza con la distanza interlamellare della perlite: L varia da 0,24 a 0,42  $\mu$  passando dalla sorbite alla perlite grossolana; questi valori concordano con quelli di Belaiew sull'acciaio eutettoide e, quindi, Collaud deduce che nella ghisa la durezza dipende esclusivamente dalla matrice (fig. 151).

Pertanto, la resistenza alla trazione della matrice può essere conosciuta attraverso la prova Brinell.

Per mettere in relazione, quindi, durezza e trazione nella ghisa, occorre una funzione ben più complessa che

nell'acciaio, con l'intervento di una terza proprietà, cioè il modulo elastico all'origine E<sub>0</sub>. Questo modulo è sempre inferiore a quello dell'acciaio ed inoltre varia da ghisa a ghisa, mentre nell'acciaio al carbonio rimane costante, essendo in realtà il modulo una proprietà atomica della materia ed in particolare si constata che il modulo elastico varia molto poco con la grandezza del grano, è indipendente dall'incrudimento e dai trattamenti termici, ecc.

Per le ghise il problema è molto più difficile, poiché la lega è eterogenea, tuttavia la variazione del modulo rispetto all'acciaio è da ritenersi dovuta alla quantità di grafite. Infatti Collaud, sperimentando su varie ghise colate in vari diametri (quindi con lamelle di varia distribuzione e lunghezza) e selezionando le barre con eguale percentuale di grafite, trova in esse lo stesso modulo ed inoltre, selezionando le barre aventi eguale resistenza a trazione, trova che il modulo elastico aumenta con l'aumentare del diametro e la durezza diminuisce.

Si giunge così ad una equazione che è stata oggetto di vari studi sperimentali successivi che hanno dimostrato la sua validità anche per altre leghe ferrose:

$$\frac{R}{E \cdot HB} = \alpha \quad (4)$$

ove:

$$\alpha = 15,5 \div 16 \times 10^{-6} \text{ per le ghise malleabili}$$

$$\alpha = 16 \div 16,5 \times 10^{-6} \text{ per le ghise sferoidali}$$

$$\alpha = 17 \times 10^{-6} \text{ per gli acciai}$$

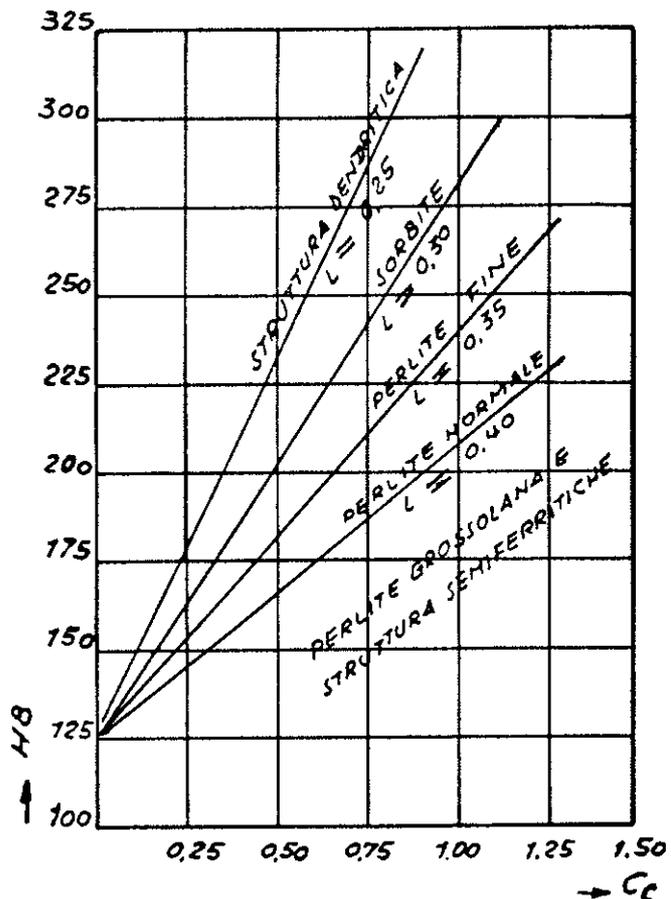


Fig. 151 - La durezza è funzione del C<sub>c</sub> e di L;  $HB = 125 + \frac{13,8 \cdot C_c}{L}$

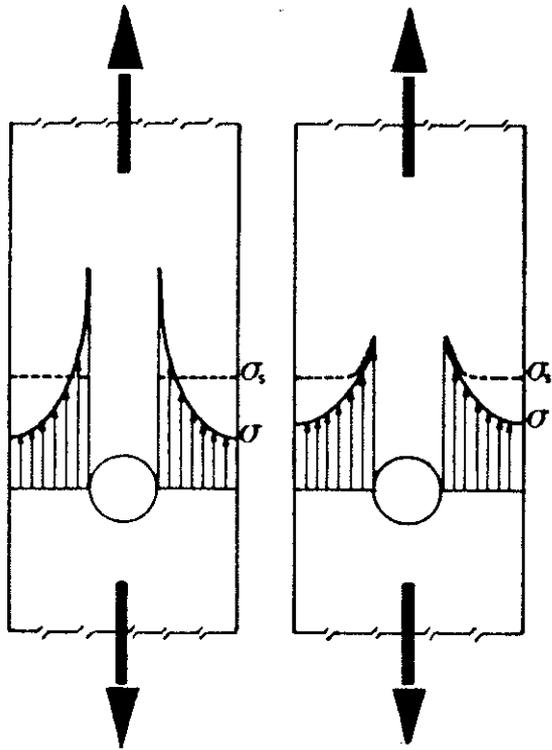


Fig. 152 - Livellamento delle punte di sollecitazione in un materiale duttile e tenace.

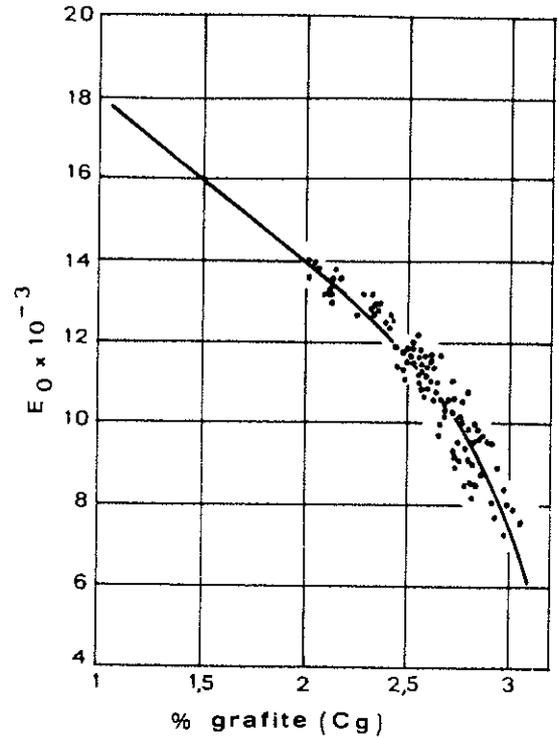


Fig. 154 - Relazione tra il modulo elastico ed il tenore in grafite per provette a diverso diametro.

Si noti come la variazione di  $\alpha$  assume il significato di coefficiente d'intaglio della grafite e come tale dipende, oltre che dalla forma della grafite, anche dalla capacità di deformazione della matrice: per le ghise grigie perlitiche  $\alpha = 9,5 \div 10,5 \cdot 10^{-6}$  per le stesse ghise ricotte (ferritiche)  $\alpha = 12 \div 14 \cdot 10^{-6}$ .

In quest'ultimo caso l'effetto dell'intaglio, sempre deleterio sulla duttilità, è sulla resistenza più attenuato dalla plasticità locale che abbassa il  $\sigma_{max}$  (fig. 152); plasticità che interverrebbe a modificare il raggio di curvatura all'estremità della lamella.

In definitiva, la resistenza alla trazione della ghisa grigia in rapporto alla matrice acciaiata sarà tanto più bassa quanto:

- Più elevato è l'effetto d'intaglio rappresentato dal rapporto  $\frac{\alpha \text{ acciaio}}{\alpha \text{ ghisa}}$
- Più elevato è l'effetto geometrico dovuto alla presenza della grafite e rappresentato dal rapporto  $\frac{E \text{ acciaio}}{E \text{ ghisa}}$

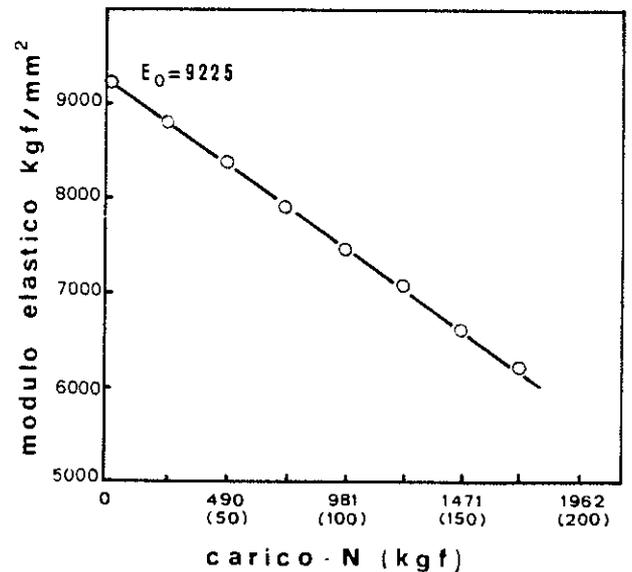
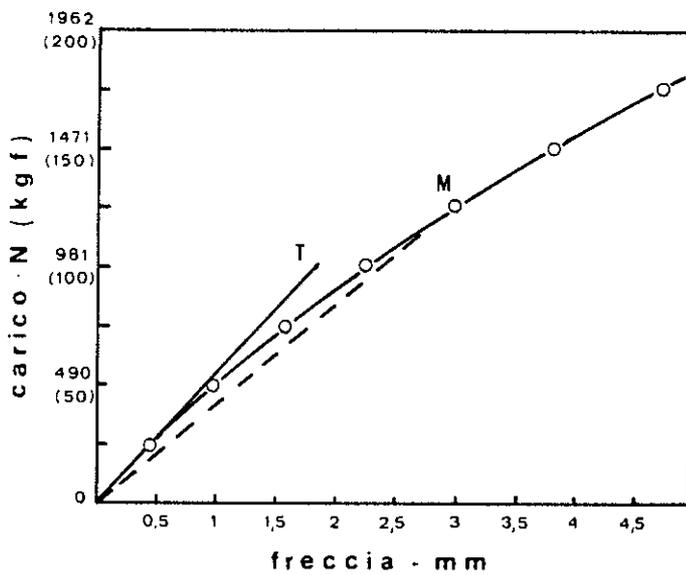


Fig. 153

La (4) mostra anche che è impossibile risalire alla resistenza a trazione di un getto di ghisa attraverso la sola durezza (come la (2) mostra per l'acciaio) senza conoscere il valore del modulo elastico. Detto modulo può essere determinato per:

$$\text{trazione } E = \frac{\frac{\Delta F}{s}}{\frac{\Delta L}{L}}$$

$$\text{flessione piana } E = \frac{L}{48 J} \cdot \frac{P}{f}$$

Recentemente si è perfezionato l'esame ultrasonico che consentirebbe di risalire al modulo su pareti anche di notevole spessore.

Per misurare la velocità del suono, si procede convogliando impulsi d'ultrasuoni (di frequenza  $1 \div 4$  MHz) che sono emessi da un trasduttore piezoelettrico e che producono delle sollecitazioni periodiche. Per le ghise si usano in genere due testine (procedimento per trasmissio-

ne). I tempi di percorso delle onde sonore longitudinali tra due piani paralleli è rilevato con un oscillografo di precisione, da cui (secondo Ziegler e Gerstner)

$$E = \left( \frac{\text{Velocità di propagazione}}{1,08 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Velocità propagaz.} + 35,59} \right)^2 (\text{kg/mm}^2)$$

Recentemente Canella e Monti<sup>6</sup> hanno ottenuto buoni risultati con misure per trasmissione in pareti da 300 mm (lingottiere), utilizzando come trasmettitore un trasduttore in titanio di bario di 0,25 mm di diametro, 0,4 MHz ed un ricevitore indipendente in metaniobato di piombo di 25 mm di diametro, 1 MHz.

La fig. 153 mostra come varia la velocità del suono al variare della densità. Un metodo ancora più semplice per risalire al modulo è quello dell'analisi chimica del carbonio grafítico.

La fig. 154 mostra l'alta significatività della correlazione, ma questa analisi è molto delicata e lunga ed un errore dello 0,1% esercita già una forte influenza sul modulo elastico.

D'altra parte il grado  $S_c$ , di più facile determinazione, esprime la quantità di eutettico e, quindi, approssimativamente anche la quantità di grafite.

## IL DIAGRAMMA DI COLLAUD

Negli anni '50 A. Collaud elaborò un diagramma, esprimendo tutte le caratteristiche delle ghise in funzione della matrice e della grafite o meglio della durezza (il cui valore è una caratteristica della matrice) e del grado di saturazione eutettica  $S_c$

$$S_c = \frac{C_t}{4,23 \frac{\text{Si} + \text{P}}{3}}$$

che attraverso la relazione seguente dà la percentuale di eutettico

$$192 S_c - 92\% = \text{percentuale di eutettico}$$

che è in relazione diretta con la percentuale di grafite.

Pertanto, Collaud costruì un grafico HB —  $S_c$  e riportò in esso i valori di 100 provette di trazione ricavate da barre di diametri diversi, colate con 34 tipi di ghisa, ottenendo così il grafico di fig. 155 ove si possono vedere delle bande che si dispongono secondo il diametro delle provette che esse rappresentano. Lo stesso diagramma risolve anche il problema della previsione. Ad esempio, quale sarà la resistenza di una barra di 30 mm di diametro, utilizzando una ghisa avente un grado di saturazione compreso tra 1,04 e 0,98?

La resistenza potrà variare tra  $150 \div 250$  N/mm<sup>2</sup> ( $15 \div 25$  kg/mm<sup>2</sup>) e la durezza tra 175 e 225.

Tuttavia, il principio di classificare le ghise sulla base della resistenza a trazione con una provetta di 30 mm di diametro, colata separatamente, generalmente accettato, ha condotto Collaud<sup>7</sup> a modificare il suo diagramma originale, ponendo in ascissa la resistenza (fig. 156)

della barretta standard, utilizzando la formula che lega il grado di saturazione alla resistenza minima nella barretta standard:  $R_{10} = 98,4 - 80 S_c$ .

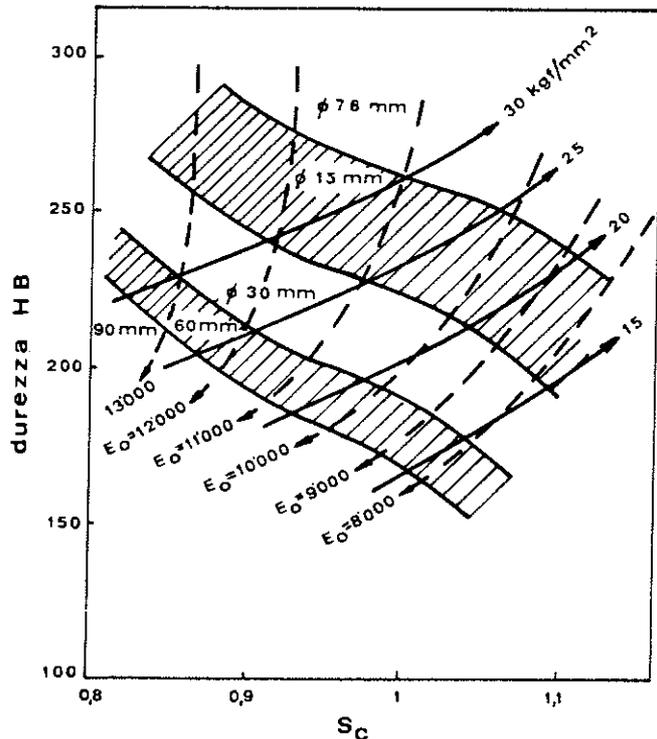


Fig. 155 - Diagramma di A. Collaud (7).

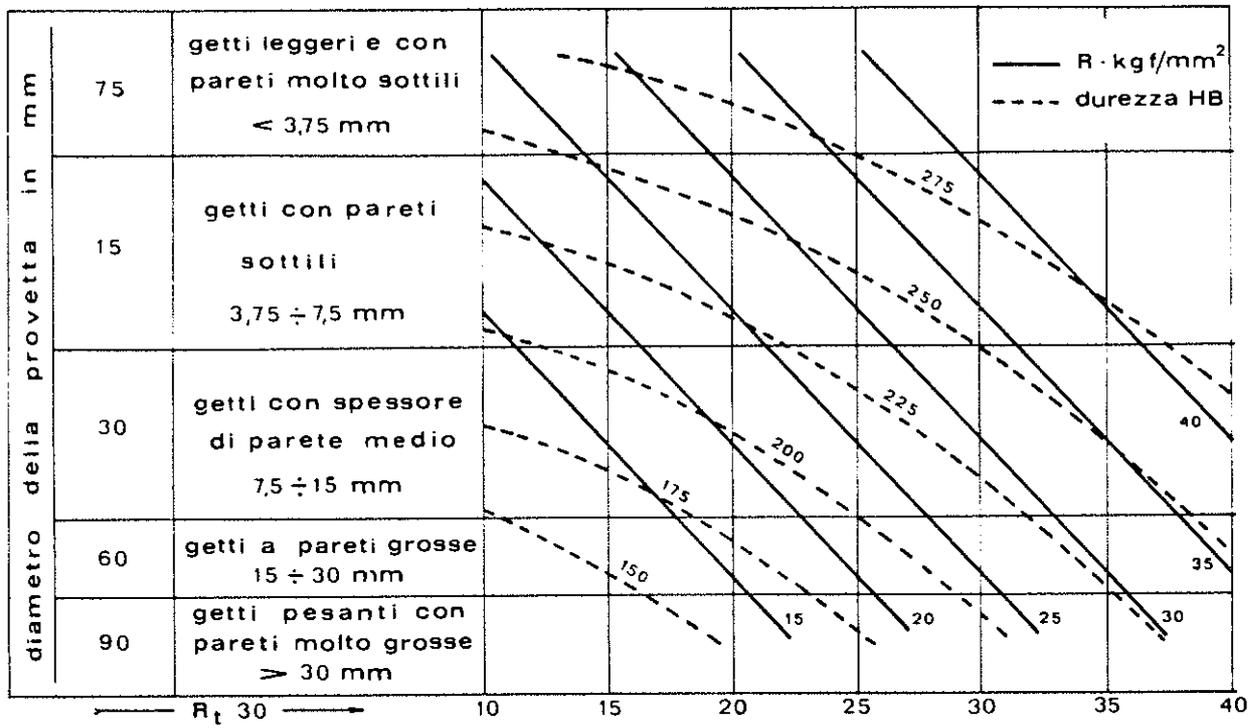


Fig. 156 - Diagramma di normalizzazione di A. Collaud.

Categorie di Massività	CLASSI DELLE GHISE						
	G 10	G 15	G 20	G 25	G 30	G 35	G 40
Ø 7,5 mm							
Ø 15 mm							
Ø 30 mm							
Ø 60 mm							
Ø 90 mm							
Sc	1.1	1.04	0.98	0.92	0.86	0.8	

Fig. 157 - Variazione della lunghezza e distribuzione della grafite in funzione della massività nelle ghise UNI 5007 (x 100 - ridotto a 65 : 1).

Categorie di Massività	CLASSI DELLE GHISE						
	G 10	G 15	G 20	G 25	G 30	G 35	G 40
φ 7,5 mm							
φ 15 mm							
φ 30 mm							
φ 60 mm							
φ 90 mm							
Sc	1,1	1,04	0,98	0,92	0,86	0,8	

Fig. 158 - Variazione della struttura della matrice in funzione della massività nelle ghise UNI 5007 (x 500 - ridotto a 325 : 1).

Pertanto, le resistenze rappresentano in questo caso le classi di leghe le cui composizioni danno sulla barretta standard determinate resistenze alla trazione; ciò comporta una dilatazione dei limiti di previsione entro cui possono variare le caratteristiche del getto.

I lavori di Collaud si sono imposti all'attenzione di vari Paesi; il suo diagramma raccoglie molti consensi, in quanto permette il collaudo mediante il semplice strappo della sola barretta standard di 30 mm di diametro, come è prevista dalla maggior parte delle Norme europee, ed in mancanza di questa, con una accurata prova Brinell, si può risalire alla resistenza del getto.

L'utilità di inserire un simile diagramma nella Norma è troppo evidente, basterà citare un caso pratico.

Il costruttore disegna un getto di spessore compreso tra 3,75 e 7,5 mm.

Se volesse, su detto getto, una resistenza di 340 N/mm<sup>2</sup> (35 kg/mm<sup>2</sup>), dovrebbe usare la ghisa G 30; tuttavia, il diagramma mostra che il getto potrebbe anche raggiungere una R<sub>t</sub> di 440 N/mm<sup>2</sup> (45 kg/mm<sup>2</sup>), cioè fuori scala, e pertanto ripiega su resistenze minori, ad esempio 270 N/mm<sup>2</sup> (28 kg/mm<sup>2</sup>), o ridimensiona il getto.

Amnesso che 270 N/mm<sup>2</sup> siano sufficienti, prescriverà sul disegno: G 25, ma non potrà prescrivere sul getto una durezza, ad esempio di 175 Brinell massima; infatti,

il limite di durezza massima consentita dal diagramma è di 285 Brinell. Se vorrà ghise più tenere, dovrà accontentarsi di resistenze minori, od ancora ridimensionare il suo getto.

A sua volta, il fonditore fornirà una ghisa che dia sulla barretta standard 250 N/mm<sup>2</sup> (25 kg/mm<sup>2</sup>) minimo ed il collaudatore verificherà se effettivamente la barretta darà R<sub>t</sub> superiore a 250 N/mm<sup>2</sup> e se il getto avrà una durezza minore di 285 Brinell.

Tutta la procedura di prescrizione, di esecuzione e di collaudo del processo produttivo dal progetto al getto verrebbe così notevolmente semplificata.

Tuttavia, la complessità dei fattori, che intervengono nella pratica di fonderia, non è sfuggita a Collaud; egli, infatti, afferma: « Il diagramma è valido per ghise aventi questi limiti analitici:

C = 3,02 ÷ 3,49%; Si = 1,21 ÷ 3%; Mn = 0,45 ÷ 0,94%; P = 0,28 ÷ 0,85%; S = 0,062 ÷ 0,13%

fuse al cubilotto acido con vento freddo ed inoculate con piccole quantità di Fe-Si al 98%. Variando queste condizioni, e cioè il trattamento metallurgico, ed impiegando certe materie prime, le curve del diagramma si possono spostare, tuttavia l'andamento delle curve e le relazioni che legano tra loro le condizioni di raffreddamento, la struttura e le caratteristiche metallurgiche non dovrebbero essere influenzate in modo apprezzabile ».

Queste limitazioni e l'indubbia praticità del metodo hanno indotto vari Paesi a controllare il diagramma di Collaud, utilizzando materie prime, metodi e tecniche in uso nel settore industriale nazionale.

Anche in Italia, su invito dell'Assofond e dell'AIM, 20 Fonderie italiane hanno inviato i risultati di resistenza e di durezza ricavati da spezzoni prelevati con la sezionatura di 51 getti, colati contemporaneamente a barrette isolate standard, verificando la validità del diagramma.

L'Ente Nazionale Italiano di Unificazione ha deciso, sulla base di questi lavori, di inserire nella Norma UNI

5007 una tabella e delle micrografie (figg. 157 e 158) che riproducono l'equivalente metallografico della Norma stessa.

Studi più recenti condotti al calcolatore, elaborando un gran numero di dati (W. Weis e K. Orth<sup>8</sup>), hanno confermato che, per risalire alla resistenza a trazione di un getto di ghisa (conoscendone la durezza), è indispensabile determinare un'altra proprietà: la quantità di C<sub>g</sub> oppure il S<sub>c</sub> o meglio ancora la composizione:

R = 22,84 — 0,13 HB — 6,5 C — 2,55 Si — 3,2 P (± 1,5).

## DUTTILITÀ E TENACITÀ DELLE GHISE

Il diagramma di A. Collaud ha messo un po' d'ordine nell'elaborazione, nel collaudo e nella prescrizione delle ghise grigie meccaniche, limitando a due le variabili indipendenti scelte tra le seguenti:

- Spessore medio del getto (S<sub>p</sub>)
- Grado di saturazione (S<sub>c</sub>)
- Durezza Brinell (sul getto) (HB)
- Resistenza a trazione (su barra Ø 30) (R<sub>30</sub>)
- Modulo elastico (E<sub>o</sub>), ecc.

In altre parole bastano due caratteristiche per valutare tutte le altre per mezzo del diagramma.

Il collaudo, che in genere si opera mediante una provetta standard che dà il solo carico di rottura a trazione, è sufficiente (se completato dalla durezza Brinell) a valutare un getto di ghisa sotto l'aspetto della resistenza, della rigidità, dell'elasticità.

Tuttavia, quando duttilità e tenacità diventano due caratteristiche non trascurabili, le Norme ISO R-185 propongono oltre alla barretta corta a diavolo (UNI 5007), anche una barretta lunga (barretta a scopo scientifico), per il rilievo, con carichi perfettamente assiali e con strumentazione di alta precisione, del diagramma sforzi-deformazioni.

Una prova alternativa di eguale precisione, ma che utilizza le normali attrezzature esistenti nei laboratori di fonderia, è la prova di flessione condotta su barretta grezza di 30 mm di diametro o meglio lavorata di 20 mm di diametro con distanza tra gli appoggi pari a 20 volte il diametro. In queste condizioni si ha:

$$\sigma'_{20} = 50,93 \frac{P}{d^2}; E_o = 3393 \cdot \frac{P}{d \cdot F_e} \text{ da cui}$$

$$0,015 \frac{E_o}{\sigma'_{20}} = \frac{d_{20}}{F_{e20}} = \frac{d_x}{F_{ex}}$$

cioè le frecce sono proporzionali ai diametri (per una distanza tra gli appoggi eguale a 20 d).

Inoltre, una freccia di 1 mm corrisponde ad allungamento percentuale per trazione di

$$\frac{100 \cdot \sigma}{E} = \frac{0,015}{20} \cdot 100 = 0,075\%$$

Se si esprime il diagramma di flessione sotto forma

$$\frac{\sigma'}{F_t} = f(\sigma')$$

si ottengono curve complesse che permettono di analizzare il comportamento meccanico delle ghise.

Due esempi di analisi delle curve sforzi-deformazioni nella prova di flessione sono sintetizzati nelle figg. 159-160-161.

In particolare il diagramma A mette in evidenza con il suo andamento tre domini:

- Il primo tratto denuncia la costanza del rapporto  $\sigma'/F_t$  sino ad un carico di 103 N/mm<sup>2</sup> (10,5 kg/mm<sup>2</sup>) che corrisponde ad una freccia elastica F<sub>e</sub> di 1 mm, questo tratto rientra nel dominio elastico ove vale la relazione

$$F_e = K \frac{\sigma'}{E_o} = 1,34 \frac{10,5}{E_o} = 14,07/E_o \quad (5)$$

è evidente che il modulo elastico è 14,07 t/mm<sup>2</sup> e che 103 N/mm<sup>2</sup> (10,5 kg/mm<sup>2</sup>) rappresenta il limite di proporzionalità.

- Il secondo tratto della curva denuncia il dominio delle deformazioni pseudo-elastiche ( $\varphi_e$ ). Questo tratto di curva ha per equazione

$$\frac{\sigma'}{F_t} = \frac{E_e}{K} - \varepsilon \sigma' \quad (6)$$

ove  $\varepsilon$  è la pendenza e E<sub>e</sub>/K è l'intercetta sull'asse delle ordinate, siccome E<sub>e</sub>/K = 10,75 ne consegue che E<sub>e</sub> = 14,4 t/mm<sup>2</sup>.

Dalla (5) e (6) si ottiene che  $\varepsilon = \frac{E_e \cdot F_p}{K \sigma' \cdot F_t} - \frac{E_e}{K}$

Se nella (5) si mette in evidenza  $\frac{E_e}{K}$ , si ottiene:

$$\frac{\sigma'}{F_t} = \frac{E_e}{K} - \frac{E_e \cdot F_p}{K \sigma' \cdot F_t} \quad (\sigma') = \frac{E_e}{K} (1 - \eta \cdot \sigma')$$

Mentre l'acciaio e la ghisa sferoidale hanno due modi di deformazione, uno esclusivamente elastico e l'altro esclu-

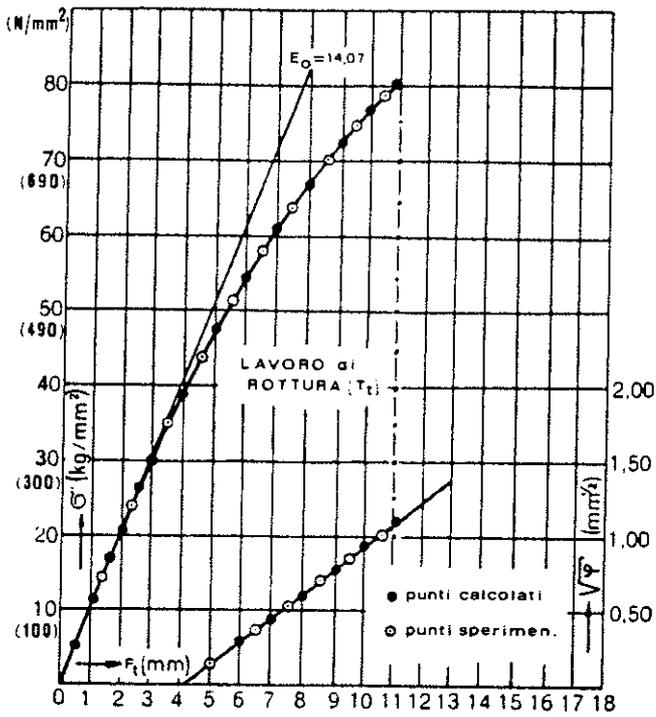


Fig. 159 - Curva di flessione della ghisa G 35.

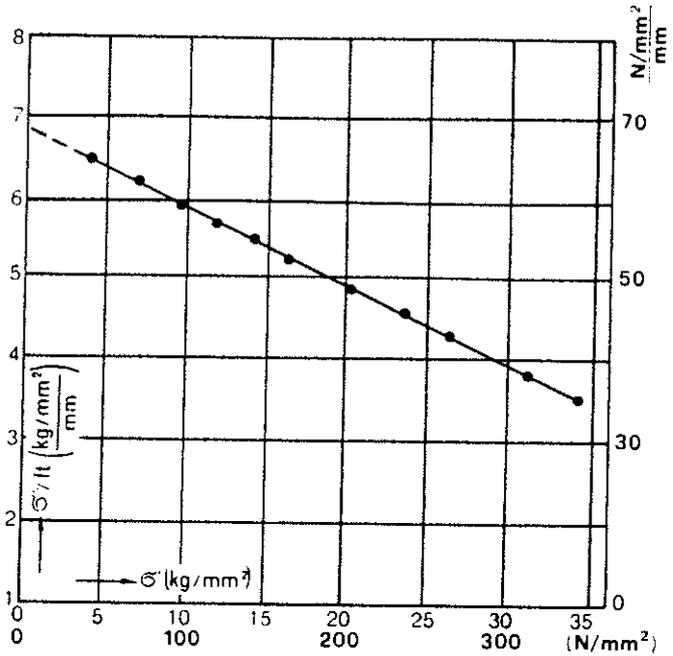


Fig. 161 - Analisi della curva di flessione della ghisa G 15 ad alto carbonio (?).

sivamente plastico (fig. 162), la ghisa grigia presenta un dominio di deformazioni pseudo-elastiche ( $\varphi_e$ ) caratterizzate dall'apparire dei cicli d'isteresi. Si ritornerà sull'argomento, per il momento basta anticipare che esiste una legge lineare che lega l'inclinazione dei cicli d'isteresi alla tensione massima applicata (fig. 163).

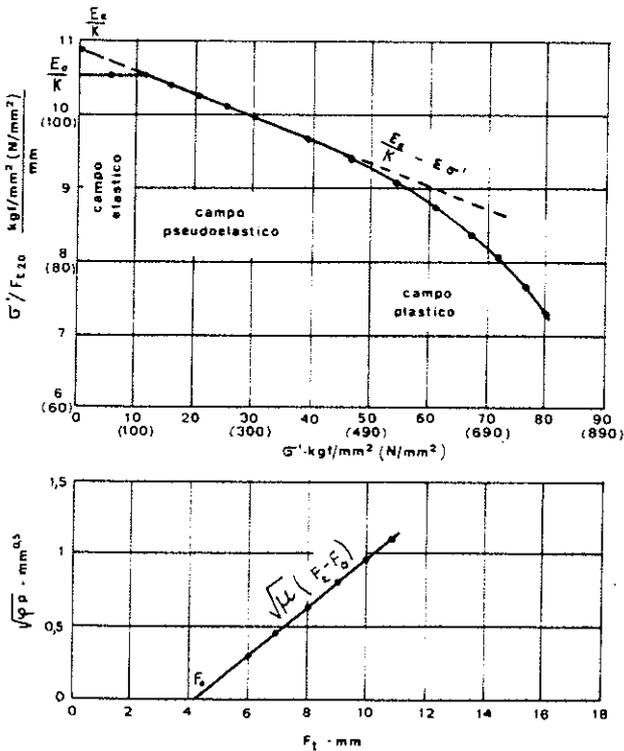


Fig. 160 - Analisi della curva di flessione della ghisa G 35.

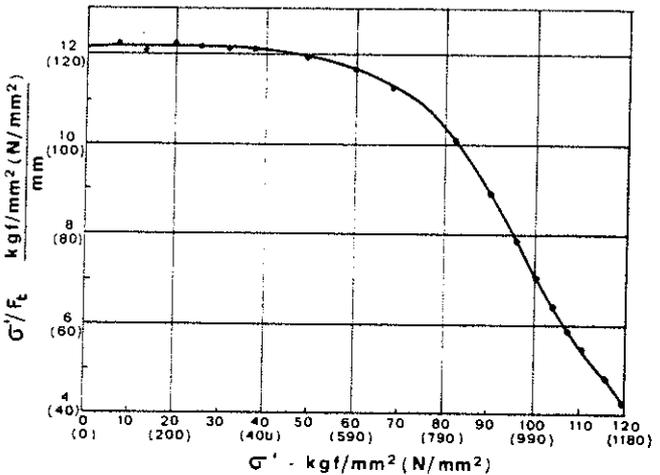


Fig. 162 - Variazione del rapporto  $\sigma'/F_t$  in funzione di una ghisa perlitica a grafite sferoidale.

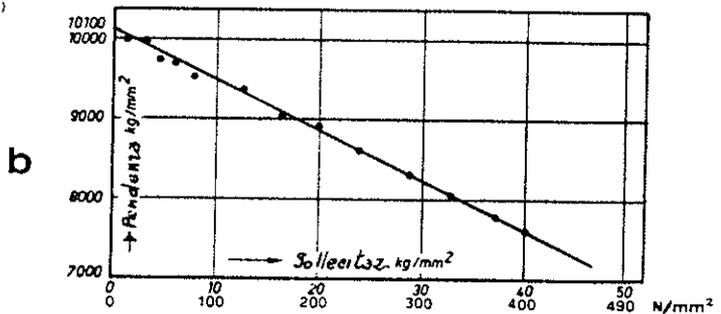


Fig. 163 - Pendenza di cicli d'isteresi al variare del carico applicato (?).

Si deve, pertanto, ammettere che questa legge caratterizza l'apparizione delle deformazioni pseudo-elastiche dovute all'azione d'intaglio esercitato dalla forma lamellare della grafite.

Questo effetto d'intaglio è un dato strutturale indipendente dalla tensione, cioè per una determinata ghisa, costante al variare della tensione, è il caso di

$$\eta = \frac{F_p}{\sigma' \cdot F_t} \quad (7)$$

Se si osserva la fig. 160 A tra 103 N/mm<sup>2</sup> e 395 N/mm<sup>2</sup> (10,5 e 40,45 kg/mm<sup>2</sup>), si nota infatti la costanza di questo coefficiente  $\eta = 0,0026$  ( $\epsilon = 0,028$ ).

Le frecce pseudo-elastiche  $\varphi_e$  sono deducibili dalla formula (7)

$$\varphi_e = \eta \cdot F_t \cdot \sigma'$$

Si noti anche che al di sopra di 103 N/mm<sup>2</sup>  $F_p$  e  $\varphi_e$  sono praticamente eguali, cioè assimilabili alle frecce pseudo-elastiche dovute a deformazioni più o meno reversibili d'isteresi.

Al di sopra di 395 N/mm<sup>2</sup> (40,45 kg/mm<sup>2</sup>) le frecce plastiche totali  $F_p$  cominciano a crescere più rapidamente che le frecce pseudo-elastiche  $\varphi_e$  in funzione della tensione. Delle deformazioni puramente plastiche ( $\varphi_p = F_t - \varphi_e$ ) hanno inizio.

Se si costruisce il diagramma  $\sqrt{\varphi_p}$  in funzione della freccia totale, si ottiene la curva B di fig. 160 avente per equazione

$$\sqrt{\varphi_p} = \sqrt{\mu} (F_t - F_0)$$

da cui  $\varphi_p = \mu (F_t - F_0)^2$

ove  $\mu$  è la pendenza e  $F_0$  l'intercetta sull'ascissa corrispondente al limite pseudo-elastico 395 N/mm<sup>2</sup> (40,45 kg/mm<sup>2</sup>).

Il coefficiente  $\mu$  caratterizza il comportamento plastico, cioè l'aumento della freccia plastica in funzione della freccia totale. La curva si allontana (dalla retta) quando ci si avvicina alla rottura. Per quanto si è detto nella ghisa grigia, la freccia totale è la somma di tre valori

$$F_t = F_e + \varphi_e + \varphi_p = \frac{K\sigma'}{E} + \eta \cdot F_t \cdot \sigma' + \mu (F_t - F_0)^2$$

Diverso è il comportamento della G 15 ( $S_c = 1,05\%$   $C = 3,48$ ), nella quale non si manifesta né il dominio elastico né il dominio plastico (fig. 161), ma solo il dominio pseudo-elastico. Detto comportamento è generale per le ghise ad alto carbonio e silicio. In queste ghise due azioni si esercitano; la forte quantità di grafite provoca rottura prematura, mentre il Si (e il P) aumentano il limite elastico della matrice, ne consegue che la rottura avviene prima dell'apparire di deformazioni esclusivamente plastiche. Diverso ancora è il comportamento di una ghisa perfettamente ferritica ove non è possibile calcolare né  $\eta$  né  $\mu$ , in quanto le deformazioni plastiche appaiono già all'inizio delle tensioni (fig. 164).

Anche l'effetto della massività può essere evidenziato: esaminando la fig. 165 (relativa alla G 20:  $C = 4\%$ ), appare evidente che quando la velocità di raffreddamento diminuisce, tutto evolve nel senso di una grafitizzazione più pronunciata: diminuzione di  $E_0$ , diminuzione del dominio delle tensioni o deformazioni elastiche, aumento del valore del fattore d'intaglio (aumento dell'inclinazione della porzione pseudo-elastica), eliminazione progressiva della duttilità, ecc.

Se ne conclude che un esame particolareggiato della prova di flessione è sufficiente per esprimere un giudizio completo sul comportamento meccanico delle ghise: sia sulle proprietà di resistenza ( $\sigma'$ ), sia sulle proprietà di rigidità ( $E_0$ ), sia sulle proprietà di duttilità ( $F_p$ ), sia sulle proprietà di tenacità ( $T_1$ ).

Tuttavia questa prova, pur di facile esecuzione in laboratorio, è per il fonditore poco pratica (necessità di colare in verticale, barrette molto lunghe, necessità di disporre di numerose staffe particolari, difficoltà di stampaggio, ecc.), per cui la determinazione sperimentale e routinaria della tenacità è fatta più semplicemente con una prova di resilienza che risulta più economica di quella condotta sull'acciaio, nel senso che si ha un solo modo di rottura; che essa sia d'origine statica o dinamica, la rottura della ghisa grigia è prevalentemente intercristallina.

L'utilizzo d'un intaglio nella provetta è dunque superfluo.

La proposta ISO/TC 25 suggerisce per questa prova una provetta lavorata cilindrica di 20 mm di diametro ( $\pm 0,5$  mm) di lunghezza 120 mm ( $\pm 1$  mm) ricavata dalla barretta grezza di 30 mm di diametro (UNI 5007).

Per limitare la dispersione, si prescrive che l'energia disponibile del pendolo sia solo leggermente in eccesso nei confronti del lavoro di rottura, pertanto il pendolo deve avere le seguenti caratteristiche:

- Energia disponibile: 5 ÷ 6 kgm.
- Distanza tra gli appoggi: 100  $\pm$  1 mm.
- Velocità d'impatto: 3,6 ÷ 4,2 m/s.

Si opera su un minimo di 4 provette e si fa la media m. La resilienza si esprime in lavoro per unità di volume e

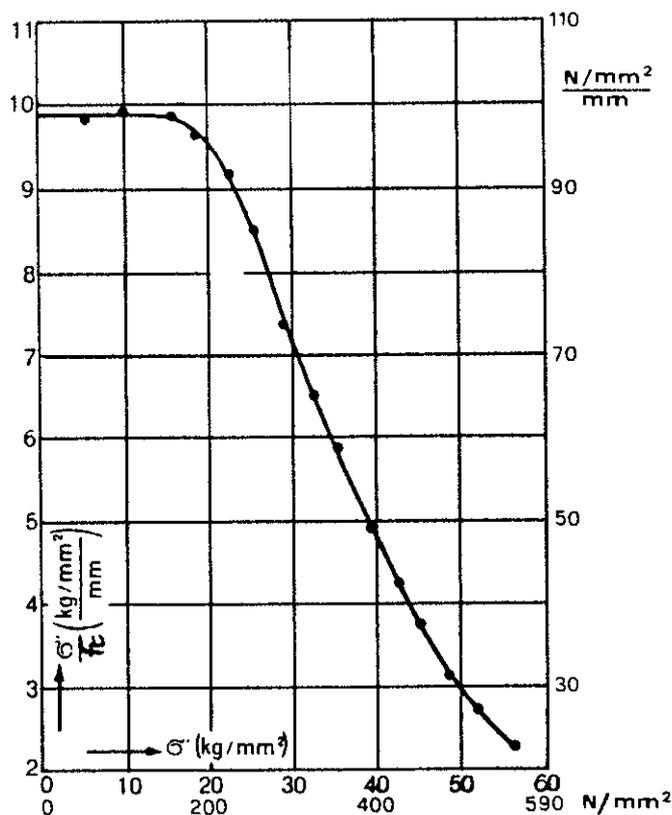


Fig. 164 - Analisi del diagramma di flessione di una ghisa ferritizzata (G 30).

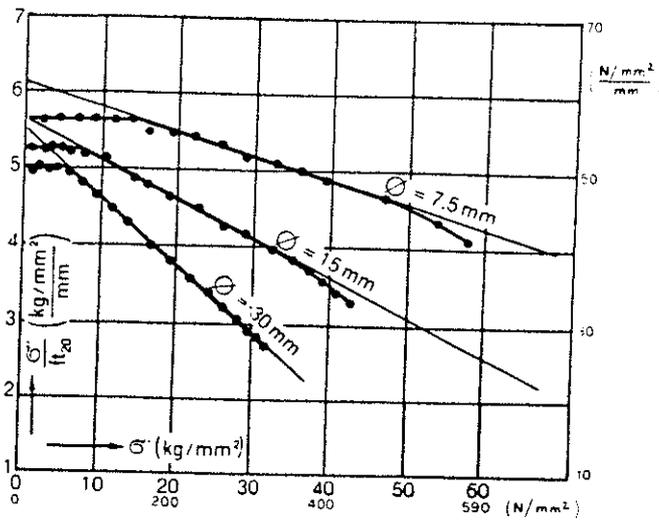


Fig. 165 - Effetto della massività sulla ghisa G 20, messa in evidenza dall'analisi dei diagrammi di flessione (9).

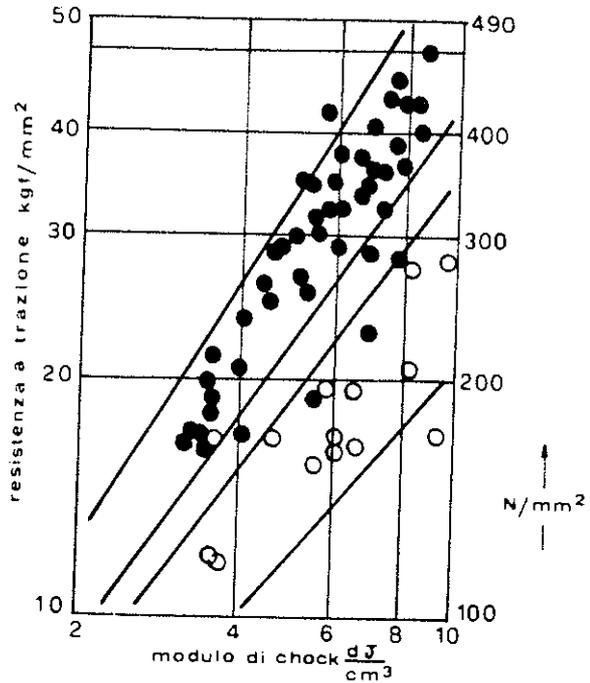


Fig. 166 - Relazione tra resistenza a trazione e modulo di shock in ghise perlitiche (●) e ghise ferritizzate mediante ricottura (○).

cioè con il modulo di shock:  $m/V$  ( $\text{kg} \cdot \text{cm}/\text{cm}^3$ ) che consente il confronto tra barrette ridotte (con lunghezza utile = 5 diametri) nel caso di tenacità elevate.

La fig. 166 mostra la relazione in coordinate doppio-logaritmiche tra resistenza a trazione ed il modulo di shock di ghise perlitiche e ferritiche. Le rette danno il lavoro di rottura in funzione della resistenza a trazione ed analiticamente si esprimono con:

$$\log. MC = Z \log. R - 0,7 \text{ e cioè}$$

$$Z = \frac{\log. MC + 0,7}{\log R} = \text{indice di tenacità (secondo A. Collaud }^{10}).$$

Il fattore Z può essere considerato come una vera base di riferimento per la nozione di qualità della ghisa. Nel caso delle ghise grigie (UNI 5007) i valori di Z sono compresi tra 0,9 e 1,05. Altri indici di qualità, particolarmente utilizzati per confrontare le varie ghise, sono:

— Grado di normalità: (Patterson <sup>11</sup>)

$$\frac{R_{30}}{100-80 S_c} = RG \text{ (variabile tra 0,7 e 1,3)}$$

— Durezza relativa: (Patterson <sup>11</sup>)

$$\frac{HB_{30}}{530-344 S_c} = HG \text{ (variabile tra 0,7 e 1,3)}$$

— Indice di qualità:

$$\frac{RG}{HG} = Qi \text{ (variabile tra 0,8 e 1,2).}$$

RG e HG indicano di quanto i valori trovati sulla barretta standard si allontanano (in più od in meno) dalla media, mentre Qi indica che il valore qualitativo della ghisa è tanto più elevato quanto più, a parità di resistenza, è bassa la durezza. Ne consegue anche che più elevate sono la duttilità e la tenacità.

## CAPACITÀ DI SMORZAMENTO

Un'altra importante caratteristica della ghisa è la sua alta capacità di smorzamento. Un diapason di acciaio, una volta percosso, vibrerà a lungo, mentre uno di ghisa vibrerà per periodi molto più brevi. Le vibrazioni sono smorzate, sempre più efficacemente procedendo via via nell'ordine verso ghise a bassa resistenza. Nel processo di smorzamento l'energia è trasformata in calore per attrito interno. Quindi, quando è assorbita energia per attrito interno nell'applicazione di sforzi ciclici (ripetuti) che non provocano sensibile deformazione plastica, il diagramma sforzo-deformazione non può essere effetti-

vamente una linea retta e si deve verificare una piccola deformazione permanente, poiché il materiale non può comportarsi in maniera perfettamente elastica, nel senso di seguire esattamente la legge di Hooke della proporzionalità tra sforzo e deformazione.

La capacità di smorzare le vibrazioni, cioè assorbire energia, è una caratteristica spiccata della ghisa (fig. 167) e può essere determinata dal rapporto tra energia dissipata (area FCDEF) e l'energia elastica massima nel corso di un ciclo (O DL, fig. 168).

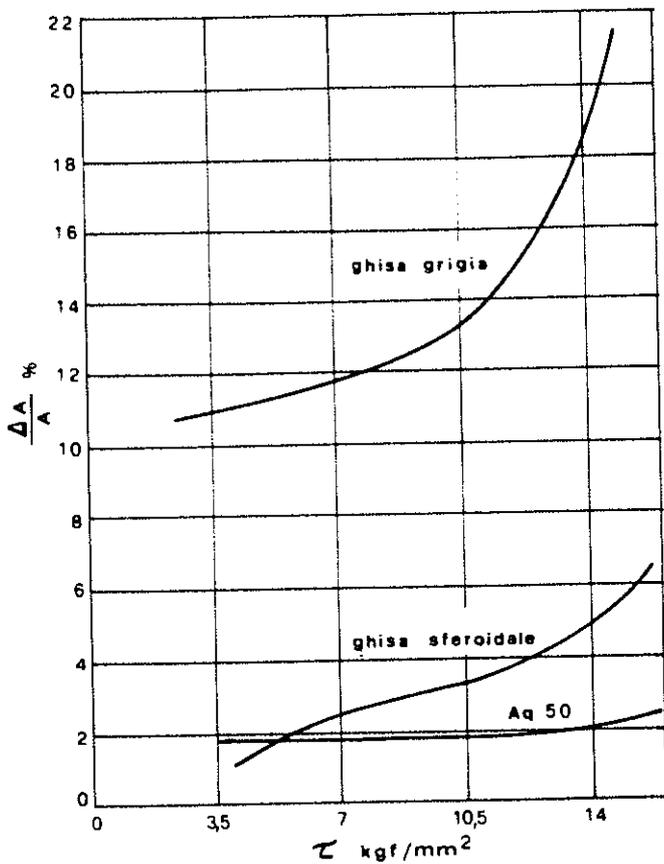


Fig. 167 - Capacità di smorzamento alla torsione.

$$\text{Capacità di smorzamento} = \Psi = \frac{\Delta A}{A}$$

Si dimostra anche che se la variazione relativa di energia è piccola

$$\Psi = -2\delta$$

ove  $\delta$  è il decremento logaritmico, esso è equivalente alla metà dell'aliquota di energia dissipata in un'oscillazione:  $\frac{\Delta A}{2A}$  ove  $\Delta A$  è in sostanza l'energia fornita alla materia per mantenere una vibrazione forzata.

I massimi dell'oscillazione smorzata stanno sopra una curva esponenziale  $x = e^{-\delta t}$

Il moto tende alla quiete asintoticamente, l'ampiezza di oscillazione decresce con progressione geometrica ed

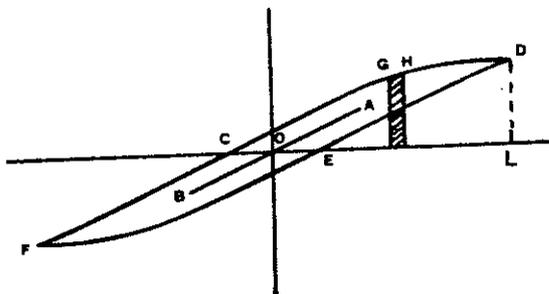


Fig. 168 - Ciclo d'isteresi.

il rapporto fra due ampiezze consecutive risulta:

$$\frac{X_{n-1}}{X_n} = e^{-\delta}; \ln\left(\frac{X_n}{X_{n+1}}\right) = \delta = \text{decremento logaritmico.}$$

Il decremento è determinabile graficamente dall'oscillogramma della vibrazione smorzata, il cui moto è rappresentato dalla classica sinusoide ad ampiezze decrescenti (fig. 169). Il decremento logaritmico dipende dal tipo di sollecitazione, cresce con l'aumentare della sollecitazione applicata, per cui non vi è un valore di determinato  $\delta$  per ogni materiale e nel confronto di materiali diversi occorre scegliere a quale sollecitazione effettuare la misura. Prove di confronto condotte da G. Cola<sup>12</sup> nelle stesse condizioni, cioè in compressione  $\pm 70 \text{ N/mm}^2$  ( $\pm 7 \text{ kg/mm}^2$ ), hanno messo in evidenza che nelle ghise perlitiche grigie il decremento logaritmico  $\delta$  è tanto più grande quanto più bassa è la resistenza a trazione (fig. 170).

Si ricorda che nelle stesse condizioni, l'acciaio al carbonio, allo stato grezzo di fusione ha, a parità di R, un decremento cinque volte più piccolo della ghisa.

Per smorzare le vibrazioni e, quindi, ridurre l'ampiezza di risonanza, è in genere richiesta un'alta capacità smorzante.

L'ampiezza delle sollecitazioni vibrazionali è regolata dalla capacità di smorzamento, cioè dalla capacità del materiale ad assorbire tali sollecitazioni ed a dissipare l'energia sotto forma di calore. Tuttavia, si commetterebbe un errore nel pensare che la capacità di smorzamento limiti le ampiezze di vibrazione in tutte le circostanze: al di fuori del fenomeno di risonanza, l'influenza della capacità di smorzamento sull'ampiezza è modesta.

La ghisa, che ha un'alta capacità di smorzamento ed un limite di fatica mediocre, può dunque avere, in condizioni di servizio determinate, una durata più grande e comportare rischi minori nei confronti di altri materiali a limite di fatica più elevato, ma con decremento più basso (vedi: alberi a gomiti).

I basamenti ed i supporti delle macchine utensili in ghisa consentono di assorbire la brusca variazione d'energia che si manifesta al momento dell'asportazione del truciolo e le vibrazioni che potrebbero nuocere alla precisione della lavorazione.

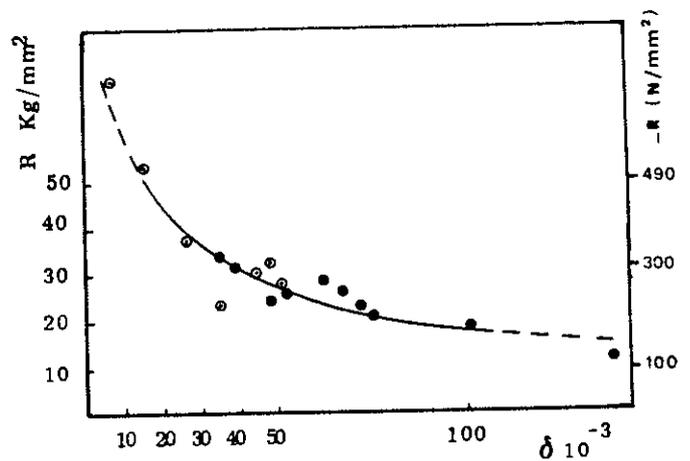


Fig. 170 - Relazione fra decremento ( $\delta$ ) e resistenza a trazione (R) nella ghisa grigia.

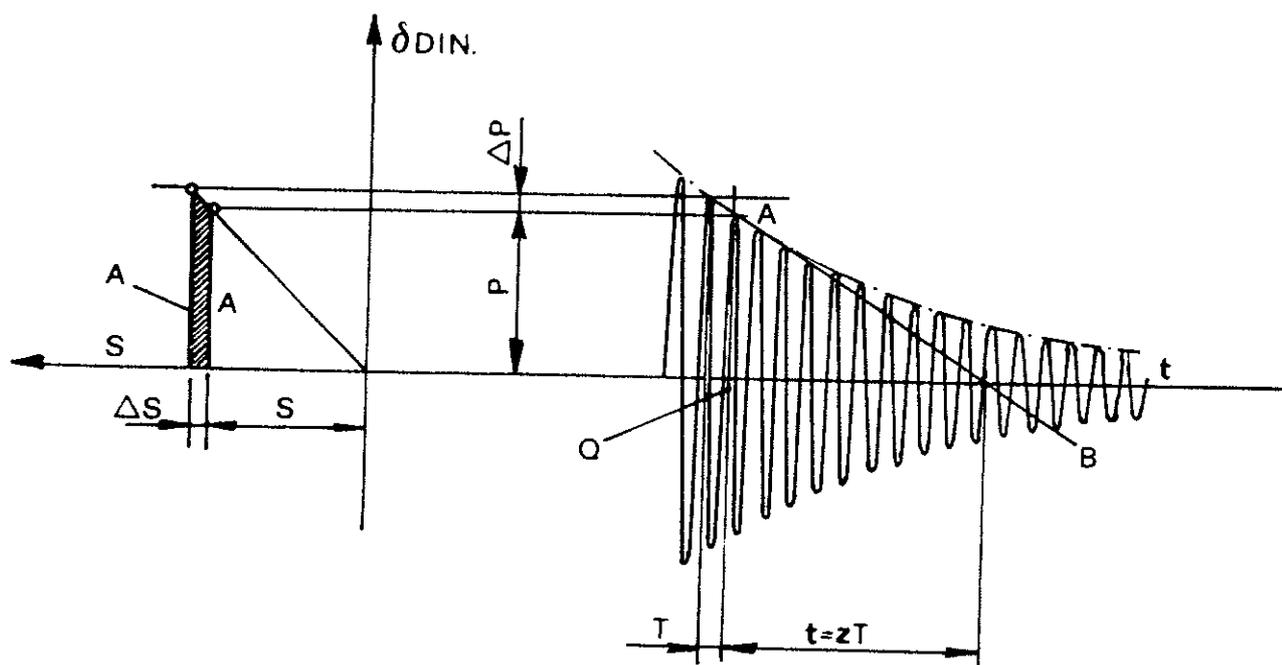
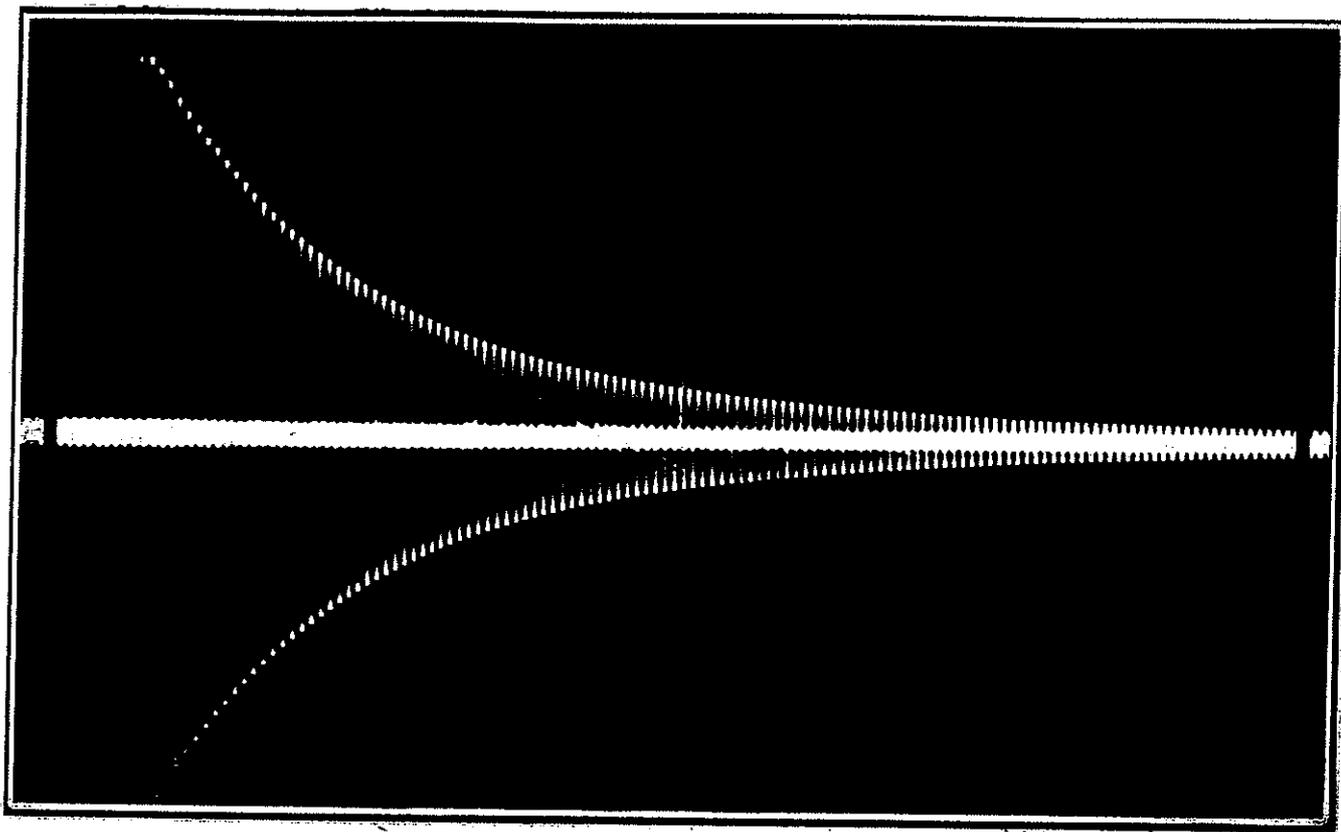


Fig. 169 - Determinazione grafica dello smorzamento. La foro è relativa alla ghisa grigia G 15 ( $1 \text{ mm} = 17,7 \text{ kg/cm}^2$  e  $1 \text{ mm} = 0,004 \text{ s}$ ).

## CAPACITÀ DI ADATTAMENTO

Il modulo elastico all'origine determinato staticamente (fig. 159), essendo la tangente alla sollecitazione zero della curva sforzi-deformazioni è il massimo valore assegnato, inoltre nelle ghise E non è solo funzione della momentanea sollecitazione, ma anche di quelle precedenti, nelle figg. 171 e 172 è illustrato questo comportamento in confronto dell'acciaio per carichi crescenti (diversa pendenza dei cicli d'isteresi) ed in fig 173 il

confronto è condotto a carico costante fra il 1° ciclo ed il 15° per una ghisa G 30, ove si nota che la deformazione residua nel primo ciclo è molto superiore a quella del 15°; cioè la ghisa diventa più elastica.

La legge, con cui varia la deformazione residua (ad un certo carico) al variare del numero dei cicli, consente di valutare più razionalmente la rigidità e l'elasticità della ghisa.

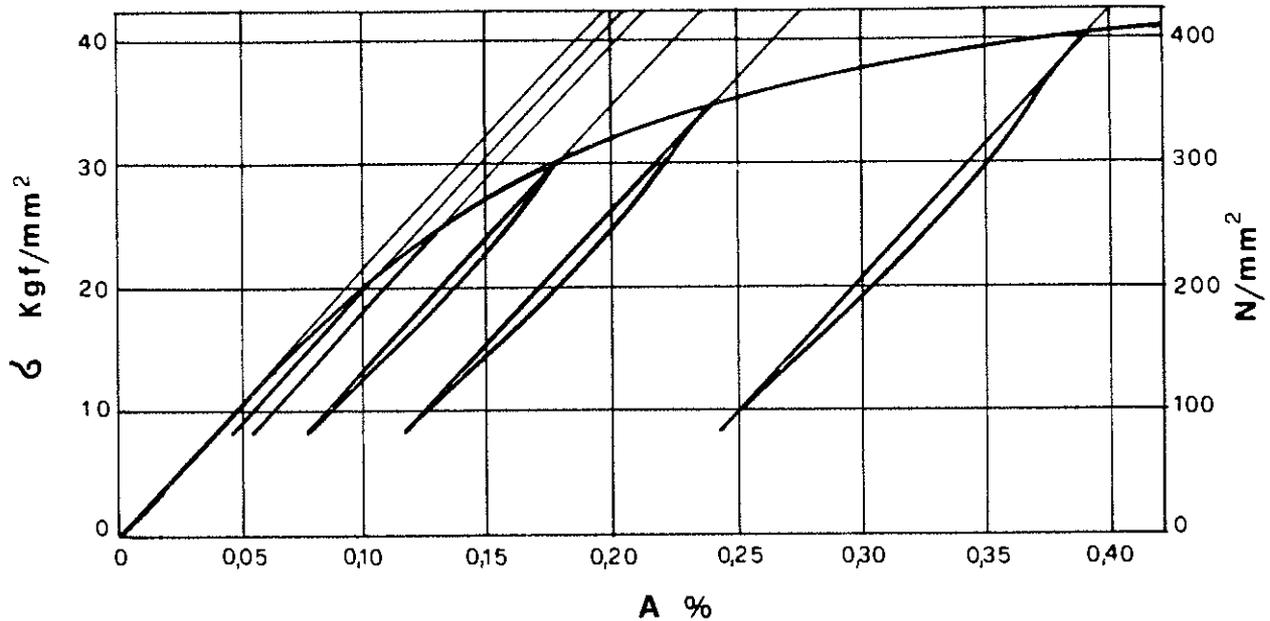


Fig. 171 - Diagramma di trazione di un'acciaio e determinazione di  $E_0$ .

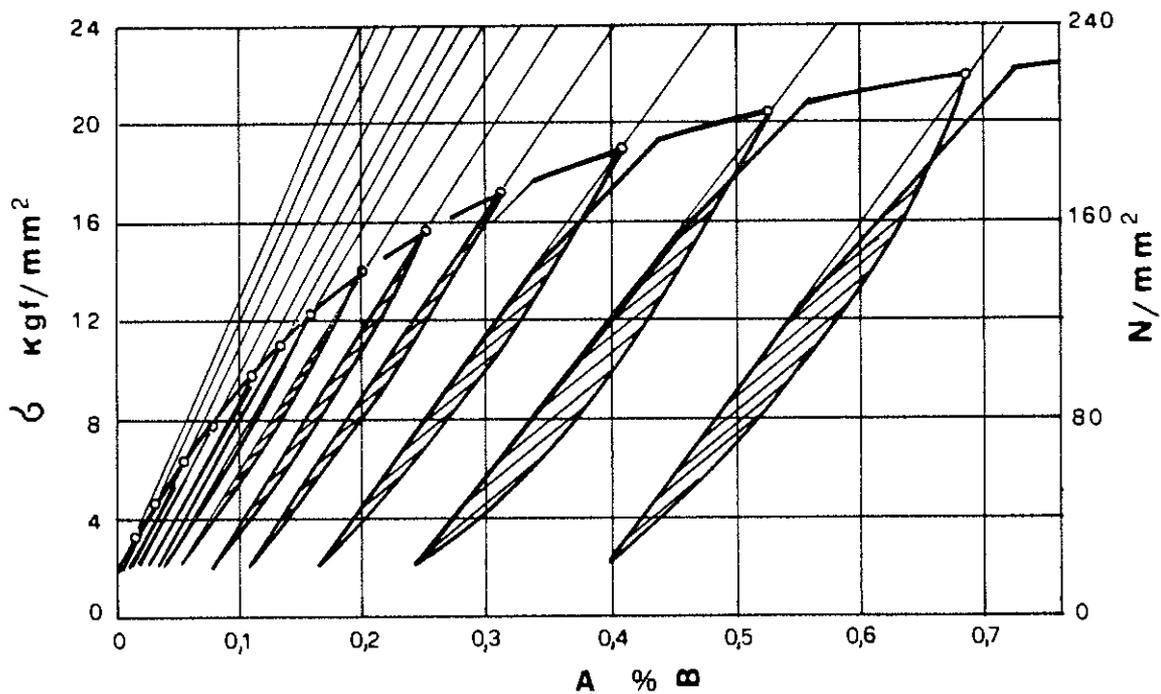


Fig. 172 - Diagrammi di trazione della ghisa grigia e determinazione di  $E_0$ .

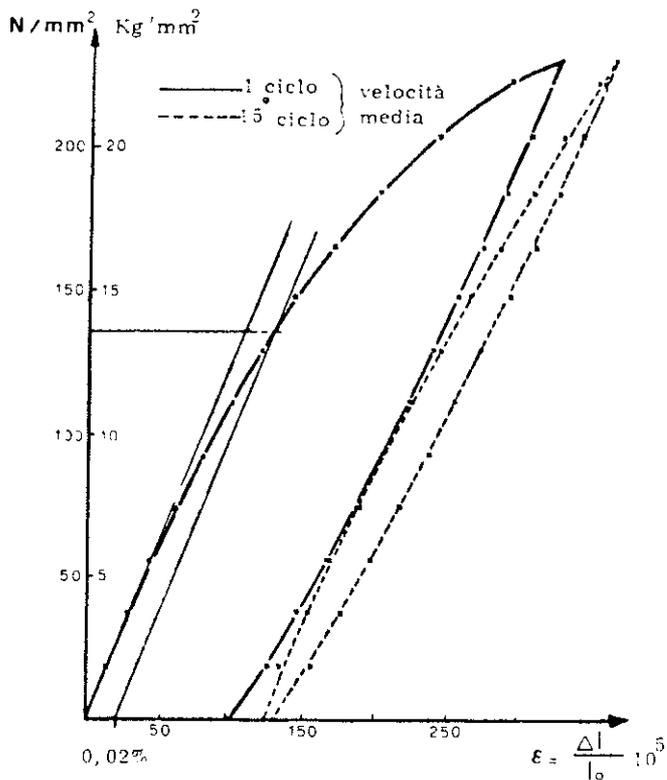


Fig. 173

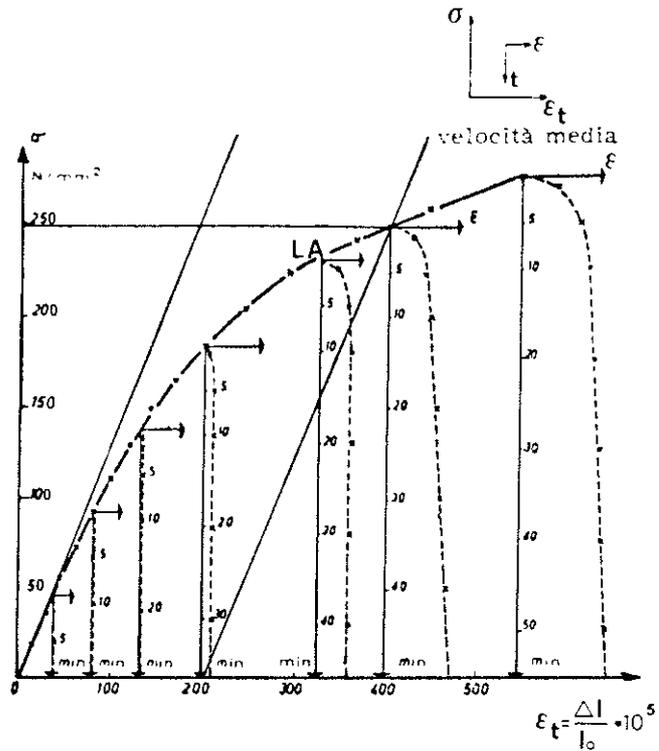


Fig. 175

Se lo sforzo massimo applicato nel corso delle sollecitazioni successive resta inferiore ad un certo valore critico, la ripetizione ciclica, di carico e scarico, ha una forma stabile, cioè l'isteresi si stabilizza ed il modulo cessa di essere convenzionale, per cui la deformazione residua diminuisce a poco a poco e finisce per annullarsi dopo un numero di cicli variabile con l'intensità dello sforzo massimo e con il tipo di ghisa.

In fig. 174 si evidenzia un fenomeno di adattamento da isteresi. L'azione degli sforzi ripetuti inferiori al limite di adattamento  $L_A$  provocano, dunque, delle deformazioni che assumono progressivamente un carattere d'elasticità. Per carichi superiori a  $L_A$  anche se il ciclo si stabilizza, la deformazione residua non si annulla più. Il limite di adattamento  $L_A$  varia da un minimo di  $0,6 \cdot R$

per una ghisa G 10 ad un massimo di  $0,75 \cdot R$  per una ghisa G 35. Inoltre, come risulta dalla fig. 175, per carichi inferiori od eguali a  $L_A$ , bastano  $4 \div 5$  cicli per provocare l'adattamento.

La ghisa *adattata* è un materiale stabile e ben definito ed il limite  $L_A$  consente di conferire alla ghisa proprietà elastiche acquisite e ben definite valutabili a circa 4 volte quelle dello stato non *adattato*. La velocità, con cui è operato l'adattamento, ha una certa influenza sulla deformazione totale, in quanto il tempo di sosta a carico costante influisce sul valore della deformazione (scorrimento a temperatura ambiente). La fig. 175 mostra che al carico  $L_A$  la deformazione totale aumenta sino a 5 min di sosta, mentre si stabilizza e resta pressoché uguale anche per soste di 10, 20 e 30 min, ecc., se invece si supera  $L_A$ , la deformazione aumenta con l'aumentare del tempo di sosta del carico. E. Plenard e J. Plessier hanno confermato quanto segue:

- $L_A$  può essere assunto come limite elastico acquisito
- $L_A$  coincide con il limite di scorrimento a temperatura ambiente.

Se è necessario limitare la deformazione residua totale, occorre operare l'adattamento velocemente.

Ne consegue la possibilità di migliorare la rigidità dei pezzi in servizio, ad esempio sottoponendo le parti più sollecitate ad un certo numero ( $8 \div 10$ ) di carichi e scarichi di flessione; questi non presenteranno in esercizio deformazioni permanenti sino al valore del carico cui il getto è stato sottoposto nel corso delle alternanze; inoltre lo stabilizzarsi di deformazioni (misurabili con estensimetri) nel corso dei cicli di adattamento è un indice di qualità del getto, in quanto si ha la sicurezza che il getto sopporterà in esercizio la sollecitazione alla quale è stato eseguito l'allenamento.

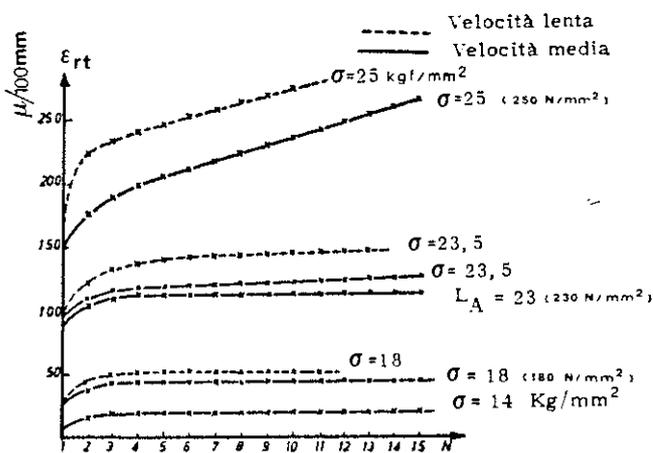


Fig. 174 - Adattamento da isteresi (1).

## RESISTENZA A FATICA

L'effetto di intaglio dovuto alla grafite, così deleteria per la duttilità e la resistenza a trazione, si manifesta anche nella resistenza a fatica; questo effetto, già valutato attraverso l'indice  $\alpha''$ , è direttamente proporzionale alla radice quadrata della lunghezza ed inversamente proporzionale alla radice quadrata del raggio di curvatura. Le concentrazioni di sforzi delle sollecitazioni alternate attraverso i ponti metallici, provocate dall'addensamento delle linee di distribuzione degli sforzi, unitamente all'effetto di intaglio che ne deriva, possono superare il limite di fatica nominale della matrice e provocare rotture premature. Ne consegue che nelle ghise grigie la resistenza a fatica è tanto più bassa quanto più lunghe sono le lamelle (fig. 176). Ikawa ed Ohira hanno dimostrato che il limite di fatica è inversamente proporzionale alla radice quadrata della lunghezza  $t$  della lamella (fig. 177) ed è tanto più basso quanto minore è il raggio di curvatura  $\rho$  terminale e quanto maggiore è il fattore di riduzione  $f$  dovuto all'ampiezza dei ponti metallici (figg. 178 e 179).

Kuntze formula analiticamente questi concetti con un indice che dà la concentrazione degli sforzi (alternati) dovuti alla grafite

$$\alpha'' = 0,75 \cdot \left( 1 + 2 \sqrt{\frac{t}{\rho}} \right) \cdot f + 0,25$$

L'equazione è confermata da Ikawa ed Ohira sulla base di misurazioni micrografiche e prove di fatica ad urto ripetuto; la sintesi dei dati è illustrata in fig. 180 ove si nota che il  $\sigma_{max}$  di concentrazione è 13 volte il  $\sigma_w$  di fatica per la ghisa grigia con lamelle di lunghezza  $t = 0,5$ ;  $\rho = 0,001$  ed è solo di 2,5 volte per la grafite sferoidale.

Si noti come la concentrazione sia intermedia tra lo snervamento ed il carico a rottura di un acciaio ad elevato carbonio e che quando  $\alpha'' > 4$  (ghise grigie) l'energia spesa per provocare la cricca di fatica è minore di quella spesa per propagarla, se  $\alpha'' < 4$  accade l'opposto (ghise nodulari) (fig. 181).

Nella fig. 182 si riportano i valori della fatica desunti dalla letteratura; questi valori diagrammati in campo doppio logaritmico in funzione di  $R$  danno un insieme piuttosto disperso, ma che in gran parte sono racchiusi

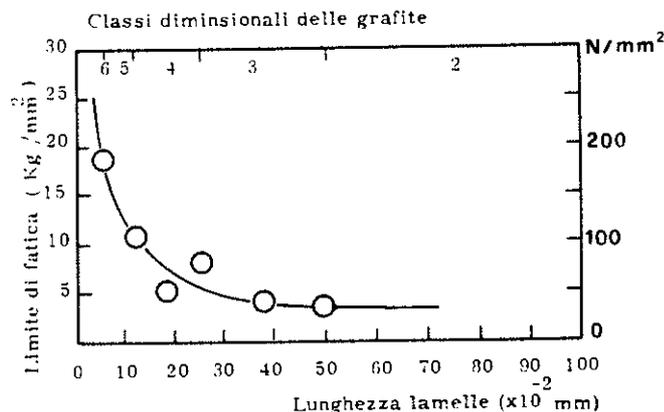


Fig. 176 - Effetto della lunghezza della grafite sul limite di fatica.

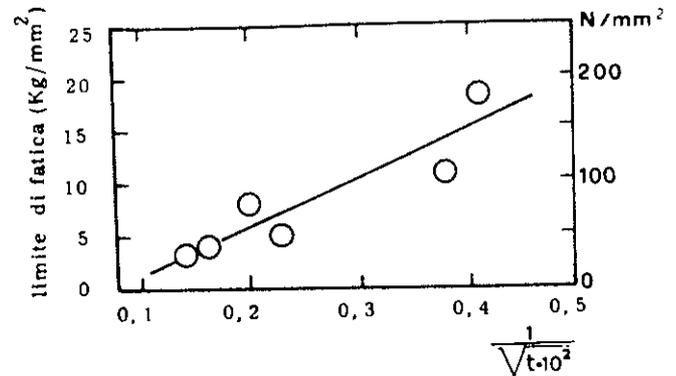


Fig. 177 - Relazione lineare tra limite di fatica e l'inverso della radice quadrata della lunghezza della grafite (14).

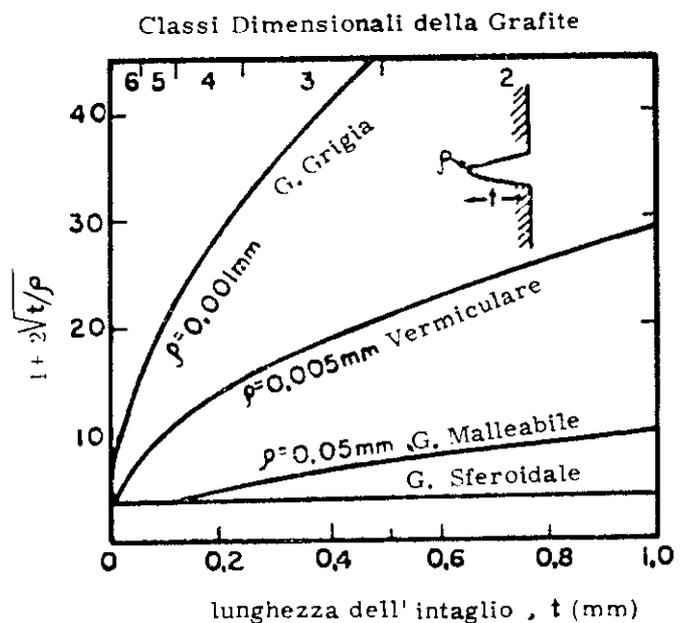


Fig. 178 - Contributo della lunghezza delle lamelle sulla concentrazione degli sforzi.

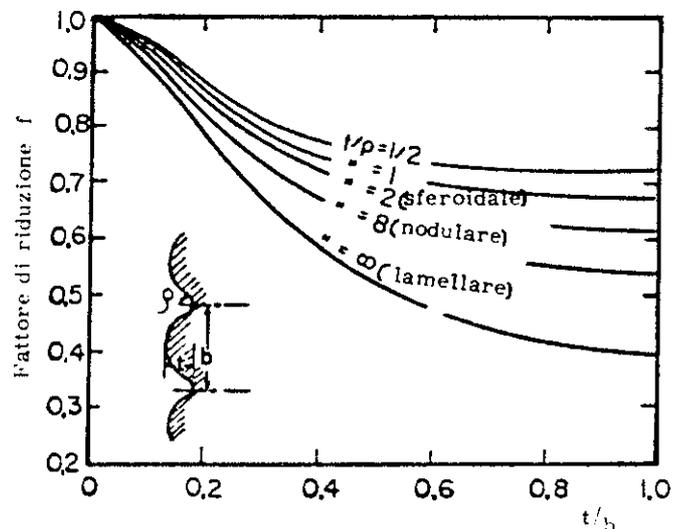


Fig. 179 - Fattore di riduzione per varie strutture di grafite.

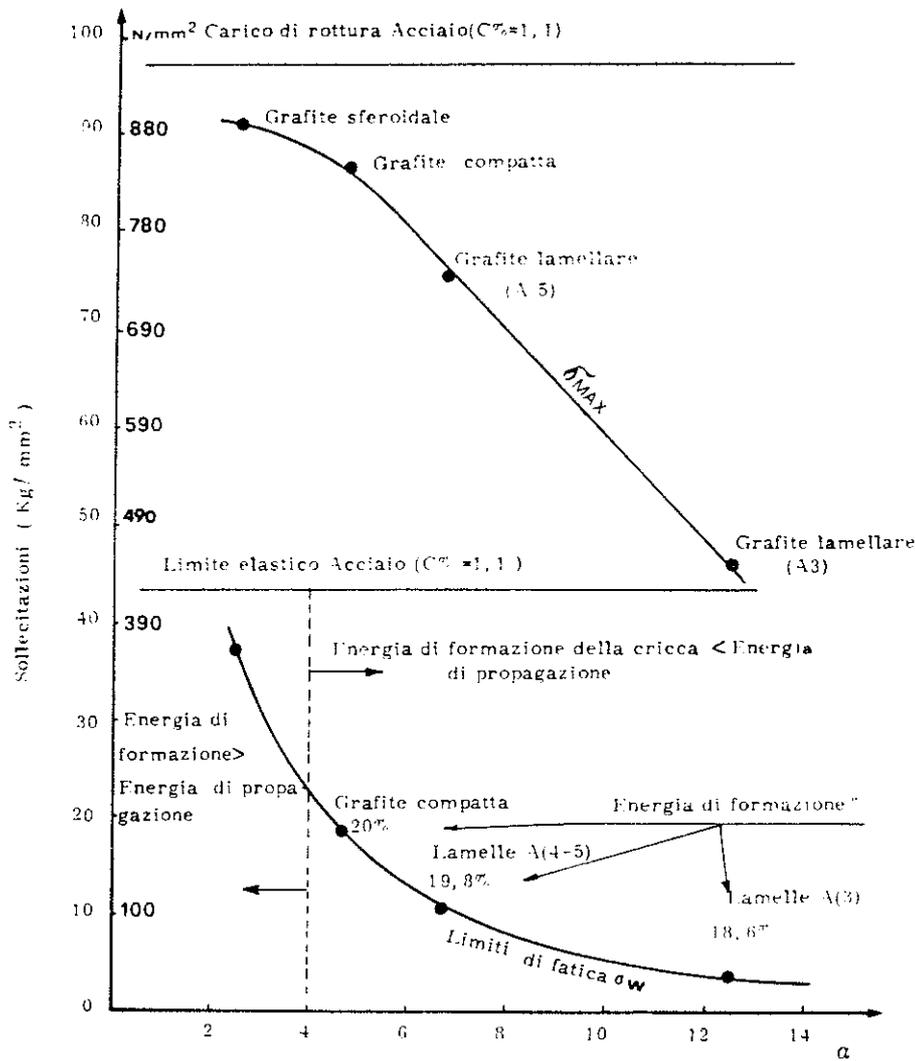


Fig. 180 - Relazione tra la concentrazione di sforzi  $\sigma_{max}$  ed il fattore di concentrazione  $\alpha$ .

fra coppie di rette corrispondenti a rapporti fissi detti *rapporti di durata* tra il limite di fatica e la resistenza a trazione ( $\frac{LF}{R} = K$ ).

Mailender, che ha sperimentato 14 tipi di ghise, trova

che la resistenza alla flessione alternata aumenta con l'aumentare della resistenza a trazione e che il rapporto di durata  $\frac{FP}{R_t} = K$  è di circa 0,45 (variabile da 0,33 a

0,6); il valore di questo rapporto (media) non è molto minore di quello relativo all'acciaio e ciò significa che l'azione d'intaglio della grafite produce in media una diminuzione circa in egual misura della resistenza a fatica e della resistenza a trazione.

Nelle tabb. XXXVII e XXXVIII si riportano da R. Brotzen i limiti di fatica delle ghise grigie unificate.

Tabella XXXVII - Limite di fatica delle ghise unificate.

Tipo	R N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	LF N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> ) senza intaglio	LF N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> ) con intaglio	Kf
G 10	140 (14)	60 (6,5)	60 (6,5)	1,00
G 15	170 (17,58)	80 (8,4)	80 (8)	1,05
G 20	210 (21)	100 (10,55)	90 (9,5)	1,10
G 20	230 (23,5)	150 (15,5)	110 (11)	1,40
G 25	250 (25,5)	130 (13,5)	110 (11,3)	1,20
G 30	290 (30)	160 (16,6)	130 (13,2)	1,26

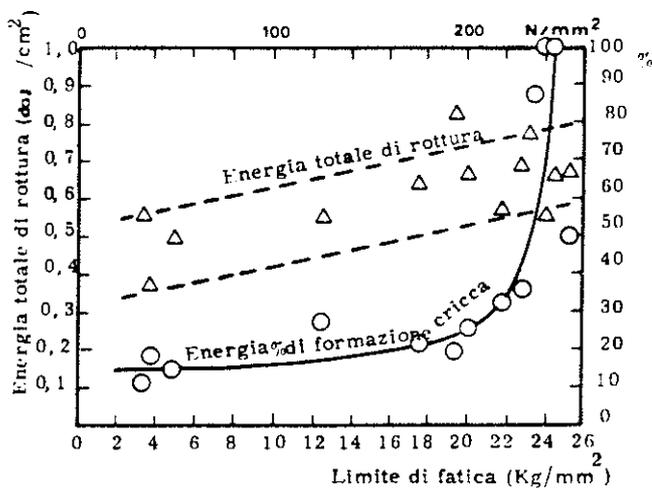


Fig. 181 - Energie totali di rottura e di formazione di cricche ai vari limiti di fatica.

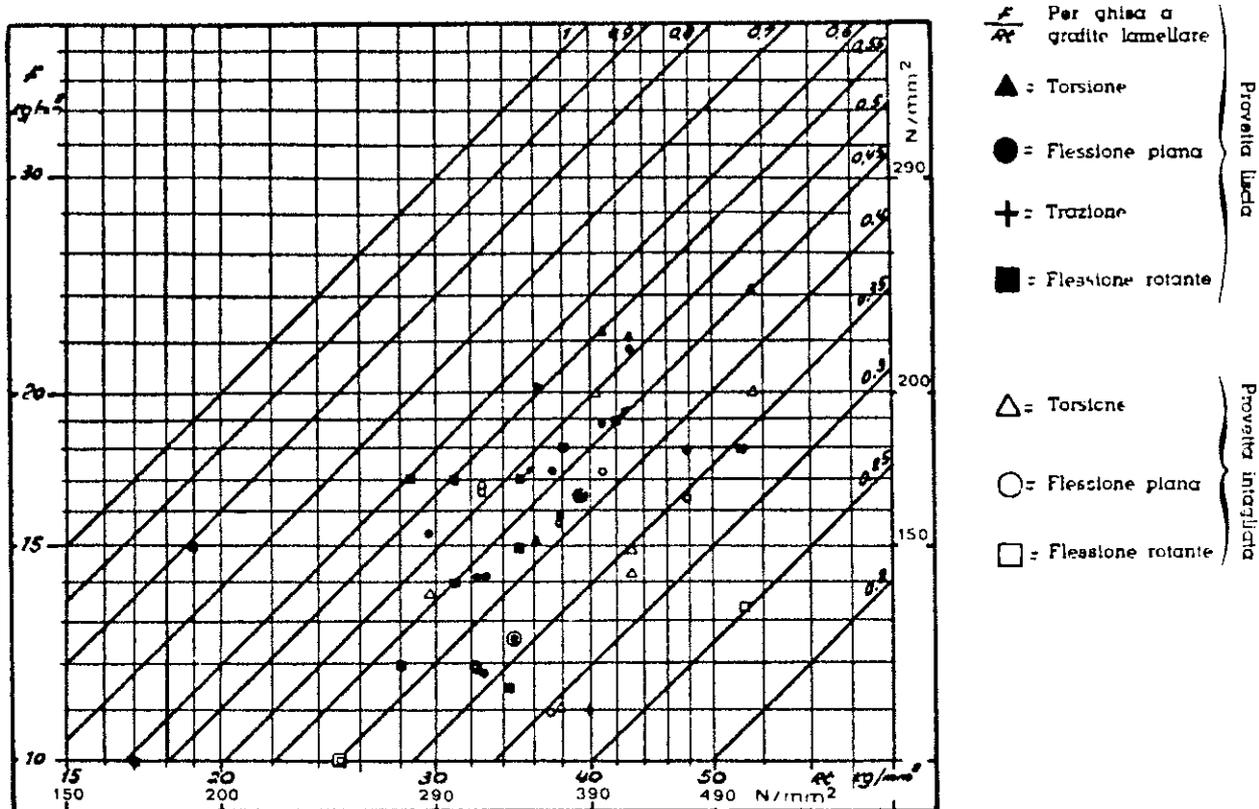


Fig. 182 - Ricerca del rapporto di durata  $\left(\frac{F}{R_t}\right)$  per la ghisa grigia.

Tabella XXXVIII - Resistenza alla trazione e limite di fatica delle ghise grigie.

Tipo di ghisa	G 30	G 30	G 35	G 35	Aciculare
R N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	300 (31)	330 (33,75)	380 (38,67)	390 (39,37)	530 (54)
FP (oscillante) N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	130 (13,3)	140 (14,7)	150 (15,47)	150 (15,47)	170 (17,58)
K	0,43	0,44	0,40	0,39	0,33
FP (pulsante) N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	160 (16,17)	220 (22,5)	190 (19)	230 (23,2)	260 (26,72)
K	0,52	0,67	0,49	0,58	0,50
FT (oscillante) N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	110 (11,25)	110 (11,5)	140 (14,77)	140 (14)	150 (15,47)
K	0,36	0,34	0,38	0,35	0,29
FT (pulsante) N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	160 (16,17)	170 (17,58)	180 (18,28)	230 (23,2)	200 (20,4)
K	0,52	0,52	0,47	0,58	0,38

Il problema della correlazione fra le prove statiche e dinamiche è nel caso della ghisa molto complesso, in quanto intervengono molteplici fattori che non consentono una impostazione sulla base di una semplice proporzionalità.

Ad esempio, il limite di fatica per carichi assiali è stato trovato variabile dal 59 al 94% del limite di fatica a flessione (in genere si sceglie il 75%).

Notare come il limite di fatica a flessione ed a torsione è più alto quando il carico è applicato tra 0 ed un massimo in una sola direzione; ed ancora, i limiti di fatica per carichi assiali sono molto diversi per sollecitazioni pulsanti trazionali e compressionali (fig. 183).

L'effetto di intaglio interno della grafite ha per conseguenza che intagli praticati su barrette lavorate sono praticamente senza influenza sulla resistenza a fatica di una ghisa di qualità scadente  $\left(K_f = \frac{F}{F_i} = 1\right)$ ; per una ghisa di qualità diventa più sentita l'influenza di un intaglio  $\left(\frac{F}{F_i} > 1\right)$ , tale influenza è però sempre meno sentita che nel caso dell'acciaio (fig. 184).

In effetti, le particelle di grafite giocano già un ruolo d'intaglio nel caso di provette lisce ordinarie.

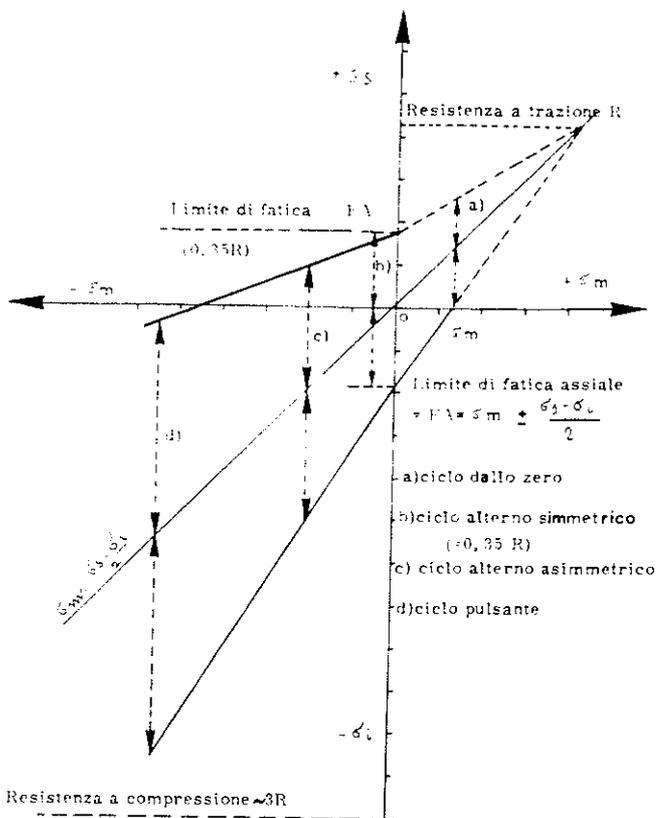


Fig. 183 - Diagramma di Smith (trazione-compressione) per la ghisa grigia. Le condizioni interne al diagramma danno vita illimitata ( $> 10^7$  cicli). Le condizioni esterne al diagramma danno vita limitata ( $< 10^7$  cicli).

Morrogh e Grant<sup>17</sup> trovano che il rapporto di durata è inversamente proporzionale alla resistenza a trazione. Occorre, però, distinguere almeno due casi: ghise a basso carbonio e ghise legate; nelle prime la resistenza è incrementata, riducendo il carbonio (poca grafite), nelle seconde la resistenza è incrementata, rendendo più rigida la matrice e più affinata la segregazione grafitica. Nelle prime l'effetto d'intaglio interno sarà minore ( $K_f$  grande) e quello d'intaglio esterno sarà maggiore ( $K_t$  grande).

Quindi, l'incremento di resistenza provocherà un aumento di  $K_f$  ed un aumento di  $K$  nelle ghise a basso carbonio; viceversa, nelle ghise legate ad un incremento di  $K$  corrisponderà una diminuzione di  $K_f$  (fig. 185).

Analoghe considerazioni possono essere fatte esaminando la tab. XXXIX, ove sono considerati gli effetti di alcuni trattamenti termici. È stato dimostrato, infatti, che la tempra ed il rinvenimento e la tempra isotermica non aumentano il limite di fatica tanto rapidamente come avviene invece per la resistenza, perciò il rapporto di durata diminuisce ed aumenta la sensibilità all'intaglio.

L'effetto della dimensione sul limite di fatica (sollecitazione non assiale) della ghisa grigia è rappresentato nel grafico di fig. 186 riportato dal lavoro di H. Majors<sup>18</sup>. Il grafico distingue l'influenza dello spessore del getto sul limite di fatica e l'influenza della dimensione della barretta lavorata. Se ne deduce che più grande è la sensibilità allo spessore della ghisa, minore sarà il limite di fatica sul provino liscio; sul provino intagliato la diminuzione del limite di fatica al variare dello spessore è molto minore. Il beneficio indiretto dell'effetto d'intaglio della grafite si manifesta anche nell'allenamento (under-stressing) e nel sovraccarico (overstressing). Ikawa e Ohira hanno seguito l'evolversi della microdurezza nei punti di diramazione delle lamelle al variare dei cicli durante le prove di fatica ed hanno trovato incrementi di durezza dopo 100.000 cicli di circa 35% (ghisa G 15) causati da deformazioni plastiche locali.

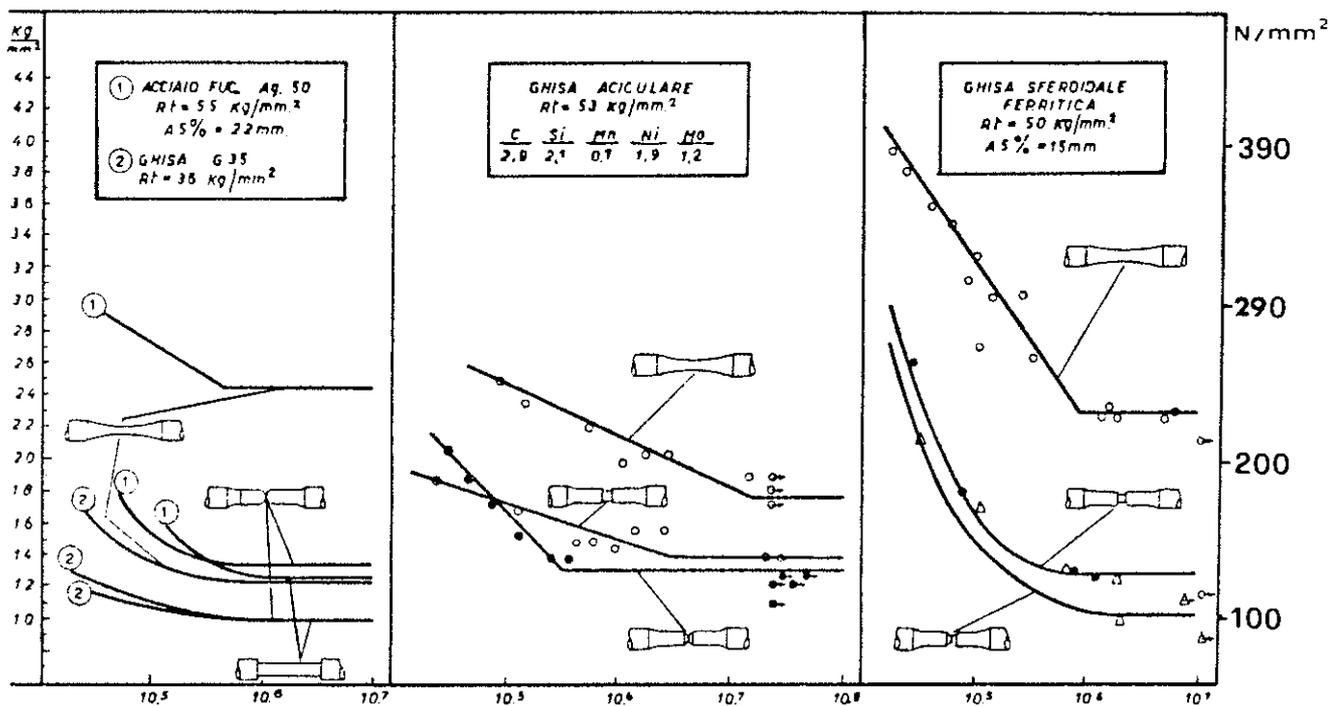


Fig. 184 - Curve di Woehler alla flessione rotante dell'acciaio, della ghisa grigia, della ghisa aciculare e della ghisa sferoidale ricotta (18).

Tabella XXXIX - Effetto dei trattamenti termici sul limite di fatica di alcune ghise basso-legate.

Trattamento	HB	R N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	F N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	K
Grezza di fusione	217	340 (35)	120 (12.2)	0,35
Tempera in olio	311	460 (46,5)	120 (12,57)	0,27
Tempera isoterma	248	430 (43,7)	120 (12,2)	0,28
Grezza di fusione	197	320 (33)	110 (11,25)	0,34
Normalizzazione	248	460 (46,5)	140 (14,77)	0,32
Tempera isoterma	255	490 (49,5)	150 (15,8)	0,32
Grezza di fusione	207	360 (36,2)	120 (11,95)	0,33
Bonifica	255	450 (46)	100 (10,55)	0,23
Bonifica	293	520 (53)	100 (10,55)	0,20
Grezza di fusione	217	330 (33,8)	110 (11,5)	0,34
Tempera isoterma	277	400 (41)	110 (11,5)	0,28
Grezza di fusione	—	330 (33,5)	140 (14,77)	0,44
Bonifica	—	520 (53)	170 (17,58)	0,33

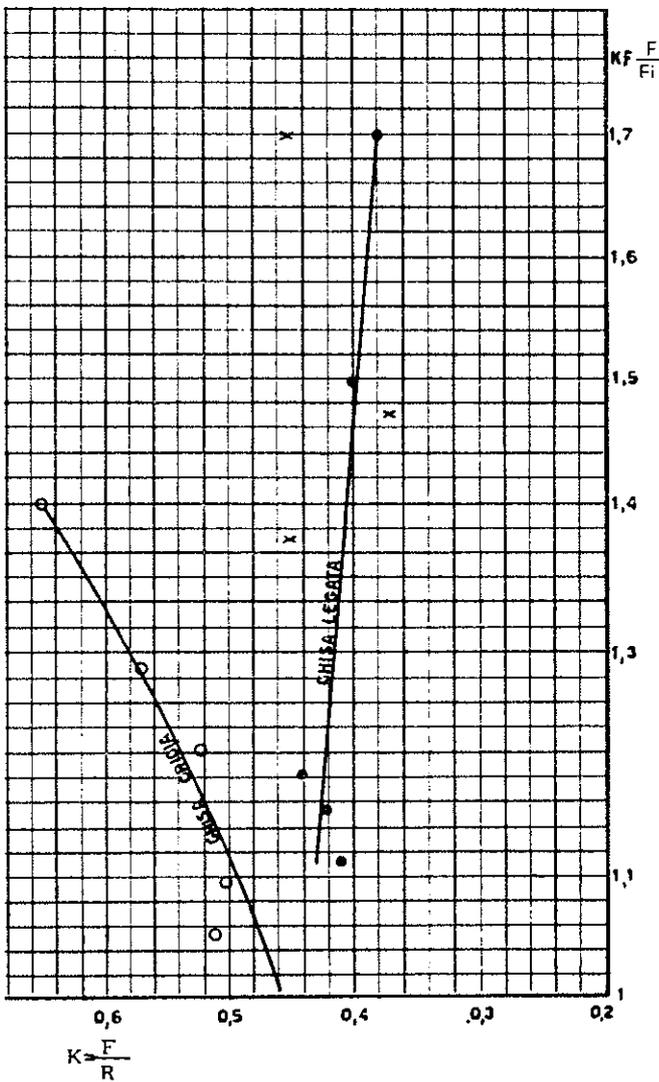


Fig. 185 - Rapporto di durata in funzione del fattore dinamico di concentrazione nelle ghise grigie e legate.

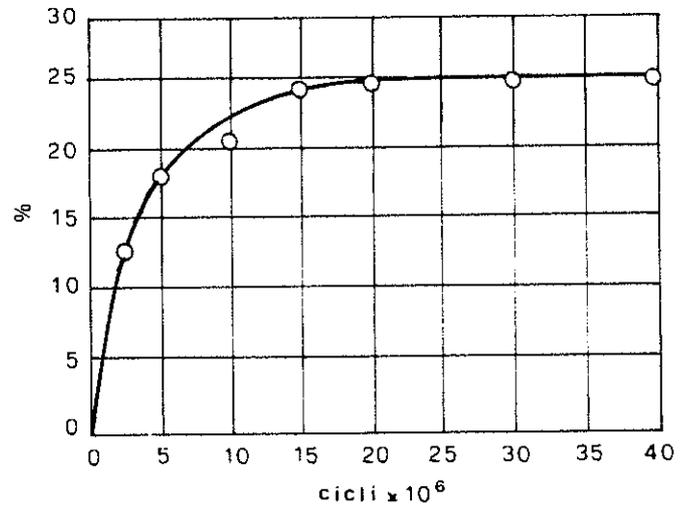


Fig. 187 - Aumento del limite di fatica (%) della ghisa G 15 mediante allenamento (19).

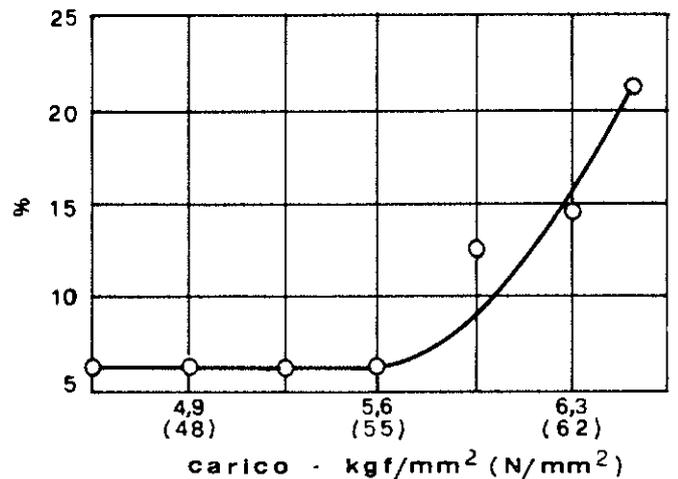


Fig. 188 - L'aumento per allenamento del limite di fatica della ghisa G 15 dipende anche dal valore della sollecitazione con la quale si esegue l'allenamento (19).

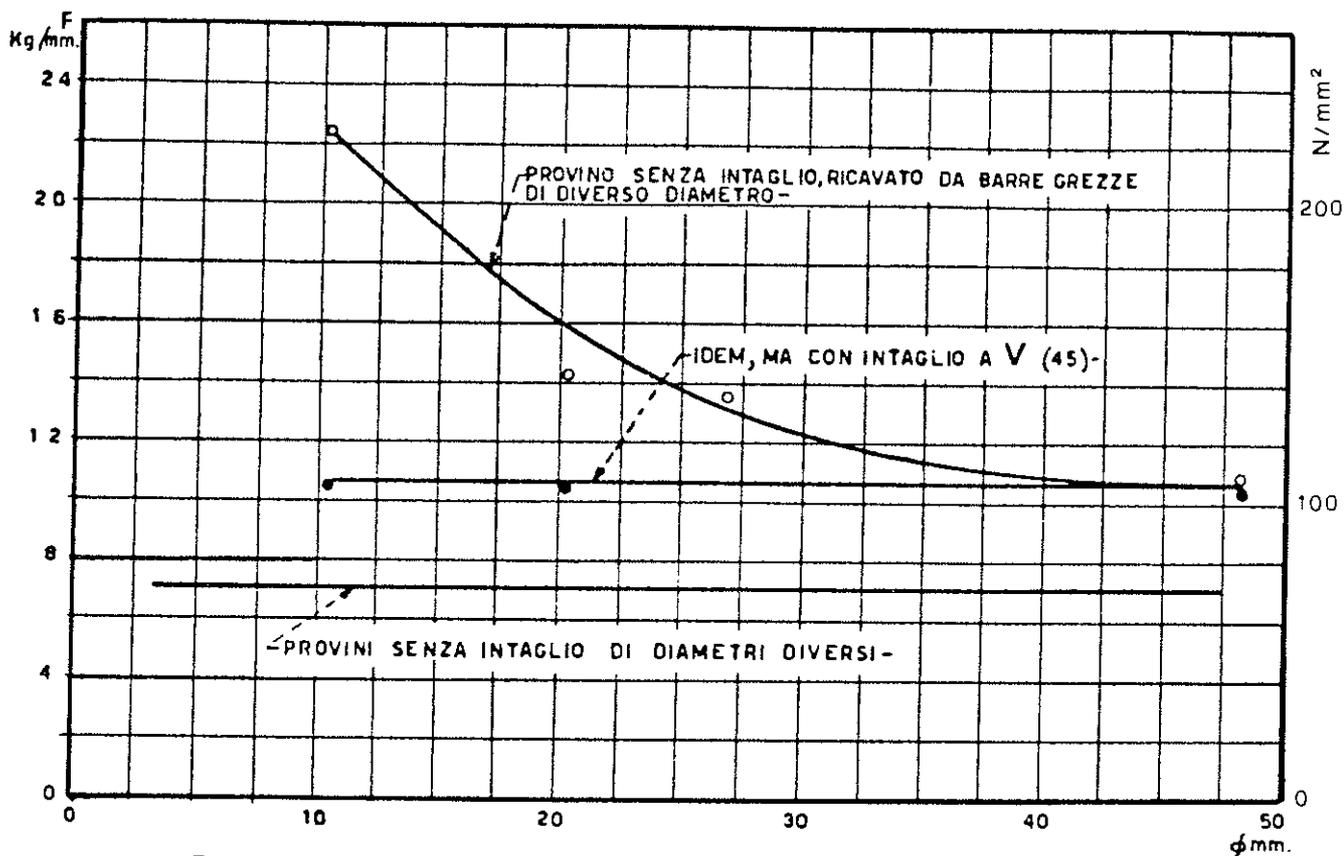


Fig. 186 - Effetto del diametro del provino e del diametro del grezzo sul limite di fatica della ghisa grigia.

C'è un rapporto di causa ed effetto tra l'incremento di durezza della matrice dovuta ad un certo numero di alternanze poco al di sotto del limite di fatica, e l'incremento del limite di fatica. Quest'allenamento (understressing) migliora (in analogia con l'adattamento) il limite di fatica della ghisa.

J. B. Kommers riferisce che ghise aventi una resistenza a trazione di  $140 \text{ N/mm}^2$  ( $14 \text{ kg/mm}^2$ ) ed un limite di fatica di  $65 \text{ N/mm}^2$  ( $6,5 \text{ kg/mm}^2$ ) sottoposte, in periodi preventivi di sollecitazione alterna, a sforzi di 0,96 volte (understressing) il limite di fatica, quest'ultimo è aumentato notevolmente (25%), secondo la legge diagrammata in fig. 187. Se lo stesso campione è allenato per 20 milioni di cicli, con carichi maggiori di 0,96 volte il limite di fatica, quest'ultimo aumenta ulteriormente (32%), secondo la legge diagrammata in fig. 188, dimostrando una eccellente resistenza a sopportare sovraccarichi accidentali. Solamente altissimi sovraccarichi ripetuti per numerosi cicli abbassano il limite di fatica nelle ghise.

Sia la sensibilità all'allenamento sia la resistenza al sovraccarico sembrano avere i loro massimi valori nelle ghise meno resistenti.

Da quanto si è detto, il comportamento della ghisa verso le sollecitazioni cicliche è una ulteriore smentita alla vecchia ipotesi che un metallo, per non essere danneggiato da intagli, doveva essere duttile e tenace per consentire un cedimento plastico locale che li arrotondi, facendo diminuire la concentrazione degli sforzi. La deformabilità, così come la si misura negli acciai, il più delle volte è superflua. Basti pensare che se un organo si piega senza rompersi, ciò significa egualmente la fine di una macchina. Quello che è importante è l'accomodamento plastico localizzato senza formazioni di cricche, soprattutto ai fini di evitare concentrazioni di sforzi, e per garantire questo è sufficiente una deformazione dell'1% sopra un'area definita. Sotto questo aspetto la ghisa quasi priva di duttilità alla prova di trazione e con resilienza molto bassa, presenta una duttilità locale in un volume artificiosamente allargato dalla segregazione grafitica, che la rende praticamente indifferente agli intagli, così le ghise possono essere non molto inferiori all'acciaio nella fatica sotto corrosione in presenza di cause di esaltazione degli sforzi, caratteristica tecnicamente utile di cui raramente si tiene debito conto.

## RESISTENZA ALL'USURA - L'ATTRITO E L'USURA

Il significato esatto di usura, qual'è attualmente inteso nel linguaggio della tecnica, è assai più complesso di quello che il linguaggio corrente attribuisce a questa parola.

Locati<sup>20</sup>, richiamandosi alle osservazioni di Perucca, definisce l'usura come *asportazione continuativa di materiale dalla superficie di un solido sotto un'azione di sfregamento (moto relativo a contatto) contro un altro solido.*

Una definizione di usura, proposta dall'Istitution of Mechanical Engineers, è *l'usura è la progressiva perdita di sostanza dalla superficie di un solido causata da una azione meccanica*. Se si esamina al rugosimetro la superficie di un pezzo lavorato, si rilevano asperità tali per cui la superficie è considerevolmente più grande della superficie geometrica che appare agli occhi di tutti (fig. 189).

Secondo la vecchia teoria di Coulomb, a causa dello sforzo che si esercita fra le superfici a contatto, le rugosità dell'una tendono ad addentrarsi nelle rugosità dell'altra, per cui si nota una certa resistenza a fare scorrere l'una superficie sull'altra, la quale resistenza od attrito è tanto più piccola quanto più levigate o lisce sono le superfici e quanto minore è lo sforzo che si esercita su di esse.

Coulomb e Morin hanno formulato le leggi dell'attrito che si possono riassumere: resistenza d'attrito = carico · coefficiente d'attrito

$$T = N \cdot f$$

Secondo Amontou la resistenza  $T$  è la forza occorrente per tranciare le aree  $A$  di contatto reale, pertanto  $T = At$  ove  $t$  è la resistenza specifica al taglio del materiale; d'altra parte al carico  $N$  fa equilibrio  $AS$  ove  $S$  è la resistenza specifica allo sneramento del materiale, pertanto

$$f = \frac{T}{N} = \frac{At}{AS} = \frac{t}{S} \text{ e quindi } T = \frac{t}{S} N$$

Stabilizzato che sia il coefficiente di attrito, si può determinare il *lavoro* di attrito come prodotto della resistenza d'attrito per lo spazio percorso.

La resistenza d'attrito, nel caso dei perni (fig. 190), può essere determinata con il momento di attrito  $M$

$$fNr = M \text{ quindi } T = \frac{M}{r} \text{ (} r = \text{raggio del perno)}$$

Il lavoro di attrito si trasforma una parte in calore ed una parte è spesa per disgregare la materia (ipotesi di Reye). I fenomeni dell'attrito sono, tuttavia, più complicati di quanto non appaia dalle leggi su esposte che

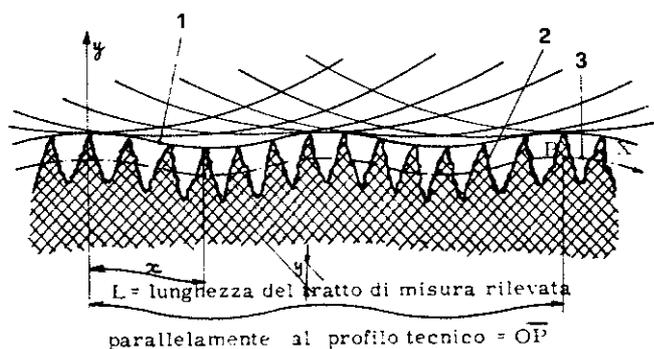


Fig. 189 - Rugosità è la media  $Ra$  ( $\mu m$ ) dei valori assoluti delle deviazioni del profilo reale rispetto alla linea media. Esprimendo, invece, lo stesso valore in micropollici ( $0,025 \mu m$ ), si indica la rugosità con le sigle C.L.A. (Center Line Average) od A.A. (Arithmetical Average). La radice quadrata del valore medio quadratico degli scostamenti del profilo reale dalla linea media si indica con R.M.S. (Root Mean Square) ed è misurato in micropollici ( $\mu m$ ).

1  $Ra = 40$  C.L.A. =  $40$  A.A. =  $45,6$  R.M.S.

1 - Inviluppo delle posizioni della testa sferica di raggio  $25$  mm del tastatore dell'apparecchio rilevatore; l'inviluppo costituisce il profilo tecnico.

2 - Profilo reale.

3 - Linea media.

debbono considerarsi semplificative e, pertanto, empiriche; ad esempio, l'attrito non è completamente indipendente dalla velocità di strisciamento relativo, ma presenta una notevole variabilità in funzione di questa; in condizioni di moto incipiente,  $f$  passa da un valore  $f_0$  (coefficiente d'attrito di primo distacco) corrispondente a velocità nulla, ad un valore minimo, per poi aumentare nuovamente al crescere della velocità.

Il coefficiente d'attrito, oltre che variare con la velocità e con la rugosità, dipende anche da molte altre variabili, quali la natura dei materiali costituenti la coppia cinematica, la formazione di pellicole superficiali, la temperatura, il tipo di lubrificazione, ecc.

Per la ghisa grigia i coefficienti di attrito più utilizzati in pratica (per attrito radente secco) sono i seguenti:

— Ghisa su ghisa:  $0,15 \div 0,2$

— Ghisa su rame:  $0,18 \div 0,2$

— Ghisa su acciaio:  $0,2 \div 0,3$

Schmidt e Weiter<sup>21</sup> danno i valori per il coefficiente d'attrito statico (allo spunto), esposti in tab. XL, nella quale si nota la variazione del coefficiente al variare della rugosità, del carico, delle condizioni superficiali e della natura dei metalli.

Si noti come l'azione portante del lubrificante riduca notevolmente ( $40 \div 50\%$ ) il coefficiente d'attrito; in effetti nel caso dell'attrito secco, l'effettiva area microscopica portante è molto minore dell'area macroscopica apparente, in qualche caso particolare queste aree stanno nel rapporto di  $1$  a  $10^4$ ; gli enormi sforzi che si originano deformano plasticamente i punti di contatto che si comportano in pratica come se fossero saldati insieme.

### Considerazioni generali sull'usura adesiva

Il fenomeno delle saldature, detto di adesione superficiale, si manifesta dopo lo strappo del manto protettore (ossidi, solfuri, ecc.), quando cioè nei punti di contatto le molecole sulle facce opposte sono così vicine ( $< 25 \cdot 10^{-6}$  mm) da esercitare intense forze intermo-

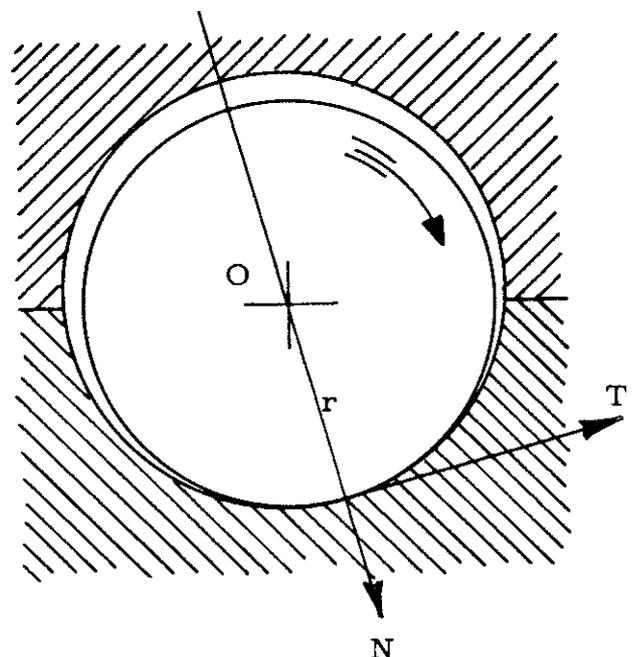


Fig. 190 - Coppia perno-cuscinetto.

Tabella XL - Coefficiente d'attrito statico, dopo 1 min dell'applicazione del carico.

Guide	Ghisa rettificata *			Ghisa raschiata **			Acciaio rettificato		
	0,7	2,1	3,5	0,7	2,1	3,5	0,7	2,1	3,5
Pattino in ghisa									
Attrito secco	0,330	0,325	0,350	0,169	0,200	0,202	—	—	—
Attrito lubrificato	0,114	0,123	0,142	0,140	0,144	0,130	0,114	0,126	0,123
Pattino in bronzo									
Attrito secco	0,296	0,276	0,260	0,259	0,259	0,250	0,287	0,306	—
Attrito lubrificato	0,143	0,148	0,150	0,167	0,196	0,211	0,100	0,096	0,098

\* RMS = 20 (µin).  
 \*\* Raschiata a mano (20 punti di contatto per 25 mm<sup>2</sup>).

lecolari l'una sull'altra, tanto più elevate quanto più i materiali sono simili.

In queste condizioni si manifesta un considerevole innalzamento della temperatura superficiale, vicino alla temperatura di fusione (per ravvicinamenti di qualche Angström si avrebbero temperature di 100.273 K (100.000 °C), trasformando in plasma la struttura superficiale del cristallo).

Sotto l'effetto combinato dell'avvicinamento e dell'agitazione termica degli atomi, le due superfici aderiscono, per solubilità e diffusione; si dice allora che c'è adesione (fig. 191) ed affinché il moto continui occorre:

- o tagliare la giunzione (e ciò non provoca usura)
- o strappare il corpo più tenero (che si usura).

Se la densità delle microsaldature supera il limite critico, si ha grippaggio.

La resistenza d'attrito, che si oppone al rotolamento (attrito volvente) di un corpo su un altro, è molto minore di quella del moto radente, il minore attrito è dovuto al fatto che nel rotolamento le saldature dei contatti microscopici sono *stirate* più che *troncate* come nell'attrito radente.

Ciò può ridurre la forza d'attrito in modo drastico.

Sotto l'effetto del meccanismo d'usura esposto e sin dai primi stadi la superficie evolve, modifica la sua rugosità e la sua composizione chimica, dando luogo ad un *post-strato* generalmente molto complesso.

M. J. Hodgson e T. S. Eyre<sup>22</sup>, sperimentando su ghise grigie (attrito secco), mostrano che il fenomeno d'usura descritto avviene macroscopicamente in due tempi: un pri-

mo stadio di usura, generalmente regolare e modesto, ed un secondo stadio di usura generalmente rilevante. È detto *carico di transizione* quel carico che si ottiene estrapolando i due andamenti (fig. 192); analogamente la gra-

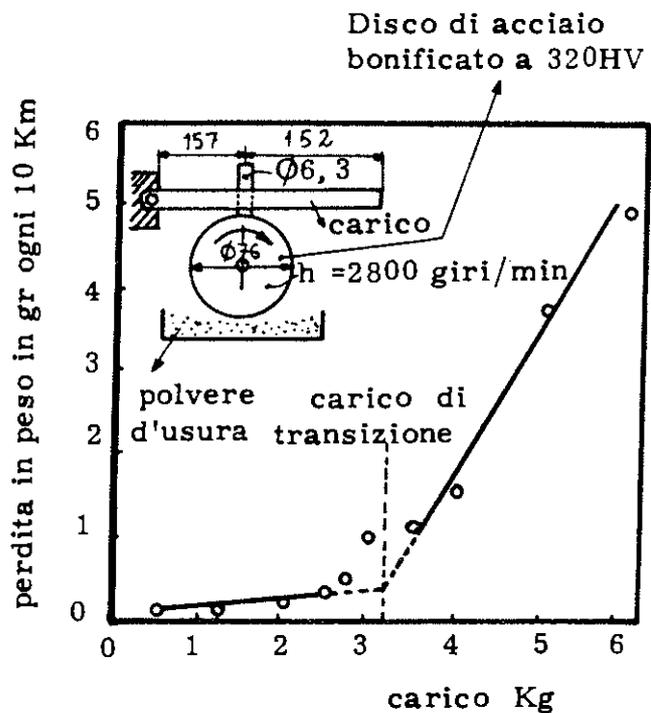


Fig. 192 - Curva di transizione di una ghisa G 15 (ferrite 25%, grafite tipo E 6/7) (2).

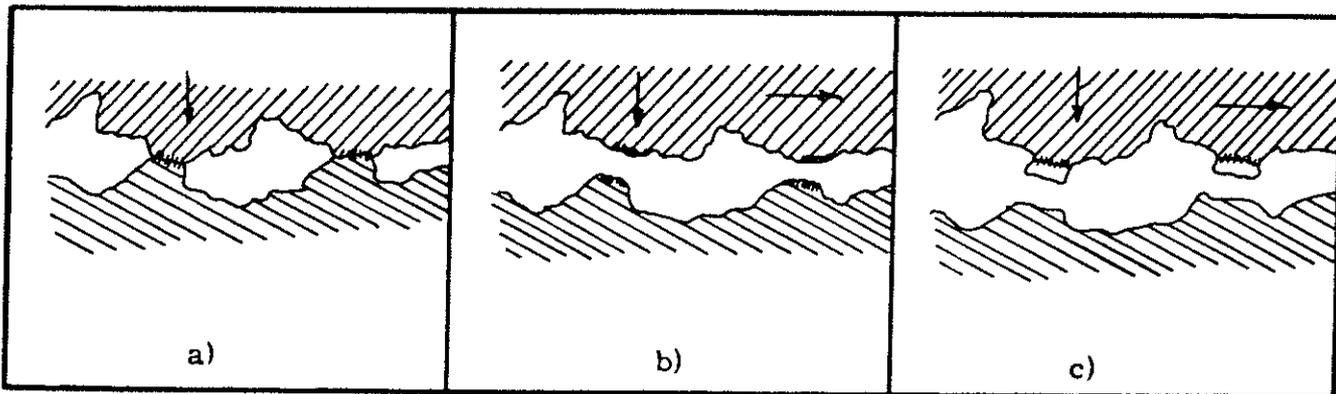


Fig. 191 - Usura per adesione.

nulometria della polvere d'usura (costituita da Fe + ossidi) presenta i due andamenti delle perdite in peso (fig. 193) e la percentuale di Fe (elevata nel periodo di rodaggio) passa per un minimo del 29% di ferro durante il primo stadio e risale al 75% nel secondo stadio.

Secondo questi Autori le ghise con grafiti tipo E e D avrebbero un'usura iniziale di rodaggio relativamente bassa, un carico di transizione elevato, ma sia l'usura al primo stadio che quella al secondo stadio sono sino a 4 volte più rapide (a parità di percorso) delle ghise con grafite tipo A.

Un'indagine più approfondita dell'evolversi delle superfici di scorrimento è stata condotta da M. Kawamoto e K. Okayaschi<sup>23</sup>. Questi Autori, sperimentando a secco sulla macchina d'usura cilindro-anello (fig. 194) con pressioni di 40 N/cm<sup>2</sup> (4 kg/cm<sup>2</sup>) e velocità variabili sino a 7,38 m/s in aria e sottovuoto, hanno trovato per ghise grigie perlitiche (CE = 3,8) i risultati esposti in fig. 195 ove si nota che la velocità d'usura in aria è veramente bassa, se la velocità di scorrimento è inferiore a 1 m/s, ed il post-strato è costituito da  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; alle velocità di 1,5 ÷ 2 m/s appare un'usura meccanica il cui post-strato è costituito prevalentemente da  $\alpha$ -Fe, ma se la velocità aumenta, è ristabilita una bassa velocità di usura per la formazione di un secondo stadio ossidativo ed il post-strato è costituito di  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (fig. 196).

Le differenze di comportamento con le condizioni sottovuoto indicano che se il post-strato si ossida, l'usura è minima, in quanto l'ossido fa barriera all'adesione, a velocità oltre i 5 m/s le cose si invertono, in quanto sotto vuoto le molte areole di contatto sono tutte allo stato di fusione ed il lavoro d'attrito è assorbito nel processo fusorio anziché nella formazione della polvere d'usura.

Queste areole si presentano come zone indurite ed in entrambi i casi raggiungono microdurezze elevate (~ 1.000 HV), ma nel caso del vuoto la profondità è maggiore (fig. 197).

L'analisi ai raggi X ha mostrato che i componenti di queste areole sono ferrite, austenite, martensite, cementite (ledeburite), quest'ultimo componente indica l'avvenuta fusione seguita da un rapido raffreddamento.

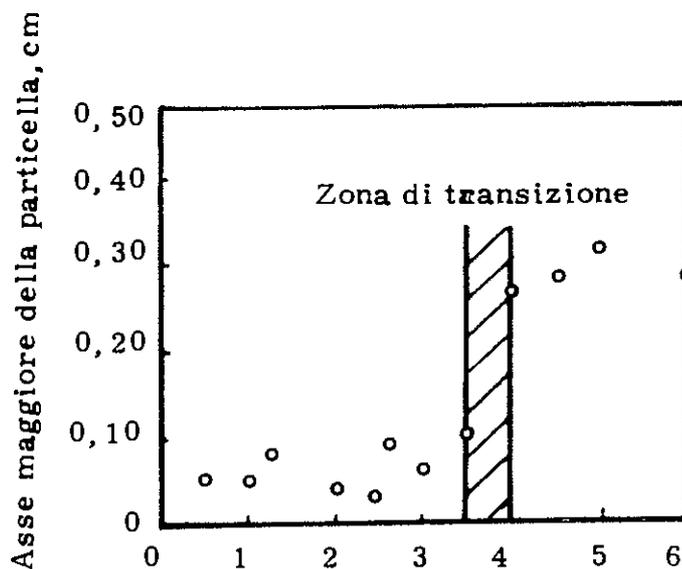


Fig. 193 - Dimensione media della polvere d'usura (ghisa G 15) (22).

Woog e Rabinowics hanno provato a collegare i fenomeni di attrito a fenomeni energetici, i due Autori sostengono che il coefficiente d'attrito varia come la quantità di energia che è necessaria per separare 1 cm<sup>2</sup> di interfaccia, energia che può essere calcolata, quindi, in termini di energia superficiale. Ora questa energia è abbassata dalla formazione di un post-strato grafítico o di ossido o dalla interposizione di un lubrificante la cui energia superficiale è < 30 erg/cm<sup>2</sup>.

Questo sarebbe il motivo principale che spiega la caduta del coefficiente d'attrito, quando le superfici sono lubrificate.

Nel caso delle ghise, poi, l'olio lubrificante assume una notevole tenacità di velo che, secondo E. Takeuchi<sup>24</sup>, sarebbe in relazione più che con la distribuzione grafítica con la distanza interlamellare media e questo sia nel caso di usura iniziale (rodaggio) dovuta all'adattamento delle superfici a contatto (rugosità ed anomalie di forma) nella coppia cinematica, (in questo caso tamburo rotante + ceppo) sia a rodaggio avvenuto (fig. 198).

Inoltre, se l'olio è parzialmente ossidato a 373 K/100 h (100 °C x 100 h) in modo da non alterare le proprietà, l'ossigeno reagirebbe con il metallo, formando ossidi ( $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) che facilitano l'ancoraggio riducendo l'usura. I molti Autori, che hanno studiato l'intervento della segregazione grafítica quale fattore fondamentale nel comportamento all'usura in organi meccanici, ne hanno anche stabilito la lunghezza e la distribuzione ottimali. Trova molti consensi l'opinione che una grafite troppo fine od una distribuzione non uniforme della grafite non è desiderabile per una buona resistenza all'usura.

L'influenza della dimensione della grafite fu già rappresentata graficamente da Piwowarsky<sup>25</sup> nella fig. 199. Se il numero delle lamelle, o la finezza delle lamelle, aumenta, comporta usura. In qualche caso una dimensione media (ad esempio A 4 UNI 3775) è preferibile ad una grafite fine o grossolana; una distribuzione casuale ed uniforme è migliore della grafite interdendritica di tipo D. A questi risultati sono anche pervenuti P. S. Lane<sup>26</sup>, sperimentando su centinaia di fasce elastiche, e più recentemente Y. N. Pavlov<sup>27</sup>. Prove di pratico impiego, condotte da Pavlov su motori con camicie aventi grafite tipo D e camicie aventi grafite tipo A, hanno confermato che la grafite tipo D presenta un'usura più elevata del 28%.

#### Durezza Brinell ed usura

Non meno importante, ai fini soprattutto di una esatta diagnosi dei casi d'usura e dei rimedi da proporre, è l'argomento delle correlazioni con le proprietà meccaniche.

Si inizia con il citare la formula di Holm-Burwell<sup>28</sup>

$$V = K \frac{P}{HB} L$$

ove il volume del materiale asportato è direttamente proporzionale al percorso compiuto (L) ed al carico totale ed inversamente proporzionale alla durezza Brinell.

Dividendo membro a membro per la superficie di contatto, si ha:

$$h = \frac{K}{HB} p \cdot L \text{ da cui } \frac{h}{p \cdot L} = \frac{K}{HB} = K'$$

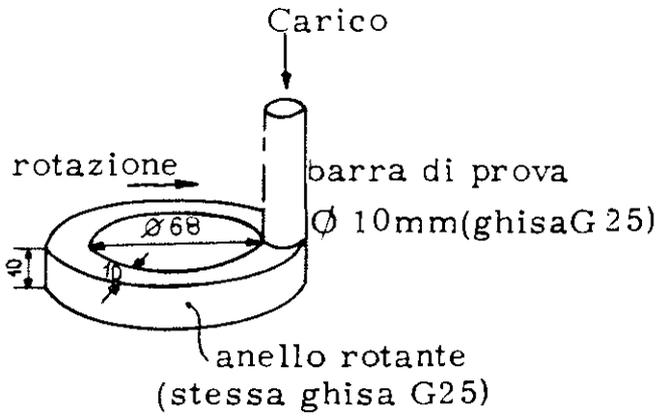


Fig. 194 - Schema di macchina di prova di Kawamoto-Okayashi (23).

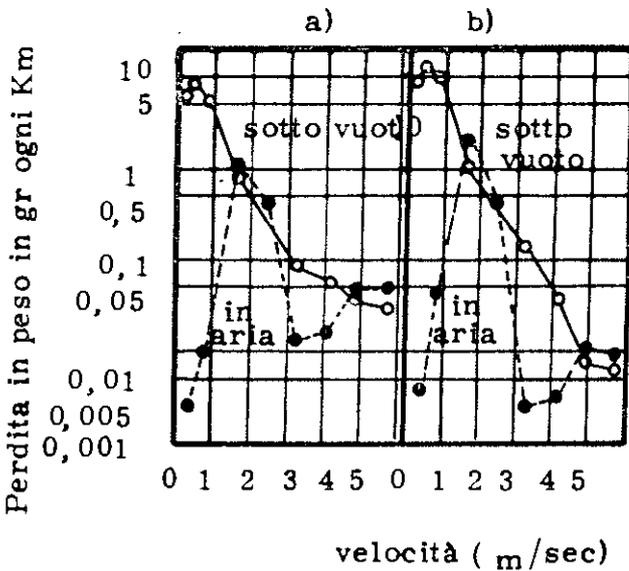


Fig. 195 - Variazione della velocità d'usura della ghisa grigia al variare della velocità di scorrimento in aria e sotto vuoto.  
a) barretta (fissa)  
b) anello rotante (23).

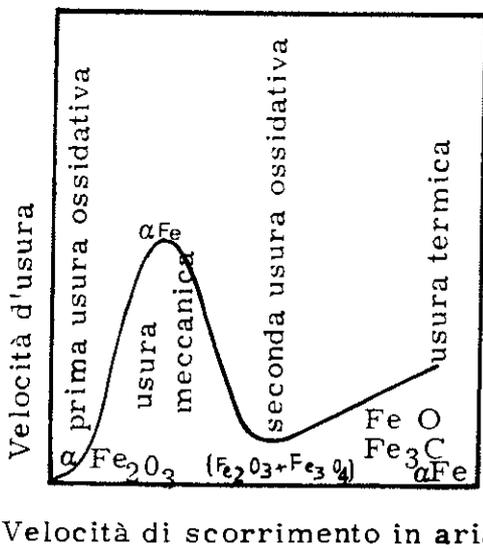


Fig. 196 - Schema della variazione della velocità di usura al variare della velocità di scorrimento in aria.

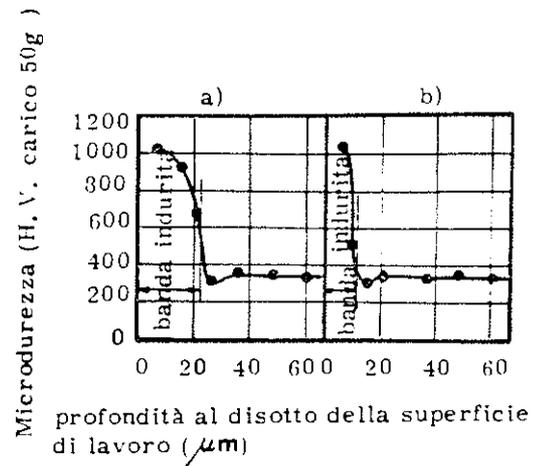


Fig. 197 - Microdurezza in profondità in corrispondenza delle aree di contatto (velocità  $4,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).  
a) sotto vuoto  
b) in aria (23).

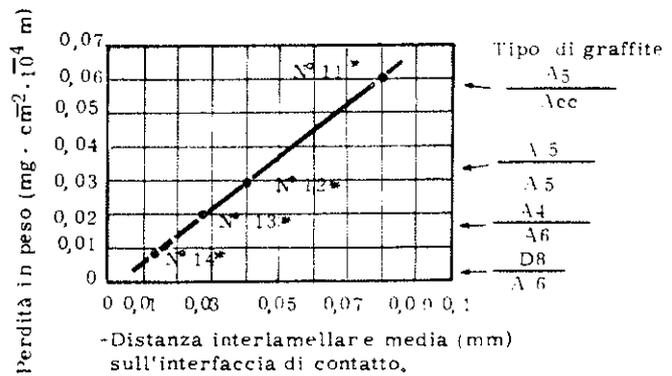


Fig. 198 - Relazione tra la distanza interlamellare all'interfaccia e la perdita per usura (dopo rodaggio) della parte fissa, per attrito radente lubrificato, in vari accoppiamenti di ghisa. Velocità di scorrimento  $1,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (percorso 100 km), pressione  $0,3 \text{ N/mm}^2$  per le coppie 11, 12, 13 e  $0,5 \text{ N/mm}^2$  per la coppia 14. Il numero delle aree racchiuse tra le lamelle di grafite delle due facce sovrapposte è garanzia di continuità del velo d'olio (24).

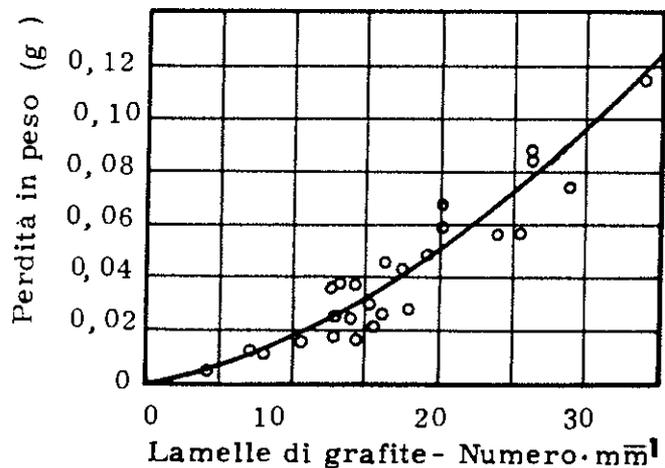


Fig. 199 - Influenza della dimensione della grafite nell'usura per attrito radente (dopo 500 giri).

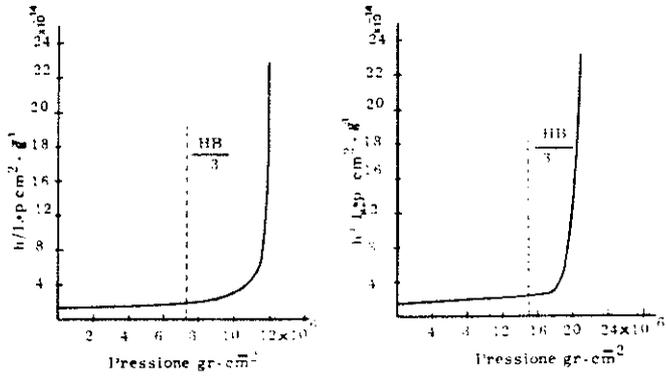


Fig. 200 - Valori di  $h/L \cdot p$  in funzione della pressione sullo stesso acciaio con durezze diverse (29).

Il coefficiente  $K'$  definisce la resistenza all'usura per adesione dei vari materiali nell'accoppiamento con un materiale fisso. La sua costanza in funzione della pressione unitaria nominale è un'espressione della validità della formula di Holm.

In fig. 200, per pressioni inferiori al valore limite,  $K'$  è infatti costante, superato il limite,  $K'$  aumenta bruscamente. Questo fenomeno osservato sullo stesso materiale (acciaio perlitico a 0,95% C) con HB diversa, porta allo stesso risultato e cioè quando la pressione supera il valore  $HB/3$ , l'usura diventa anormale. Detto valore ha lo stesso significato di un vero e proprio carico al limite di usura, del tutto analogo al limite di fatica. D'altra parte il rapporto  $HB/3$  è molto prossimo al carico di snervamento del materiale completamente incrudito, perciò la superficie è al limite di resistenza, per cui all'incremento di sollecitazione nessuna porzione di materiale fresco sarà disponibile per reagire, il che porta ad un rapido grippaggio.

L'ipotesi di Holm-Burwell<sup>28</sup> fornisce una convincente spiegazione del rodaggio.

Infatti le inevitabili imperfezioni del montaggio e della lavorazione meccanica danno luogo a pressioni specifiche superiori a  $HB/3$  e quindi a fortissimi valori di usura; tuttavia, con il procedere dell'asportazione è rapidamente interessata al contatto, una superficie molto più grande e quindi la pressione unitaria scende sotto il limite, riducendo la velocità d'usura al valore di servizio.

Un'altra correlazione tra proprietà meccaniche ed usura la fornisce T. L. Oberle<sup>29</sup> che, sulla base di una ampia elaborazione statistica, stabilisce una correlazione tra l'usura e la deformabilità elastica massima che può sopportare il materiale:

$$\text{Usurabilità} = \frac{\text{limite elastico}}{\text{modulo elastico}}$$

Da questo concetto nasce l'espressione abbreviata Modell espressa da Oberle in unità mista

$$\text{Modell} = \frac{\text{HB}}{\text{E (psi)}}$$

ove la durezza Brinell ha evidentemente il significato di superamento delle forze elastiche. Nella tab. XLI appare una graduatoria di usurabilità di vari metalli.

Il Modell successivamente adattato da Talenov alle ghise grigie  $\frac{\text{HB}}{\log n}$  ove  $n$  = numero lamelle per cm, è

Tabella XLI

Materiale	HB E (p.s.i.)
Alundum (sinterizzato)	143
Cromo duro (rivestimento)	83
Ghisa grigia (bonificata)	33
Carburo di tungsteno (9% Co)	22
Acciaio (bonificato)	21
Titanio (indurito)	17
Legia di alluminio (indurito)	11
Ghisa grigia (grezza di fusione)	10
Acciaio da costruzione	5
Ghisa malleabile	5
Cromo metallo	3,5
Rame (ricotto)	2,5
Argento (puro)	2,3
Alluminio (puro)	2
Piombo (puro)	2
Stagno (puro)	0,7

soprattutto un indice di usurabilità all'abrasione; infatti, un materiale a più alta deformabilità elastica può meglio sopportare il passaggio di una particella estranea senza dare luogo a deformazioni plastiche; gli alti carichi si traducono in elevate tensioni di compressione concentrate nei punti di contatto della particella abrasiva e, se causano ripetute deformazioni plastiche, ne deriva affaticamento dei costituenti duttili e fessurazione di quelli più fragili (fig. 201). In funzione della rugosità e del modulo elastico esiste una granulometria specifica del corpo estraneo tale che al di qua le deformazioni delle superfici sono soprattutto elastiche ed al di là plastiche ed ancora secondo la forma delle superfici, l'angolo di attacco, la granulometria delle polveri ed i giochi, si avrà un insieme di valori dei parametri tale che al di qua ci sarà deformazione del metallo ed al di là il taglio con un vero distacco di trucioli (fig. 202).

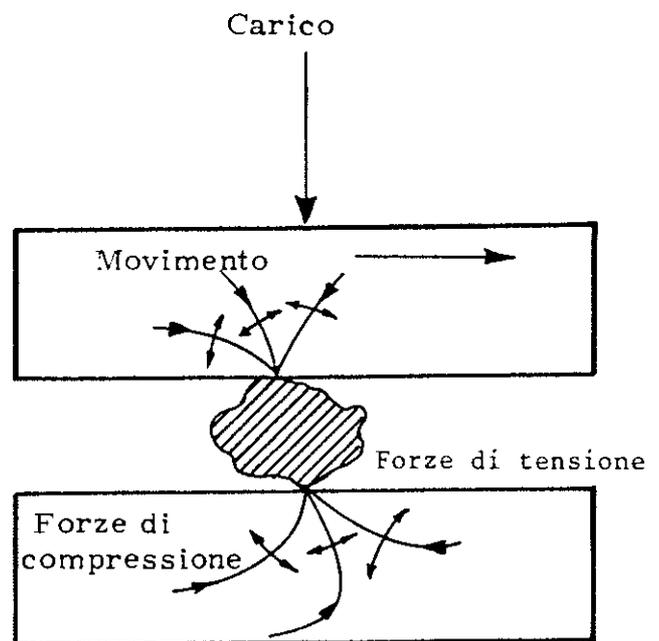


Fig. 201 - Sollecitazioni provocate da un grano abrasivo.

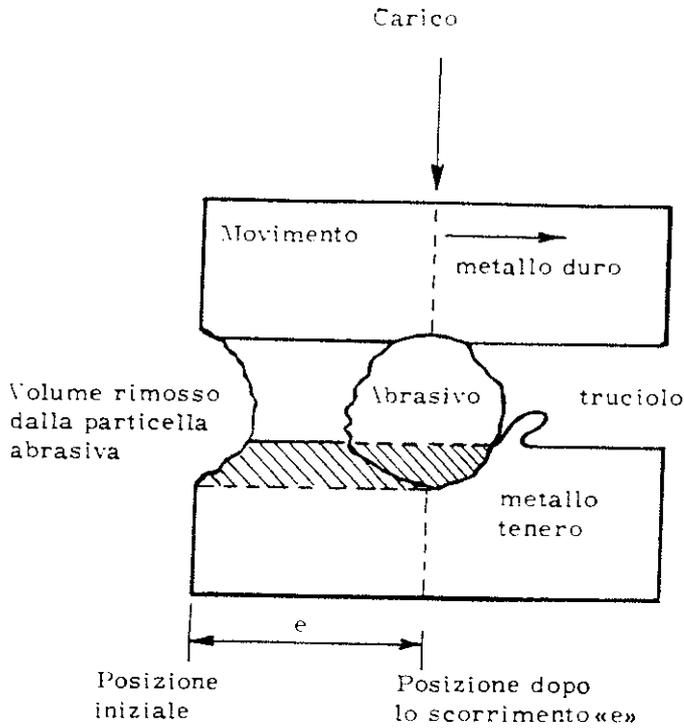


Fig. 202 - Usura abrasiva per applicazione diretta del carico su particella abrasiva dura.

Se la differenza di durezza tra metallo ed abrasivo non è troppo grande, la resistenza all'usura abrasiva dipende dal rapporto tra la durezza del grano abrasivo e quella del metallo; si ricorda, inoltre, che in presenza di lubrificante l'abrasione aumenta considerevolmente, perché diminuisce l'energia necessaria per spostare dal posto un grano di metallo ed inoltre previene l'usura del grano abrasivo, lubrificando le facce di scorrimento dei micro-trucioli.

Siccome l'usura adesiva è sempre accompagnata da una componente abrasiva, se non altro per la formazione della polvere d'usura, si prescrive per le ghise grigie un intervallo ottimale di durezza Brinell; quando la componente dell'usura abrasiva per intervento esterno si fa più severa, ad esempio abrasivi intrusi, che generalmente si raccolgono nei lubrificanti, si ricorre a strutture sempre più affinate e compatte anche con l'ausilio di elementi leganti (P, Ni, Cr, Mo, V) e/o trattamenti termici, ma se l'usura abrasiva è preponderante, alla ghisa grigia si preferisce la ghisa bianca.

Restando nel tema dell'usura adesiva per attrito radente e quindi nel settore applicativo delle ghise grigie, una correlazione diretta tra durezza e resistenza all'usura non sussiste per queste condizioni d'impiego, nel senso che al di sopra di una certa durezza (~ 250 HB) si hanno scarsi benefici (fig. 203), in generale la ghisa grigia mostra le sue qualità più favorevoli (nell'attrito radente) quando la sua durezza è intorno a 200 HB. Nelle coppie ghisa/acciaio l'HB della ghisa ha o non ha effetto sull'usura della parte mobile in acciaio a seconda che l'attrito è radente o volvente, come mostra la fig. 204.

Più frequenti sono i casi di organi meccanici in cui esistono coppie costituite da ghisa con ghisa e molto si è discusso se e quale debba essere lo scarto di Brinell e se debba essere più dura la parte mobile o la parte fissa.

Molti costruttori prescrivono una differenza di durezza tra le 2 parti in attrito, è opinione diffusa che se il rapporto tra le durezze è uguale a 1, il comportamento della coppia è irregolare, d'altra parte una forte differenza di durezza influenza la penetrazione di un materiale sull'altro, correndo il rischio di rigare la parte più tenera.

Leonard<sup>30</sup>, in un rapporto sulle ghise per macchine utensili, cita casi di eguale durezza tra carrello e guida per torni con comportamento soddisfacente, accanto a casi con differenza di Brinell altrettanto buoni; in genere la tendenza è quella di avere una parte relativamente dura ed una parte relativamente tenera ad alto potere di adattamento che in caso di abrasione sia più suscettibile di incorporare, senza rigature, particelle estranee.

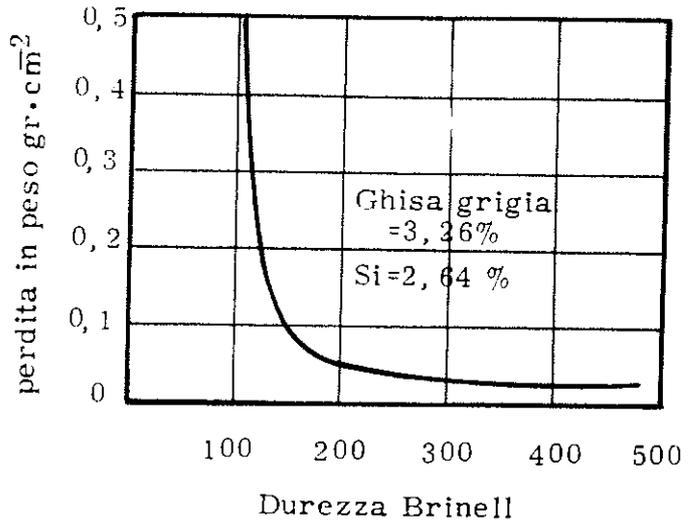


Fig. 203 - Effetto della durezza sull'usura relativa per attrito radente sull'usura della ghisa grigia (dopo 500 giri).

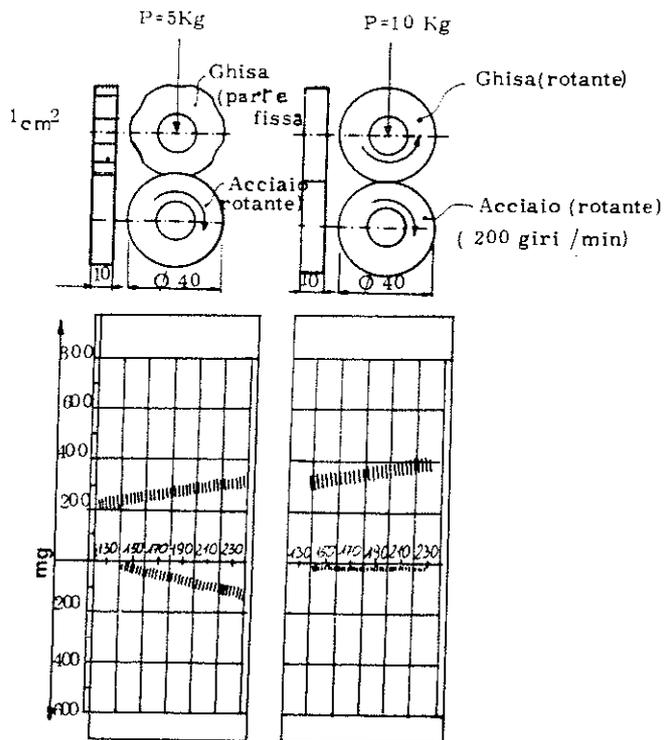


Fig. 204 - Influenza della durezza (HB) delle ghise grigie sull'usura per attrito radente ed attrito volvente su acciaio cementato e temperato (HV = 800) (Macchina Amsler).

Le tecniche sono oggi orientate a creare lo scarto di Brinell (~ 50 punti) nel caso di usura adesiva e scarti maggiori, se vi sono componenti abrasive.

Si ricorda ancora a questo proposito le esperienze di Klingenstein e Schulken riassunte nel diagramma di fig. 230, i cui risultati sono notevoli anzitutto nelle condizioni di prova ove la polvere d'usura non è allontanata.

Questa considerazione consente di richiamare l'attenzione anche sulle diversità di comportamento tra coppie piane e coppie rotoidali e quindi sullo scarto di Brinell tra parte mobile e parte fissa, in genere sono prescritte più dure le parti fisse per le coppie piane (guide-carrello) e viceversa per le coppie rotoidali (cuscinetto-asse).

Certamente la durezza è un ottimo indice pratico in una produzione controllata, cioè se corredato da altre informazioni soprattutto strutturali, sotto questo profilo bisogna assicurarsi che non ci sia ferrite né cementite e le considerazioni fatte sui diagrammi strutturali possono contribuire a realizzare strutture perlitiche favorevoli in tutti gli spessori del getto, in altre parole la composizione chimica decide sul tenore in C<sub>c</sub> (0,6 ÷ 0,8) mentre la massività impone la distanza interlamellare della perlite.

In casi di massività estrema e cioè getti molto sottili e getti a forte spessore, le ghise sono legate con elementi perlitizzanti, generalmente Sn purissimo (0,08%) per evitare la ferrite di sottoraffreddamento, mentre nei getti massicci l'impiego contemporaneo di Cu + Mo aumenta la durezza Brinell di 50 punti per ogni per cento della loro somma. Anche il cromo è aggiunto a questo scopo (sino allo 0,3%), percentuali superiori di cromo possono essere aggiunte assieme al nichel nel rapporto 3Ni : 1Cr.

Una piccola percentuale di ferrite (5 ÷ 10%) è tollerata nel caso delle ghise fosforese.

Il fosforo generalmente migliora la resistenza per formazione di un duro reticolo di steadite (500 HB) nella microstruttura.

L'aumento di resistenza all'usura dovuta al fosforo è particolarmente evidente nel caso di ghise tenere contenenti poca perlite, come è indicato in fig. 205.

La formazione di un reticolo di steadite a maglie regolari è una condizione necessaria quale provvedimento antiusura, non tanto per il contributo di durezza quanto per la formazione di microsacche di perlite nel reticolo steaditico, utili alla continuità del velo d'olio in caso di lubrificazione precaria.

La fig. 206 mostra la classifica delle celle steaditiche riportata da W. Rauterkus<sup>31</sup>, mentre la fig. 207 è una rappresentazione schematica dei ricettacoli d'olio favorevoli alla lubrificazione.

Una grandezza di cella di classe 4 è consigliata per le camicie di motori Diesel, mentre per le fasce elastiche la grandezza media risulta 2,5. Per grossi motori marini, ove i prodotti della combustione provocano una sensibile componente corrosiva, il fosforo sopperisce a diverse esigenze:

- Aumenta la durezza: ogni 0,1% al di sopra di 0,3 la durezza aumenta di 3 ÷ 5 HB.
- Forma un reticolo steaditico che favorisce il mantenimento del velubro d'olio.
- Forma steadite che ha un comportamento catodico (minima differenza di potenziale con la grafite) e pertanto contribuisce a rallentare eventuali fenomeni corrosivi.

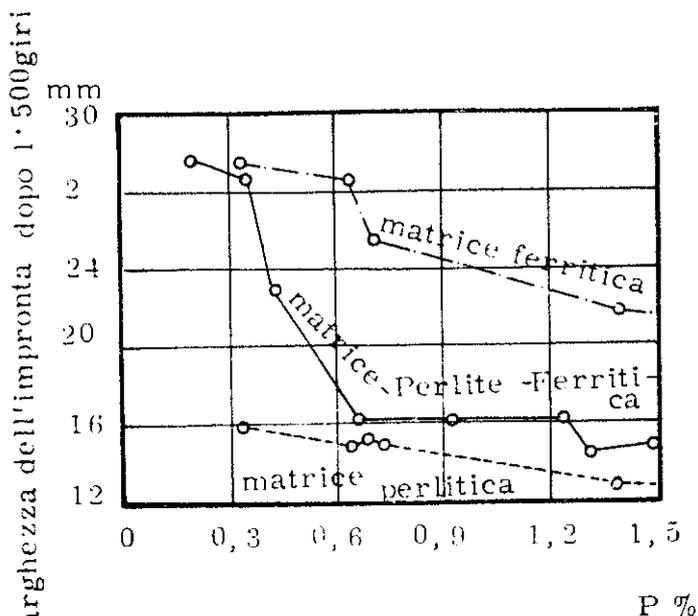


Fig. 205 - Influenza del fosforo su ghise e diverse matrici per attrito radente secco (provino tangente) su disco rotante di acciaio (carico 5 kg - 40 giri/6 s).

— È grafitizzante e pertanto limita i tenori di Si che a sua volta accelera la corrosione (figg. 208, 209).

Tuttavia, non tutti i costruttori di Diesel marini sono concordi; se l'uso del fosforo prevale nella tecnologia europea, in quella americana, in particolare, prevale l'impiego di ghise legate.

### Usura per carichi ripetuti

I meccanismi d'usura sin qui accennati riguardano soprattutto coppie cinematiche con moro relativo di strisciamento (attrito radente): le coppie di rotolamento (attrito volvente) sono invece meno sensibili all'usura per adesione, per cui si possono raggiungere valori di carico molto elevati che provocano sulla superficie della pista un reticolo di sollecitazioni, alcune delle quali di notevole entità, tali cioè da produrre, in caso di sovraccarico, brusche rotture.

Tuttavia, anche in condizione di carichi normali, sotto l'azione del rotolamento, si ha, ad una certa profondità (funzione dei raggi di curvatura e del coefficiente d'attrito) un accumulo di micro-deformazioni plastiche per

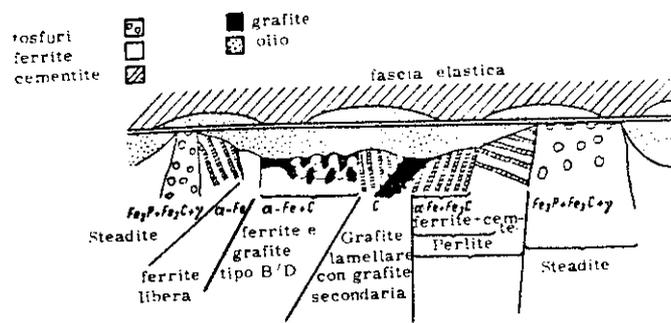


Fig. 207 - Rappresentazione schematica della formazione di tasche d'olio tra camicia e fascia elastica<sup>(31)</sup>.

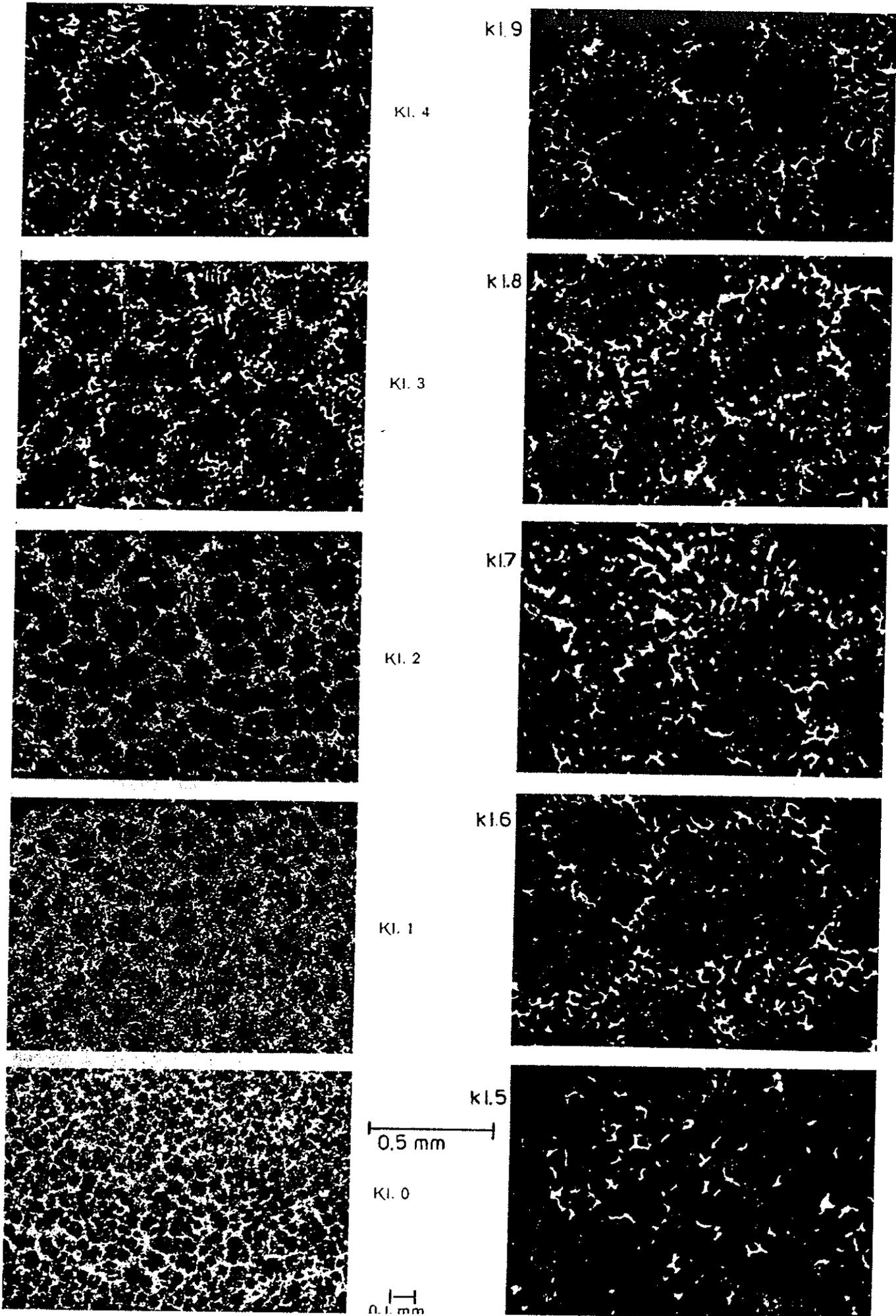


Fig. 206

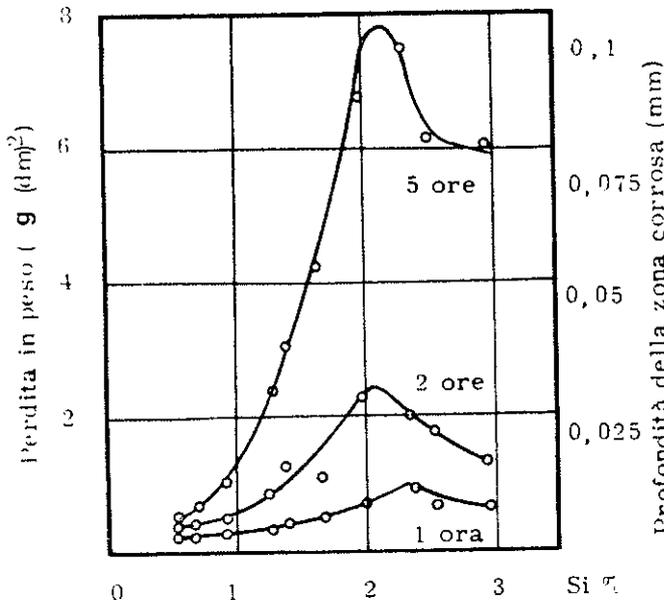


Fig. 208 - Usura della ghisa grigia a vari tenori di silicio in presenza di gas combustivi corrosivi (32).

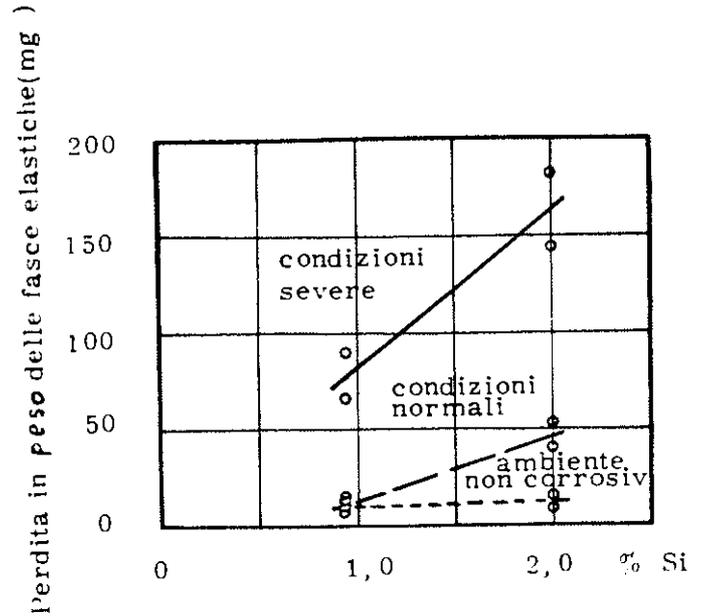


Fig. 209 - Usura della ghisa grigia perlitica (fasce elastiche) a vari tenori di silicio in ambienti corrosivi (32).

sforzi di taglio che provocano micro-lesioni di fatica ed infine rottura del sotto-strato che tende ad isolare le zone superficiali. Le sollecitazioni alternate ad ogni ciclo tagliano ed isolano un frammento di questo strato superficiale che è infine enucleato dalla superficie (butteratura; inglese: *pitting*).

Un getto può essere distrutto dal *pitting*, eppure qualche attimo prima di crollare la sua superficie appare pulita ed intatta, trattasi dunque di un vero caso di fatica la cui microcricca, anziché partire dall'esterno, trae origine in profondità e tanto più profonda è la sede della sollecitazione tanto più lento è l'evolversi del fenomeno, cioè quando i raggi di curvatura sono più grandi (fig. 210).

Questo concetto è evidenziato in fig. 211 che rappresenta alcune curve  $k/N$ , in analogia a quelle di fatica, essendo  $k$  una funzione dei raggi di curvatura e precisamente

$$k = \frac{F}{R_r} = \text{L.S.F. (load stress factor)}$$

ove:

$F$  = carico per unità di lunghezza della generatrice di contatto

$$R_r = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} = \text{raggio relativo}$$

La massima pressione Hertziana ammissibile (coefficiente di Poisson =  $\nu = 0,3$ ) è ottenibile con le note formule di Hertz:

$$P_m = 0,418 \sqrt{E} \cdot \sqrt{k} \text{ (coppie con materiali eguali)}$$

$$P_m = 0,591 \cdot \sqrt{\frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2}} \cdot \sqrt{k}$$

(coppie con materiali diversi)

Il massimo sforzo di taglio si considera approssimativamente eguale a  $0,3 P_m$  e si manifesta ad una profon-

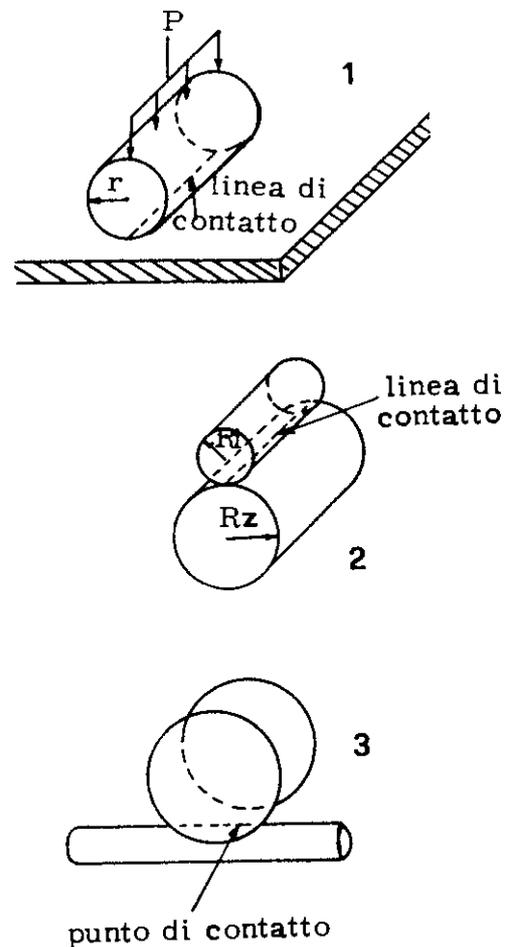


Fig. 210 - Coppie cinematiche ad alto carico locale (33).

- 1 - Linea di contatto tra cilindro e piano; esempio: camme, rulli, punterie.
- 2 - Cilindro su cilindro ad assi paralleli; esempio: ingranaggi e cilindri.
- 3 - Cilindro su cilindro ad assi incrociati; esempio: ruota su rotaia.

dità di circa 0,78 b ove b è la semilarghezza della zona di contatto:

$$b = 1,08 \cdot \sqrt{FR_r} \cdot \sqrt{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}} \quad (\text{coppia cilindri})$$

$$b = 1,08 \cdot \sqrt{F \cdot r} \cdot \sqrt{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}} \quad (\text{coppia cilindro-piano})$$

La tab. XLII, redatta sulla base dei lavori di W. C. Cram, di Talbourdet e di Angus, dà i valori di k, per vari accoppiamenti, per varie durate ed al variare del rapporto percentuale attrito volvente/attrito radente.

La fig. 212 dà il valore di k in funzione della durezza per le coppie volventi ghisa/ghisa e ghisa/acciaio bonificato in funzione dell'HB della ghisa per una durata di 10<sup>8</sup> cicli.

Quest'aspetto dei problemi d'usura è molto importante, in quanto riguarda molti accoppiamenti utilizzati in motoristica ed in meccanica in genere: alberi a gomiti, alberi a cammes, punterie, ingranaggi, rulli, cilindri, ruota-rotai, perni, cuscinetti.

I concetti esposti hanno, oltre che una validità teorica, anche una validità pratica acquisita dalla determinazione sperimentale del L.S.F. (Load Stress Factor) mediante semplici macchine di prova (figg. 213, 214).

Tecniche progettistiche più avanzate tendono a dare oggi indicazioni, mediante un complesso di regole, sul come *disegnare contro l'usura*; per superare i vincoli restrittivi del calcolo Hertziano, J. J. Caubet e M. Cartier<sup>34</sup> introducono nel calcolo il coefficiente d'attrito, responsabile di sforzi tangenziali i quali provocano un reticolo di sollecitazioni che si sovrappone al reticolo normale, dando luogo ad un reticolo risultante tale da potere giustificare grippaggi, butterature, incrinature, fratture verticali, ecc. Gli Autori dimostrano analiticamente che sulla superficie (a valle del movimento) esiste uno stato biassiale di sforzi comprendenti due tensioni (fig. 215) N<sub>1</sub> = 2f P<sub>m</sub> e N<sub>3</sub> = 2f v P<sub>m</sub>; sotto la prima metà del cursore le sollecitazioni superficiali triassiali di compressione sono massime, come pure quelle di taglio τ<sub>s</sub>.

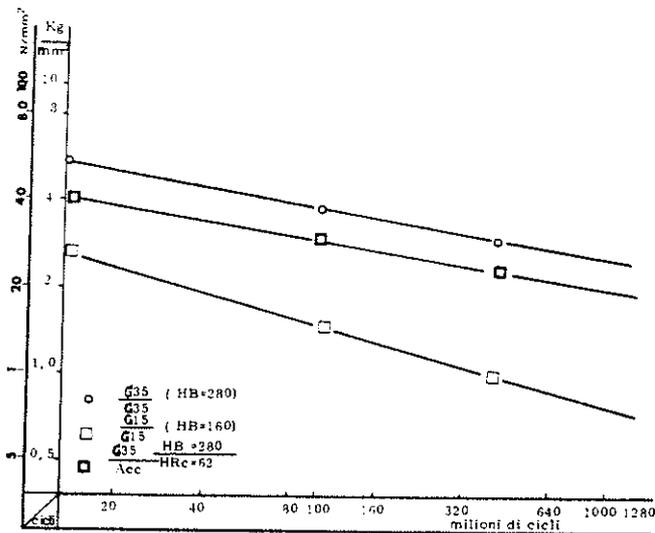


Fig. 211 - Curve tipiche K-N per ghisa grigia in coppie rotoidali cilindriche ad assi paralleli (33).

Tabella XLII - Fattore K per vari materiali (kg/mm<sup>3</sup>).

Materiale I	Materiale II	HB	E <sub>v</sub> x 1.000	HB	E <sub>v</sub> x 1.000	Attrito volvente				Attrito radente a (10 <sup>8</sup> cicli)				
						n° cicli				% Attrito radente a				
						10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	4 x 10 <sup>7</sup>	10 <sup>8</sup>	8%	30%	50%	75%	100%
Ghisa grigia	idem	idem	6	160	6	2,8	1,4	0,9	0,75	0,7	0,6	0,38	0,34	—
						2,8	1,75	1,36	1,2	—	0,9	0,66	0,42	
						5,25	3,7	2,84	2,6	2,30	1,90	1,75	1,40	
						6,5	3,92	3,4	3,2	—	—	—	—	
						7	4	—	2,38	—	—	—	—	
Ghisa grigia legata	Acciaio bonificato	idem	6	600	21,5	1,8	0,98	0,8	0,7	0,63	—	—	—	
						3,85	2,80	2,15	1,6	1,45	—	—		
						4,8	3	2,3	2,16	1,95	—	—		
						—	—	—	(9)	—	—	—		
Ghisa grigia bonificata	idem	idem	12	600	12	—	—	—	—	—	—	—		
						—	—	—	—	—	—			
						—	—	—	—	—	—			
Ghisa concigliata *	idem	idem	13	600	13	—	—	—	—	—	—	—		
						—	—	—	—	—	—			
Ghisa su acciaio	idem	idem	18	600	18	—	—	—	—	—	—	—		
						—	—	—	—	—	—			

\* Velocità consentite: per la ghisa concigliata: 10 ÷ 15 m/s, e per la ghisa grigia 4 ÷ 6 m/s. Esempio: calcolare la massima pressione consentita su due cilindri in ghisa (280 HB) e acciaio (600 HB) per ottenere una durata di almeno 10 milioni di giri.

$$P_m = 0,591 \sqrt{\frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2}} \times \sqrt{K} = 0,591 \sqrt{\frac{12 \times 21,5}{21,5 + 12}} \times 10^3 \times \sqrt{2,8} = 0,591 \times 87 \times 1,6 = 86 \text{ kg/mm}^2; \text{ per una durata di oltre 100 milioni di giri } P_m = 65 \text{ kg/mm}^2.$$

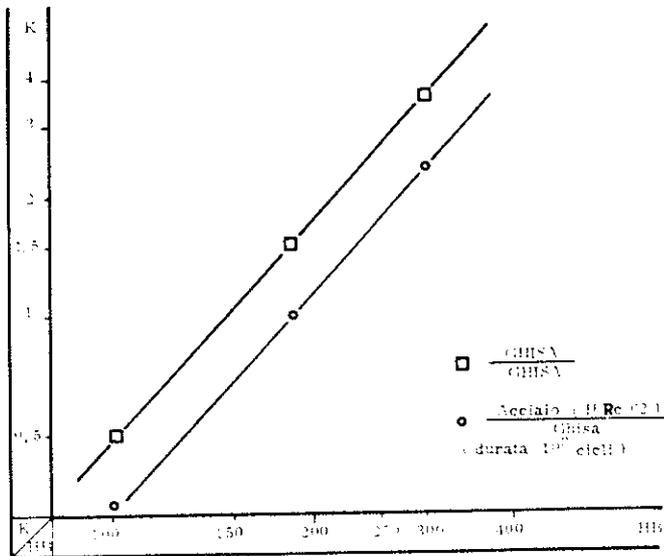


Fig. 212 - « Surface stress factors » per ghise grigie a varie durezza in coppie rotoidali cilindriche ad assi paralleli (33).

Ad una certa profondità (funzione dei raggi di curvatura) si trova la zona di taglio massimo  $\tau_c$ .

Le compressioni, essendo triassiali, possono portare a deformazioni plastiche (anche in materiali fragili), ma non a bruschi accidenti per sovraccarico, lo stesso dicasi per gli sforzi di taglio massimo  $\tau_c$ .

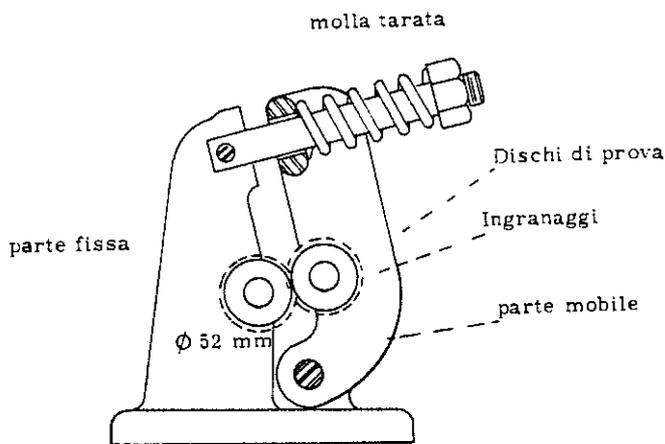


Fig. 213 - Macchina di prova per la determinazione del L.S.F. (Load Stress Factor).

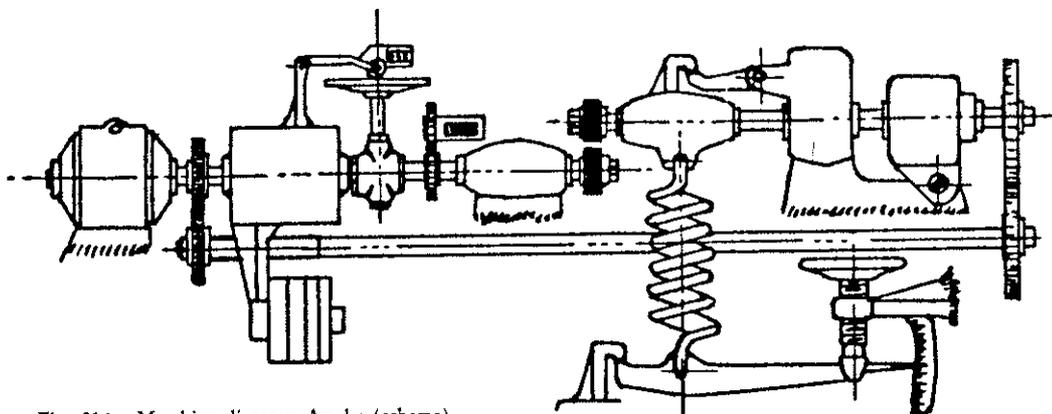


Fig. 214 - Macchina di prova Amsler (schema).

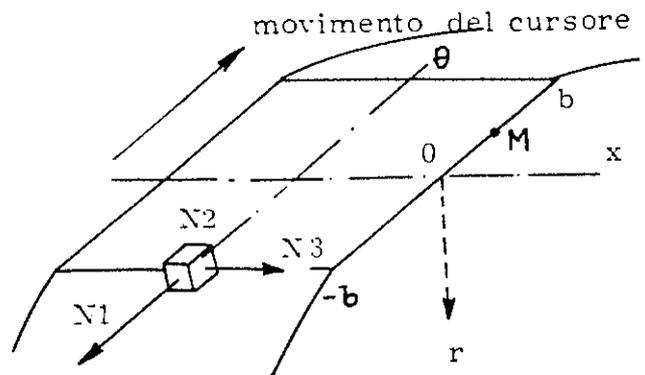


Fig. 215 - Rappresentazione delle sollecitazioni all'uscita del cursore (34).

La sola possibilità, che le sovrassollecitazioni hanno di produrre brusche rotture, sono:

- Le tensioni  $N_1$  dietro il cursore.
- Il taglio superficiale  $\tau_s \approx f P_m$  (per  $f > 0,3$ ).

Le prime sono responsabili delle fratture, le altre della enucleazione. Con la macchina di prova di J. J. Caubet e collaboratori<sup>35</sup>, consistente in un rullo percorrente un piano di ghisa (pista) ( $Ra < 0,01 \mu$ ) alla velocità di 0,01 m/s sono state eseguite prove a carichi crescenti, ad ogni carico (dopo un percorso fisso) era osservata la pista per verificare l'apparire del danno.

I dati relativi alla ghisa G 25 sono riassunti nella tab. XLIII.

Gli esami micrografici mostrano l'apparire di fenomeni irreversibili tra le prove successive N° 3 e 4. Ciò mostra che esiste un valore specifico di tensione  $2f P_m$  compreso tra  $170 \div 250 \text{ N/mm}^2$  (17 e  $25,5 \text{ kg/mm}^2$ ) tale che al di qua non si constata nessun danno, al di là questo è sistematico. Per ciò che concerne la ghisa grigia, è di interesse pratico conoscere un possibile meccanismo d'intervento della segregazione grafitica nella riduzione del coefficiente d'attrito, con le benefiche conseguenze deducibili dall'ipotesi di Caubet.

In fig. 216 si può osservare un meccanismo analogo al comportamento dei bronzi al piombo che si autolubrificano continuamente, via via che i cuscinetti lavorano, mediante la fuoriuscita di piombo (che successivamente si trasforma in ossido).

Una particella, subito sotto alla superficie della pista, sotto l'effetto alternato delle sollecitazioni dovute ai passaggi ripetuti del cursore, è sottoposta ad un effetto di pompaggio tale per cui la grafite migra verso la super-

Tabella XLIII - Quadro riepilogativo di esperimenti successivi effettuati su ghisa perlitica:  $R = 220 \text{ N/mm}^2$  ( $22 \text{ kgf/mm}^2$ );  $R_c = 740 \text{ N/mm}^2$  ( $75 \text{ kgf/mm}^2$ );  $E_s = 122.600 \text{ N/mm}^2$  ( $12.500 \text{ kgf/mm}^2$ );  $Sc = 0,89$ .

No.	Q (kg)	l mm	P kg/mm	f	$P_m$ N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	$2f P_m$ N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	Danneggiamento in superficie
1	20	8	2,5	0,125	470 (48)	120 (12)	no
2	30	8	3,75	0,13	570 (58,5)	150 (15,2)	no
3	50	9	5,55	0,12	700 (71)	170 (17)	no
4	50	4	12,5	0,12	1.050 (107)	250 (25,5)	si
5	50	4	22,5	0,11	1.410 (144)	310 (31,7)	si
Q = carico sul cursore l = larghezza della portata					P = Q/l v = 0,25		

ficie, allontanando il pericolo di una incollatura epidermica (grippaggio).

Questo potere antisaldante della grafite che non è momentaneo, ma che si rinnova continuamente, è di grande importanza nella fase di rodaggio, cioè durante il periodo di adattamento delle superfici, perché evita possibili saldature dei punti caldi.

La rimozione poi della grafite crea piccoli vuoti che agiscono non solo da serbatoi d'olio, ma anche da ricettacoli di eventuali particelle abrasive che, restando sottomesse e non venendo trascinate, ne limitano il danno.

### Usura per attrito secco

Indiscutibilmente se la ghisa grigia è ancora oggi utilizzata come materiale per cuscinetti (soprattutto nell'industria tessile e compressoristica), lo si deve alla presenza della grafite nelle quantità e distribuzioni ottimali già viste.

Questa applicazione della ghisa, sia pur limitata a bassi carichi e velocità e che sfrutta le proprietà antifrizione, sembrerebbe contrastare con l'impiego della ghisa come materiale frenante (ceppi-freno, tamburi-freno, dischi-freno).

Nei freni ad attrito secco l'azione frenante è esercitata dalla resistenza allo scorrimento relativo fra due superfici ad alto coefficiente d'attrito premure fortemente l'una contro l'altra.

Il materiale più usato per generare un forte coefficiente d'attrito è la guarnizione tipo *ferodo*. Questo materiale a base di amianto perde il potere frenante (*fading*) via via che la temperatura supera  $873 \div 1.073 \text{ K}$  ( $600 \div 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

È necessario, pertanto, smaltire in breve tempo il calore d'attrito, di qui la necessità di avere un materiale ad alta conducibilità termica, di durezza sufficiente e di forma appropriata e con accorgimenti tecnici tali da favorire lo smaltimento di calore. Quest'ultimo aspetto è stato sviluppato soprattutto in aviazione ove la dissipazione di energia cinetica, in fase di atterraggio, è dell'ordine di  $15.000.000 \text{ kgm}$  in pochi secondi. I freni a disco (applicati per la prima volta in aviazione) sono oggi una delle soluzioni che garantiscono un rapido smaltimento del calore di attrito, pertanto si riducono i gradienti termici e quindi si riducono le espansioni contrastate delle zone adiacenti più fredde, creando un sistema transitorio di sollecitazioni meno severe.

La ghisa è ancora il materiale più usato nelle coppie frenanti ad attrito secco appunto per la sua elevata con-

ducibilità termica conferitale dal reticolo di lamelle di grafite a contatto fra loro (la conducibilità della grafite è circa tre volte quella della perlite).

L'alta conducibilità conferisce minori gradienti termici lungo la sezione interessata e, quindi, un più rapido livellamento; inoltre il coefficiente di dilatazione lineare nei confronti del ferro risulta abbassato del  $4 \div 5\%$ .

Pertanto la maggiore conducibilità, la minore dilatazione, il minore modulo elastico contribuiscono nella ghisa a ridurre il valore delle sollecitazioni termiche nei confronti di tutte le altre leghe ferrose.

Nel caso di repentine applicazioni del carico (frenate brusche), nessun sistema di raffreddamento può completamente prevenire un gradiente termico critico tra superficie esterna e superficie di lavoro se il metallo stesso non ha doti di diffusività termica.

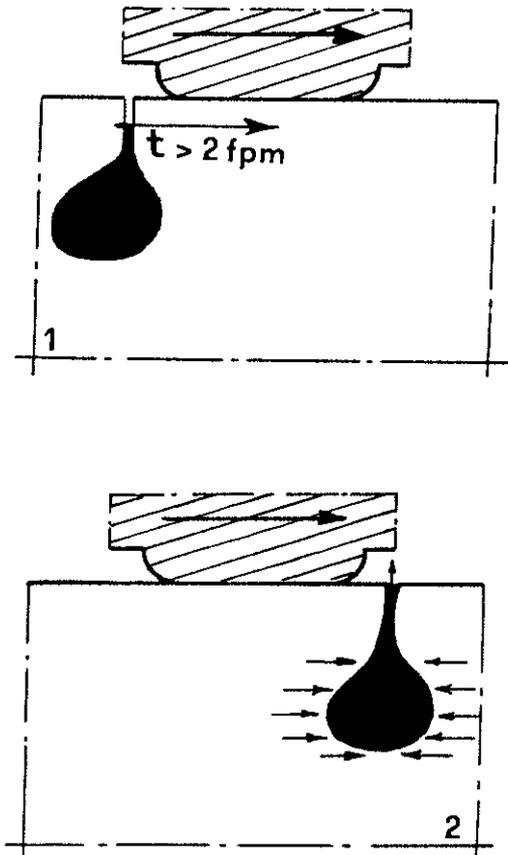


Fig. 216 - Azione di pompaggio della grafite in superficie per l'alternarsi degli sforzi dovuti al moto del pattino.

In certe condizioni di estrema severità è possibile *fondere* la superficie di lavoro con temperature che eccedono i 1.223 K (950 °C) ad una profondità di circa 3 ÷ 4 decimi, mentre il resto del tamburo essendo relativamente freddo, può costituire il mezzo temprante per i punti caldi che si trasformano in martensite, aumentando di volume e generando microcricche che poi l'eccessivo sforzo termico può propagare a tutto il getto. Il rapporto fra l'area reale in contatto con i pattini del freno e l'area totale del tamburo (o disco) è tanto più favorevole quanto più è piccola, poiché così si consente una più alta superficie all'irraggiamento.

Fenomeni ossidativi possono invece intervenire nei veicoli urbani con frequenti fermate (città affollate) ove la frenata non è particolarmente severa, ma il calore non ha avuto il tempo di uniformarsi e dissiparsi. In questi casi le temperature, anche se non superano i 1.003 K (730 °C), sono sufficienti ad ossidare la grafite ed a sferoidizzare la perlite con gravi cali di durezza.

A questi casi estremi *frenata brusca* (shock termico) e *frenate frequenti* (ossidazione, accrescimento), con i loro tipi di danneggiamento, si associa un terzo meccanismo di logoramento che prende il nome di *fatica termica* e che è l'effetto cumulativo prodotto dalla ripetizione di sollecitazioni termiche dovute a gradienti termici anche non eccessivi ed al di sotto della temperatura critica [ad esempio 873 ÷ 473 K (600 ÷ 200 °C)].

Le caratteristiche meccaniche e termiche, che maggiormente condizionano la resistenza alla fatica termica della ghisa, sono le seguenti:

— Conducibilità termica K (una elevata conducibilità termica favorisce un rapido flusso del calore e impedisce il formarsi di forti gradienti termici e quindi meccanici lungo lo spessore).

— Carico di rottura a trazione R	}	Sono favorevoli per avere una maggiore resistenza; un alto carico di rottura, alto allungamento e basso modulo elastico.
— Allungamento A		
— Modulo elastico E		
— Coefficiente di dilatazione termica $\alpha$	}	Un basso coefficiente di dilatazione termica riduce le tensioni differenziali dovute alla non uniformità del campo termico.
— Pendenza (— p) della curva $\sigma_{0,2} \div T \text{ } ^\circ\text{C}$		
	}	È favorevole una bassa pendenza e cioè una relativa stabilità resistenziale a caldo.

Da queste considerazioni derivano i fattori di qualità

$$\text{di Eichelberg: } \frac{R(1-v)K}{E\alpha}$$

$$\text{e di Kattus: } \frac{K \cdot R \cdot A}{E \cdot \alpha \cdot \sqrt{-p}}$$

che sintetizzano le proprietà resistenziali alla fatica termica.

### Elaborazione metallurgica

Come si vede, i vari parametri considerati non sono indipendenti e si deve quindi individuare caso per caso

una soluzione di compromesso, cosa del resto comune a tutte le applicazioni della ghisa.

Per facilitare una selezione dei vari casi possibili, si prospettano alcune regole generali che il fonditore deve rispettare per una corretta impostazione metallurgica del getto sottoposto ai vari tipi di attrito, sintetizzati nella tab. XLIV:

- 1 - Scegliere la classe di ghisa più appropriata alla massività per conferire una buona compattezza.
- 2 - Individuare cioè il grado di saturazione più idoneo, ricordando che, nella generalità dei getti sottoposti ad attrito, è preferibile scegliere, a parità di  $S_c$ , un carbonio più elevato.
- 3 - Quando sono prescritte ghise basso-legate, introdurre i vari elementi nel computo del  $S_c$ , ciascuno con il suo fattore (vedi Volume 1° - Metallurgia delle Ghise).
- 4 - Equilibrare il valore grafitizzante degli elementi (Si = 1; Ni = 0,33; Cu = 0,3; Mo = — 0,35; Cr = — 1,3; V = — 1,5, ecc.) (vedi Volume 1° - Metallurgia delle Ghise).
- 5 - Utilizzare una tecnica di formatura e di colata che garantisca uniformità di caratteristiche, di compattezza, di struttura su tutta la superficie di lavoro soprattutto quando detta superficie è molto vasta.
- 6 - Ove occorra, si può ridurre il Modulo locale ( $M_o = V/S$ ) con conchiglie rivestite o con materiali di formatura ad alta diffusività termica (carburo di silicio). Ricordare che una conchiglia sufficiente, cioè di spessore almeno eguale a  $M_o$  rivestita con 0,5 cm

$$\text{di sabbia, riduce il modulo a } M_R = \frac{2 M_o}{1,5 + 1}$$

e pertanto il suo effetto interessa uno spessore pari a 0,4  $M_o$ . Le caratteristiche resistenziali in questo spessore si surclassano di almeno un livello (esempio da G 20 a G 25).

- 7 - Inoculare con inoculanti compound (che contengano, cioè, elementi disossidanti, stabilizzanti e metastabilizzanti), meglio se applicati in staffa per prevenire l'evanescenza.
- 8 - In casi di getti anche di piccola serie, conviene realizzare prototipi e stabilirne le condizioni di riproducibilità, mediante sezionatura, durezza esplorative, uniformità di struttura.
- 9 - Considerare l'eventualità di fornire getti con la superficie di lavoro sgrassata.
- 10 - I getti più impegnativi vanno trattati termicamente almeno con una ricottura di distensione per ghisa grigia a temperatura di circa 773 ÷ 843 K (500 ÷ 570 °C) cioè al di sotto del punto critico:
 
$$A_{c1} = 730^\circ + 28^\circ (\% \text{ Si}) - 25^\circ (\% \text{ Mn})$$
- 11 - Quando sono prescritte durezza superiori a 250 ÷ 280 HB, è generalmente conveniente trattare termicamente al di sopra di  $A_{c1}$  normalmente in due tempi: riscaldamento lento sino a 923 K (650 °C) seguito da riscaldamento rapido fino a 1.143 K (870 °C); e ciò per impedire sia distorsioni che grafitizzazione nell'intervallo critico. Se il getto è a geometria semplice, si temprà in olio e si rinviene a circa 573 K (300 °C) (martensite rinvenuta) se si vuole un'alta durezza (~ 450 HB), oppure a ~ 698 K (~ 425 °C) se si desidera un'alta resistenza a trazione (+ 25%, con matrice sorbitica).

Tabella XLIV - Regole generali per una corretta impostazione metallurgica dei getti<sup>1)</sup>.

CONDIZIONI DI LAVORO					
ATTRITO SECCO		ATTRITO LUBBRIFICATO (UNTUOSO)			
Attrito radente	Attrito volvente	Volvente (+ radente)			
Dischi freno, tamburi	Condizioni abrasive	Rulli	Ingranaggi		
Cilindri, frantoi scivoli, ecc.	Cilindri Rulli Ruote	Alberi a cammes e punterie	Esercizio intermittente lubrificazione completa	Radente con lubrificazione marginale	Azione combinata. Corrosione e abrasione
Ceppi freno	Cilindri, frantoi scivoli, ecc.	Superficie conchigliata	Cuscinetti Pattini	Motori a combustione interna	Pompe, condutture valvole, presse, stampi
Ghise grigie leghate HB 230	In ordine di merito	Ghisa bianca conchigliata	Ghisa grigia 220 ÷ 260 HB con carburi a seconda si richieda alla tenacità P <sub>m</sub> < 60	Cilindri, fasce elastiche, camicie	In ordine di merito
Se condizioni di fatica termica C = 3 ÷ 3,2 Grafite tipo A	1) Ghisa bianca legata 750 HB 2) Ghisa bianca non legata 500 HB 3) Ghisa legata bonificata 450 HB 4) Ghisa trotata o con carburi dispersi 350 HB 5) Ghisa fosforosa 0,7 ÷ 1,4 P 260 HB	Ghisa bianca conchigliata 420 ÷ 600 HB Ghisa trotata o con carburi dispersi 240 ÷ 500 HB Bonifica con o senza carburi dispersi 300 ÷ 500 HB Ghisa grigia tenace 220 ÷ 260 HB	Indurimento superficiale alla fiamma o all'induzione oppure bonifica P <sub>m</sub> < 65 Ghise conchigliate	Legate, perlitiche HB 230 o sorbitiche con fosfuri/carburi dispersi. HB > 230 Grafite tipo A (A) T.T. per martensite o sorbite Nitrazione Cromatura	1) 30% Cr 2) 15% Si Se azione corrosiva premimente 3) Ghisa austenitica Se azione abrasiva premimente 4) Ghisa bianca legata 5) Ghisa bianca
		Trotate o con carburi dispersi 280 HB P <sub>m</sub> < 63 Indurimento alla fiamma o induzione P <sub>m</sub> < 70 Bonifica P <sub>m</sub> < 70 Ghisa grigia dura 220 ÷ 260 HB (P <sub>m</sub> < 56)		Una migliore capacità di adattamento può essere conferita da una matrice ferritica 180 HB con P = 1%	
				(B) Non legate con grafite tipo A, matrice perlitica (C) Non legate con grafite tipo A, matrice perlitica	
				Il gruppo (A) per condizioni severe d'esercizio; il gruppo (B) per camicie e fasce elastiche auto. (C) Monoblocchi auto. Per anelli preferire C > 3,4	

Se il getto è complicato, si sostituisce alla tempra ordinaria (tempra di durezza) la tempra termale o meglio ancora la bonifica isotermica che consiste nel temprare in bagno di sali a  $593 \div 643$  K ( $320 \div 370$  °C), permanenza da  $3 \div 5$  h e poi raffreddare in aria; si hanno allora incrementi di resistenza del 50% con 320 HB (matrice bainitica).

12 - Ricordare che a parità di durezza le strutture modificate non migliorano molto la resistenza all'usura, tuttavia il trattamento termico può giovare nell'uniformare le strutture delle superfici di lavoro e quando è indispensabile uno stracco di durezza tra parte fissa e mobile della coppia cinematica.

13 - La stessa cosa è valida per l'uso di elementi leganti (ghise bassolegate) che se aumentano di poco il comportamento medio, nei confronti di una buona ghisa grigia garantiscono però una riproducibilità con minore dispersione.

Nel caso, poi, di massività elevate la loro aggiunta diventa obbligatoria sia per conferire le necessarie proprietà sul grezzo sia per spostare a destra le velocità critiche di tempra, sia per evitare ossidazioni a caldo.

Per l'impiego di questi elementi si rimanda all'Appendice del Volume 1° - Metallurgia delle Ghise. Per una sintesi qualitativa si propone la tab. XLV.

14 - Composizione, massività, grado di saturazione, elementi leganti, tecniche di colata e formatura, inoculazione, trattamenti termici, ecc. sono i vari fattori che il fonditore deve tenere sotto controllo ad un unico scopo: quello di conferire la struttura ottimale sulla superficie di lavoro per garantire un comportamento regolare sia nel rodaggio sia nel periodo di esercizio normale.

Per l'individuazione e la realizzazione della struttura ottimale, ben si presta il diagramma di fig. 217 che rappresenta l'elaborazione strutturale del diagramma bivariente di Collaud<sup>37</sup>.

Ciascun punto del diagramma corrisponde alla composizione ed alla durezza in un punto qualunque del getto ed informa sia sul tenore di  $C_c$  che sulla distanza interlamellare della perlite. Ad esempio, se un getto con  $S_c = 0,95$  ha una HB = 225, si può dire con sicurezza che la distanza interlamellare nella perlite è prossima a  $0,32 \mu$  che corrisponde ad una perlite normale e che il suo tenore di  $C_c$  è prossimo a 0,7%.

Nel diagramma sono anche riportate le categorie di massività, queste categorie sono separate da rette, le zone tratteggiate (tenuto conto del peso e dello spessore del getto) indicano le condizioni più favorevoli per realizzare le proprietà antiusura.

Per il computo della quantità di grafite vale la relazione

$$C_g = C_t - C_c = [4,23 - 0,33 (Si + P)] S_c - 0,85 + 0,14 Si \%$$

Le zone indicate realizzano anche le condizioni più favorevoli all'attitudine alla tempra superficiale ed ai trattamenti in genere.

Più è alto il  $C_c$ , più bassa è la distanza interlamellare e più facilmente la ghisa sarà temprabile superficialmente.

$$\text{Siccome } \frac{C_c}{L_A} = \text{cost} \cdot \sqrt{(HB - 125) \cdot C_c} \quad (\text{fig. 151})$$

per un dato  $C_c$  l'attitudine alla tempra superficiale di un getto di ghisa grigia sarà tanto migliore quanto più la durezza è elevata.

Nel caso della tempra superficiale, ove la durata del surriscaldamento è breve (soprattutto se si opera per induzione), è importante che la diffusione del carbonio nell'austenite (al di sopra di  $A_{c1}$ ) si produca rapidamente.

— Esempio 1: Si debba colare un getto per una macchina utensile di grosse dimensioni e di alta precisione: è prescritta sulle superfici di lavoro una durezza di 230 HB. Siccome lo spessore del getto è variabile da 25 ad oltre 100 mm, si deve colare con una ghisa avente  $S_c = 0,85$ , si otterrà un  $C_c$  di almeno 0,8, una perlite normale ed una grafite A 2/3 nello spessore più sottile; inoltre, mediante conchiglie indirette si deve modificare il modulo locale delle guide a più forte spessore in modo da ottenere per una certa profondità un  $C_c$  di  $\sim 0,9$  ed una perlite di finezza 0,35.

— Esempio 2: Si debba colare un tamburo-freno di spessore 20 mm in cui sia richiesta una durezza di 230 ÷ 250 HB ed una alta conducibilità termica, cioè un elevato tenore di C ( $\geq 3,3$ ).

Il diagramma indica che in queste condizioni di massività e di composizione è necessario elaborare una ghisa con  $S_c$  di  $\sim 0,92$ , non ottenendo però i valori di HB richiesti; escludendo ovviamente la bonifica (in quanto il getto può superare in servizio le temperature di rinvenimento), si deve fare ricorso ad elementi leganti: l'aggiunta di 1,5% di Ni + Mo provoca un aumento di almeno 60 HB, per ragioni di economia una parte di Mo può essere sostituita con Cr. La composizione più utilizzata è

$$C_r = 0,2 \div 0,3; \quad Ni = 0,8 \div 1; \quad Mo = 0,3 \div 0,5.$$

Nelle percentuali indicate il Cr stabilizza i carburi, mentre Ni e Mo diminuiscono notevolmente la distanza interlamellare, con incremento delle proprietà meccaniche e con i benefici supplementari tipici degli elementi refrattari.

È anche possibile prevedere la resistenza del getto,

$$\text{infatti} \quad R = 4,09 \cdot \frac{C_c}{L^2}$$

Il carbonio  $C_c$  tabellare non varia gran che con l'aggiunta degli elementi leganti e, pertanto, si può ritenere compreso fra 0,7 e 0,8 indicativamente 0,75 mentre l'incremento di 60 HB sul valore tabellare porta la stratificazione perlitica da  $\sim 0,33$  a  $\sim 0,28 \mu$ , pertanto la resistenza prevista sarà  $> 35$  kg/mm<sup>2</sup>, valida anche ai fini della fatica termica, mentre il  $C_g = 3,3 - 0,75 = 2,55\%$  assicura un rapido smaltimento di calore.

— Esempio 3: Dovendo colare una camicia di 1.200 kg (spessore medio di 45 mm) con prescrizione di durezza di 220 ÷ 230, il diagramma indica una composizione avente  $S_c \sim 0,87 \div 0,8$ .

Per garantire la durezza si può ricorrere ad aggiunte di P, ricordando che per ogni 1% di P (oltre 0,3) si ha un incremento di 30 HB, per il contributo della fase steadite, generalmente l'aggiunta è dell'ordine di 0,7%.

Migliore, ma più costosa, è l'aggiunta di 0,35 Cr e 0,6 Mo.

Tabella XLV - Sintesi qualitativa degli elementi leganti <sup>16</sup>.

Elemento	Formazione di grafite		Matrice		Struttura			Proprietà						Corrosione			Osservazioni	
	x abbinata	xx meglio ripartita	x perlite affinata	xx perlite stabilizzata	Carbonio combinato	Crano affinato	Aumentata compattezza	Resistenza alla trazione	Freccia alla flessione	Tenacità	Resistenza alla fatica	Durezza	M: acqua di mare	A: acidi	E: acidi diluiti	Resistenza all'usura (con abrasione)		Lavorabilità
Carburizante	(x)	(xx)	x	xx	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	1)	
	x	xx	xx	xx	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	2)	
	x	xx	x	xx	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	3)	
	x	xx	x	xx	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	4)	
	?		(x)	xx	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	5)	
Gratificante	(x)		x		(-)	+		(+)	+	+	-	+	+			+	6)	
	(x)	xx	x		(-)	+	+	+	+	?	+	+	+	+		+	7)	
	x				-	+		+		?	+	+	+			+	8)	

+ Aumento

— Diminuisce

? Incerto

(x) Debole aumento

(-) Debole diminuzione

- 1) Carburizante energetico - Effetto massimo con Mo, oppure Ni-Mo. Aumenta la resistenza a caldo.
- 2) Carburizante debole (può essere sostituito con W = 2% Mo) aumenta la tenacità e la resistenza all'usura a temperature elevate.
- 3) Agisce anche come degassante per reazione con ossigeno e azoto.
- 4) Senza effetto sensibile al di sotto di 1%.
- 5) Generalmente non supera 0,2%. Tenori maggiori quando si richiede resistenza all'acqua marina.
- 6) Efficacia totale in presenza di carburante: Cr, Mo, Cr-Mo.
- 7) Idem.
- 8) Agisce essenzialmente come desossidante e degassante.

TIPO DI GRAFITE

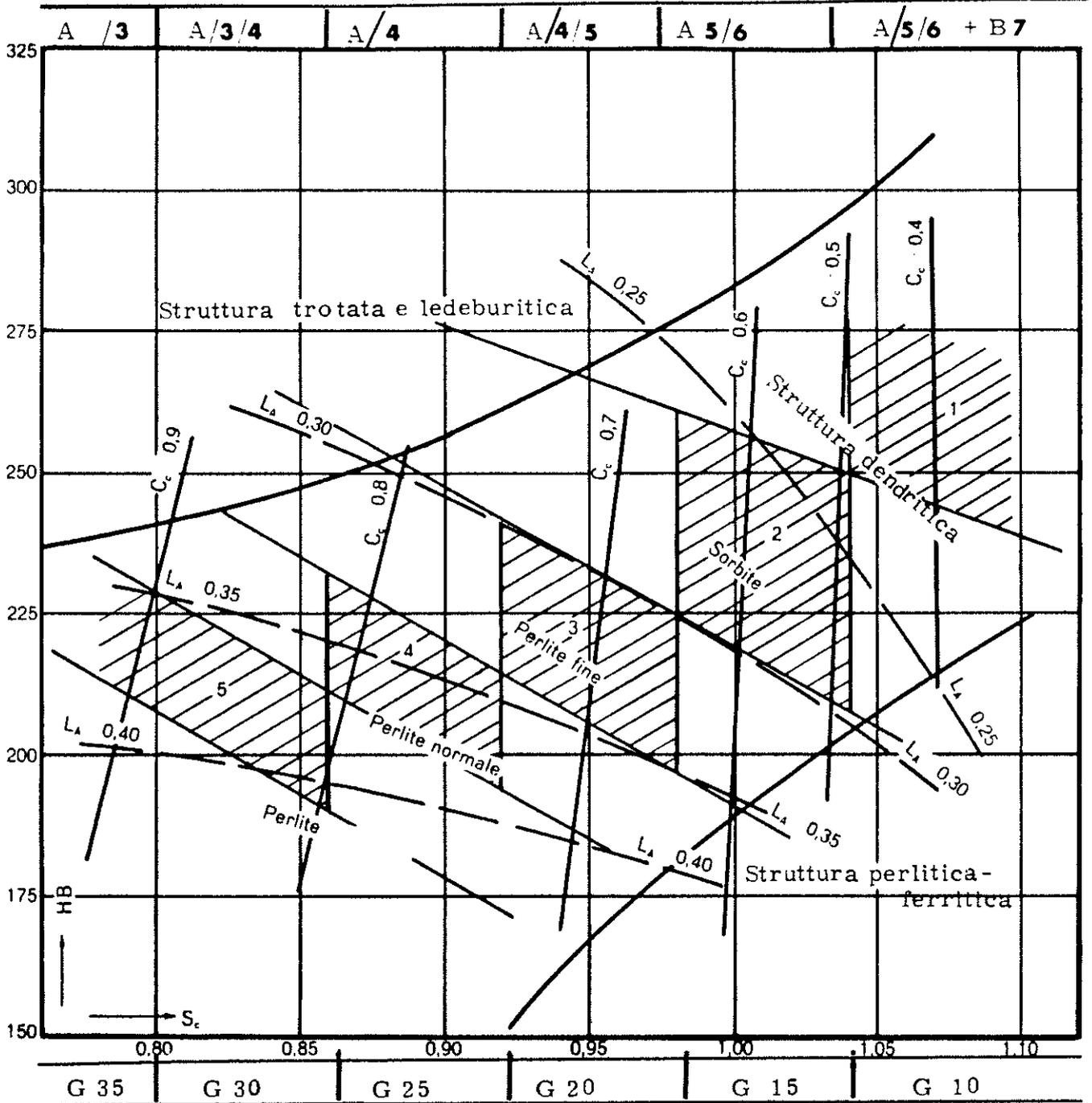


Fig. 217 - Elaborazione strutturale del diagramma bivalente di Collaud (37).  
 Le zone tratteggiate corrispondono alle categorie di massività.  
 Zona 1 - Getti molto sottili e molto leggeri (circa 3 ÷ 5 mm e circa 1 ÷ 10 kg).  
 Zona 2 - Getti sottili e molto leggeri (circa 5 ÷ 10 mm e circa 10 ÷ 50 kg).  
 Zona 3 - Getti con spessore medio e di peso medio (circa 10 ÷ 20 mm e circa 100 kg).  
 Zona 4 - Getti spessi e pesanti (circa 20 ÷ 30 mm e circa 1.000 kg).  
 Zona 5 - Getti molto spessi e molto pesanti (da 30 ad oltre 50 mm ed oltre 1.000 kg).

## GENERALITÀ SULLA LAVORABILITÀ

La valutazione della lavorabilità, per asportazione di truciolo (truciolabilità), dei materiali metallici grezzi o semilavorati, mediante un indice numerico che ne dia in qualche modo la misura è senza dubbio della massima importanza nei riguardi delle lavorazioni meccaniche.

Numerosi sono stati finora i metodi messi a punto dai ricercatori per dare una definizione operativa della lavorabilità; quello comunque, che fino ad oggi è stato il più utilizzato, per il quale è disponibile una larga messe di dati cui sono stati generalmente riferiti per ricavarne la validità, i risultati ottenuti con altri tipi di prove, elaborate successivamente, è il metodo che si avvale delle classiche prove di lunga durata, eseguite mediante tornitura longitudinale di una superficie cilindrica, operando con velocità di taglio comprese nel campo di validità della legge di Taylor, che lega la velocità di taglio  $V$ , alla durata del tagliente in minuti  $T$ :

$$VT^{-\frac{1}{K}} = C \quad (8)$$

e cioè

$$\log V = \log C + \frac{1}{K} \log T$$

ove  $\log C$  (fig. 218) è letto all'incontro della retta con l'asse delle ascisse per  $T = 1$  e  $K = \text{Tg } \alpha$  è la tangente dell'angolo che la retta forma con l'asse stesso. Anziché misurare l'angolo  $\alpha$ , si preferisce ottenere il valore di  $-K$  dal rapporto dei cateti  $b$  ed  $e$ . In corrispondenza a  $b = 100$  mm il valore di  $e$  (mm) diviso per 100 dà  $-K$ .

Il tratto della retta considerato nella fig. 218 è quello usato in pratica, mentre la funzione  $(\log V, \log T)$  non dà luogo sempre ad una retta, ma può assumere la for-

ma di fig. 219 in cui il tratto considerato nella fig. 218 è quello rettilineo nella parte discendente.

I valori di  $\frac{1}{K}$  per i diversi utensili sono riportati nello specchio seguente:

	Acciaio rapido	Carburi	Ceramici
$-\frac{1}{K}$ max	— 0,2	— 0,4	— 0,8
$-\frac{1}{K}$ medio	— 0,125	— 0,25	— 0,5
$-\frac{1}{K}$ minimo	— 0,007	— 0,17	— 0,4

dalla (8) si ha

$$C = V' T'^n = V'' T''^n \quad (\text{ove } n = -\frac{1}{K})$$

se si vuole  $T'' = 2 T'$  è:

$$V'' = \frac{1}{2^n} V' = 0,92 V'$$

Cioè la velocità  $V''$  alla quale corrisponde una durata doppia dell'utensile di acciaio rapido è mediamente dell'8% inferiore alla velocità  $V'$ .

Per trovare senza perdite di tempo il primo punto della retta in campo doppio logaritmico si può procedere lavorando per un tempo prefissato (ad esempio 1 min) ad una velocità molto bassa, quindi senza riaffilare l'utensile per altrettanto tempo, si lavora ad un numero di giri

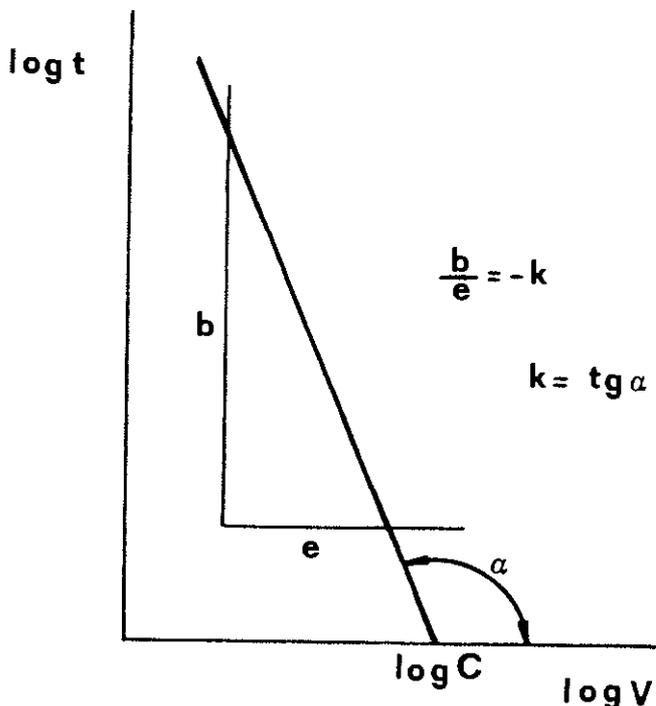


Fig. 218

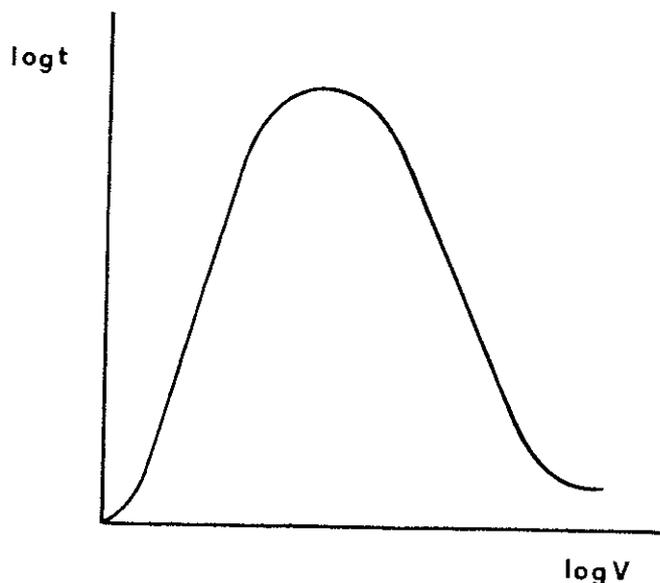


Fig. 219

immediatamente successivo e così via sino a che la durata dell'utensile (crollo dell'utensile) alla velocità  $V_{\Delta}$  risulta uguale a  $T_{\Delta}$  inferiore a quella prefissata.

In tale modo, partendo dal valore  $T_{\Delta}$  trovato, si calcola la velocità alla quale la durata sarà di 5 min.

Si tornisce a questa velocità calcolata, trovando l'effettiva durata e si ripete la prova almeno 3 volte per avere un valore medio della durata. Si ottengono così le coordinate V-T del primo punto della retta, si riduce la velocità di taglio trovata dell'8% e si ha il secondo punto sperimentale della retta e così via sino ad ottenere 6 ÷ 7 punti.

Come indice di lavorabilità si assume la velocità di taglio che corrisponde ad una durata prefissata dell'utensile; se tale durata, come in molti casi è stato fatto, è stabilita in 1 h, la corrispondente velocità di taglio è generalmente indicata con  $V_{60}$ . Per avere una confrontabilità di risultati tra le  $V_{60}$  ottenute sulle varie ghise, occorre operare a secco con lo stesso utensile e gli stessi parametri di taglio; così operando, si ottiene un indice di lavorabilità diretto (in quanto ottenuto con prove di taglio) ed assoluto (in quanto non riferito ad un materiale campione). I parametri di taglio suggeriti sono:

- Avanzamento = 0,2 mm/giro.
- Profondità di taglio  $1,5 \pm 0,05$  mm.

Una cura particolare deve essere posta nella preparazione degli utensili, innanzi tutto, nel corso di una serie di prove, le barre da cui estrarre gli utensili devono provenire da un'unica colata; inoltre il trattamento termico, consigliato dalle Norme, deve essere condotto con gli stessi forni e possibilmente in un unico trattamento per tutti gli utensili.

L'utilizzo di forni sotto vuoto è raccomandato per evitare decarburazioni. Il ciclo del trattamento è il seguente:

- Preriscaldamento a 773 K (500 °C): 30 min
- Preriscaldamento 773 ÷ 1.123 K (500 ÷ 850 °C): 30 min
- Preriscaldamento 1.123 ÷ 1.373 K (850 ÷ 1.100 °C): 10 min
- Preriscaldamento 1.373 ÷ 1.533 K (1.100 ÷ 1.260 °C): 6 min
- Immissione di  $N_2$  e raffreddamento sino a temperatura ambiente
- Rinvenimento doppio a 833 K (560 °C) per 1 h 30 min.

### Pratica operativa della prova $V_{60}$

Generalmente le prove  $V_{60}$  sulle ghise sono effettuate su bussole cilindriche del tipo illustrato in fig. 220 alle quali è asportato un anello terminale di altezza 25 mm, allo scopo di evitare l'influenza delle ineguaglianze strutturali che si verificano ai bordi della parte bassa della colata a pioggia.

L'ordine delle fasi per le prove di lunga durata è il seguente:

- Montaggio e centraggio della camicia su un tornio che consenta la variazione continua della velocità di rotazione del mandrino (fig. 221 a).
- Tornitura conica interna della parte terminale della bussola (fig. 221 b).

- Montaggio di un disco conico adeguato, munito di un foro per la centratura nella contropunta (fig. 221 c).
- Sgrossatura della *pele di fonderia* in 2 passate successive, ciascuna di 2 mm con utensile a carburi.
- Realizzazione dei lavori destinati alla determinazione della durata dell'utensile (secondo la metodica già descritta). L'utensile con i suoi angoli caratteristici è descritto in fig. 222. La regolazione della velocità del mandrino si ottiene azionando il reostato d'eccitazione del motore elettrico in corrente continua.
- Al termine di ogni prova e prima di proseguire con la successiva deve essere asportata (per un tratto di 1,5 cm al di qua ed al di là) la parte interessata al crollo mediante utensile a carburi (profondità di passata 1,5 mm).

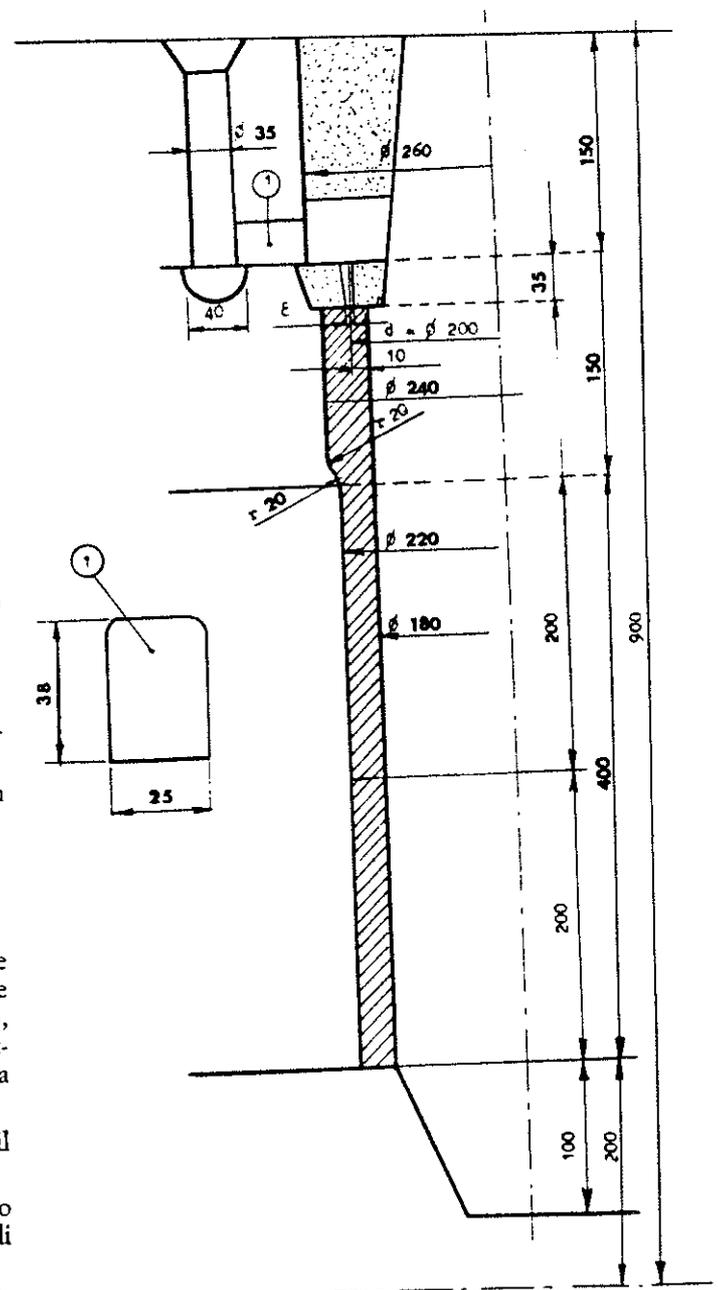


Fig. 220

## Metodo di calcolo della durata del tagliente

Il procedimento seguito è detto della regressione (Norma Unsider - Progetto n° 820/IV), un metodo statistico che porta alla valutazione delle caratteristiche della retta, partendo dai valori V-T ottenuti.

Con tale procedimento si trova l'equazione della retta che rende minima la somma dei quadrati delle distanze verticali degli n punti rilevati.

Un esempio di applicazione pratica del metodo citato è illustrato in tab. XLVI che riassume il procedimento condotto su una camicia colata in G 25 la cui durezza media, su 3 + 3 valori riguardanti la parte alta (lato materozza) e bassa (lato anello terminale), risultava di 211,5 Brinell.

## Metodi rapidi per la misura della lavorabilità

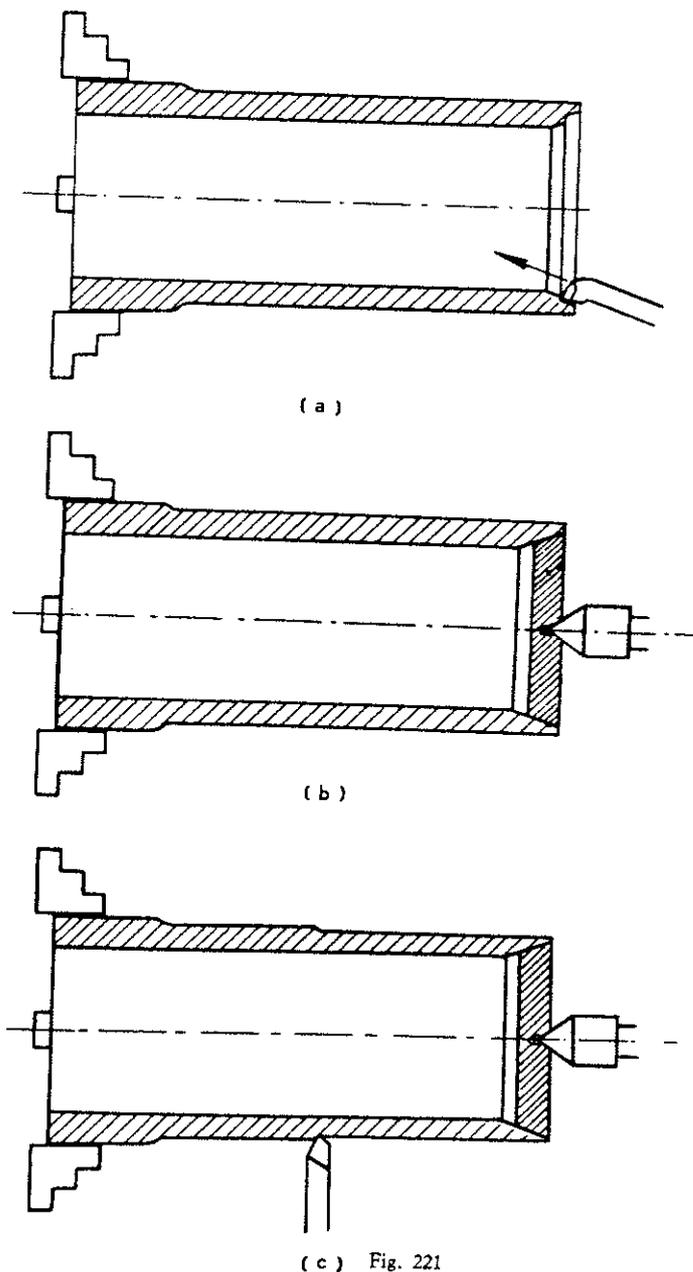
Il metodo classico per la determinazione delle  $V_{60}$ , sebbene ormai consacrato dall'uso, risulta essere tuttavia

molto lungo e laborioso e necessita di una notevole quantità di materiale da tagliare e di utensili: bisogna, infatti, effettuare in genere 7 o 8 prove di taglio con velocità differenti, portando fino al *crollo* altrettanti utensili per durate che vanno da qualche minuto a circa 1 h (le durate variano comunque in funzione del materiale tagliato). Inoltre, le prove devono essere fatte su un tornio che permetta la variazione continua della velocità di rotazione del mandrino, se non si vogliono complicazioni eccessive dal punto di vista della pratica esecuzione della prova. La determinazione delle  $V_{60}$  rimane, quindi, una tipica prova da laboratorio di ricerca.

Molti ricercatori hanno perciò ritenuto opportuno di mettere a punto dei metodi di prova più rapidi, che tuttavia fossero comparabili a quello precedente. Un primo passo è stato fatto in tal senso con l'elaborazione di un metodo rapido consistente nell'eseguire, sul materiale in esame, delle torniture di superficie cilindriche, di durata costante, con velocità crescenti in modo discontinuo, secondo una progressione geometrica, fino al *crollo* dell'utensile, e ricavare poi le  $V_{60}$  mediante una correlazione analitica<sup>38</sup>.

Anche se tale metodo snellisce notevolmente la procedura per la determinazione delle  $V_{60}$ , esso da una parte è affetto da dispersioni maggiori del metodo classico, e dall'altra non presenta, nel campo della lavorabilità, per asportazione di truciolo, quei caratteri di rapidità di esecuzione e di immediatezza di risultati, che invece si verificano, ad esempio, nel campo della lavorabilità per deformazione plastica, con la prova Erichsen effettuata sulle lamiere da imbutitura.

Un metodo di prova rapida ad incremento continuo della velocità di taglio per la determinazione della lavorabilità dei getti di ghisa grigia, è il metodo Brandsma<sup>39</sup>; tale metodo, anche se dal punto di vista logico può essere considerato come un'estensione per passaggio, al limite, del metodo precedente, si presenta, tuttavia, al-



(c) Fig. 221

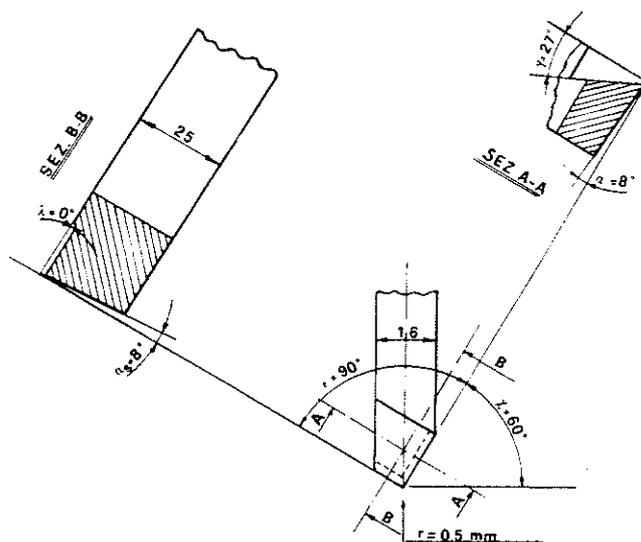


Fig. 222 - Acciaio UNI per 75 W 18 KU —  $HR_c = 65 \pm 1$   
 Spoglia superiore  $\gamma$   
 Inclinazione del tagliente  $\lambda$   
 Spoglia inferiore  $\alpha$   
 Spoglia inferiore secondaria  $\alpha_s$   
 Profilo  $\lambda$   
 Angolo tra i taglienti  $\varepsilon$   
 Raggio di raccordo tra i taglienti  $r$   
 Tolleranza angoli  $\pm 0,5^\circ$

Tabella XLVI - Prova di lavorabilità di lunga durata V 60

UTENSILE utensile in acciaio rapido 18-4-1		$\alpha$	$\gamma$	$\lambda$	$\chi$	$\epsilon$	$\tau$	Tratt. term. v. UNI 2955-68 trat. HRC = 64		Sgrossatura normale sino a 4 mm	avanzamento $s = 0,20$ mm/giro	profondità $a = 1,5 \pm 0,05$ mm
		8°	27°	0°	60°	90°	0,5					
Risultati												
N°	V	T	X = lg V	Y = lg T	XY	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>					
1	47	3,34	1,67210	0,52375	0,87576	2,79592	0,27431					
2	45	8,75	1,65321	0,94201	1,55734	2,73310	0,88738					
3	43	22,37	1,63347	1,34967	2,20464	2,66822	1,82161					
4	41	17,34	1,61278	1,23905	1,99832	2,60106	1,53524					
5	39	23,50	1,59106	1,37107	2,18145	2,53147	1,87983					
6	38	96,09	1,57978	1,98268	3,13220	2,49570	3,93102					
N = 6			$\Sigma X = 9,74240$	$\Sigma Y = 7,40823$	$\Sigma XY = 11,94971$	$\Sigma X^2 = 15,82547$	$\Sigma Y^2 = 10,32939$					
$X = \frac{\Sigma X}{N} = 1,62373$			$(\Sigma X)^2 = 94,91436$	$\Sigma X \cdot \Sigma Y = 72,17394$	$k = -12,36817$ $C = 52,912$	$s^2 X \cdot Y = 0,05048$ $SQR = 0,98055$						
$X = \frac{\Sigma Y}{N} = 1,23470$			$(\Sigma XY)/N = 15,81906$	$\Sigma X \cdot \Sigma Y/N = 12,02899$	$F. (95\%) = 7,71$	F. calc. = 19,42						
$V \cdot T^{0,0662} = 52,912$			V 60 = 38,05 m/min	HB = 211,5 kg/mm <sup>2</sup>								

l'atto pratico molto più rispondente a quei requisiti di facilità di esecuzione che sono necessari ad una prova industriale standard di fonderia.

Il metodo Brandsma — così come è stato messo a punto dalla Sottocommissione 7<sup>a</sup> del Comitato Internazionale delle Associazioni Tecniche di Fonderia (C.I.A.T.F.), con il contributo della Régie Renault, della G. Fischer e del Centro Sperimentale Metallurgico (C.S.M.) di Roma — consiste essenzialmente nell'effettuare, su un provino standard avente forma di disco (fig. 223), montato sul mandrino autocentrante di un comune tornio parallelo, una sfacciatura mediante un utensile di acciaio super-rapido di determinata geometria: la prova di sfacciatura è eseguita con profondità di passata ed avanzamento per giro prefissati, partendo dal foro centrale preventivamente praticato sul disco-provino (dal quale è stata anche asportata la *crosta* superficiale di fusione) con velocità di rotazione del mandrino costante e quindi con incremento continuo della velocità di taglio, fino al *crollo* dell'utensile.

È definito come indice di lavorabilità del materiale in esame il valore assunto dalla velocità di taglio all'atto del crollo dell'utensile; tale valore, detto *velocità critica* ( $V_{cr}$ ) espressa in m/min è determinato mediante la misurazione del *diametro critico* ( $D_{cr}$ ) corrispondente al diametro tornito all'istante del crollo dell'utensile e della velocità di rotazione del mandrino.

Il fenomeno determinante è ancora quello del crollo dell'utensile, intimamente legato alle proprietà caratteristiche degli utensili di acciaio rapido e super-rapido: quando i vari fenomeni, che si determinano nella formazione del truciolo, producono una temperatura di taglio (intesa come la temperatura dell'interfaccia truciolo-petto dell'utensile) che raggiunge il valore corrispondente a quello che provoca il decadimento delle proprietà, soprattutto di durezza, acquisite per effetto del trattamento termico preliminare subito dall'utensile, la parte più calda di quest'ultimo cede deformandosi, poiché cede la matrice martensitica nella quale sono alloggiare le parti-

celle di carburi durissimi ed insolubili, matrice che non costituisce più il letto indeformabile delle particelle predette, che offrono la massima resistenza all'abrasione.

Il metodo Brandsma presenta, dal punto di vista operativo, i seguenti vantaggi:

- Il metodo è veramente rapido (per ciascuna prova occorrono, infatti, non più di 15 min, compreso ogni tempo necessario per il montaggio e lo smontaggio del pezzo e per le lavorazioni preparatorie).
- Il consumo di materiale è modesto: su ogni disco del peso di circa 9 kg si possono eseguire almeno 3 prove, per ciascuna delle quali occorre un utensile di acciaio super-rapido.
- Le prove possono essere effettuate su un qualsiasi tornio parallelo di medie dimensioni (per ottenere la velocità di rotazione del mandrino prefissata — 250 giri/min — occorre, tutt'al più, sostituire la puleggia calettata sull'asse del motore elettrico del tornio).
- Non occorrono misurazioni accurate e, quindi, strumenti di misure costosi e delicati; non sono necessari calcoli complessi; le prove possono essere eseguite da personale non qualificato.

Occorre, inoltre, mettere in evidenza che, in sede di applicazione industriale, la prova potrebbe essere eseguita presso la fonderia che fornisce una certa partita di getti, prelevando dalla stessa siviera il metallo per i getti, per i provini unificati destinati alla prova di trazione e per i provini Brandsma. La fonderia sarebbe così in grado di fornire all'utilizzatore, oltre i dati consueti (carico di rottura, durezza Brinell, grado di saturazione, ecc.), dai quali si può trarre un primo orientamento per la scelta di parametri del taglio, anche un indice diretto della lavorabilità, ricavato da un provino che, essendo stato colato con la stessa ghisa, alla stessa temperatura di colata, con lo stesso metodo e lo stesso materiale di formatura, dovrebbe avere presumibilmente una struttura identica a quella dei getti prodotti a parità di HB.

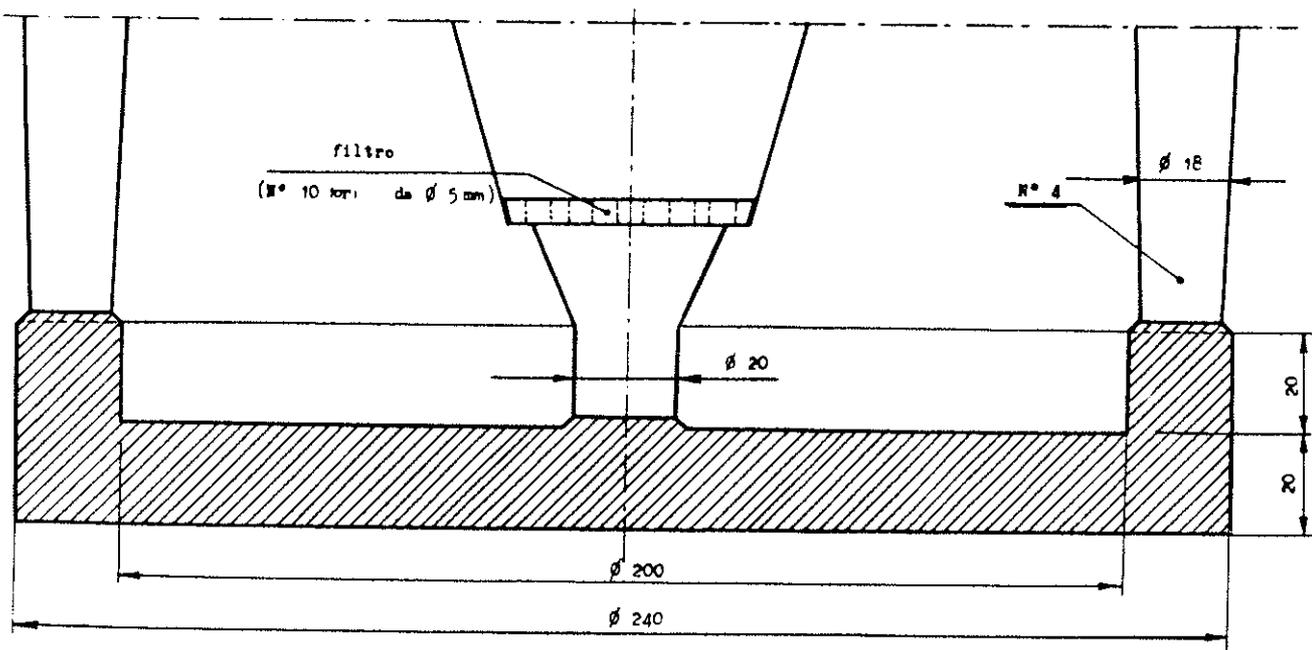


Fig. 223

### Pratica operativa della prova Brandsma (39)

L'ordine delle fasi per le prove su disco Brandsma è il seguente:

- Montaggio del disco-provino su tornio, mediante piattaforma autocentrante, con le modalità di afferraggio e bloccaggio indicate in fig. 224.
  - Foratura ( $\varnothing 35$ ) del centro del disco-provino mediante punta ad elica, montata sulla controtesta del tornio, con velocità di rotazione del mandrino di 250 giri/min.
  - Sgrossatura di sfacciatura con due passate successive eseguite con utensile a sfacciare dotato di placchetta in carburi fissata meccanicamente con avanzamento dalla periferia verso il centro (fig. 225), adottando i seguenti parametri di taglio:
    - avanzamento: 0,175 mm/giro;
    - profondità di passata: 2 mm;
    - velocità di rotazione: 250 giri/min.
  - Esecuzione della prova di lavorabilità con l'utensile schematizzato nella fig. 226 in cui sono riportate le caratteristiche geometriche.
- È possibile utilizzare anche un utensile a placchetta

fissata meccanicamente anziché un utensile a barretta, sia per garantire, con un gran numero di placchette affilate in serie, una buona uniformità dei taglianti, sia per snellire la procedura di prova nel caso di prove sistematiche su molti campioni (fig. 227).

Sono adottati i seguenti parametri di taglio:

- avanzamento: 0,175 mm/giro;
- profondità di passata: 1,50 mm;
- velocità di rotazione del mandrino: 250 giri/min.

- Misurazione del diametro critico  $D_{cr}$  (mm) e determinazione della velocità critica  $V_{cr}$  mediante l'espressione:

$$V_{cr} = \frac{\pi \cdot D_{cr} \cdot n}{1.000}$$

ove  $n$  è la velocità di rotazione del mandrino in giri/min, pertanto

$$V_B = V_{cr} = \frac{\pi}{4} D_{cr} \text{ (m/min)}$$

L'analisi micrografica e la prova di durezza, secondo le indicazioni della fig. 226, hanno mostrato che conviene

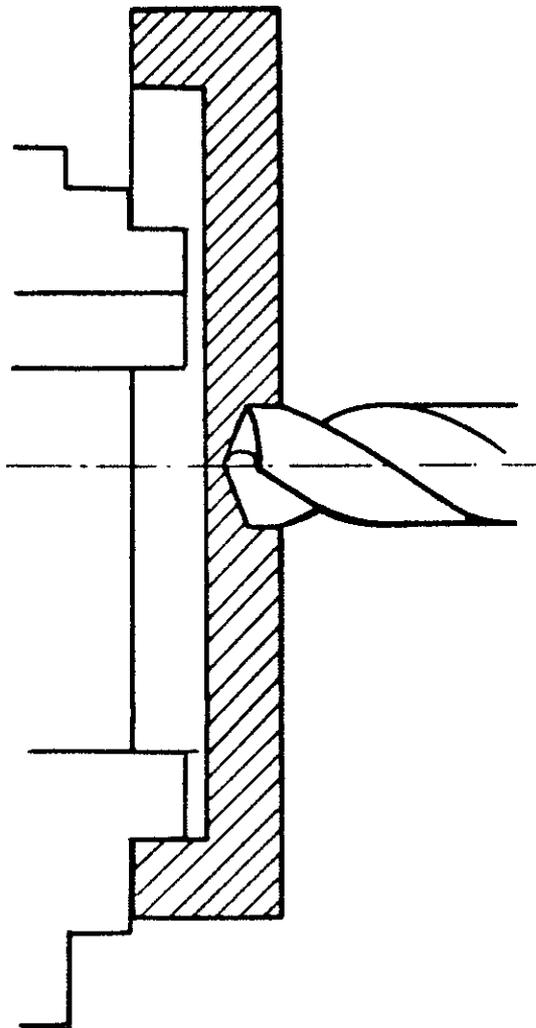


Fig. 224

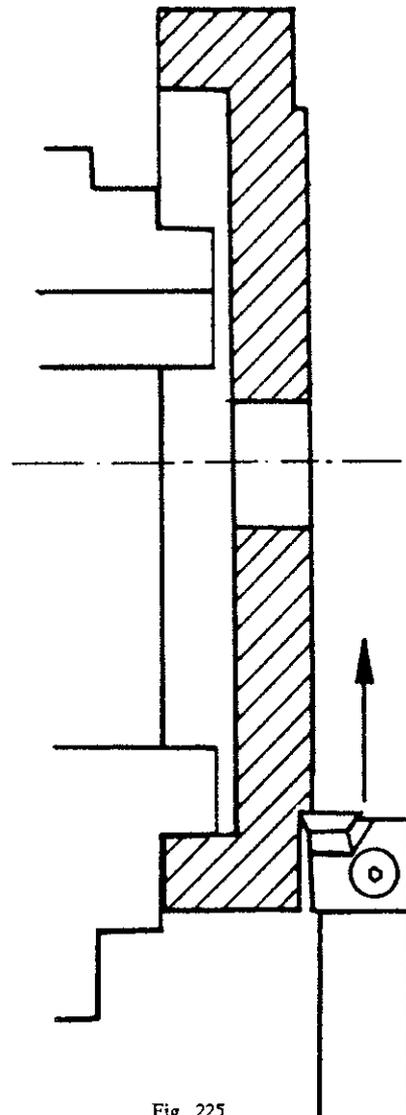


Fig. 225

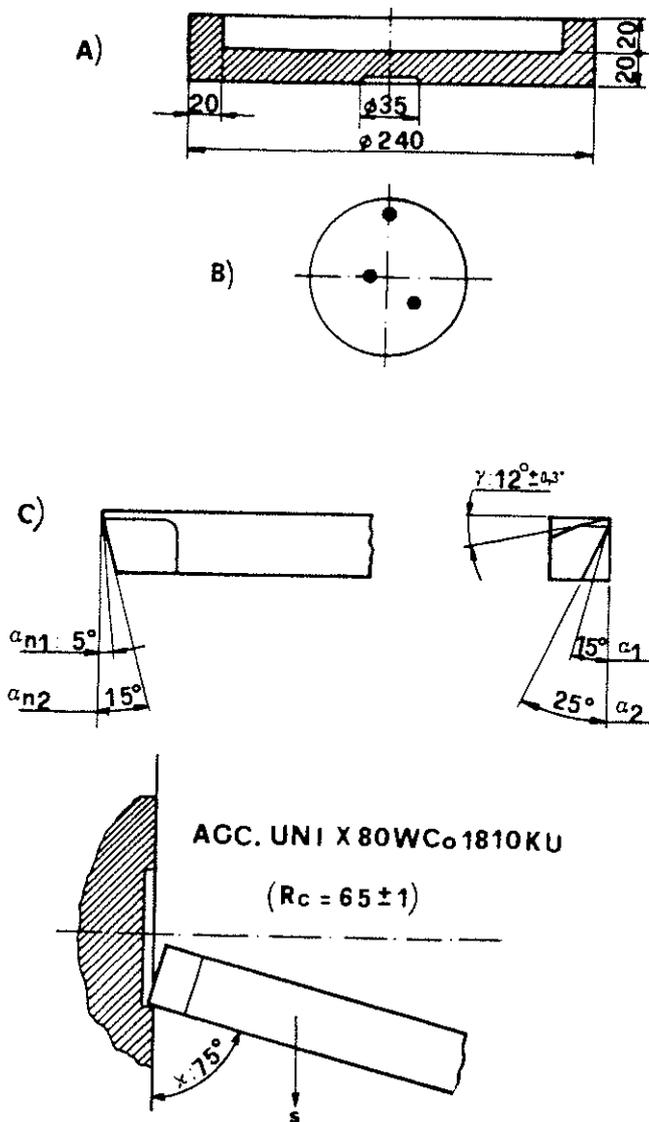


Fig. 226 - A) Disegno del getto di prova (grezzo)  
 B) Posizione consigliata per la misura di HB  
 C) Geometria e tipo di acciaio dell'utensile

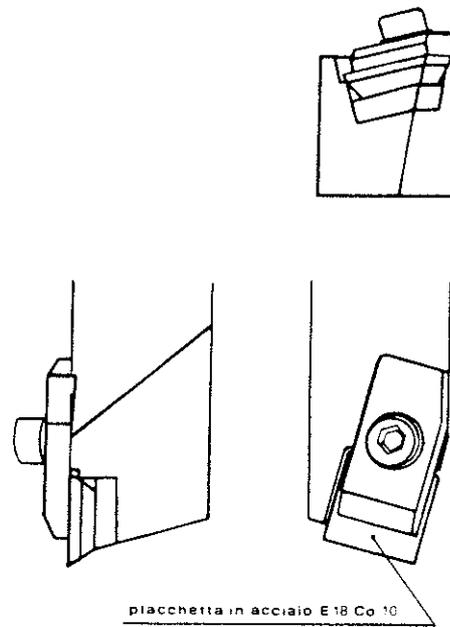


Fig. 227

limitare il campo delle prove di tornitura ad una superficie circolare di un diametro inferiore di 1 ÷ 2 cm al diametro esterno del disco-campione per evitare l'influenza delle ineguaglianze di struttura ai bordi degli spigoli esterni.

La tab. XLVII mostra un esempio di applicazione pratica del metodo Brandsma su 4 dischi colati contemporaneamente con la stessa G 25 servita per la colata delle camicie V<sub>60</sub> di cui a tab. XLVI.

Seguendo i criteri passati in rassegna, la prova Brandsma ha un ottimo coefficiente di variazione percentuale ( $v\% = 3,5$ ) (vedi Norma UNI 1456).

Inoltre il numero di pezzi, necessari per stabilire la media ( $\sim = 5$ ) con una precisione del 4%, è di 3.

Tabella XLVII - Prova di lavorabilità Brandsma - Utensile: placchetta acciaio super-rapido - Sgrossatura: n° 2 passate da 2 mm - Avanzamento:  $s = 0,175$  mm/giro - Profondità:  $a = 1,5 \pm 0,05$  mm - Velocità rotazione:  $n = 250$  giri/min.

Provetta disco n°	Saggio		Diametro critico $D_{cr}$ mm	Velocità critica $V_{cr}$ m/min	Durezza Brinell
	ripetizioni	mm dal bordo			
C 12-1	I				
	II	4 ÷ 5,5	78,6	61,70	219,0
	III	6 ÷ 7,5	77,5	60,84	
C 12-2	I				
	II	4 ÷ 5,5	72,8	57,15	221,0
	III	6 ÷ 7,5	73,3	57,54	
C 12-3	I				
	II	4 ÷ 5,5	73,5	57,70	216,3
	III	6 ÷ 7,5	73,2	57,46	
C 12-4	I				
	II	4 ÷ 5,5	74,8	58,72	224,0
	III	6 ÷ 7,5	75,4	59,19	

## Il metodo Mathon - Renault (40)

Il metodo di prova rapida, proposta da P. Mathon (presso la Renault) per verificare la lavorabilità delle ghise in genere, si differenzia poco da quello Brandsma.

Come provetta si utilizza la barretta UNI 5007 di 30 mm di diametro oppure dei dischetti di  $30 \div 40$  mm di diametro, spessore  $\geq 3$  prelevati direttamente dai getti. La superficie piana del disco è forata al centro (6 mm di diametro).

Per limitare l'incrudimento, si preferisce fare un primo foro di 5,5 o di 5,75 mm di diametro e poi terminare l'alesaggio a 6 mm.

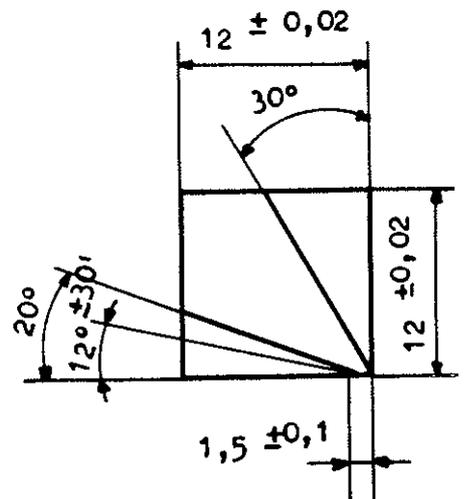
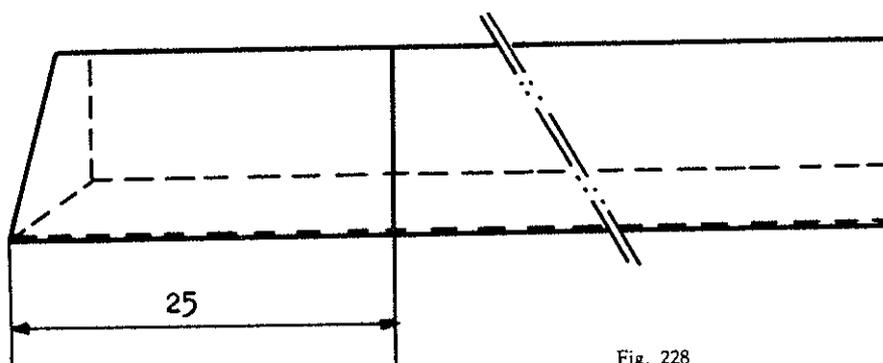
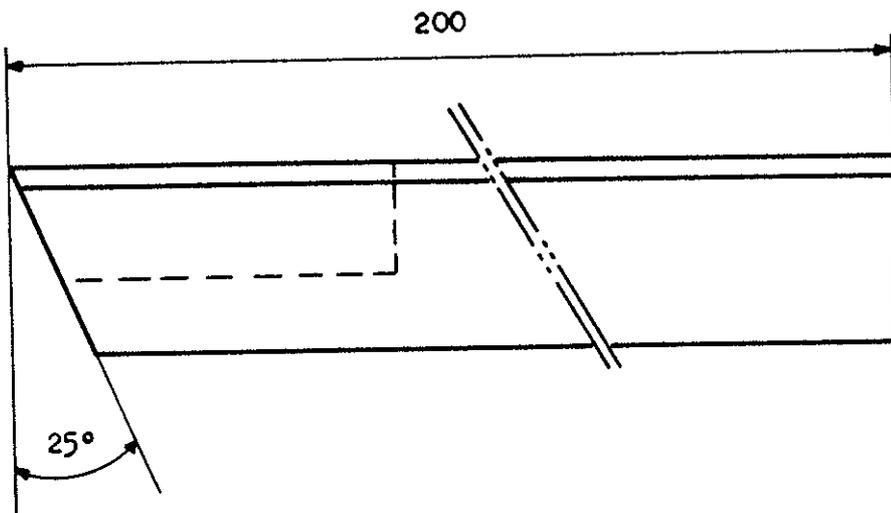
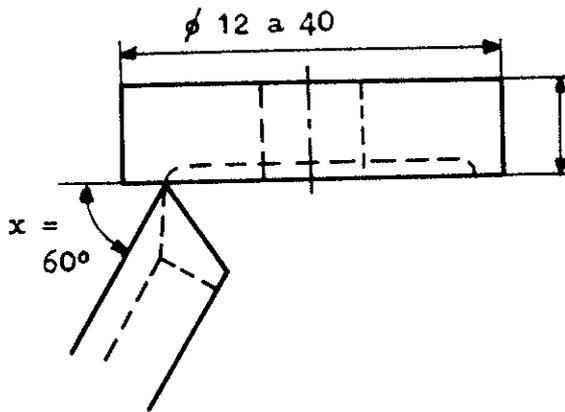


Fig. 228

La superficie piana di partenza è ottenuta prima di ciascuna prova per rifinitura con utensile a carburi.

La profondità di taglio deve essere inferiore a 1 mm, l'avanzamento eguale a 0,02 mm/giro e la velocità di rotazione di 160 giri/min.

Gli utensili sono fabbricati in acciaio C100KU ed affilati secondo le indicazioni di fig. 228.

Una particolare cura deve essere data al trattamento termico degli utensili, poiché questo influisce fortemente sulla riproducibilità dei risultati. Si consiglia:

- Preriscaldamento per 30 min a 833 K (560 °C) in bagno di sali.
- Riscaldamento alla temperatura di tempra: 5 min a 1.098 K (825 °C) in bagno di sali.
- Tempra in olio.
- Raffreddamento: 15 min a 198 K (— 75 °C).
- Rinvenimento: 2 h a 453 K (180 °C).

Il controllo degli utensili si effettua mediante misure di durezza Rockwell C. La media di due misure a ciascuna estremità ed al centro non deve differire, per ciascun utensile, di più di  $\pm 0,5$  unità Rockwell, dalla media generale (60 HRC).

L'angolo di incidenza è di  $60^\circ$ . La punta dell'utensile deve essere regolata a  $0,5 \pm 0,1$  mm al di sotto dell'asse della provetta. Il procedimento di prova consiste nella tornitura, partendo dall'alesaggio centrale verso l'esterno con una profondità di taglio di 1 mm, un avanzamento di 0,032 mm/giro ed una velocità di 1.600 giri/min.

Come criterio di lavorabilità del materiale in esame, si determina per mezzo di un comparatore il diametro per il quale la profondità di taglio, inizialmente di 1 mm, sarà diminuita, in seguito, di 0,2 mm per inizio di fusione del tagliente ( $D_{0,2}$ ).

La prova può essere ripetuta da 4 a 6 volte sulla stessa provetta. È possibile calcolare la velocità di taglio istantanea nel momento in cui si raggiungerà il limite di usura del tagliente in m/min:

$$V_{MR} = \frac{D_{0,2} \cdot \pi \cdot n \text{ giri}}{1.000}$$

### Correlazioni fra metodi a breve durata, metodi a lunga durata e durezza Brinell

Una conferma indiretta dell'efficacia dei metodi a breve durata nel valutare la lavorabilità risiede nel confronto con i metodi di lunga durata. Ad esempio

$$V_{60} = 0,75 V_B - 6,65 \quad (\alpha = 0,05) \quad (R^2 = 77\%) \quad (s = 5,3)$$

correlazione trovata mediante una sessantina di prove su ghise G 25 e G 30 di varia provenienza<sup>41</sup>, ma su dischi (Brandsma) e camicie ( $V_{60}$ ) colate con la stessa siviera; analogamente, nel corso delle stesse prove sono state trovate le correlazioni con la durezza Brinell

$$V_{60} = 100 - 0,3 \text{ HB} \quad (\alpha = 0,05) \quad (R^2 = 84\%) \quad (s = 2,04)$$

$$\text{analogamente} \quad V_B = 155 - 0,45 \text{ HB} \quad (s = 5,4)$$

Su ghise di diversa provenienza (De Sy e coll.<sup>42</sup>) trovano

$$V_{60} = 0,0021 \text{ HB}^2 - 1,092 \text{ HB} + 158,5 \quad (s = 1,79)$$

inoltre (fig. 229), a durezza eguale compresa tra 200 e 220 HB, non c'è differenza tra fusione al cubilotto e forno elettrico; per durezza superiori il forno elettrico tende a dare lavorabilità inferiori.

In merito alla prova  $V_{MR}$  si riporta da Mathon<sup>40</sup> la correlazione tra  $D_{0,2}$  e la *Machinability rating per cent* U.S.A. (figg. 230-231-232).

Tutte queste correlazioni, più che ad un utilizzo pratico al fine di stabilire i tempi di lavoro, mirano ad una convalida dei metodi rapidi proposti per consegnare al metallurgista di fonderia una prova economica che gli consenta di mettere a punto le proprie ghise in vista di particolari esigenze richieste dall'utilizzatore.

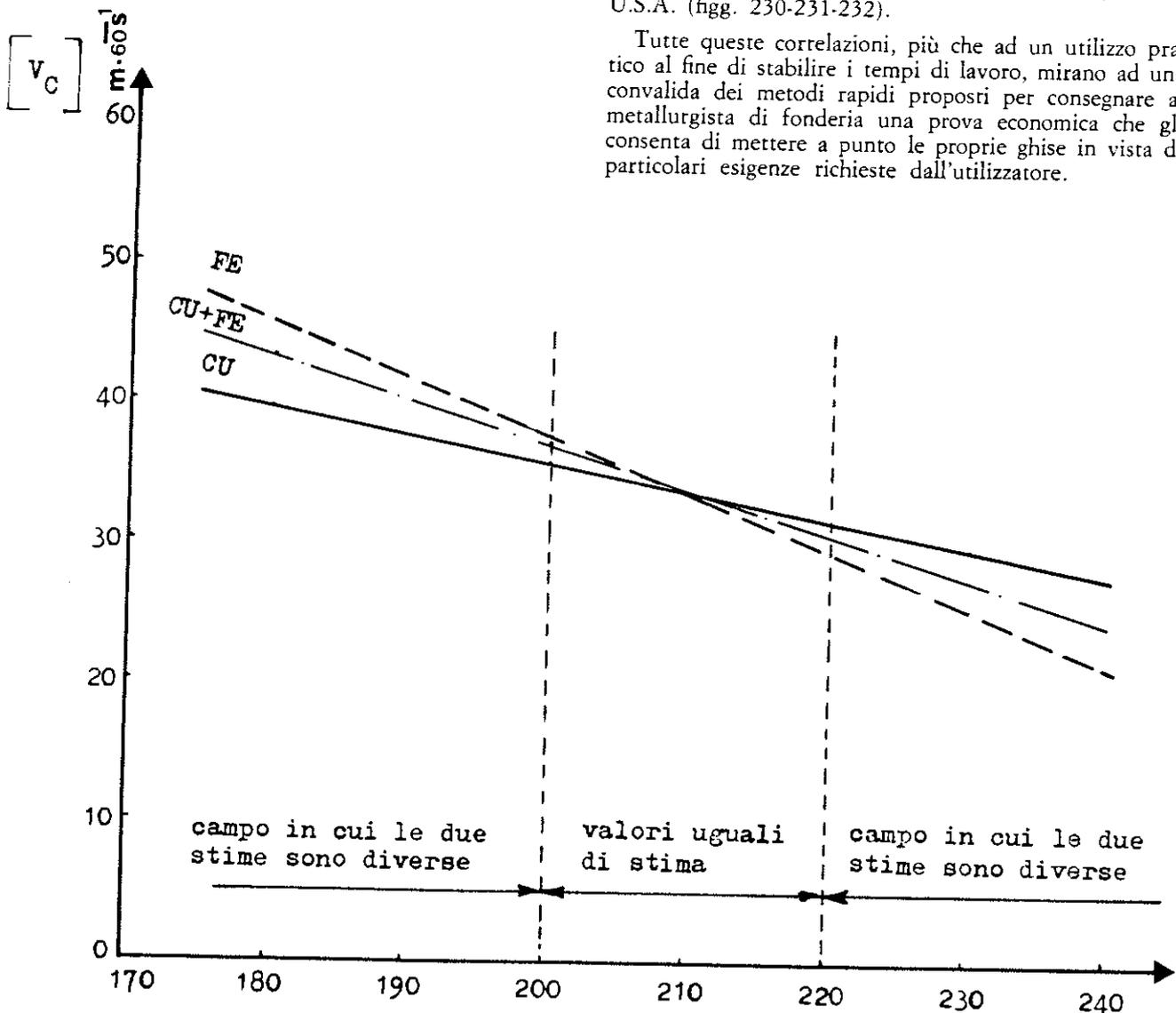


Fig. 229 -  $([V_c]_{60})_{CU} = -0,200949 \cdot (\text{HB}) + 75,774 \pm 2,55$  ( $\alpha = 0,05$ )  
 $\pm 3,54$  ( $\alpha = 0,01$ )  
 $r = 0,944 \quad R^2\% = 89,2$   
 $([V_c]_{60})_{FE} = -0,410981 \cdot (\text{HB}) + 119,710 \pm 3,45$  ( $\alpha = 0,05$ )  
 $\pm 4,78$  ( $\alpha = 0,01$ )  
 $r = 0,974 \quad R^2\% = 94,9$   
 $([V_c]_{60})_{CU+FE} = -0,315772 \cdot (\text{HB}) + 100,187 \pm 4,67$  ( $\alpha = 0,05$ )  
 $\pm 6,30$  ( $\alpha = 0,01$ )  
 $r = 0,92 \quad R^2 = 84,6$

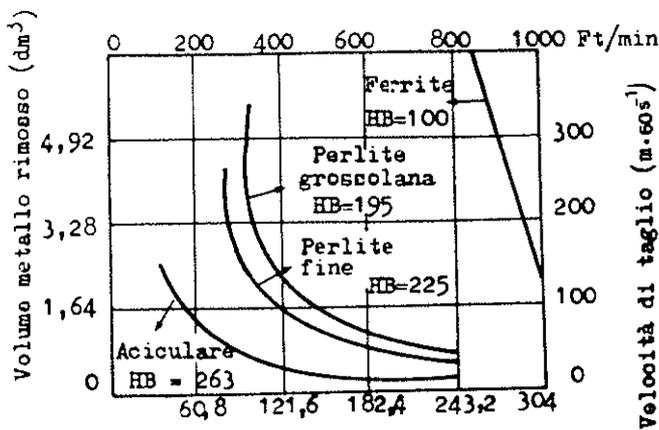


Fig. 230

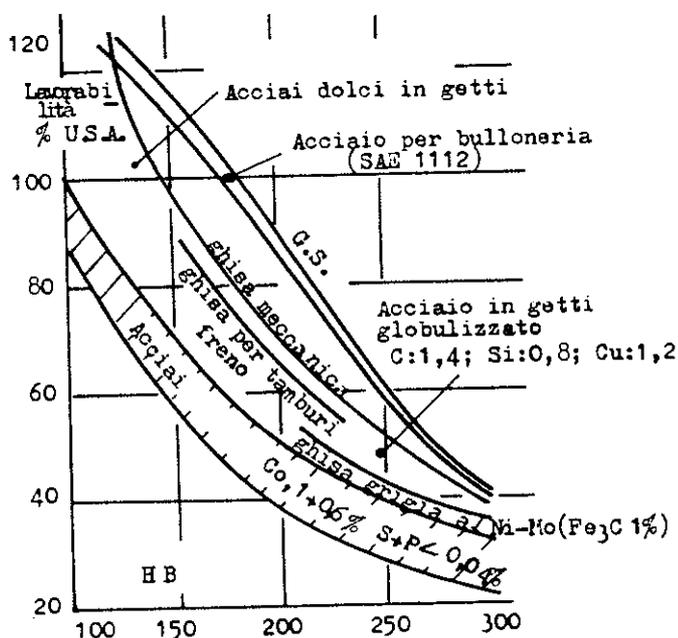


Fig. 231

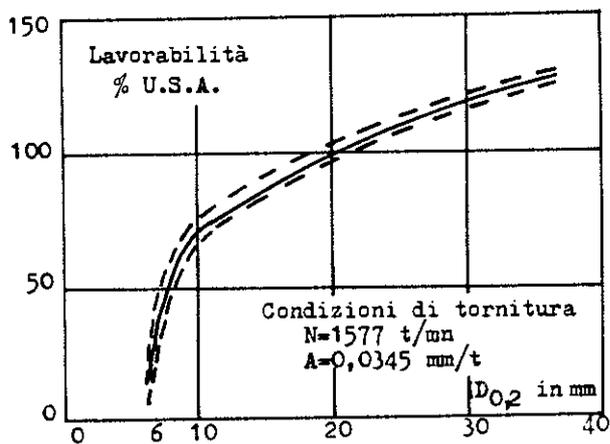


Fig. 232

È chiaro che il solo aspetto metallurgico, essendo una delle tante componenti che intervengono nella lavorabilità dei getti, non è decisivo, ma i metodi proposti valutano per confronto se una ghisa è più lavorabile di un'altra.

D'altra parte, si è visto come la sola durezza Brinell spiega l'80% delle cause che intervengono nella lavorabilità (al tornio), naturalmente restando nel campo delle ghise grigie meccaniche perlitiche. Ciò significa che le variabili che intervengono nella lavorabilità sono in prima approssimazione quelle che decidono la durezza e cioè  $C_c$  e stratificazione perlitica (confronta le figg. 151 e 230): ne consegue che a parità di modulo è la composizione l'elemento determinante e viceversa. Infatti se il  $C_c$  supera il valore:

$$C_c > 0,85 - 0,1 Si$$

significa che per ogni 0,1 in più in  $C_c$  vi sono almeno 1,5% di carburi liberi: la lavorabilità crolla e l'HB aumenta; se il  $C_c < 0,85 - 0,1 Si$  la lavorabilità aumenta per diventare massima per  $C_c = 0$  e  $HB = 125$ . Se la ghisa contiene  $P > 0,08$  si ha a 1.223 K (950 °C) l'eutettico fosforoso (steadite).

Il fosforo ha una grande affinità per il Fe, formando  $Fe_3P$  nella misura del 45 ÷ 65% dell'eutettico fosforoso, detto componente è relativamente duro e fragile a questo si aggiunge (se il Si e/o il modulo sono bassi)  $Fe_3C$  con ulteriori incrementi di  $C_c$  e quindi di HB.

Pertanto, a parità di durezza, il P conferisce lavorabilità di poco inferiori, e che rientrano nei limiti d'errore dei metodi (tab. XLVIII), più evidente sembra invece l'influenza della lunghezza delle lamelle di grafite (tab. II) e cioè a parità di durezza se la grafite è finemente suddivisa, la lavorabilità aumenta. Secondo P. Mathon l'effetto d'urto, delle discontinuità dell'ordine di ~ 1 mm, è tale da provocare il distacco (dal tagliente) di grani gamma aventi dimensioni dell'ordine del centesimo di mm e quindi un'usura accelerata.

Le grafite tipo  $A_1$  e  $A_2$  di dimensioni rispettivamente di  $\geq 1$  mm e di  $0,5 \div 1$  mm sarebbero quindi peggiorative nei confronti dei tipi  $A_4$  e  $A_5$ . Se ne conclude che in un getto, con forti differenze di spessori (ma con  $C_c$  pressoché costante) dovrebbe risultare anche una lavorabilità pressoché costante, in tutti i suoi punti in quanto questa proprietà è in parte bilanciata da due effetti opposti, la lunghezza delle lamelle e la stratificazione perlitica. Anche la finitura superficiale del getto è migliore se la grafite è fine, in caso di grafite  $A_1$  e  $A_2$  per evitare il così detto *grano aperto* conviene usare (a parità di velocità) avanzamenti inferiori.

Si ricorda, senza insistere oltre, che la matrice delle ghise contiene anche inclusioni ricche di manganese. I solfuri, i tellururi sono favorevoli alla lavorabilità dell'acciaio, in quanto impediscono la formazione del *tagliente di riporto* (J. Bellot<sup>43</sup>), nelle ghise dove la grafite ha un effetto predominante sia come lubrificante, sia come *rompitruciolo* dette impurezze (entro i limiti degli standard normali) hanno un'azione trascurabile. Viceversa non sono trascurabili, nei confronti dell'acciaio, le più elevate concentrazioni di silicio, di tutti i costituenti della ghisa ( $Si > 1$ ) e le segregazioni importanti nell'interno ed ai bordi delle celle eutettiche. Ad esempio, il Si si scioglie nella ferrite perlitica, dando silicoferrite contenente il 3,5% di silicio di fer-

Tabella XLVIII - Lavorabilità MR su barre grezze di diametri diversi <sup>4)</sup>.

Prelievo di saggi da $\varnothing$ 25 mm	A cuore della barra $\varnothing$ 300, lunghezza 300 mm	In superficie del tondo di $\varnothing$ 75, lunghezza 300 mm	A cuore del tondo di $\varnothing$ 52, lunghezza 300 mm	A cuore del tondo di $\varnothing$ 52, lunghezza 200 mm	Carter di spessore 13 mm
Modulo V/S in mm	50	30	16,7	11,7	6,5
HB	167	159	176	196	197
Dimensioni grafite	A <sub>1</sub> - A <sub>2</sub>	A <sub>2</sub> - A <sub>3</sub>	A <sub>3</sub> - A <sub>4</sub>	A <sub>4</sub> - A <sub>5</sub>	A <sub>5</sub>
D <sub>0,2</sub> mm	14,3	16,4	16,8	17,2	18,0

Tabella IL - Lavorabilità Mathon-Renault di ghise con diverso tenore in fosforo <sup>4)</sup>.

Tipo di ghisa	Getto spessore mm	Composizione %						Struttura		Durezza Brinell	Lavorabilità D <sub>0,2</sub> mm
		C	Si	Mn	S	P	Altri elementi	grafite	matrice		
Ghisa con 1% P	20	2,95	1,45	0,73	0,093	0,920	—	A <sub>5</sub>	Perlite fine Ferrite 1% Steadite	240	12,3
Ghisa con 1% Cu	20	2,98	1,66	0,49	0,098	0,110	Cu = 0,96	A <sub>4</sub> - A <sub>5</sub>	Perlite fine un po' di steadite	226	13,4
Ghisa allo Sn	20	2,95	1,63	0,52	0,110	0,036	Sn = 0,37	A <sub>4</sub> - A <sub>5</sub>	Perlite media	218	13,0
Ghisa al B	20	2,90	1,65	0,52	0,120	0,037	B = 0,15	A <sub>5</sub>	Perlite media Cementite 25 a 30%	260	7,25
Ghisa al Ni-Mo	20	2,86	1,63	0,57	0,120	0,039	Ni = 1,27 Mo = 0,60	A <sub>4</sub> - A <sub>5</sub>	Perlite Bainite 10 a 20%	262	11,3

ro (FeSi) per ogni 1% di Si nominale, inoltre nell'interno delle celle eutettiche si ha segregazione inversa, per cui si può arrivare a 4,6% FeSi per ogni 1% di Si. Si vedrà anche nei paragrafi successivi come l'eutettico

fosforoso pseudobinario ( $\gamma - \text{Fe}_2\text{P} - \text{C}_\gamma$ ) possa diventare ternario ( $\text{Fe}_3\text{C} - \text{Fe}_2\text{P} - \text{Fe}$ ) quando Mn, Cr, B, V che segregano ai bordi, si concentrano nella steadite, rendendola molto dura e fragile.

## INTRODUZIONE SULLE PROVE IMMEDIATE

Motivi di variazione nella composizione del metallo nel corso della fusione non mancano certo nella fonderia di ghisa, soprattutto se la fusione è condotta al cubilotto entro il quale le singole gocce di ghisa hanno un destino particolare a seconda della zona del forno che esse attraversano. Anche se ogni attenzione è fissata sulla condotta del forno (regolazione del vento, rapporto coke/metallo, temperatura del vento, pesata delle cariche, ecc.), esistono pur sempre fattori imponderabili di incertezza inerenti alla composizione delle cariche, all'umidità del vento, alla sua temperatura e velocità, alla quantità di acciaio introdotto, alla sua pezzatura, al suo stato di ossidazione, alla basicità ed altezza delle scorie, al passaggio tra un tipo di carica e l'altro, alle interruzioni di marcia che esigono un controllo continuo e tempestivo del metallo uscente.

Questo controllo è ancora oggi affidato alle *prove immediate* di fonderia; in particolare l'attitudine alla tempra primaria è la prova più diffusa. Anche se le possibilità offerte dalla spettrografia sotto vuoto e della spettrografia a RX sono notevoli, ben difficilmente il fonditore rinuncerà alle informazioni supplementari derivanti dall'esame della provetta di tempra, in quanto le caratteristiche delle ghise sono principalmente determinate da tre fattori:

- Composizione chimica.
- Condizioni di raffreddamento.
- Stato di nucleazione.

La provetta di tempra si basa essenzialmente sugli effetti di questi tre fattori e dà al fonditore un'informazione globale evidenziata da una particolare struttura frattografica.

Affiancano questo tipo di prova altri due test a lettura immediata: la spirale di colabilità e la provetta di risucchio.

Mentre l'uso della provetta di tempra è sicuramente cominciato nelle fonderie specializzate per la produzione di ruote per vagoni e di cilindri per laminatoio, le altre due sono di uso più recente e sono anche estese ad altre leghe oltre che alla ghisa.

Se sono prese alcune precauzioni di carattere esecutivo, contenute negli standard quali la temperatura di colata, la velocità di colata, il modo di colata, eventuale temperatura della conchiglia, la composizione del materiale di formatura, ecc. dette prove possono rendere utili informazioni al fonditore non solo sulle qualità intrinseche della lega, ma anche sulle sue attitudini tecnologiche nei confronti del riempimento della forma, dell'alimentazione del getto, ecc.

In sostanza, la barretta di tempra indica essenzialmente lo spessore del getto che può ricevere il metallo saggato, senza sorprese di punti duri, scarsa lavorabilità, ecc., mentre la spirale di colabilità indica l'attitudine a riempire la forma anche in punti distanti dall'attacco di colata (senza pericoli di riprese); la colabilità è anche uno dei fattori che determinano la velocità di entrata del metallo nella forma; la provetta di risucchio ha, infine, lo scopo di adeguare l'alimentazione alle esigenze del getto.

Accanto a queste informazioni, che sicuramente si hanno con buona attendibilità, il fonditore si serve di dette prove per modificare tempestivamente con particolari tecniche lo stato chimico-fisico della sua ghisa e la fa rientrare nello standard prefissato.

Anche se è generalmente ammesso che le prove immediate non sono sostitutive dell'analisi chimica, non mancano lavori anche recenti che si occupano di questo problema; soprattutto nelle fonderie medie, che non possono investire capitali in apparecchiature costose che implicano un'assistenza specializzata, ci si serve delle prove immediate come unico criterio qualitativo, riducendo il numero di analisi al minimo indispensabile; d'altra parte, nonostante certe nuove tecniche, l'analisi chimica degli elementi fondamentali C, Si e P resta ancora troppo lenta per consentire la tempestività dell'intervento in forni

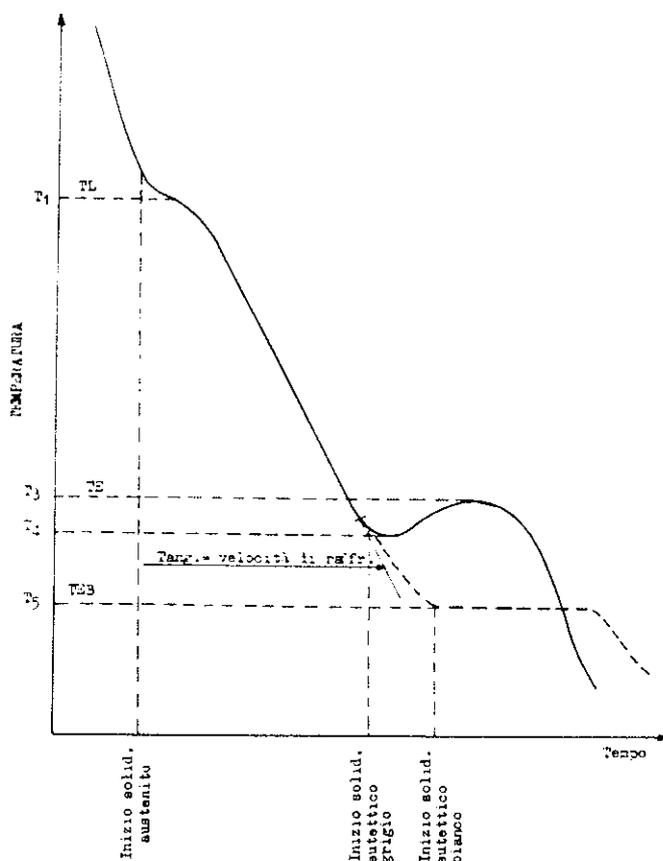


Fig. 233 - ——— Curva di solidificazione di una ghisa grigia  
 - - - - - Curva di solidificazione di una ghisa resa bianca mediante aggiunta di Te

continui; sono questi motivi che hanno reso possibile l'estensione su larga scala ed in modo rapido dell'ultima *prova immediata*, in ordine di tempo: la determinazione pirometrica del carbonio equivalente, mediante registrazione della temperatura di inizio di solidificazione di un campione di metallo liquido (fig. 233).

Detta determinazione completa, integra e coordinata, come si vedrà tra breve, le informazioni ricevute dalle altre prove immediate.

## CORRELAZIONE TRA TEMPERATURA DI INIZIO SOLIDIFICAZIONE ED IL CARBONIO EQUIVALENTE (CE)

Dal punto di vista chimico la ghisa è sostanzialmente una lega Fe-C il cui diagramma di stato è in gran parte definito nelle sue due forme *stabile e metastabile*. Tuttavia, alcuni elementi satelliti provocano alcuni spostamenti nelle concentrazioni e nelle temperature di varia entità dipendenti dalla percentuale dell'elemento di lega.

Per riportare la ghisa al concetto essenziale di lega Fe-C è stata formulata la nozione di carbonio equivalente, che deriva sostanzialmente dalle modifiche nella composizione eutettica portata dall'elemento satellite:

$$\text{Carbonio eutettico} = 4,23 - K$$

da cui

$$\text{Carbonio equivalente} = C_t + K$$

L'altra nozione utilizzata soprattutto in Europa è il grado di saturazione eutettica

$$S_c = \frac{C_t}{4,23 - K} \text{ che concettualmente è simile a CE}$$

Il termine K si calcola nel modo seguente

$$K = \frac{\text{Si}}{x} + \frac{\text{P}}{y}$$

La limitazione ai soli valori Si e P è puramente arbitraria ed è valida nell'ambito delle ghise grigie comuni non legate, tuttavia anche nel caso di ghise basso-legate le composizioni sono tali che gli elementi di lega aggiunti sono computati in modo da neutralizzare i loro rispettivi effetti.

Caso tipico sono le ghise al Ni-Cr in cui il diverso divisore (9 e 3,2) impone un rapporto percentuale di 3 : 1.

In letteratura si trovano diversi divisori per ogni elemento, in particolare per Si e P il più usato è il divisore 3.

Dal punto di vista teorico, il senso della notazione  $S_c$  risiede nel riportare una ghisa di composizione qualunque ai medesimi punti critici (temperatura e concentrazione), liquidus e solidus, delle leghe Fe-C nell'intento di prevedere il comportamento in relazione al tipo ed alle percentuali di fasi presenti; ad esempio, la percentuale di eutettico può essere direttamente calcolata con la semplice relazione:

$$(192 S_c - 92) \% = \left( \frac{\text{Massa d'eutettico}}{\text{Massa totale}} \right) \% \times 100$$

analogamente per ghise ipereutettiche:  $\frac{100}{192 S_c - 92} \times$

$$\times 100 = \left( \frac{\text{Massa d'eutettico}}{\text{Massa totale}} \right) \%$$

Questa percentuale, per il suo alto contenuto di grafite, incide fortemente sulle caratteristiche meccaniche mediante correlazioni ad altra significatività, ad esempio:

$$R_{30} = 98,4 - 80 S_c \text{ (limite inferiore)}$$

$$HB_{30} = 465 - 270 S_c$$

Diverso è l'effetto degli elementi satelliti sia sulla temperatura di inizio di solidificazione (TL) sia su quella di fine solidificazione (TE).

Da un lavoro sperimentale di J. Vaclavinek<sup>44</sup> risulta che C, Si, P diminuiscono la TL, mentre TE aumenta con l'aumentare di C e Si e diminuisce aumentando il contenuto di P.

Per ciò che concerne gli elementi leganti Cr, Mo, Mn, Cu, Ni, diminuiscono TL ed i primi tre anche TE, mentre Cu, Ni aumentano TE (vedi E. Kasch<sup>45</sup>).

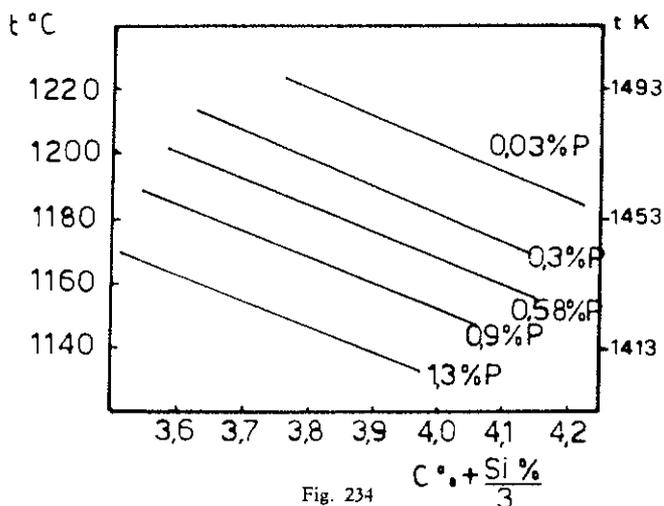


Fig. 234

Mentre le correlazioni della composizione con TE, oltre che richiedere una delicata sperimentazione a causa del grado di nucleazione che agisce come fattore di disturbo è anche logicamente meno tempestiva, quelle con la TL fatte su numerosi campioni, oltre ad essere ad alta significatività sia in prove di laboratorio sia nelle fonderie industriali, sono più rapide e, come si vedrà, i risultati concordano abbastanza bene tra i vari sperimentatori.

In particolare un aumento dell'1% dell'elemento considerato determina una diminuzione della temperatura del liquidus di 128 °C per il C, di 33 °C per il Si, di 61 °C per il P (vedi Vaclavinek<sup>46</sup>).

I rapporti di questi cali di temperatura sono:

$$128 : 33 : 61 = 1 : 0,257 : 0,476 \cong 1 : \frac{1}{4} : \frac{1}{2}$$

Di conseguenza, anche il rapporto dei 3 elementi nell'equazione del carbonio equivalente al liquidus (CEL) sarà:

$$CEL = C + \frac{Si}{4} + \frac{P}{2}$$

Numerose prove, eseguite su questo tema da vari laboratori e fonderie, hanno portato alle seguenti equazioni:

- TL = 1.669 — 124 (CEL) (Bcira) (500 dati)
- TL = 1.636 — 113 (CEL) (A.T.F.B.) (106 dati)
- TL = 1.581,7 — 100,9 (CEL) (Sulzer) (206 dati)
- TL = 1.638 — 121 (CEL) (Università Visconsin) (24 dati)
- TL = 1.650 — 121 (CEL) [A. Moore (Bcira)]
- TL = 1.580 — 99,5 (CE) (Ctif) (94 dati)
- TL = 940,3 — 48,7 (CE) (Univers. Kansas) (27 dati)
- TL = 1.655 — 118 (CE) (Ditta Stankolit Mosca) (250 dati)

Tuttavia, lo studio più completo: quello del BCIRA<sup>47</sup> convalidato in altri Paesi (Belgio<sup>48</sup>, Cecoslovacchia<sup>49</sup>) ha mostrato che tutti i punti sono situati in una banda di  $\pm 0,07$  dell'espressione CEL, mentre il 92% sono situati in una banda di  $\pm 0,05$  CEL; usando invece

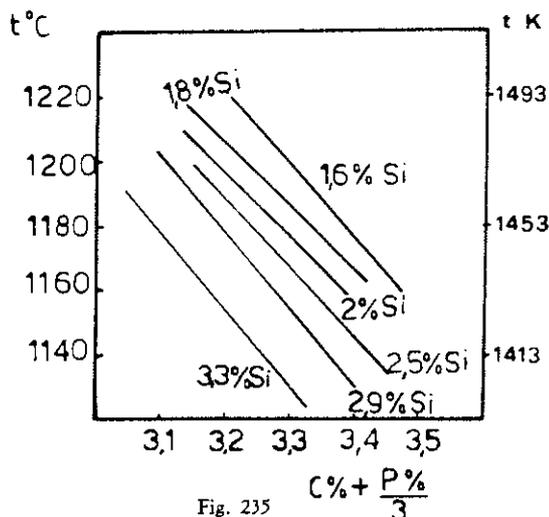


Fig. 235

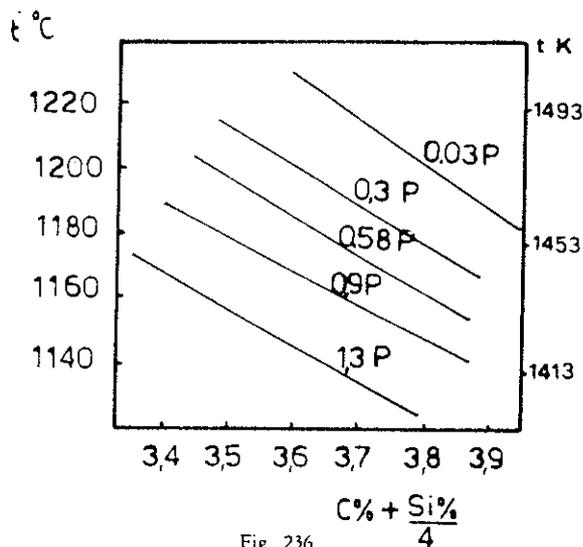


Fig. 236

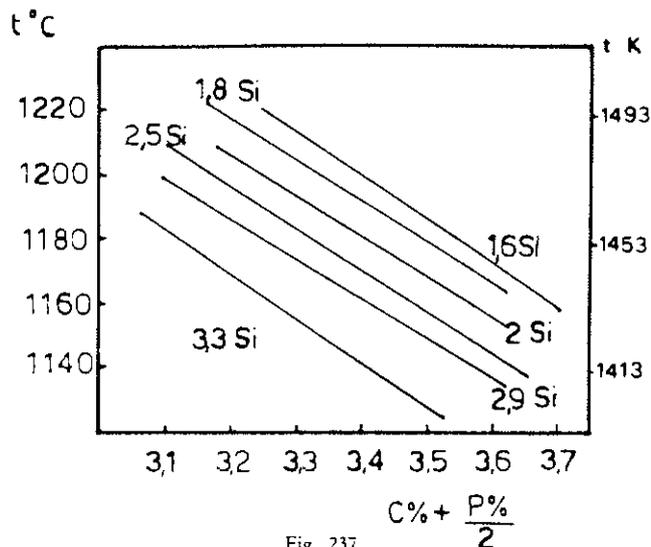


Fig. 237

l'espressione CE si ha una dispersione doppia. Un ulteriore guadagno in precisione si avrebbe utilizzando la formula  $TL = 1.625 - 113 \left( C + \frac{Si}{4,5} + \frac{P}{2} \right)$  (Re-nault) (42 dati) e precisamente  $\pm 0,020$  al 95% di probabilità<sup>50</sup>.

Dette dispersioni non sono, inoltre, in funzione diretta con il tenore di P; ghise con P 0,15 ÷ 0,5 hanno la stessa dispersione di quelle con P 0,5; inoltre (vedi Hall<sup>51</sup>) per ghise con contenuto di P dell'ordine dello 0,1% è possibile, per tutti i calcoli pratici, trascurare

questo elemento ed usare la relazione semplificata  $CEL = C + \frac{Si}{4}$ .

Da quanto si è detto, appare evidente che è possibile determinare il carbonio equivalente conoscendo la temperatura del liquidus e che il carbonio equivalente è espresso dalla notazione CEL. Inoltre, osservando le figg. 234-235-236-237, si ha una ulteriore conferma che il P riduce la temperatura del liquidus di circa due volte rispetto al Si: ciò non esclude, beninteso, la possibilità di risalire al CE conoscendo TL e valutando il P in carica.

## CORRELAZIONE FRA CEL E COLABILITÀ - TEMPI DI COLATA - SEZIONE DEGLI ATTACCHI

Ad analogo risultato erano giunti, nel 1952, Porter e Rosenthal<sup>52</sup>, studiando i fattori che influenzano la colabilità della ghisa, arrivando ad esprimere questo dato mediante la prova della spirale:

$$\text{Colabilità (inch)} = \frac{4C + 2P + 1Si + 5 \times \text{surriscaldamento (in } ^\circ\text{F)}}{100} - 6$$

ove si nota che l'influenza sulla colabilità del P è doppia di quella del silicio.

Anche Evans nel 1951<sup>53</sup> dimostrò che l'influenza del P sulla colabilità è superiore a quella del silicio e che pertanto non si poteva utilizzare, per esprimerla, una funzione del CE; successivamente Humphreys<sup>54</sup> (figg. 238 e 239), elaborando i dati di Evans, mostra la validità della funzione CEL nei confronti della colabilità.

Tutto ciò autorizza a sostituire, nella formula della colabilità, all'analisi chimica la temperatura del liquidus, per cui la colabilità diventa funzione di TL e di TC (temperatura di colata): dati facilmente rilevabili dalla curva dell'analisi termica immediata.

Utilizzando come TL l'espressione media delle già citate formule (dopo verifica della non significatività delle differenze tra le medie)

$$\text{colabilità (n° di tacche)} = \frac{1.631 - 115 \text{ CEL (fig. 240)} + 14,32 \text{ CEL} - 152,8 + 0,09 \text{ TC}}{1,97}$$

detta colabilità risulterebbe massima con un CE  $\cong 4,7\%$ .

Si ricorda l'utilità di questo dato, nello stabilire tempi di colata dei getti di ghisa secondo le equazioni (J. F. Wallace, E. P. Evans<sup>55</sup>), derivate da quella di Dietert:

$$\begin{aligned} \text{— tempo di colata (s)} &= \frac{\text{n° tacche}}{20} \left( 0,95 + \frac{\text{spessore (mm)}}{21,66} \right) \cdot \sqrt{\frac{\text{peso getto in kg}}{0,453}} \end{aligned}$$

per getti medi sino a 600 ÷ 800 kg, spessore da 3 a 30 mm

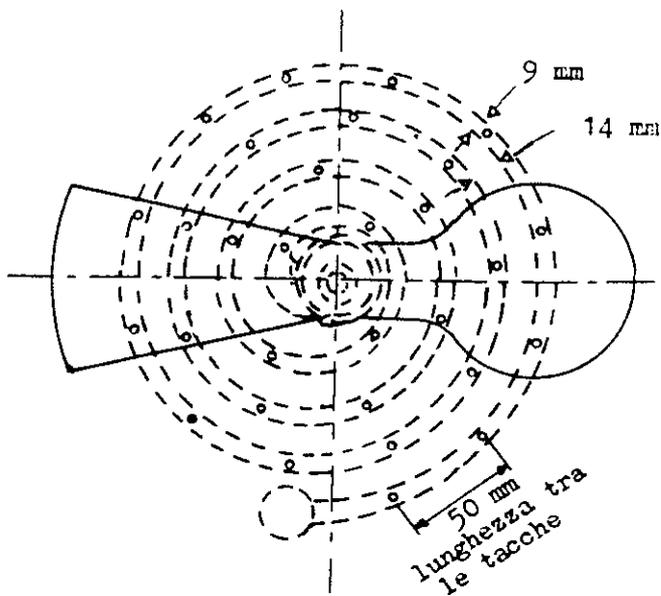


Fig. 238 - Provetta di fluidità.

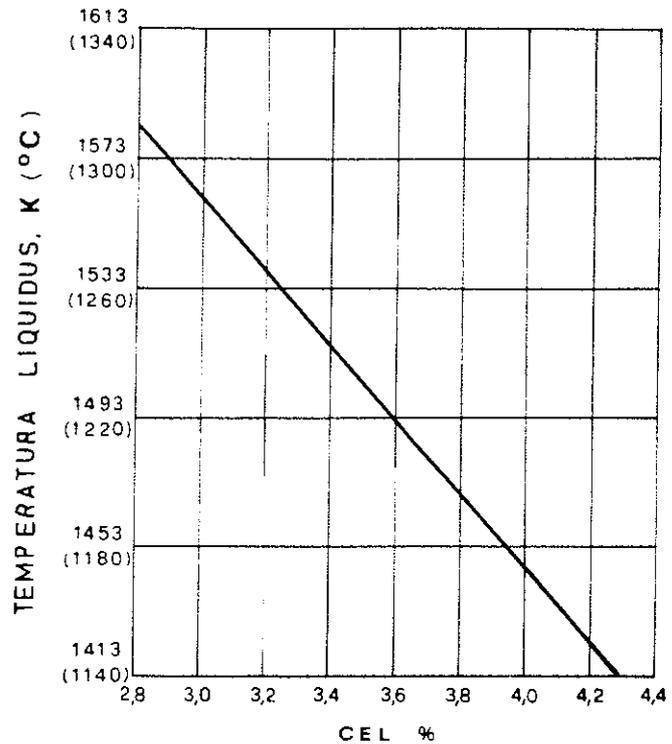


Fig. 240

$$\text{tempo di colata} = \frac{n^{\circ} \text{ tacche}}{20} \left( 0,95 + \frac{\text{spessore}}{21,66} \right) \sqrt[3]{\frac{\text{peso getto}}{0,453}}$$

per getti grossi sino a 8.000 kg, spessore oltre i 50 mm.

ove si nota che a parità di condizioni, meno la ghisa è fluida e minore è il tempo di colata consentito oppure più sottile è il getto e minore è il tempo di colata consentito, in quanto minore è il tempo d'inizio di solidificazione:  $t_{\min} \approx 0,6 M^2_{cm}$  (per  $\Delta T = 150$ ).

Per rispettare il tempo di colata previsto occorre regolare la portata ponderale (peso del getto: tempo di colata) mediante una opportuna sezione  $S$  (strozzatura, sezione caratteristica, sezione principale), tale cioè che soddisfi alla relazione:  $S \times$  portata specifica effettiva = portata ponderale.

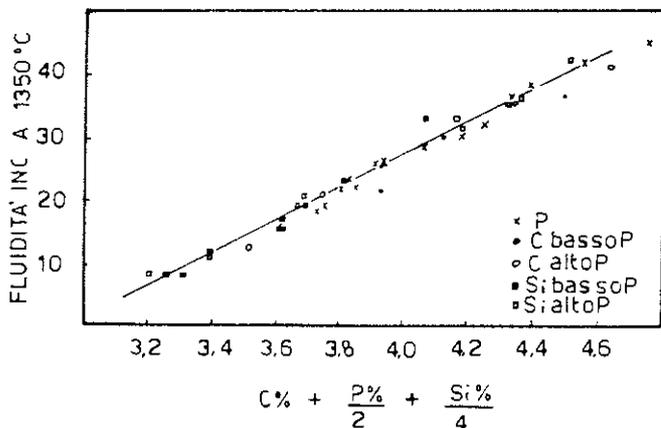


Fig. 239

Essendo la portata specifica il prodotto della velocità (per 1  $cm^2$ ) per peso specifico (7,1) per la perdita di carico ( $< 1$ ). Semplici sostituzioni nelle formule portano alla seguente espressione:

$$S_{cm^2} = \frac{P}{0,025 \cdot (14,32 \text{ CEL} + 0,09 \text{ TC} - 152,8) \cdot (1,412 + \frac{V}{S} \cdot 0,136) \cdot \sqrt{P} \cdot \gamma \cdot 0,1 \cdot e \cdot \sqrt{2g H_m}}$$

ove si nota che la sezione caratteristica (strozzatura) è in funzione inversa del CEL, TC, del modulo  $V/S$ , del battente e diretta della radice del peso. Semplificando si ottiene:

$$S_{cm^2} = \frac{\sqrt{P}}{CL} \frac{1}{20 (1,412 + 0,068 Sp) \cdot e \cdot 3,1 \sqrt{H_m}}$$

e per getti grossi

$$S_{cm^2} = \frac{\sqrt[3]{P^2}}{CL} \frac{1}{20 (1,235 + 0,06 Sp) \cdot e \cdot 3,1 \sqrt{H_m}}$$

ove:

$P$  = peso del getto in kg

$S_p$  = spessore del getto in mm

$\gamma$  = peso specifico (7,1)

$H_m$  = battente effettivo =  $H - \frac{B^2}{2C}$  in m (fig. 241)

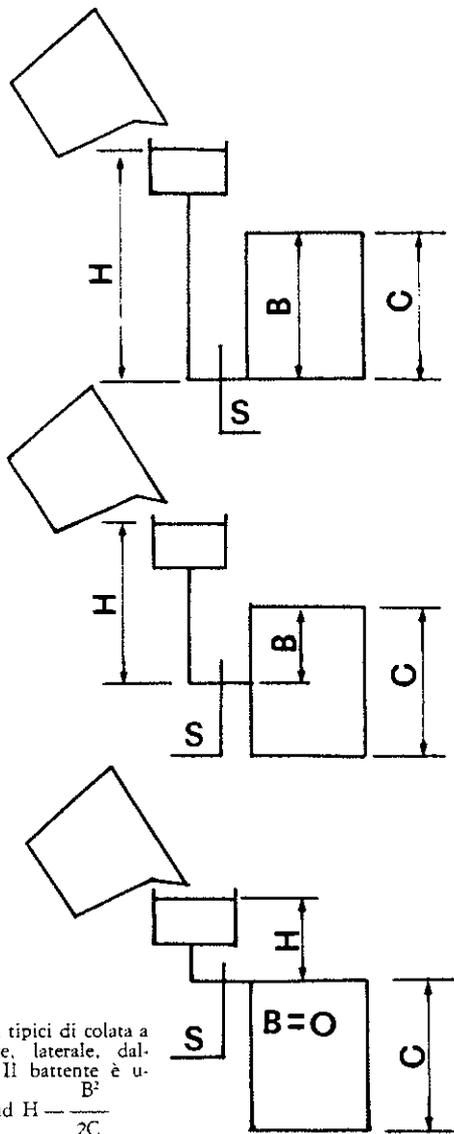


Fig. 241 - Schemi tipici di colata a sorgente, laterale, dall'alto. Il battente è uguale ad  $H - \frac{B^2}{2C}$

H = altezza della colata dalla strozzatura  
 B = altezza del getto dalla strozzatura  
 C = altezza del getto  
 e < 1 = coefficiente sperimentale globale (perdite per attrito interno, esterno, perdite allo sbocco, ecc.)

La sezione S è quella che, in relazione al battente, costituisce la strozzatura del sistema di colata (canale di colata  $S_c$ , distributore o collettore  $S_d$ , attacchi  $S_a$ ) e può trovarsi all'estremità, ad esempio:  $S_c : S_d : S_a = 1,3 : 1,2 : 1$  (sistema a pressione), sia in un punto intermedio del sistema di colata, ad esempio:  $S_c : S_d : S_a = 1 : 4 : 2$  (sistema non in pressione) ove a valle della strozzatura regna una pressione inferiore riferita al battente, per cui la velocità di entrata del metallo nel getto è ridotta rispetto a quella vigente nella strozzatura; riduzione operata smorzando l'energia cinetica del metallo (per urto, variazioni di direzione, rallentatori, filtri, ecc.).

Tanto maggiore sarà questa riduzione e tanto più uniforme sarà la distribuzione. Volendo migliorare la distribuzione del metallo ai vari attacchi, anche in caso di battente elevato si ricorre a distributori rastremati, in modo da conservare costante a valle di ogni attacco il rapporto  $S_d : \sum S_a$  (a valle del punto considerato).

I canali di colata devono essere allargati verso l'alto in modo che la sezione obbedisca alla legge  $S \sqrt{H} = \text{costante}$ .

Per evitare erosione e turbolenza, la velocità del metallo alla strozzatura non deve superare  $1,5 \div 2$  m/s; canali molto alti devono essere, quindi, interrotti in uno o più punti mediante gradini; inoltre, mettere più canali di colata di sezione minore, anziché uno di diametro maggiore di 50 mm.

## VALUTAZIONE DEL C E SI MEDIANTE ANALISI TERMICA E LA PROVETTA DI TEMPRA

Nella normale routine delle fonderie per getti meccanici di qualità la variazione nel tenore di P è trascurabile e quella del Si può considerarsi normale quando rientra in  $\pm 0,2$ , il che comporta una variazione di CEL di  $\pm 0,05$ , mentre le variazioni del tenore di C modificano la lettura proporzionalmente; una fusione, quindi, può considerarsi regolare quando la variazione di CEL è compresa fra  $\pm 0,05$ .

Tuttavia, possono sussistere nel corso della fusione varie cause di variabilità, come si è visto, più ampia, tanto per il Si quanto per il C.

Alcuni tentativi sono stati effettuati per valutare l'effetto separato del Si e del C, ci si riferisce soprattutto agli studi su TE, dato che è fornito dall'analisi termica immediata. Ad esempio, i lavori del CTIF<sup>56</sup> mostrano che si può calcolare separatamente C, Si attraverso il sistema

$$TL = F(CE) \text{ e } TL - TE = F(CE)$$

e si hanno dati attendibili quando i valori risultano nella media, ma quando questi se ne allontanano, le pendenze delle rette essendo troppo vicine, conducono ad errori inaccettabili.

Humphreys<sup>57</sup>, invece, trova sperimentalmente (60 composizioni) un'interessante relazione (fig. 242) tra TE

e l'espressione  $(1 + P - \frac{Si}{4})$  che, essendo indipendente dal carbonio, consentirebbe di valutare il Si:

$$TE = 1.171 - 30 \left(1 + P - \frac{Si}{4}\right)$$

Dunque nel sistema stabile, all'aumentare del Si, TE aumenta (tra 1.413 e 1.433 K = 1.140 ÷ 1.160 °C).

**Volume II: Ghise grigie**

**Capitolo VI**

## **Comportamento alle alte e alle basse temperature**

- EFFETTO DELLE TEMPERATURE ELEVATE SULLE PROPRIETA' MECCANICHE
- RIGONFIAMENTO DELLA GHISA GRIGIA
- INFLUENZA DELLA COMPOSIZIONE CHIMICA E DELLA STRUTTURA
- PRODUZIONE DI GHISE STABILI DI VOLUME
- RESISTENZA AL CALORE ED AL FUOCO
- MECCANISMO DI OSSIDAZIONE DELLA GHISA ED ADERENZA DELLO STRATO DI OSSIDO
- SCORRIMENTO VISCOSO
- PROPRIETA' DELLE GHISE ALLE BASSE TEMPERATURE
- BIBLIOGRAFIA

A cura di: Franco Pilastro  
Marino Selli



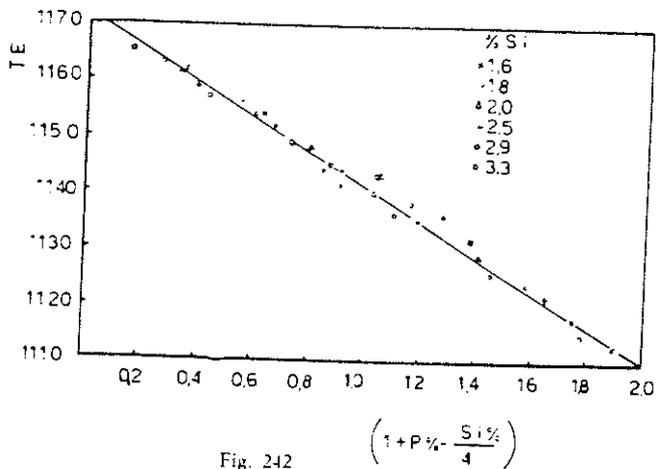


Fig. 242

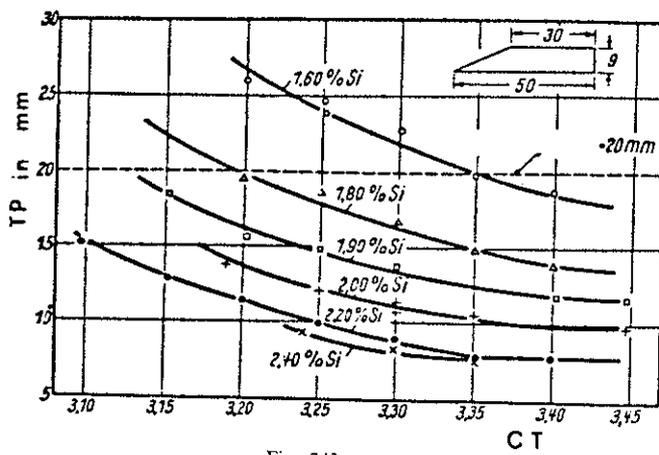


Fig. 243

Nel 1971 A. Moore<sup>58</sup> trova che, provocando la solidificazione nel sistema metastabile (mediante aggiunta di Te), all'aumentare del Si, la TE diminuisce (tra 1.413 e 1.373 K = 1.140 ÷ 1.100 °C), conferendo all'arresto una sicura linearità (differenza dall'eutertico stabile), senza alterare TL. Questa nuova TEB è in correlazione con la composizione chimica attraverso un nuovo valore di

$$CE = C + \frac{Si}{9} + \frac{P}{3,5} = CEB \text{ ove il simbolo B sta ad indicare } \textit{bianco}.$$

Ne consegue che la ghisa G 10 che è ipereutettica, se solidifica bianca (mediante Te), diventa ipoeutettica (per CEB < 4,3) e denuncia TL all'analisi termica. Ciò estende l'applicazione dell'analisi termica in fonderia, in quanto la solidificazione delle ghise grigie ipereutettiche comincia con la precipitazione della grafite primaria, ma la quantità di calore latente liberato è debole per influenzare la pendenza della curva di solidificazione secondo l'equazione puramente teorica di Heine<sup>59</sup>:

$$TGL = 389,1 CE - 505,8$$

Gli studi di Moore (BCIRA) hanno anche reso possibile stabilire correlazioni multiple tra TL, TEB, C, Si e P, correlazioni confermate mediante apparecchi più sensibili da J. Van Eeghem e coll.<sup>60</sup>; in particolare risultano d'interesse le correlazioni valide per fosfori massimi di 0,2%:

$$TEB = 1.138,2 - 6,4 (Si + 4 P) - 1,65 (Si + 4 P)^2$$

$$C = 0,017 TEB - 0,00819 TL - 5,86$$

che consentono di valutare Si e C (noti che siano TEB, TL e P).

Tentativi di risalire in qualche modo al C e Si (senza l'ausilio dell'analisi chimica) erano stati fatti in precedenza attraverso la barretta di tempra. Loria nel 1953<sup>61</sup> tenta di correlare il CE con la profondità di tempra, rag-

gruppando le ghise secondo i valori del rapporto  $\frac{C}{Si}$ ;

V. Pulsifer<sup>62</sup> fa notare come l'effettivo CE che partecipa alla tempra sia  $(C_t - 2,0) + 1,5 Si$ , escludendo il ruolo del carbonio dell'austenite saturo (che in effetti non partecipa) e dando al Si una maggiore incisività.

Più recentemente (1964) Wagner e Friedrich<sup>63</sup> in una campagna di fusioni con cubilotti a vento caldo ( $\varnothing 900$ ,

produzione 8 ÷ 9 t/h) durata sei mesi hanno esaminato 400 provini, riuscendo a raggruppare i dati nel diagramma di fig. 243, dimostrando la relazione precisa fra velocità critica di tempra ledeburitica e composizione chimica nell'ambito di condizioni d'esercizio ben determinate.

La profondità di tempra della provetta è considerata come *misura* della minima velocità (critica) che non consente grafitizzazione.

Chi determina la velocità di grafitizzazione sono anzitutto quegli elementi come il Si che contribuiscono ad accrescere il valore dell'attività termodinamica del carbonio nell'eutettico. Secondo Laplanche<sup>64</sup>, prima che la concentrazione del C nel liquido abbia raggiunto il valore

eutettico 4,23 — è molto probabile che raggrup-

pamenti preliminari di Fe e di C preparino la formazione del carburo Fe<sub>3</sub>C, ma questi raggruppamenti si trovano in presenza di Si che ha per il C una minore affinità che per il Fe; ciò determinerebbe la dissociazione del carbonio.

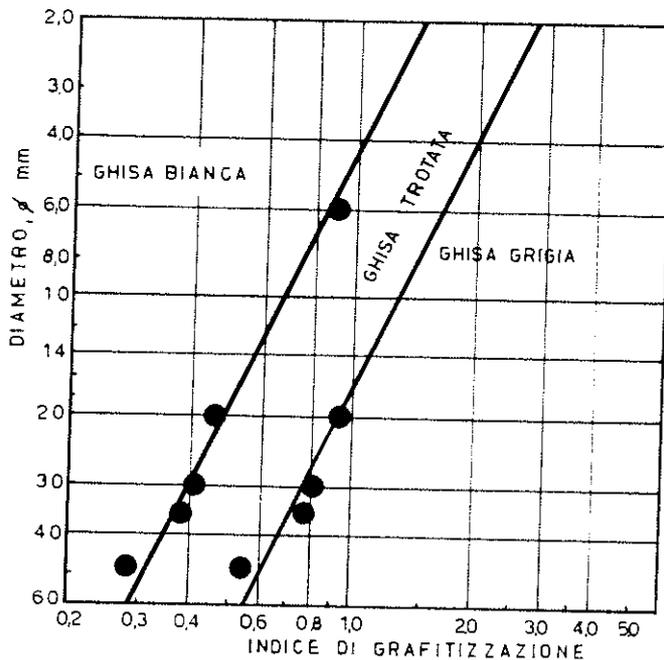


Fig. 244 - Diagramma strutturale delle ghise in funzione del P<sub>G</sub> e della massività.

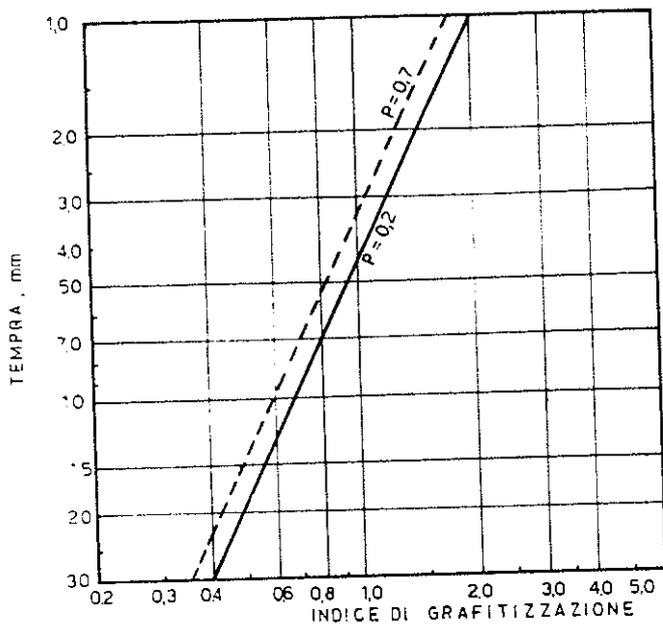
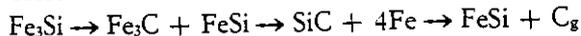


Fig. 245

Pertanto, l'esistenza di preraggruppamenti d'atomi di Fe, C e Si (germi) è molto probabile ad esempio  $(Fe_3C)_x$ ,  $(FeSi)_y$ , di stabilità chimica variabile; si può supporre una formazione effimera di carburo di silicio, decomposto dal ferro in eccesso



Velocità e grado di dissociazione di questi germi dipendono essenzialmente dal loro tenore di Si e dalla velocità di raffreddamento.

L'esperienza insegna che, per una determinata velocità di raffreddamento e per ogni tenore di C, esiste un tenore di Si critico al di sotto del quale non si forma alcuna traccia di grafite.

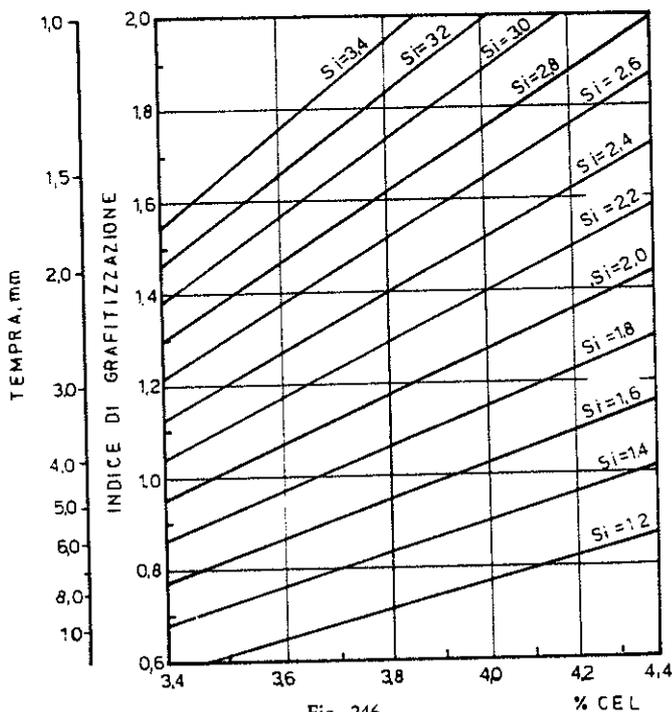


Fig. 246

La caratterizzazione numerica del potere grafitizzante in funzione della composizione della ghisa per ogni legge di raffreddamento è stata formulata da Laplanche nell'espressione:

$$P_G = \frac{3}{2} Si \left( 1 - \frac{11}{5C + Si} \right)$$

In particolare, sono stati individuati sperimentalmente i valori di  $P_G$  alle velocità critiche di raffreddamento su barrette cilindriche (fig. 244).

Se ora si considera un provino di tempra a cuneo, è possibile risalire a  $P_G$  individuando lo spessore massimo nella provetta a cuneo della zona bianca (circa equivalente al diametro massimo del cilindro che cristallizzerebbe ancora bianco). Si giunge così al diagramma di fig. 245.

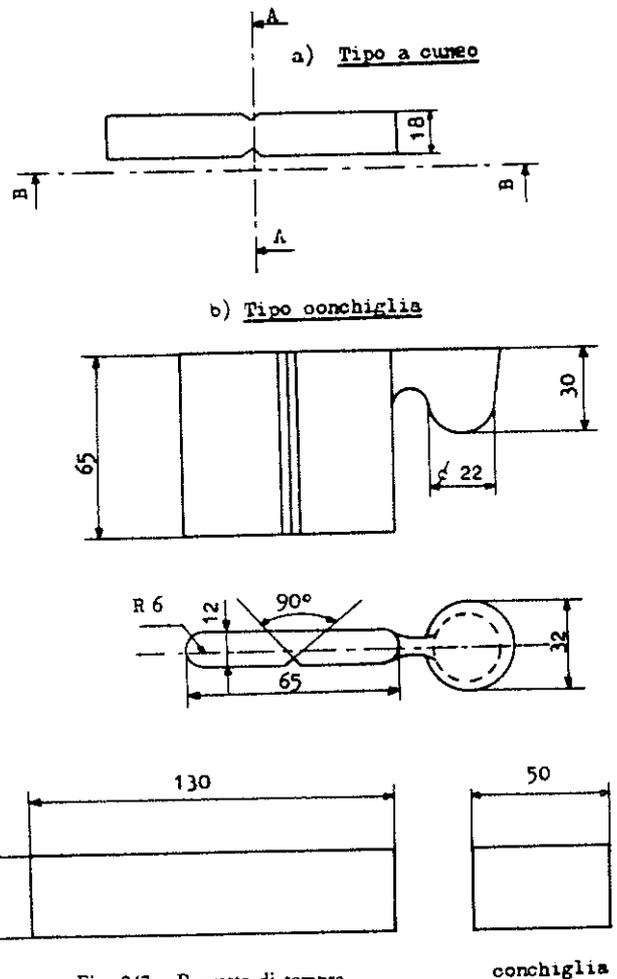
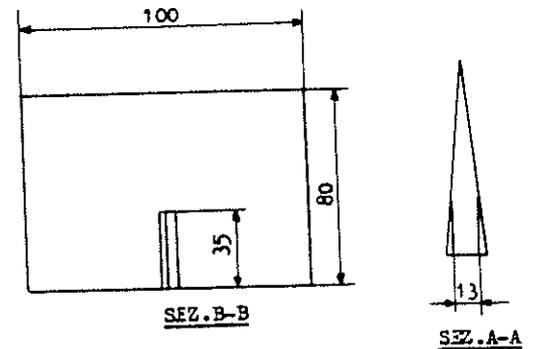


Fig. 247 - Provette di tempra.

conchiglia

La misura, infine, di CEL consente di tracciare l'abaco di fig. 246 nel duplice scopo di valutare il Si per mezzo di TL o di controllare mediante TEB se lo spessore di tempra rientra negli standards. Naturalmente, detti diagrammi sono utilizzabili se sono garantite fedeltà e riproducibilità delle prove immediate, nell'ambito della fonderia utilizzatrice. È noto, infatti, che a parità di tutte le altre condizioni, diversi gradi di nucleazione danno spessori di tempra diversi. A titolo orientativo si può considerare valido un grado di nucleazione che dia  $8 \div 12$  celle/cm nelle ghise iper, e  $13 \div 18$  celle/cm nelle ghise ipoeutetiche colate nella barretta standard UNI 5007 di 30 mm di diametro ( $M = 0,75$  cm); con moduli dimezzati il numero delle celle raddoppia.

Detto numero aumenta del 50 sino al 300% nelle ghise più ipoeutetiche (tra prima e dopo inoculazione) e del 100% sino al 50% per le ghise più ipereutetiche.

In prove di riproducibilità su barrette di tempra diverse (a cuneo ed in conchiglia) colate con la stessa ghisa ipoeutettica, la correlazione tra numero delle celle e spessore di tempra è meno dispersiva utilizzando la barretta a cuneo (figg. 247, 248).

In definitiva, la provetta di tempra indica la minima velocità di raffreddamento che annulla l'espressione

Carbonio grafitico

Carbonio grafitizzabile

Confrontando sul diagramma C-Si il luogo dei punti che danno la stessa tempra sia con l'impostazione data da Pulsifer<sup>66</sup> sia con quella suggerita attraverso  $P_G$ , si

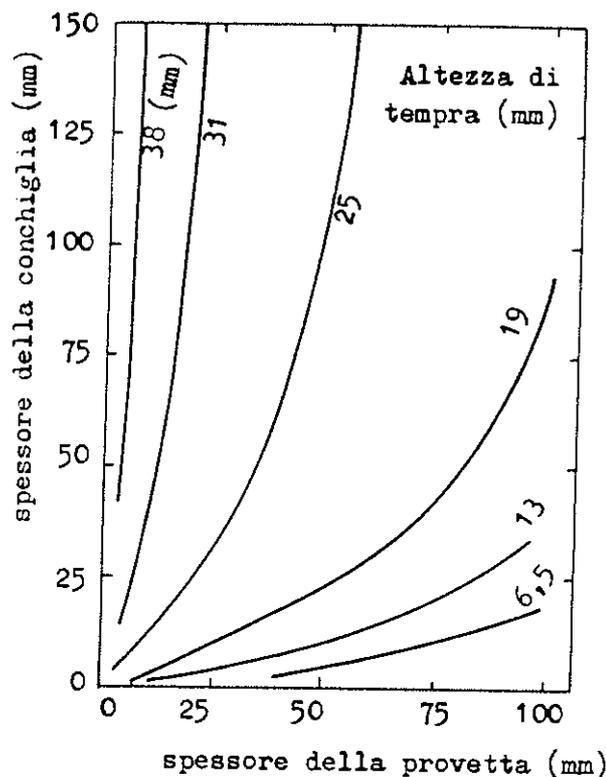


Fig. 248 - Altezza di tempra al variare dello spessore della provetta e dello spessore della conchiglia.

nota il parallelismo degli andamenti (fig. 249) nel campo delle composizioni più frequenti.

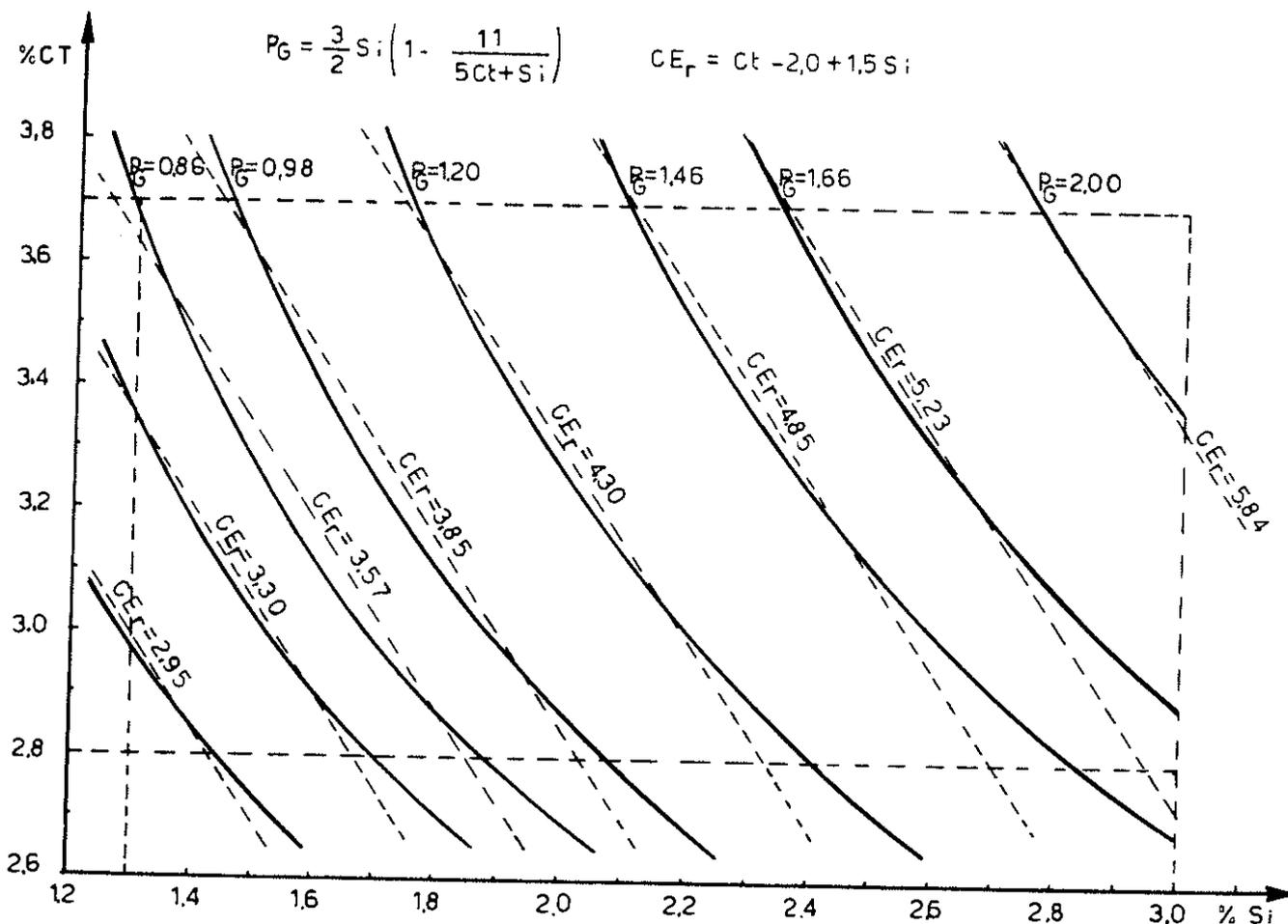


Fig. 249

## IL RISUCCHIO E LA SUA VALUTAZIONE - L'ALIMENTAZIONE DEI GETTI - CENNO SUI DIFETTI IMPUTABILI AL RISUCCHIO ED AL RITIRO

Sul carbonio grafitizzabile esistono varie formule dipendenti dalle divergenze riscontrabili nei vari diagrammi Fe-C sul punto di saturazione dell'austenite nel diagramma stabile. Detto valore assume una certa importanza pratica, in quanto è in relazione con il ritiro volumetrico di solidificazione delle ghise; come è noto, questo ritiro è contrastato dall'espansione dovuta alla segregazione grafitica al punto eutettico, maggiore è la quantità di grafite che si segrega, minore è il ritiro volumetrico e minore sarà l'alimentazione necessaria alla riuscita del getto.

Studi teorici di Schmidt e coll.<sup>67</sup> e di Wittmoser<sup>68</sup> mostrano che le ghise grigie aventi circa 1,8% di grafite eutettica non hanno ritiro di solidificazione (fig. 250).

Tuttavia, in getti complicati difficilmente alimentabili il ritiro liquido (dovuto al surriscaldamento) è solo in parte compensato dall'alimentazione e, pertanto, si aggiunge al ritiro di solidificazione e, quindi, può contribuire alla formazione del risucchio.

I dati di letteratura sul ritiro liquido sono generalmente compresi tra 1,6% (H. Hüblberger<sup>69</sup> e 1,2% (De Vaux e M. Jeancolas<sup>70</sup>, ogni 100 °C di surriscaldamento, e per

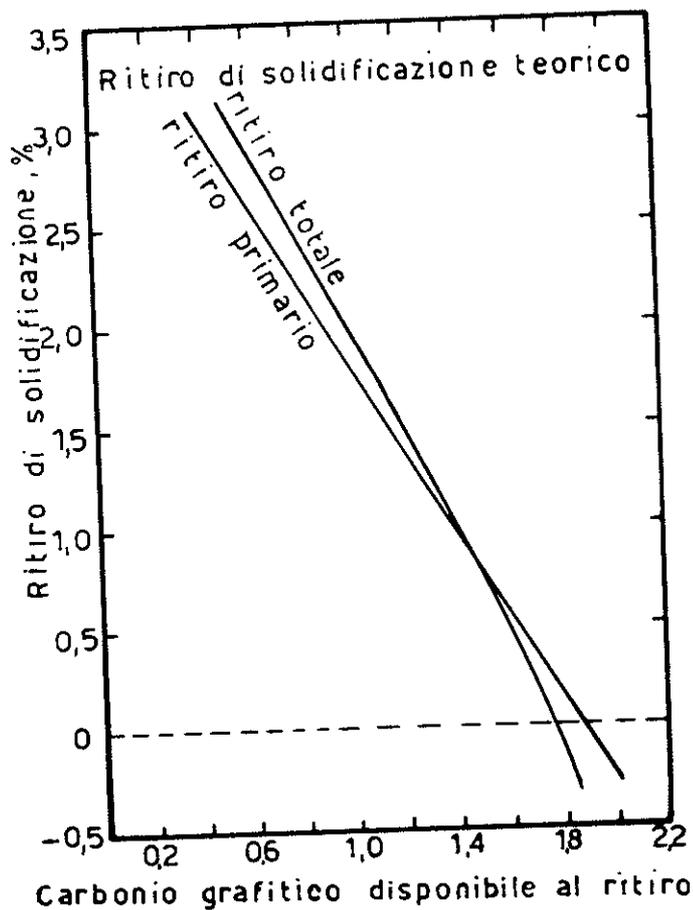


Fig. 250 -  $C_g < 1,46$  la solidificazione eutettica comporta una contrazione  
 $C_g = 1,46$  la solidificazione eutettica avviene senza variazione di volume  
 $C_g > 1,46$  la solidificazione eutettica avviene con espansione  
 $C_g = 1,75$  il ritiro totale è nullo

livelli di silicio intorno al 2% più recentemente secondo Kusakawa, Kim, Rondo<sup>71</sup>) il ritiro liquido delle ghise grigie sarebbe di 1,5% (per 100 °C di surriscaldamento), secondo A. Gorton e Austin (fig. 251) detto ritiro varierebbe con il tenore in Si; praticamente si ritiene valida l'espressione

$$RL \% = \frac{\Delta T \cdot 1,5}{100} \cdot \alpha \text{ ove } \alpha \leq 1 \text{ è}$$

un coefficiente di correzione. Quindi il dimensionamento dell'alimentazione dei getti, ai fini di evitare risucchi, deve tenere conto almeno nei getti più complessi, della grafite spesa per compensare il ritiro liquido.

Naturalmente, i benefici dell'espansione non si devono esaurire nel lavoro di deformazione della forma o nell'espulsione di metallo dalle materozze, ma devono servire a sigillare le cavità lasciate dal ritiro primario (austenite + liquido) e da quello eutettico, con questo criterio si avrà la massima compattezza e densità nel getto. Se la forma non è rigida, l'espansione grafitica provoca un aumento di volume del getto a spese della compattezza, ed in molti casi (in relazione agli spessori delle pareti), l'espansione grafitica può riuscire addirittura dannosa; una ragione di più, quindi, per adattare il  $S_c$  allo spessore dei getti, non troppo basso per evitare punti duri né troppo alto per evitare porosità interna.

D'altra parte, la Norma UNI 5007 sconsiglia l'utilizzo di ghisa G 15 per grandi getti e la G 30 per getti sottili, e raccomanda, per avere nei getti una resistenza alla trazione compresa tra 200 ÷ 250 N/mm<sup>2</sup> (20 ÷ 25 kg/mm<sup>2</sup>) (e quindi una buona densità) la G 15 per getti di modulo  $V/S = 0,38$  cm, la G 20 per getti di modulo: 0,75 cm, la G 25 per getti di modulo = 1,50 cm e la G 30 per getti di modulo 2,25 cm.

Il valore della grafite eutettica (EG) è dato dalla relazione

$$C_t - C_E = EG$$

ove:

$$C_E = \text{saturazione austenite.}$$

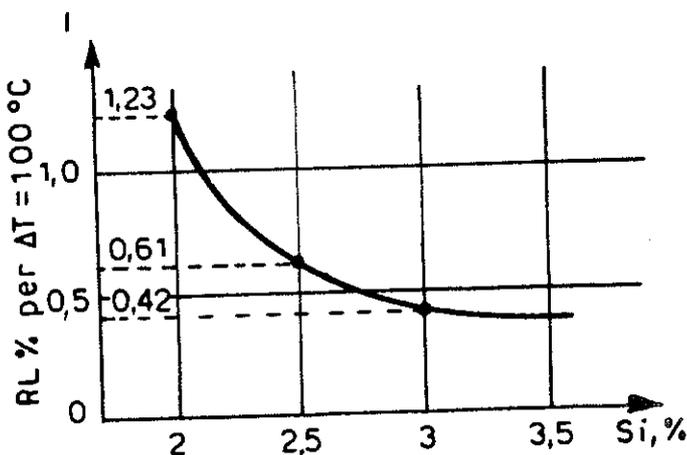


Fig. 251 - RL % in funzione del Si (M. Austin e coll.)<sup>(102)</sup>.

Se tutte le maglie del ferro fossero saturate dal C, la concentrazione sarebbe:

$$\frac{1C}{4Fe + 1C} = \frac{12}{236} = 5,1\%$$

Ma se 5 cubi di ferro sono occupati ciascuno da 1 atomo di carbonio, gli 8 cubi vicini sono talmente deformati da non consentire l'inserimento dell'atomo di C. pertanto il limite di solubilità del carbonio nel ferro  $\gamma$  a 1.423 K (1.150 °C) è di 5 atomi su 13 cubi. Siccome ogni maglia di ferro  $\gamma$  possiede in media 4 atomi di ferro, se ne deduce il limite di solubilità:

$$\frac{12 \times 5}{55,85 \times 4 \times 13 \times 12 \times 5} \times 100 = 2,03C\%$$

Detto punto si sposta verso sinistra a seconda del tenore di Si.

Recentemente (Heine<sup>72</sup>) ha puntualizzato gli effetti del Si nel diagramma di fig. 252 in cui appare che alla temperatura eutettica la concentrazione di C nell'austinite satura è espressa da  $\% C_E = 2,1 - 0,217 \% Si$ .

Secondo C. Reynolds e coll.<sup>73</sup> il gradiente del C sarebbe maggiore di quello che compete alla linearità su esposta, e cioè bassi tenori di Si comportano maggiori cali del  $C_E$ , tuttavia nell'intervallo delle ghise commerciali ( $Si = 1,5 \div 3,5$  e  $C = 3 \div 4$ ) la variazione sarebbe in accordo con l'espressione

$$\% C_E = 1,3 - 0,2 Si \%$$

Wittmoser<sup>74</sup> giunge ad un risultato analogo (fig. 253), conglobando nella GE anche parte dell'1,5% di  $C_E$  che segrega lungo la linea E'S' del diagramma Fe-C per cui:

$$\text{massima grafite eutettica} = MGE = C_i - 1,3 + 0,1 (Si + P)$$

Per ghise ipereutettiche ( $S_c > 1$ ) la grafite primaria (già solida) alla temperatura eutettica non è di nessun beneficio all'espansione; pertanto:

$$MGE = [4,23 - 0,32 (Si + P)] - 1,3 + 0,1 (Si + P) = 2,93 - 0,22 (Si + P)$$

La pratica di fonderia insegna che ci sono ghise come la G 10 e la G 15 che non hanno ritiro volumetrico apprezzabile, mentre ghise come la G 30, G 35 hanno ritiri evidenti. D'altra parte Wallace mostra (fig. 254) che, per

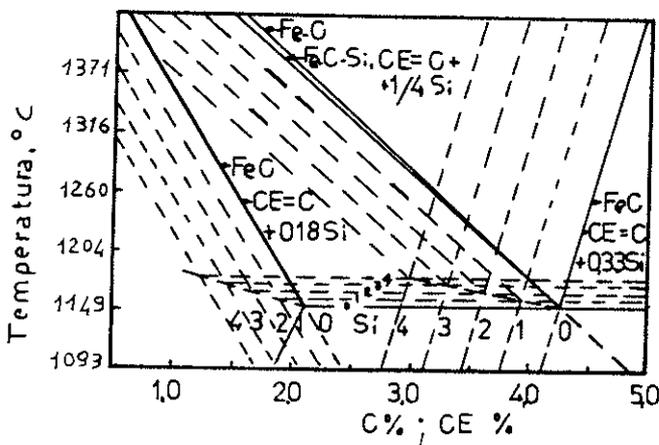


Fig. 252

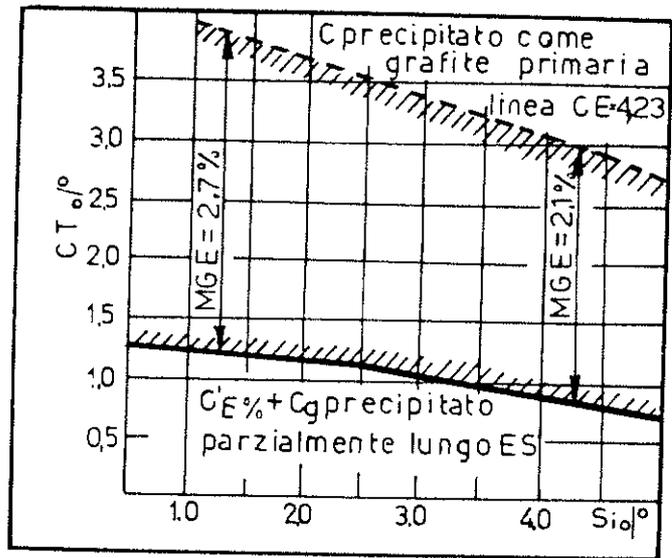


Fig. 253

non avere risucchi, si deve verificare la seguente condizione

$$C_i + \frac{Si}{7} > 3,9$$

Nel caso della G 15

$$3,5 + \frac{2,3}{7} = 3,83$$

Tuttavia, la ghisa grigia è lega assai sensibile a vari fattori che intervengono durante la solidificazione che influiscono aumentando la tendenza al risucchio rispetto al teorico.

Praticamente, le ghise meccaniche ipoeutettiche G 30, G 35 elaborate secondo i normali standard dovrebbero avere un ritiro volumetrico di solidificazione (RS %) inferiore a

$$4,7 - 1,56 MGE \% = RS \%$$

e quindi un ritiro totale volumetrico (RT %) massimo:

$$\frac{\Delta T \cdot 1,5}{100} + 4,7 - 1,56 MGE = RT \%$$

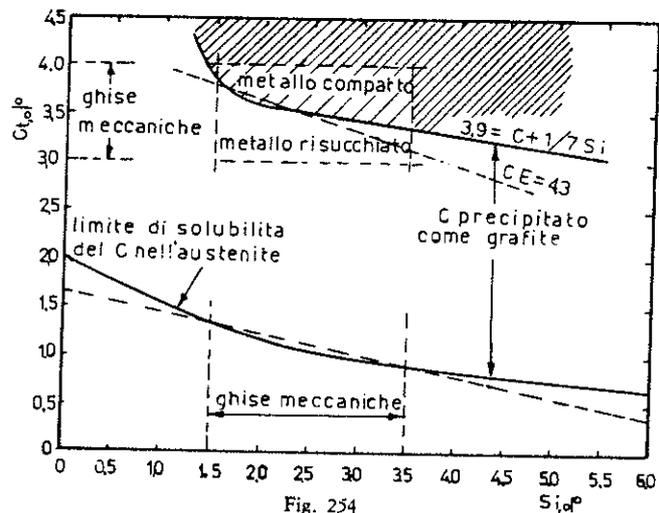


Fig. 254

Le altre ghise: G 20, G 25 e G 15, G 10 hanno generalmente ritiri rispettivamente del 65, 30% di RT massimo.

Ricordando che solo  $\frac{1}{5}$  del volume delle materozze risulta efficace ai fini dell'alimentazione, il loro peso totale sarà di almeno

$$PM = \frac{\text{peso del getto} \times RT \text{ } \sigma}{100} \times 5$$

Il diametro delle materozze è dimensionato in base a PM ed al modulo ( $M_0$ ) del getto  $\varnothing = M_0 \times 2 \times \alpha$  ( $\alpha = 1,2; 1,3; 1,4; 1,5$  a seconda delle classi di ghisa G 15, G 20, G 25, G 30 e l'altezza sarà di  $1,5 \div 2 \varnothing$ ).

Tuttavia, mentre con un'adeguata alimentazione si riesce quasi sempre ad evitare grosse cavità di ritiro, non sempre è possibile evitare una porosità diffusa o localizzata che si riscontra in getti a forte spessore colati con ghise inadatte, ad esempio ghise fosforose ( $P=0,2 \div 0,8$ ).

Il meccanismo con cui si formano queste porosità è molto complesso, tuttavia è generalmente ammesso che il tipo di solidificazione e la rigidità della forma sono le due cause principali della porosità.

In fig. 255 sono messi a confronto i due meccanismi di solidificazione che intervengono nell'intervallo eutettico durante il raffreddamento di due barre di 50 mm di diametro colate con ghisa ( $S_c < 1$ ) con e senza fosforo.

La ghisa non fosforosa, dopo 4,5 min, presenta, tra il reticolo di austenite primaria, uno strato compatto e consistente di celle eutettiche nella crosta esterna, mentre a

cuore solo il 20% dell'eutettico è cristallizzato, la ghisa fosforosa (allo stesso istante) presenta uno stato pastoso pressoché uniforme (50% di liquido) sia all'esterno sia a cuore, cioè la solidificazione non è a strati successivi, come nel primo caso.

Nel primo caso l'espansione grafica si identifica in un'espansione del liquido più interna, che sarà quindi sempre in eccesso evitando cavità di ritiro, nel secondo caso quando il metallo liquido residuo (liquido madre steaditico al 47% ~ di  $Fe_3P$ ) è chiuso fra le celle eutettiche (a 1.223 K (950 °C) ed in quantità uniforme in tutta la sezione) la pressione di espansione grafica si trasferisce alla parte solida (fig. 256) e comincia la sovraespansione (solida) con conseguente carenza di liquido e quindi con porosità.

Osservando le figg. 257-258-259, si nota che un'alta percentuale di MGE è sfavorevole per la porosità nelle ghise fosforose, porosità che è in rapporto diretto con l'aumento di volume del getto (barra di 108 mm di diametro e 990 cm<sup>3</sup> di volume).

Per disciplinare l'apparire della porosità nei getti di ghisa fosforosa si sono dimostrate utili le indicazioni del diagramma di Timmins (fig. 260) (relativo a sfere di modulo 12,5 mm) ove si vede, per esempio, che è possibile ottenere getti compatti con una ghisa allo 0,8% P allorché il tenore di Si e C<sub>T</sub> restano al di sotto dei seguenti limiti:

— Si . . . . .	1,5	2	3	%
— C . . . . .	3,5	3,2	2,7	%

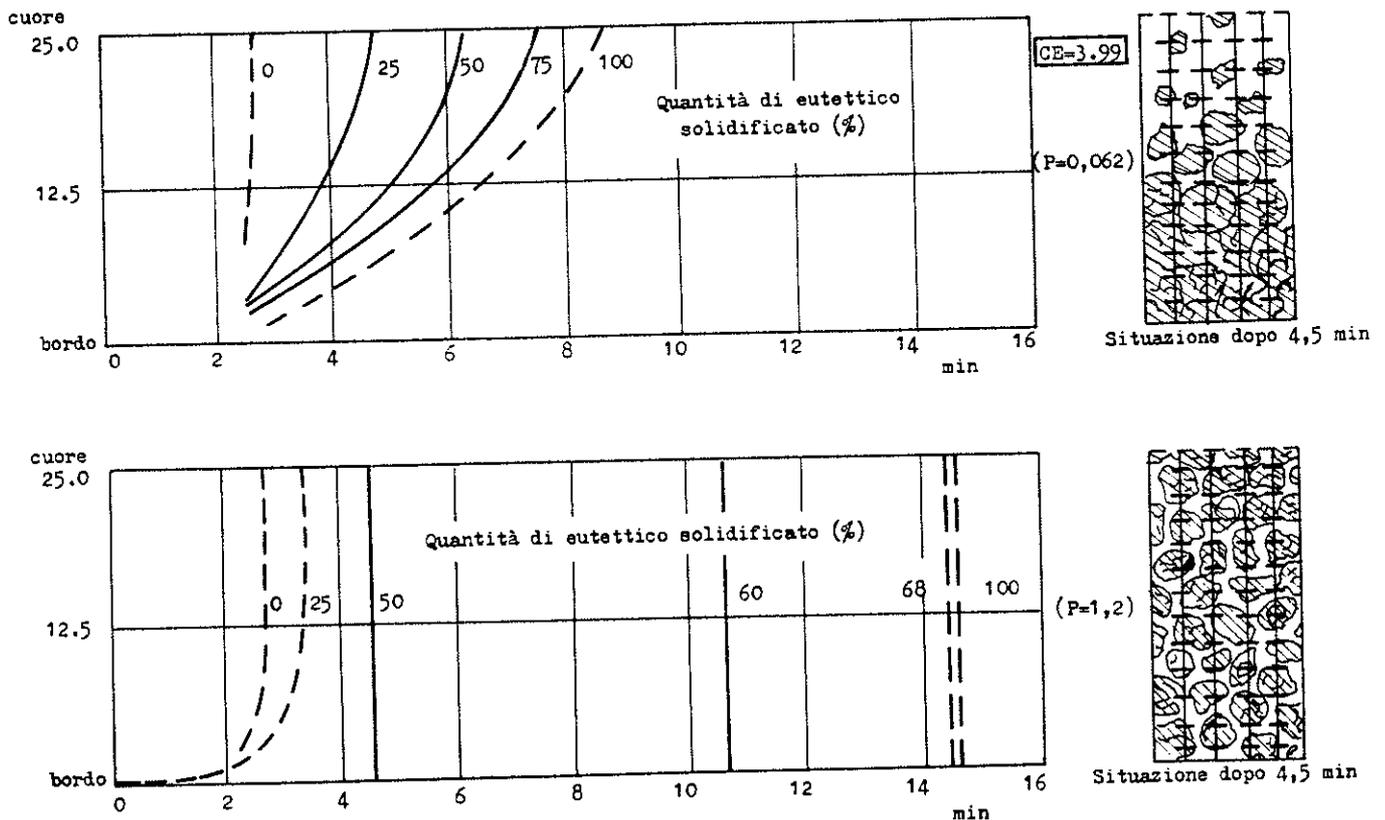


Fig. 255 - Confronto dei meccanismi di solidificazione eutettica tra ghise con e senza fosforo, colate in barre di 50 mm di diametro (Gittus e Hughes).

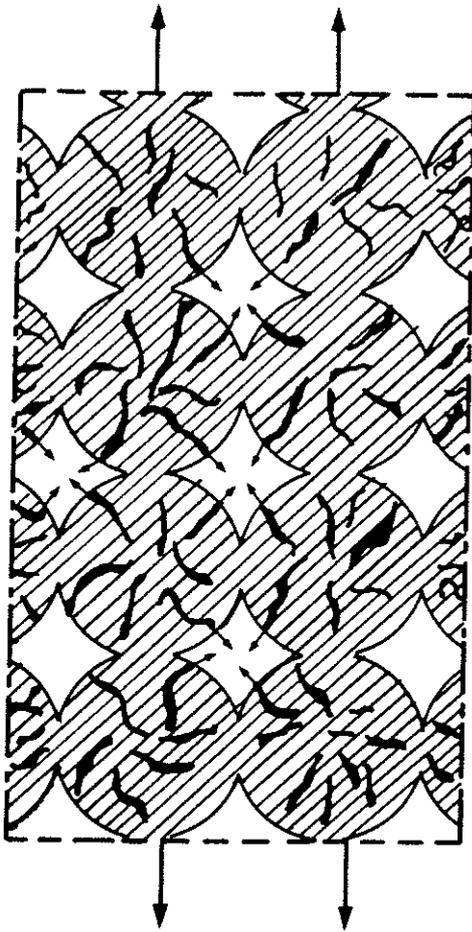


Fig. 256 - Quando l'eutettico fosforoso liquido sta per solidificare, è chiuso fra le celle eutettiche e la pressione dell'espansione grafica si trasferisce alla parte solida che si sovraespande con conseguente carenza di liquido (porosità) (da Levelink e A. Julien) (76).

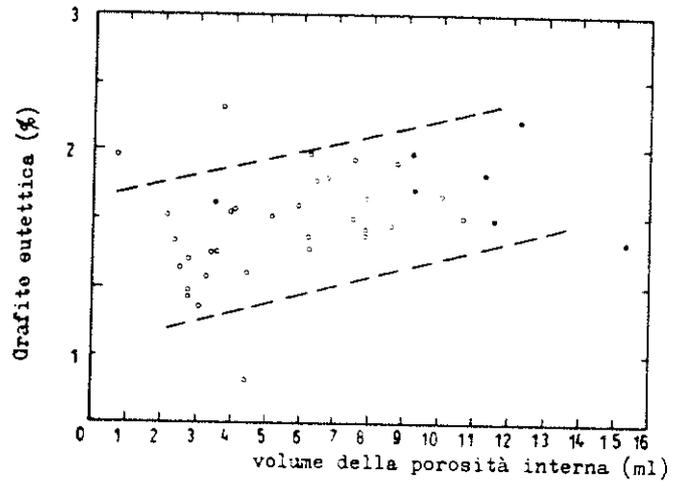


Fig. 258 - Un aumento di MGE nelle ghise fosforose ( $P \approx 1$ ): aumenta la porosità.

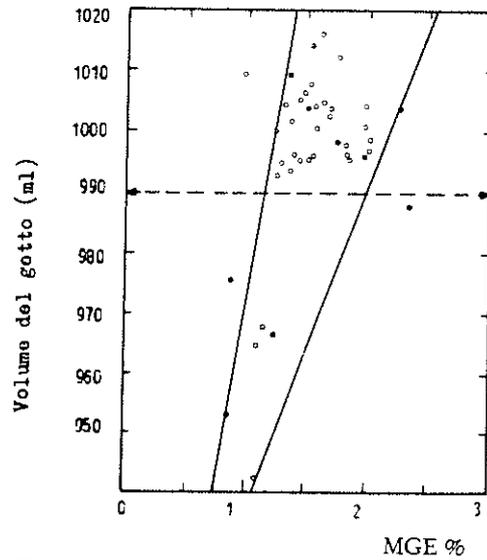


Fig. 259 - Un aumento di MGE nelle ghise fosforose ( $P \approx 1$ ): aumenta le dimensioni finali del getto.

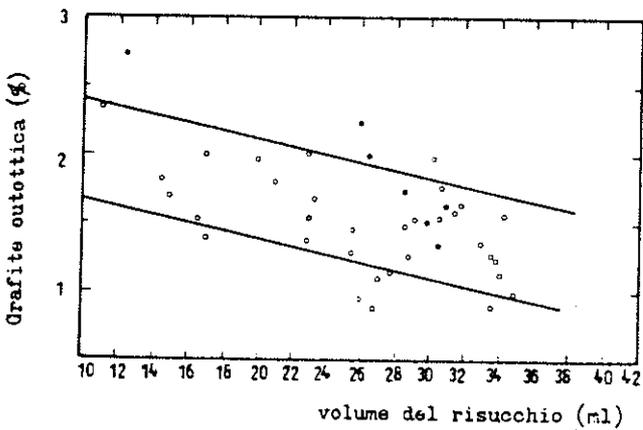


Fig. 257 - Un aumento di MGE nelle ghise fosforose ( $P \approx 1$ ): diminuisce il risucchio.

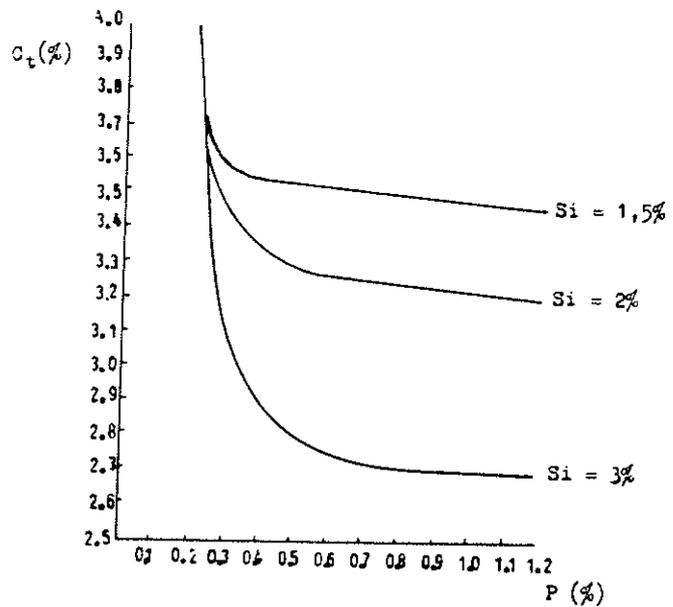


Fig. 260 - Limiti di porosità per ghise grigie a vari tenori di C, Si e P (da Timmins) (77).

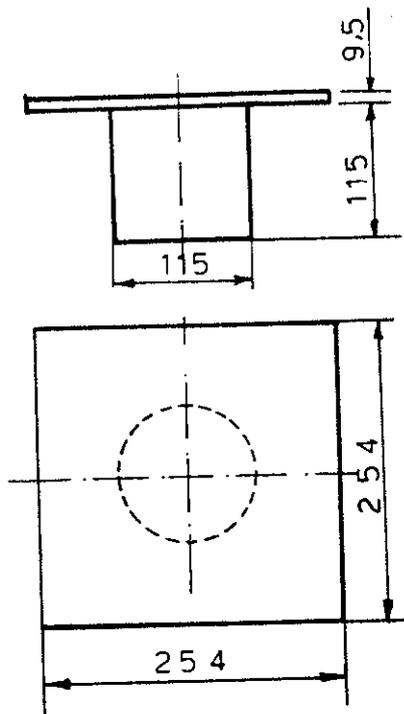


Fig. 261 - Provetta di risucchio Wallace (<sup>78</sup>).

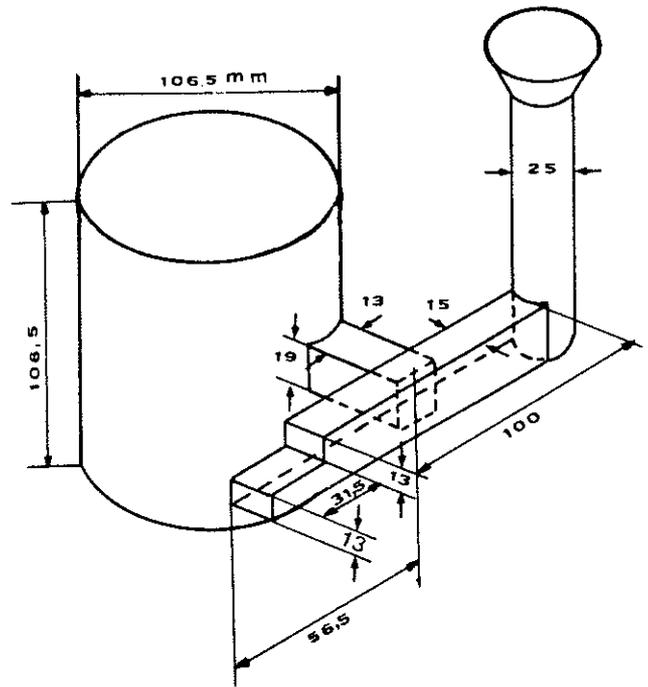


Fig. 262 - Provetta di risucchio J. Szajda (<sup>79</sup>).

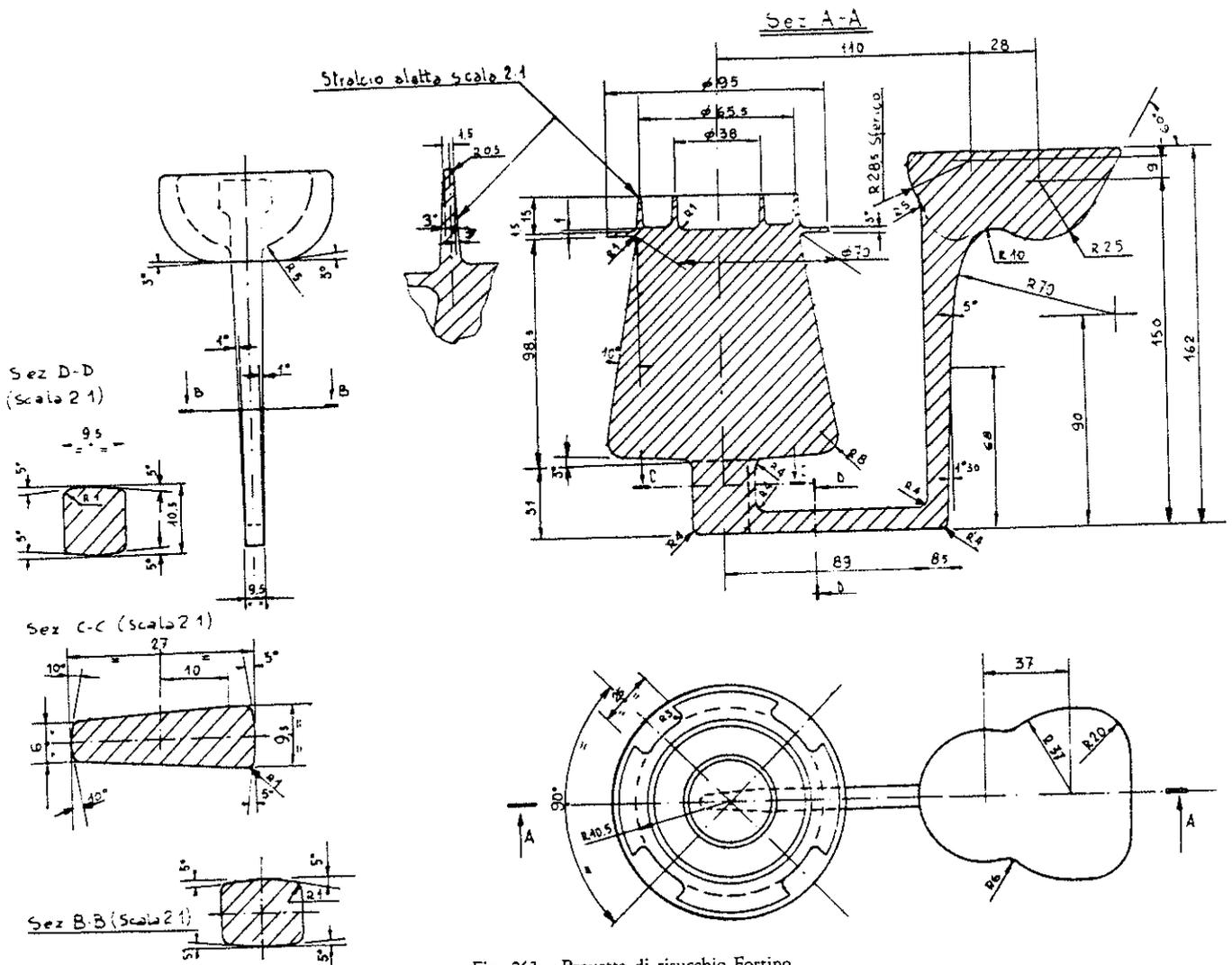


Fig. 263 - Provetta di risucchio Fortino.

Una verifica del ritiro può essere fatta con le normali provette di risucchio. Si ricorda quella di Wallace da 1.200 cm<sup>3</sup> (fig. 261), quella di Szajda da 990 cm<sup>3</sup> (fig. 262), di Fortino da 600 cm<sup>3</sup> (fig. 263), di Wittmoser da 250 cm<sup>3</sup> (fig. 264), ecc.

Misurando il volume del risucchio, si può risalire al grado di interferenza (G.I. < 1)

$$G.I. = \frac{MGE \cdot 2,61 - (4,7 - RS \%) }{(4,7 - RS \%) + MGE \cdot 2,61}$$

Una ghisa grigia con RS teorico ha un GI = 0

Una ghisa grigia con RS normale ha un GI = 0,1 ÷ 0,25

Una ghisa grigia con RS molto alto ha un GI ≥ 0,3

Per la misura del G.I. nelle ghise meccaniche la forma deve essere rigida e debitamente staffata; inoltre le provette devono essere colate con lo stesso grado di surriscaldamento. Per le ghise elaborate al cubilotto, forno che dà temperature costanti e, quindi, diversi surriscaldi al variare del CE, la temperatura di colata consigliata è di 1.623 K (1.350 °C).

Si ha G.I. ≥ 0,3 con ghise ipoeutettiche sedi di fenomeni anomali tanto più vistosi quanto più G.I. è elevato.

Forme anomali di grafiti (D, E), elementi interferenti (Ti, Te, Pb, ecc.) (vedi Fortino<sup>81</sup>) iperinoculazioni, alte percentuali di rottame d'acciaio in carica (> 35%) specie se ossidato, sono tutti fattori di perturbazione che influiscono, a parità di MGE, sul tipo di solidificazione cui si è accennato e che si manifesta con un eccesso di liquido (nessun risucchio) o con un difetto di liquido (presenza di risucchio).

Un caso particolare dei fenomeni di risucchio è quello che ha sede in un punto caldo e che si manifesta o con una cavità più o meno larga e profonda o con una cricca interdendritica. I meccanismi di formazione sono diversi nei due casi anche se la causa è sempre la mancanza di liquido.

Detti meccanismi sono esemplificati in fig. 265 e fig. 266 ove è reso evidente che se ad un certo istante della solidificazione lo spigolo O di sabbia si trova attraversato da isoterme di elevata temperatura fuoriuscenti dal getto, proseguendo questi a solidificare con conseguente diminuzione di volume della lega non solidificata, provoca la formazione di un vuoto nella porzione superiore S della sacca liquida; siccome la consistenza della ghisa nell'intervallo termico considerato è pastosa, può essere deformata dalla pressione atmosferica che spingerà la lega a colmare il vuoto; la deformazione, via via che il liquido si contrae, interesserà porzioni sempre più prossime allo spigolo O; al termine il getto presenterà un foro con i bordi esterni convessi, che nell'interno assumerà un aspetto granulare dovuto al fatto che la lega è respinta dalla pressione atmosferica sino allo scorrimento dei grani lungo i giunti ancora separati dal liquido residuo.

Ben diversa è la meccanica della frattura relativa alla formazione delle cricche a caldo (cricche di solidificazione); si supponga che lo stesso getto a squadra abbia evitato le condizioni richieste per i difetti passati in rassegna (adottando per esempio sabbie di formatura più conducibili); si ammetta anche che la lega sia isotermica in fine di colata; in seguito all'effetto d'angolo (fig. 266) una anisotermia del getto sarà evidente dopo un certo

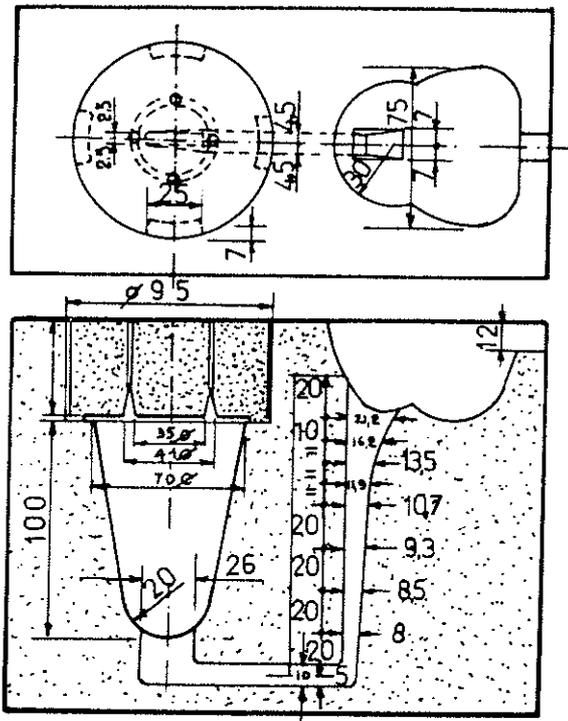


Fig. 264 - Provetta di risucchio Wittmoser (80).

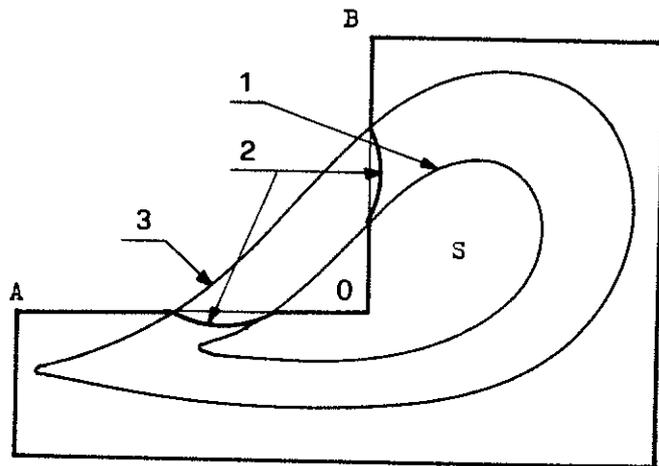


Fig. 265 - Meccanismo di formazione del risucchio.

- 1 - Isoterma T1
- 2 - Pressione atmosferica
- 3 - Isoterma T2

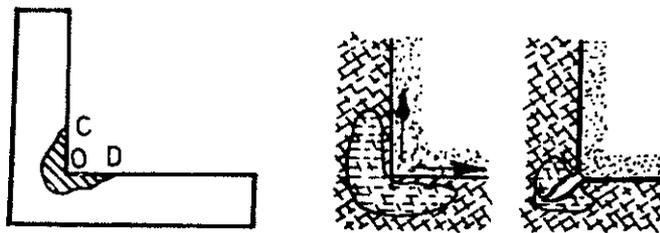


Fig. 266 - L'effetto di un angolo interno comporta un ritiro imposto nel punto caldo e, quindi, rottura.

tempo, infatti i bracci saranno già solidi, mentre la porzione di metallo prossima all'angolo O non sarà del tutto solida. I bracci della squadra, quindi, sono praticamente rigidi, quando in prossimità dell'angolo O inizia la solidificazione di uno strato sottile di lega, che subisce contrazione solida, le lunghezze OC e OD tendono a diminuire. Ora C e D, appartenendo a regioni rigide, costringono OC a ritirarsi verso C e CD verso D con il risultato di una cricca nell'angolo O.

Dall'innesco la cricca prosegue, in quanto interessa una porzione di lega in fase pastosa, infatti allorché la lega è completamente solida e calda (al rosso), subisce uno scorrimento plastico senza danno. Naturalmente se il pezzo è impedito nel libero ritiro (fig. 267), dette cricche possono costituire un innesco per rotture al solido (fig. 268), infatti il ritiro libero è sempre maggiore del ritiro con impedimento e la differenza la si ritrova in *apertura* di cricca.

Un corretto disegno, un'adeguata alimentazione, l'uso di materiali ad alta diffusività termica (raffreddatori) che abbassano il Modulo locale,\* l'impiego di nervature

\* La diffusività termica  $b = \sqrt{k\gamma c}$  è costituita da 2 fattori, uno di intensità (conducibilità  $k$ ) ed uno di capacità ( $\gamma C = C/V =$  calore specifico volumetrico). Più alto è il valore di  $b$  e più basso è il tempo di solidificazione, in altre parole più basso è  $b$  e più elevata sarà la riduzione del Modulo locale. Se ad esempio una piastra di modulo  $M_0$  ha una faccia formata in materiale a diffusività crescente, vale la relazione

$$M_R = \text{modulo ridotto} = \frac{2M_0}{y + 1} \text{ ove } y = 1; 1,08; 1,21; 1,28; 1,5; 2,6;$$

3 a seconda del materiale di formatura utilizzato: sabbia silicea; zirconite; magnesite; carburo di silicio; conchiglia rivestita; grafite; conchiglia. Per ghise, quindi, colate a 1.673 K (1.400 °C) con CE 3 ÷ 4, il tempo di fine solidificazione della piastra sarà dato da  $t_{min} = 4,5 M_R^2 (cm)$ .

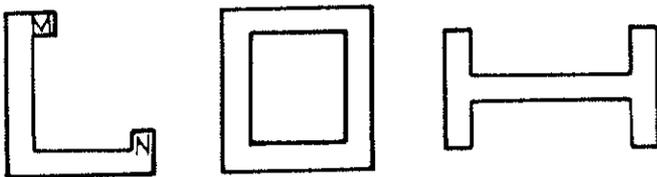


Fig. 267 - Effetto d'angolo esaltato da profili che impediscono il ritiro.

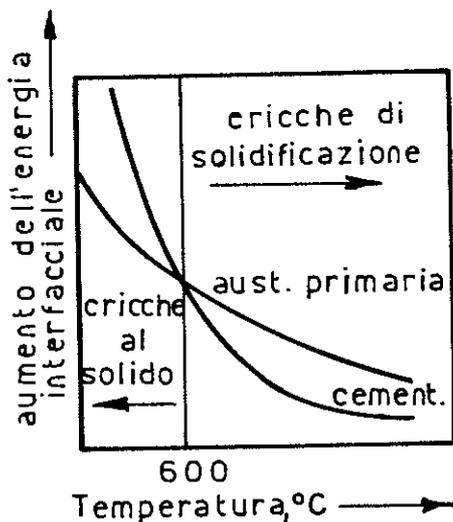


Fig. 268 - Variazioni dell'energia alle superfici limiti della cementite e dell'austenite primaria. Al di sopra di 873 K (600 °C) questa energia è più bassa nella cementite che nell'austenite primaria; perciò la crescita delle cricche di solidificazione può aver luogo sino a 873 K. A meno di 873 K le condizioni si invertono e si producono (con ulteriori sollecitazioni) cricche al solido infracrystalline.

sottili (alette raffreddatrici), l'uso di anime ad alta cedevolezza, sono i rimedi più usati per la lotta a questi tipi di difetto che si manifestano durante il ritiro di solidificazione nel momento in cui sussistono reali difficoltà di alimentazione, cioè mancanza di liquido o difficoltà al suo passaggio (dendriti molto sviluppate, dendriti a pacchetto, ecc.) (fig. 269) oppure il liquido residuo, anche se sufficiente, è di *qualità* scadente per essere ricettato di eutettici secondari (P + S, ecc.) che lo rendono vulnerabile alla deformazione imposta da un successivo ritiro impedito; ad esempio nel caso delle cricche a caldo, basta l'attrito sulla formatura da parte del metallo in incipiente solidificazione a provocare una cricca *primaria* che è subito *saldata* dal liquido; cricca che può originarne un'altra *secondaria*, se il liquido saldante è inquinato e quindi inadatto a subire l'ulteriore deformazione; questa condizione è sintetizzata nell'espressione

$$y_t \cdot l_t \geq \delta_m \cdot l_m$$

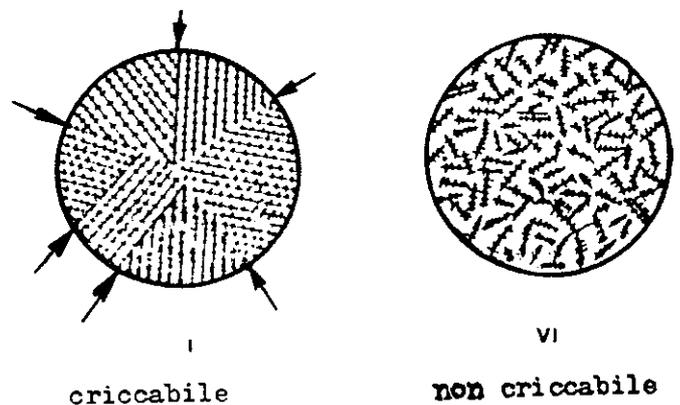
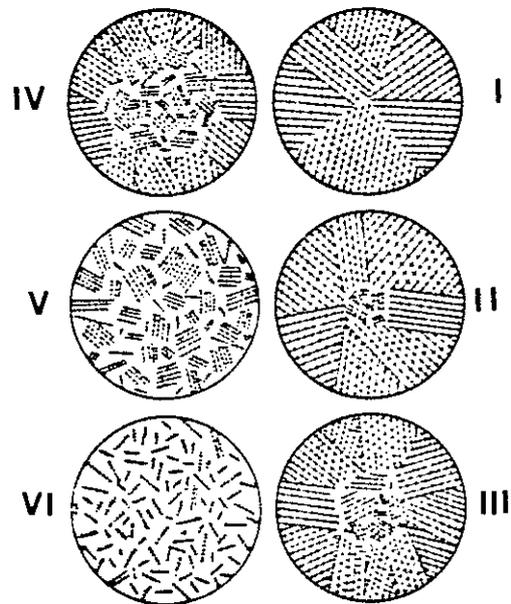


Fig. 269 - Nella cristallizzazione esogena (I) i nuclei si formano nella superficie di separazione forma-liquido e la crescita del cristallo avviene dal bordo verso il centro della massa metallica (la crescita prevale sulla formazione dei nuclei). Con la cristallizzazione endogena (VI) la formazione dei nuclei avviene nell'interno della massa e prevale sulla crescita dei cristalli. Si notino, nella serie di riferimento, tutte le macrostrutture intermedie. La struttura VI, non possedendo né bordi preferenziali né pacchetti dissimili, è ideale per prevenire sia le cricche a caldo sia le punte di spillo<sup>(2)</sup>. Per ostacolare la cristallizzazione esogena, può essere utile verniciare la forma con pigmenti metallici (Zn, Co, Fe)<sup>(3)</sup>.

in cui

$l_f$  e  $l_m$  sono le lunghezze della sezione fredda e del punto caldo,  $y_f$  è il ritiro lineare e  $\delta_m$  è l'allungamento relativo

del metallo  $\left(\frac{\text{mm}}{\text{mm}}\right)$ . Ne consegue che, a parità delle

altre condizioni, più  $l_m$  è grande e più difficilmente si manifesterà la cricca.

Le ghise grigia e sferoidale sono meno soggette alle cricche a caldo per la presenza del liquido eutettico per tutta la durata di solidificazione sino al centro della sezione, mentre per la ghisa bianca per malleabile (ipoeutettica) sono raccomandati rapporti solido/liquido, nelle zone centrali, ottimali allorché l'interfaccia inizia a solidificare (figg. 270, 271).

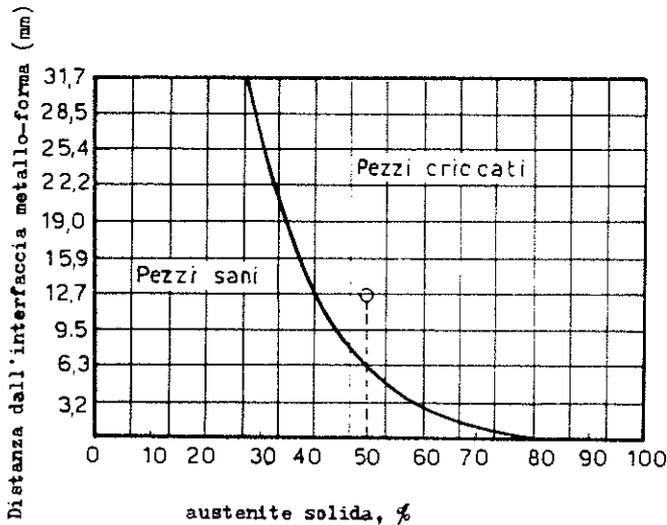


Fig. 270 - Percentuale di metallo ammissibile (per non avere difetti) all'interno di una parete di un getto in via di solidificazione allorché all'interfaccia metallo-forma si raggiungono i 1.394 K (1.121 °C). Esempio: se un getto di spessore 25,4 mm, con C.E. = 2,75 assume alla distanza di 12,7 mm dall'interfaccia  $(1.394 + x) \text{ K} = 1.455 \text{ K} (1.121 + x \text{ °C} = 1.182 \text{ °C})$  presenta cricche superficiali (vedi anche fig. 127).

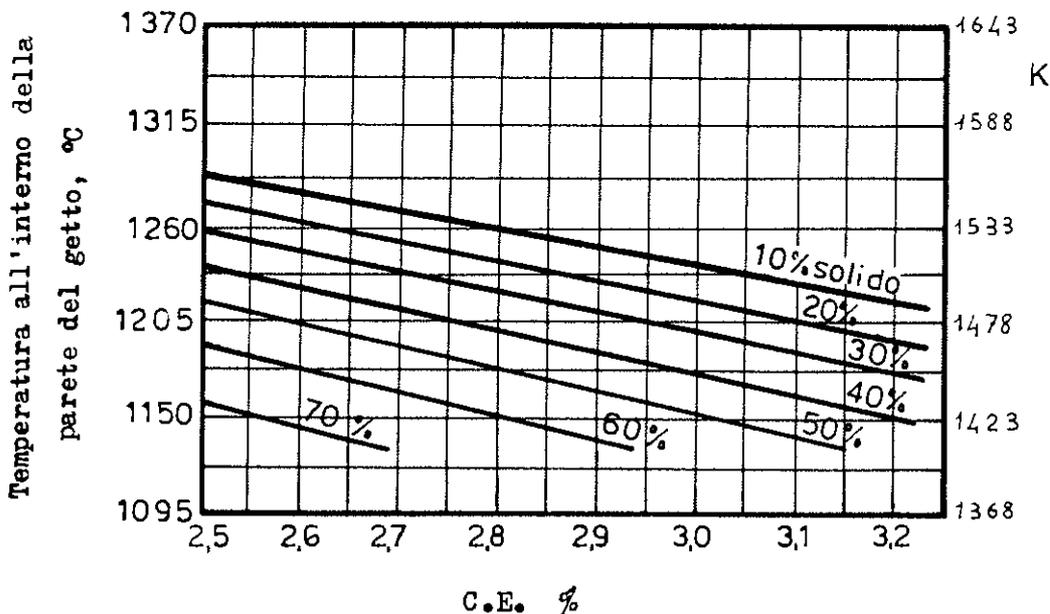


Fig. 271 - Variazione della percentuale di solido all'interno di una parete del getto in funzione della temperatura e del C.E. (%).

Se la ghisa grigia ha un tipo di solidificazione favorevole, per evitare grossi risucchi e cricche a caldo, è sfavorita per la sua bassa duttilità durante il ritiro solido soprattutto post-perlitico. Infatti se il getto è anisotermico, per differenze di velocità di raffreddamento, le sezioni più fredde sono già così resistenti da opporsi al ritiro delle sezioni calde, queste subiscono deformazione plastica, ma al di sotto di A, tutta la contrazione ulteriore si trova impedita, dando origine ad una deformazione elastica di trazione e per reazione nelle zone più fredde a deformazione elastica di compressione e pertanto a sforzi o tensioni interne; un modello geometrico di questo meccanismo è rappresentato in fig. 272.

Si chiamano sforzi interni di *primo ordine* quelli che provengono da differenze di temperatura tra sezioni contrastanti d'un getto e sforzi interni di *secondo ordine* quelli dovuti allo scarto di temperatura fra la superficie esterna e l'interno, nella medesima sezione trasversale del getto (fig. 273). La loro sovrapposizione dà lo stato tensionale finale.

Può accadere che tensioni (di trazione) del primo ordine oltrepassino nettamente su una zona della superficie le compressioni favorevoli (del secondo ordine) provocando nei casi estremi — in relazione all'ampiezza dell'intervallo termico, alle caratteristiche della lega, alla complessità dei vincoli — delle deformazioni nel getto (concavità, convessità, svergolature) od addirittura rotture.

La provetta a griglia di fig. 274 presenta appunto una sezione sottile che compie tutto il suo ritiro quando la sezione grossa è ancora plastica e quindi cede, ma allorché quest'ultima diventa rigida a sua volta ritira, il ritiro impedito dalla sezione sottile induce tensioni di trazione nella sezione grossa e per reazione tensioni di compressione nella parte sottile. Fortino<sup>86</sup> trova, dopo sezionatura della parte massiccia, degli scostamenti tra A e B, inversamente proporzionali al CE (fig. 275). A. Collaud in uno studio del 1944<sup>87</sup>, metteva in evidenza che tutti i getti di ghisa sono tensionati e che queste tensioni possono raggiungere sino al 40 ÷ 60% del carico di rottura e che tanto più elevata è la classe di ghisa, tanto più elevata è questa percentuale. È quindi illusorio

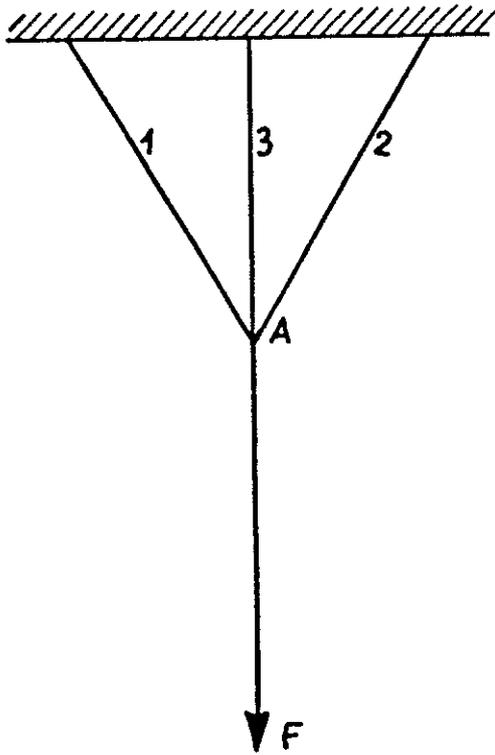


Fig. 272 - Esercitando sul sistema triangolare una forza  $F$  lentamente crescente, la barra 3 raggiungerà per prima la fase di scorrimento plastico in cui la deformazione cresce senza che si abbia un accrescimento sensibile di carico; le altre barre 1 e 2, invece, restano nel dominio delle deformazioni elastiche. Sopprimendo il carico  $F$ , le barre 1 e 2 sono impedito al ritorno elastico dalla barra 3 che si è deformata permanentemente. Il sistema sarà, quindi, sottoposto a tensioni interne: la barra 3 di compressione, le barre 1 e 2 di trazione.

evitare rotture per tensioni interne, prescrivendo ghise ad elevate caratteristiche senza un adeguato trattamento termico di invecchiamento.

Per sensibilizzare la provetta a griglia in modo da renderla idonea a stimare la *criccabilità* intrinseca delle ghise destinate ai getti sottili ( $3 \div 5$  mm) con ampia superficie (caloriferi, caldaie, vasche da bagno, ecc.) e che sono soggetti a rotture in staffa, G. Cola<sup>88</sup> ha ideato un *getto tipo* a lettura immediata. Detta provetta è derivata da quella a griglia (fig. 276), ma la differenza di lunghezza, imposta tra barre grosse e la sottile forcilla interna, è costretta ad essere sostituita da una corrispondente deformazione che darà luogo ad una sollecitazione tanto più grande quanto più *rigida* sarà la struttura sollecitata; di qui la scelta della forma ad archetto che, a parità di deformazione (freccia), fornisce una concentrazione di sforzi molto maggiori nei confronti di un traversino.

La sensibilità può essere graduata variando unicamente la lunghezza, ad esempio una buona ghisa per fumisteria a basso  $P$  ( $\leq 0,1$ ) con  $CE \approx 4,6$  deve considerarsi praticamente esente da cricche se la lunghezza  $\leq 325$  mm; così una ghisa con  $P = 0,8$  con  $CE \approx 4,35$  non dà luogo ad incrinatura se la lunghezza è  $\leq 225$ , ma la stessa ghisa fosforosa contenente  $B = 0,01\%$  porta questo limite a  $\leq 150$  mm.

In effetti la resistenza delle ghise con tenore in  $P < 0,15\%$  diventa sensibile e tale da opporsi agli sforzi a  $1.253$  K ( $980^\circ\text{C}$ ), mentre con  $P > 0,15\%$  detta resi-

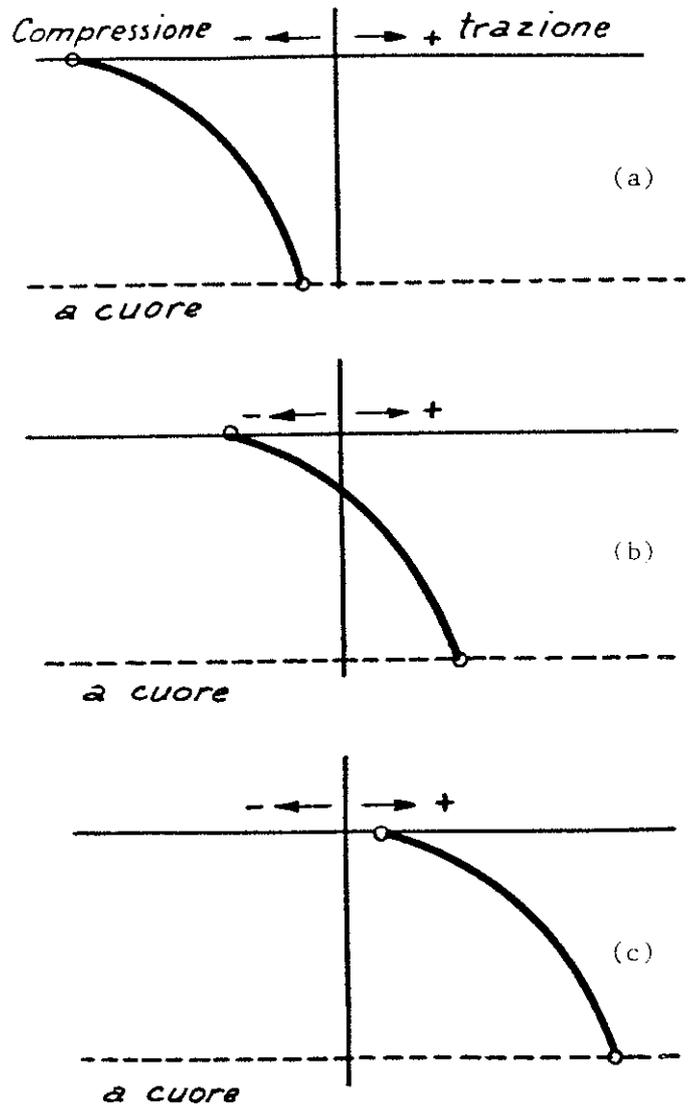


Fig. 273 - Distribuzione schematica delle tensioni interne nelle sezioni longitudinali delle pareti dei getti, caso b = tensioni del 2° ordine; casi c ed a = tensioni del 2° ordine + tensioni del 1° ordine (88).

stenza inizia a  $1.193$  K ( $920^\circ\text{C}$ ). È dunque nell'intervallo  $1.313 \div 1.253$  K ( $1.040 \div 980^\circ\text{C}$ ) e  $1.313 \div 1.193$  K ( $1.040 \div 920^\circ\text{C}$ ) che avvengono le rotture a caldo. Aumentando il tenore in fosforo da  $0,04$  a  $0,3\%$  la resistenza delle ghise legate si abbassa del  $30 \div 40\%$ , mentre nella ghisa grigia l'aumento del  $P$  non ha nessun effetto a  $1.313$  K ( $1.040^\circ\text{C}$ ) ed a  $1.253$  K ( $980^\circ\text{C}$ ) la diminuzione di resistenza è del  $14\%$ .

L'ordine di grandezza di queste resistenze oscilla tra  $10$  e  $25$  N/mm<sup>2</sup> ( $1$  e  $2,5$  kg/mm<sup>2</sup>).

La sensibilità alle cricche di ghise ad alto tenore di fosforo è molto elevata a  $1.193$  K. L'allungamento della ghisa alla rottura diminuisce della metà quando il fosforo passa da  $0,04$  a  $0,3\%$ .

Per un dato tenore in  $P$  le ghise al Cr ( $1\%$ ) ed al Mo ( $1,1\%$ ) hanno gli allungamenti più piccoli, evidentemente la solubilità del  $P$  nell'austenite diminuisce in presenza di Cr o Mo; la quantità di eutettico fosforoso aumenta e le proprietà si modificano. Anche l'ordine di grandezza di questi allungamenti è piccolo e cioè varia da  $1,5$  a  $3\%$ .

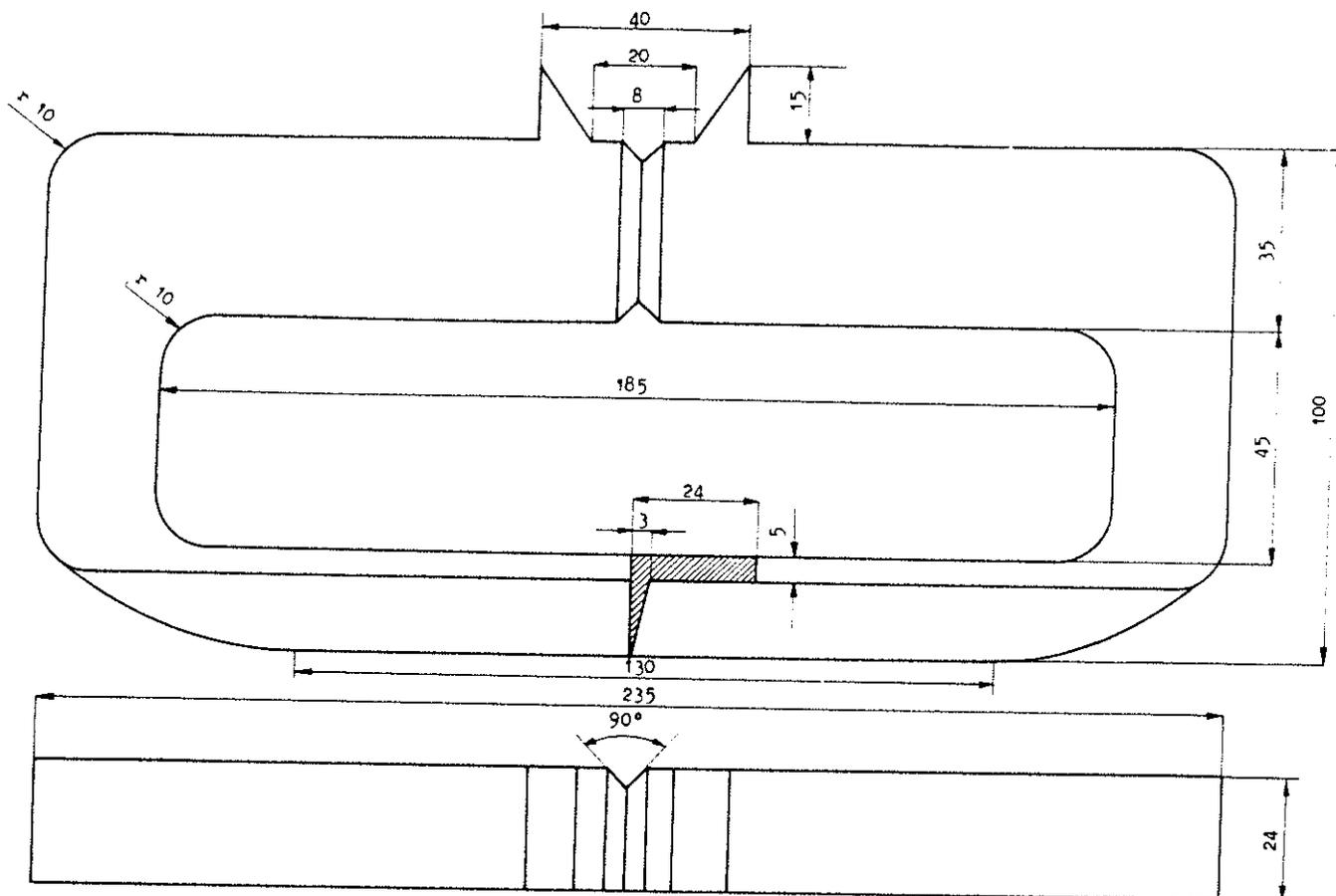


Fig. 274 - Provetta di tensionabilità delle ghise, secondo Fortino.

In genere nei getti sottili il tenore di P è elevato (0,8 ÷ 1,2%) per consentire al metallo di migliorare la propria colabilità; in questo tipo di ghise la maggiore sensibilità a dare cricche in presenza di elementi leganti si manifesta a freddo, in particolare quando gli elementi sono dei carburigeni o degli stabilizzanti i carburi.

Uno studio sistematico di Evans<sup>89</sup> sulle rotture delle vasche da bagno ha dimostrato che, aumentando la percentuale di rottame smaltato in carica, si ha un aumento dei tenori di Pb, B, Sb, As ed un conseguente aumento delle rotture.

Sono noti gli effetti deleteri del Pb ed Sb (De Sy<sup>90</sup>) (Scortecci<sup>91</sup>) soprattutto sulla segregazione grafitica ano-

mala (grafite intergranulare) con conseguente infragilimento della ghisa; meno evidente è l'effetto del B ed in genere di altri carburigeni quali Cr, V, Mo, Mn, ecc.

Già nel 1933 un lavoro sperimentale a carattere statistico di Brinckmann ed A. Nermitz<sup>92</sup> aveva messo in evidenza l'aumento della percentuale di scarti con le fluttuazioni del tenore di Mn.

Il metodo di calcolo impiegato dagli autori ha loro permesso di tracciare la curva di fig. 277. Il tenore di manganese più favorevole risulta di circa 0,6%. Detrez-Cuvillier<sup>93</sup> e Gabel<sup>94</sup> hanno confermato sperimentalmente che un tenore di manganese nettamente al di sopra della norma stabilita da  $Mn = 1,7 S + 0,3$  può risultare dannoso.

In una indagine alla microsonda elettronica (Charbonnier-Margerie<sup>95</sup>) su un campione di ghisa grigia colato in barretta di 50 mm di diametro della seguente composizione in %:

C = 3,3; Si = 1,41; Mn = 0,94; S = 0,12; P = 0,11;

Ni = 0,19; Cr = 0,32; Mo = 0,035; Cu = 0,14

si è potuto dimostrare una grande eterogeneità strutturale della ghisa, mettendo in evidenza la ripartizione dei vari elementi delle fasi (fig. 278).

I bordi delle celle eutettiche e l'eutettico fosforoso sono sede di microsegregazioni notevoli; ad esempio il Cr sale da 0,32 nominale a 3,82%, il Mn sale da 0,94 nominale a 2,4%. Si deve quindi supporre che anche il

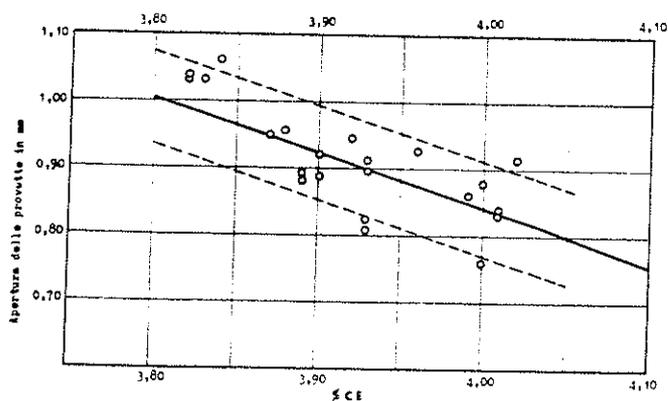


Fig. 275 - Correlazione tra tensioni interne e C.E. nelle ghise grigie (\*).

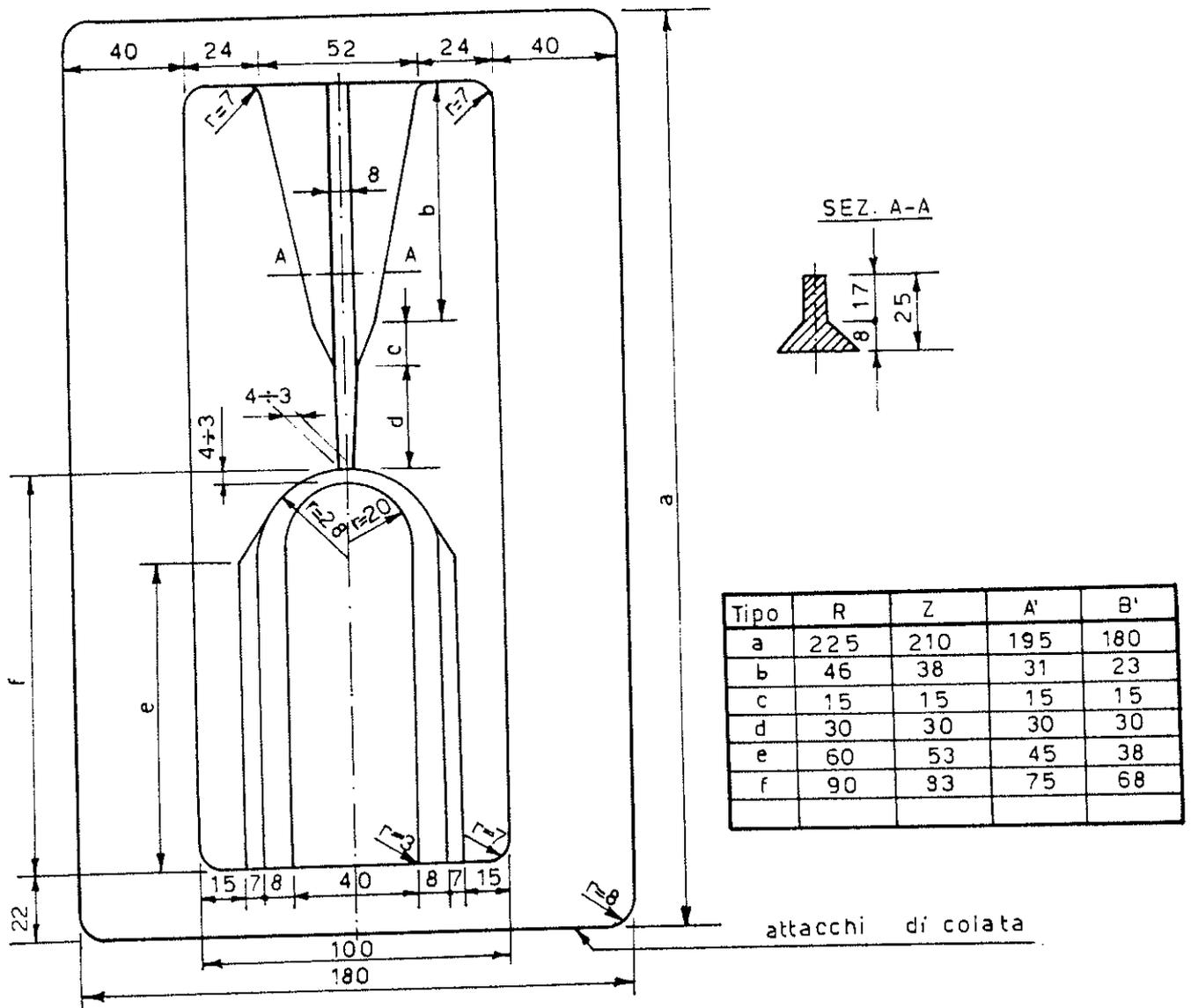


Fig. 276

B, il V, ecc. seguano analogo andamento; d'altra parte Detrez-Cuvillier<sup>96</sup> hanno dimostrato che Cr, B, Mn, hanno dei valori critici, superati i quali (a parità di legge di raffreddamento) l'eutettico fosforoso passa da binario a ternario con aumento di durezza e fragilità. Dalla fig. 279 risulta che per il Cr non si deve superare lo 0,05% nominale.

Per ciò che concerne il B, detto elemento non dovrebbe superare 0,002%, Sb e Pb dovranno essere inferiori a 0,001%.

L'intensità delle segregazioni varia al variare della velocità di raffreddamento; aumentando quest'ultima, aumenta pure lo stato di sopraffusione, pertanto i getti sottili sono più soggetti a dare tipi di grafite D ed E che, come è noto, sono accompagnati da più ampie zone di segregazione, con sensibile peggioramento nelle caratteristiche meccaniche.

Ma il fattore più importante, che agisce in parallelo con la microsegregazione dei costituenti principali della ghisa, è secondo Wendorff<sup>97</sup> la microsegregazione dell'H<sub>2</sub>.

Questa microsegregazione può prodursi in un getto sottile, rapidamente solidificato, in seguito al passaggio dell'H<sub>2</sub> dalla parte solidificata nel liquido che discioglie una più grande quantità di questo gas.

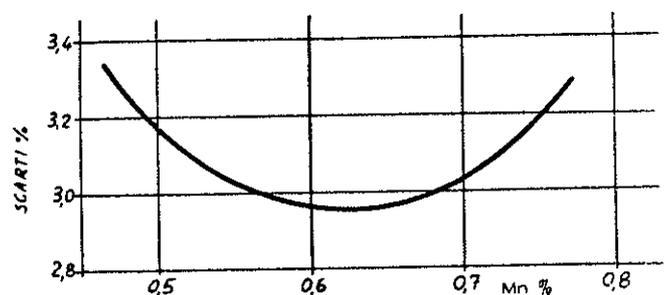


Fig. 277 - Percentuale di scarti in funzione del contenuto di manganese<sup>(1)</sup>.

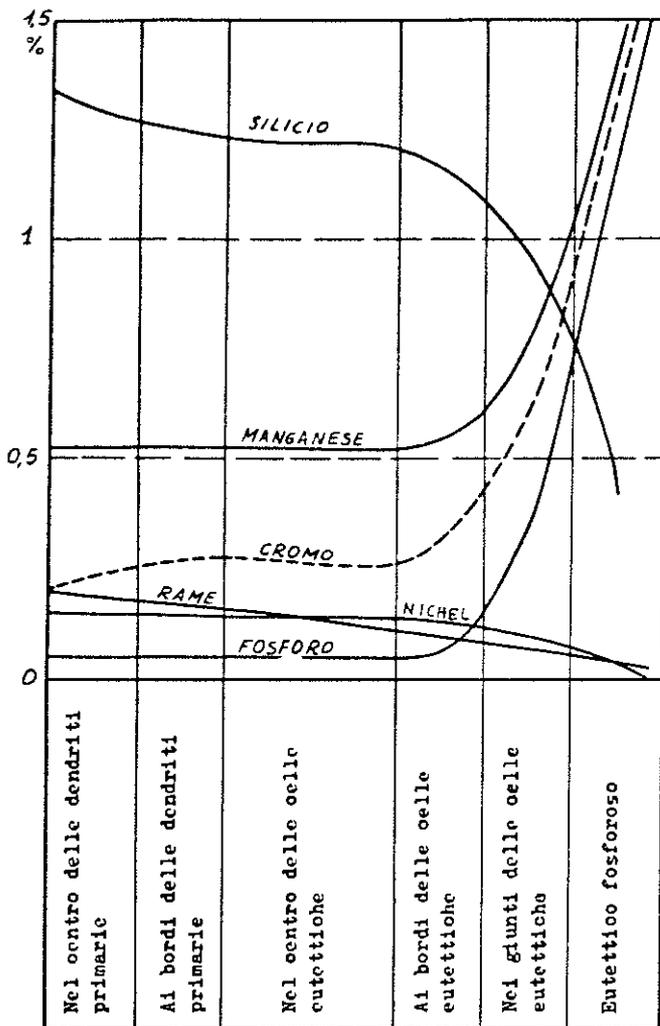
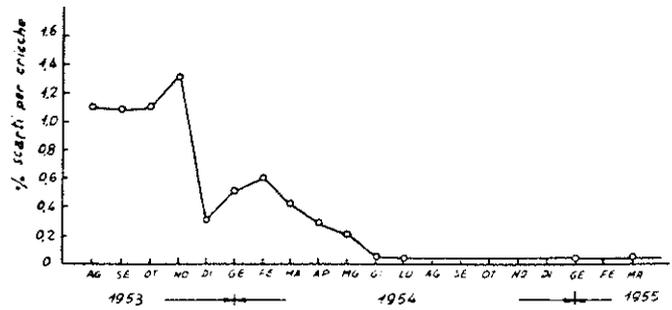


Fig. 278 - Curve sperimentali sulla microsegregazione della ghisa (14).



Date	C	Si	P	Mn	Cr	Ni
21/10/53	3,32	2,85	1,01	0,68	0,15	0,17
23/10/53	3,43	2,71	1,00	0,66	0,12	0,16
30/10/53	3,42	2,73	0,84	0,74	0,16	0,16
3/11/53	3,45	2,74	0,99	0,64	0,16	0,14
14/12/53	3,40	2,98	0,81	0,54	0,09	—
2/3/54	3,22	2,80	1,13	0,61	0,015	0,05
30/9/54	3,30	2,60	1,21	0,67	0,025	0,07
5/1/55	3,26	2,92	1,12	0,79	0,03	—
14/3/55	3,35	2,55	1,21	0,63	0,028	0,07

Fig. 279 - Variazione delle percentuali di scarti per cricche.

Se ne deduce che il bilanciamento dei vari componenti, le cause di anisotermia, la temperatura di colata, la diffusibilità termica delle forme, l'umidità delle stesse, la composizione delle cariche, l'assorbimento di gas, l'inoculazione sono elementi che influiscono sulla criccabilità dei getti sottili, la sanezza dei quali è solo apparente e dipende solo dall'intensità delle sollecitazioni aggiuntive esterne. A volte detti getti manifestano una fragilità che non è in rapporto con la qualità della ghisa colata, e che provoca rotture in seguito ad un urto insignificante, sia all'imbracatura, sia alla sterratura e sbavatura, sia per opera degli sforzi di taglio durante la lavorazione meccanica, od alla pressa idraulica.

## SINTESI GRAFICA DELLE PROPRIETÀ TECNOLOGICHE DELLE GHISE - NOMOGRAMMA MULTIPLO

Le varie considerazioni sin qui esposte lasciano intravedere i legami intercorrenti fra le prove immediate di fonderia.

Per una migliore visione d'insieme è stata elaborata (G. Cola<sup>98</sup>) una sintesi grafica mediante un nomogramma multiplo (fig. 280) per ghise meccaniche UNI 5007 nella versione P = 0,2 max.

Per la costruzione sono state utilizzate tutte le correlazioni già passate in rassegna che qui sono elencate:

$$S_c = \frac{98,4 - R_{30}}{80} \quad (\text{A. Collaud})$$

$$R_{30} = \frac{HB_{30} - 125}{3,38} \quad (\text{A. Collaud})$$

$$HB_{30} = 465 - 270 S_c$$

$$S_c = \frac{C_t}{4,23 - \frac{Si + P}{3}} \quad (\text{Piwowsky})$$

$$CE = C_t + \frac{Si + P}{3}$$

$$CEL = C_t + \frac{Si}{4} + \frac{P}{2} \quad (\text{L. Porter-P. Rosenthal})$$

$$CEB = C_t + \frac{Si}{9} + \frac{P}{3,5} \quad (\text{A. Moore})$$

$$MGE = C_t - 1,3 + 0,1 (Si + P) \text{ per } S_c \leq 1$$

$$MGE = 2,93 - 0,22 (Si + P) \text{ per } S_c > 1$$

(A. Wittmoser)

$$TL = 1.631 - 115 \text{ CEL } (^\circ\text{C}) \text{ per } S_c \leq 1$$

$$TGL = 389 \text{ CE} - 505 \text{ }^\circ\text{C} \text{ per } S_c > 1$$

$$TEB = 1.138,2 - 6,4 (Si + 4P) - 1,65 (Si + 4P)^2$$

(J. Van Eeghem)

$$CL = 7,27 \text{ CEL} + 0,045 \text{ TC} - 77,56$$

(L. Porter-P. Rosenthal)

$$C = 0,01700 \text{ TEB} - 0,00819 \text{ TL} - 5,86$$

(J. Van Eeghem)

$$PG = \frac{3}{2} Si \left( 1 - \frac{11}{5C_t + Si} \right) \quad (\text{H. Laplanche})$$

$$t_c (s) = \frac{CL}{20} \cdot (1,412 + 0,068 \cdot s_p (\text{mm}))$$

$\sqrt{\text{peso getti medi}}$

$$t_c (s) = \frac{CL}{20} \cdot (1,235 + 0,060 \cdot s_p (\text{mm}))$$

$\sqrt{\text{peso getti grossi}}$

(Dietert-F. Wallace-P. Evans)

$$RL = \frac{\Delta T \cdot 1,5}{100} \cdot \alpha \quad \text{ove } \alpha = 0,4 \div 1$$

$$S = \frac{\text{Peso getto (kg)}}{t_c \cdot e \cdot 3,1 \sqrt{H_m}} \quad (\text{H. W. Dietert})$$

$$\sqrt{H_m} = \sqrt{\frac{2HC - B^2}{2C}} \quad (\text{H. W. Dietert})$$

$$GI = \frac{MGE \cdot 2,61 - (4,7 - RS)}{(4,7 - RS) + MGE \cdot 2,61} \quad (\text{A. Wittmoser})$$

$$RS = 4,7 - 2,14 \text{ MGE} (GI = 0,1)$$

$$RS = 4,7 - 1,94 \text{ MGE} (GI = 0,15)$$

$$RS = 4,7 - 1,56 \text{ MGE} (\text{per } GI = 0,25)$$

$$RT = RL + RS$$

$$PM = \text{Peso getto} \times RT \times 0,05$$

$$R_{30} = 98,4 - 80 S_c (\text{minimo})$$

$$R_{30} = 100,6 - 80 S_c (\text{medio})$$

} (A. Collaud)

$$e = 0,9 \div 0,70 \text{ per colata dall'alto}$$

$$0,7 \div 0,50 \text{ per colata laterale o sorgente (a depressione)}$$

$$0,36 \div 0,50 \text{ per colata in sorgente o laterale (a pressione)}$$

Dai grafici proposti si può scegliere il tipo di ghisa più appropriato per un determinato getto sotto il profilo dell'attitudine alla tempra primaria (in condizioni standard di nucleazione), della sua colabilità e quindi del sistema di colata da adottare, della sua tendenza al risucchio e quindi dell'alimentazione, ecc. ed inversamente destinare una particolare ghisa elaborata ad un getto piuttosto che ad un altro.

Praticamente con TL, TP, TC e TEB:

1 - Si individua la classe delle ghise UNI 5007 presente in secchia.

2 - Si valuta il Ct ed il Si presente:

TL	TP	Ct%	Si
bassa	elevata	alto	basso
bassa	debole	alto	alto
alta	elevata	basso	basso
alta	debole	basso	alto

3 - Si determina il Si% e C% (con crogiolini al tellurio).

4 - Si determina il grado di surriscaldamento.

5 - Si determina la colabilità.

6 - Si determina il ritiro liquido.

7 - Si determina il ritiro di solidificazione.

8 - Si determina il ritiro totale.

9 - Si valuta la tendenza al risucchio.

10 - Si determinano i tempi di colata.

11 - Si dimensiona il sistema di colata.

12 - Si dimensiona l'alimentazione.

Naturalmente i punti 10-11-12 richiedono altri dati di entrata come peso del getto e suo spessore, la divisione del modello e le relative altezze, nonché la conoscenza del battente e delle perdite di carico sperimentali.

L'impostazione del diagramma multiplo basato su migliaia di dati, la sua verifica condotta presso fonderie industriali consentono il suo utilizzo, oltre che nel controllo, anche come strumento di previsione; a questo riguardo le varie relazioni passate in rassegna possono essere utilizzate come dati di ingresso per una elaborazione al computer.

L'elaborazione delle varie ghise meccaniche, mediante l'ausilio del diagramma, è condotta nel modo seguente:

1 - Determinazione della classe di ghisa UNI richiesta dal cliente.

2 - Determinazione del  $S_c$  o CE corrispondente a  $R_{30}$  min.

3 - Con l'ausilio di una riga e facendola ruotare sull'asse di rotazione individuato nel centro del cerchietto della ghisa designata, si determina un ventaglio di composizione Ct e Si.

4 - Si fissa il Ct desiderato ed automaticamente, cioè sulla stessa linea (1<sup>a</sup> linea), si hanno il Si, la tempra primaria corrispondente al punto di tangenza delle curve, la TL, la TEB, il CEL, il CE, la MGE, il RS \* %. È possibile leggere TL anche se la ghisa è ipereutettica, utilizzando crogioli al tellurio.

5 - Sulla TL nota si posiziona la riga in modo da farla coincidere con la temperatura di colata (prefissata in base alle esigenze del getto) e si ottengono automaticamente sulla stessa linea (2<sup>a</sup> linea) CL, RL \*\*.

\* Per le ghise ipereutettiche RS % può essere determinato unendo il valore del Si con CE = 4,3.

\*\* Per le ghise ipereutettiche RL % si trova unendo un valore TL = TGL (trovato dalla relazione  $389 \text{ CE} - 505 \text{ }^\circ\text{C}$ ) con TC.

6 - Sul RS % si posiziona la riga in modo da farla coincidere con RL % e si ottiene RT % direttamente sulla stessa linea (3ª linea).

7 - Volendo conoscere il tempo di colata, occorre assegnare la categoria al getto da colare in base allo spessore medio ed al peso.

Assegnata la categoria (getti medi o getti grossi), si unisce con la riga il peso del getto con lo spessore (4ª linea), l'intersezione con la linea di riferimento LR1 costituisce il centro di rotazione (della riga). Si ruota, quindi, su questo punto la riga a destra od a sinistra sino ad incontrare CL già determinato (vedi § 5 precedente); la curva dei tempi tangente alla riga indica il tempo di colata  $t_c$  in secondi.

8 - Volendo conoscere il peso complessivo delle materozze, occorre unire (5ª linea) la scala del peso con RT (scala logaritmica) e quindi leggere PM.

9 - Una volta designato il sistema di colata (dall'alto, in mezzeria, in sorgente), si può stabilire il battente effettivo  $H_m$ , unendo l'altezza del getto dalla strozzatura con la scala obliqua che dà l'altezza del getto stesso (6ª linea), si individua su LR2 il punto da unire con l'altezza del canale verticale di colata  $H$  e sulla stessa linea si legge il battente effettivo  $H_m$  sulla scala superiore (scala normale).

10 - Unendo il battente  $H_m$  (sulla scala inferiore logaritmica) (linea 7ª) con il peso, si determina un punto su LR3 che unito (linea 8ª) con il valore di  $t_c$  (già noto), ma sulla scala mediana (non come tangente alle curve), si individua un secondo punto su LR4 che unito (linea 9ª) con il valore sperimentale di  $e$  dà la sezione  $S$  (in  $\text{cm}^2$ ) della strozzatura.

Il modo di procedere indicato per la *previsione* è valido anche per il *controllo*.

## ESEMPIO

Si debba colare il getto di fig. 220 del peso di 50 kg di spessore 20 mm, con ghisa G 30 ( $290 \text{ N/mm}^2$ ).

Si segua l'elaborazione secondo le modalità passate in rassegna, e cioè:

1 - Verificare la classe di ghisa UNI più rispondente; trattandosi di camicia per compressori, si stima sufficiente il tipo G 30.

2 - Il grado di saturazione ( $S_c$ ), secondo le formule già viste, risulta essere circa eguale a 0,85 che corrisponde ad un Carbonio Equivalente di circa 3,72%.

3 - Individuato sul nomogramma il cerchietto della classe G 30, con l'ausilio di un righello si sceglie il C % desiderato:

$$C \% = 2,5 S_c + 0,9 = 3,0\%$$

cui corrisponde un silicio di 1,96 (con Mn =  $0,5 \div 0,6$  e P = 0,2).

4 - Mantenendo nella stessa posizione il righello, si avrà:

- la tempratura primaria di  $\approx 4,0$  mm
- la Temperatura del Liquidus (TL) = 1.219
- il Carbonio Equivalente (CEL) = 3,59
- la Massima Grafite Eutettica (MGE) = 1,92
- il Ritiro di Solidificazione (RS %) = 1,7

5 - Ora si unisce (con il righello) TL con la temperatura di colata TC predeterminata:  $\approx 1.370$  °C e si ottiene:

- la Colabilità (CL) = 11,5
- il Ritiro Liquido (RL) = 2,25%

6 - Sul RS % = 1,7 si posiziona ora il righello in modo da farlo coincidere con RL % = 2,25 e si legge sulla scala RT il valore del ritiro totale: RT = 3,95%.

7 - Unendo la scala logaritmica di RT = 3,95 con la scala del peso *getti medi* (62 kg) si legge il peso complessivo dell'alimentazione PM  $\approx 12,0$  kg.

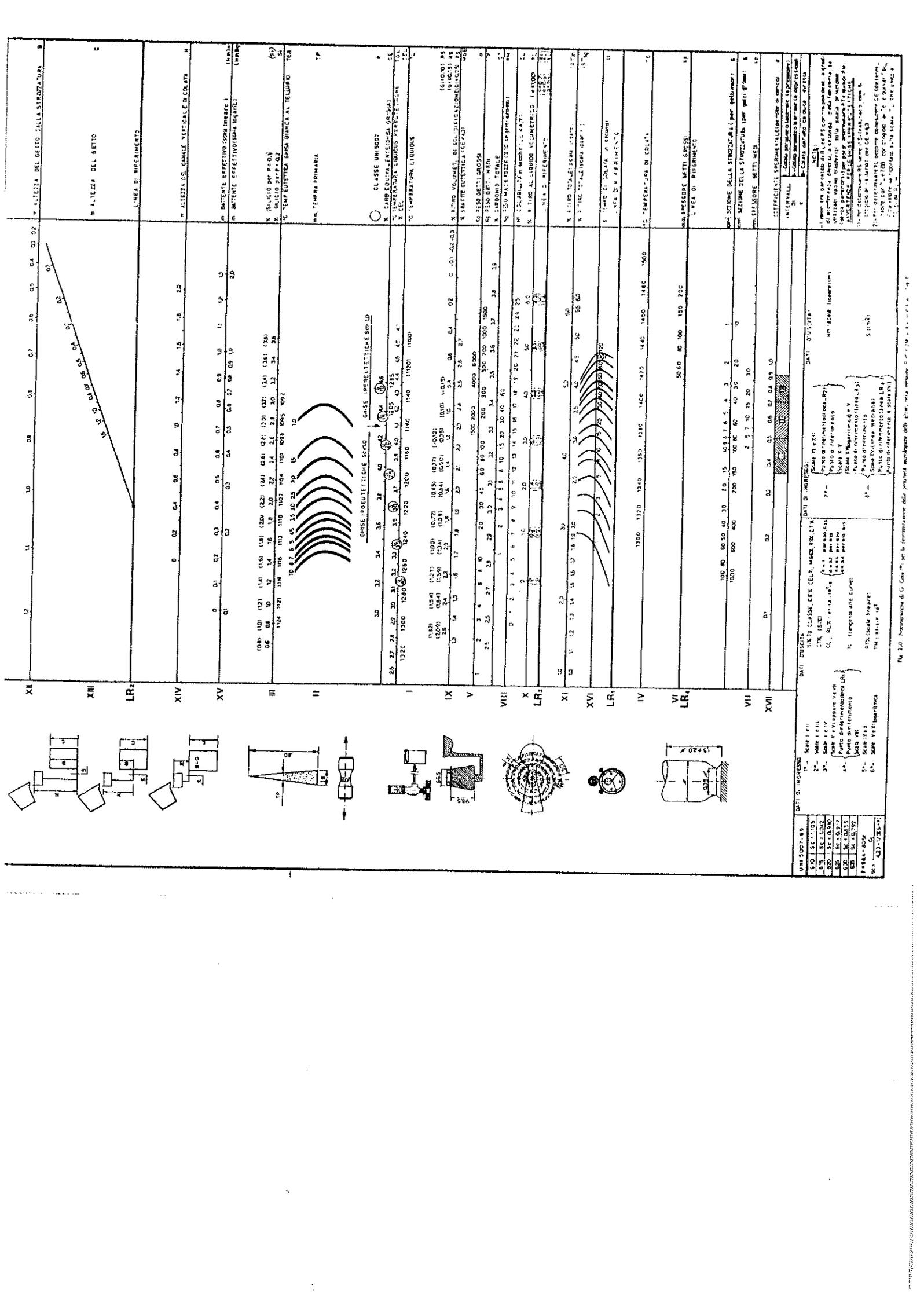
8 - Appartenendo il getto alla categoria dei getti medi, si unisce il peso 50 + 12 kg (dell'apposita scala) con lo spessore di 20 mm, si interseca così la linea di riferimento LR1, si ruota il righello (sul punto di intersezione) sino ad incontrare CL = 11,5 il punto di tangenza ad una curva della serie  $t_c$ , fornisce il tempo di colata:  $t_c = 12,5$  s.

9 - Si determina ora il battente effettivo  $H_m$ , unendo l'altezza del getto al di sopra della strozzatura ( $\approx 0$ ) con l'altezza del getto = 0,55 m. Si individua così un punto sulla LR2 (che in questo caso coincide con il punto di intersezione della scala C) da unire con l'altezza del canale verticale di colata  $\approx 0,15$  m; quindi sulla scala lineare superiore  $H_m$  si leggerà ancora 0,15 m.

10 - Unendo il battente 0,15 m (sulla scala inferiore logaritmica) con il peso (62 kg) si determinerà un punto sulla LR3 che unito con il valore di  $t_c = 12,5$  s (sulla scala mediana non come tangente) si individua un secondo punto su LR4 che unito con il « valore sperimentale » di  $e$ , che in questo caso si stima essere 0,7 si ottiene la sezione totale degli attacchi  $\approx 6 \text{ cm}^2$  che divisa per il numero delle colatine a pioggia dà  $6 : 12 = 0,5 \text{ (cm)}^2$ , che corrisponde al diametro di 8 mm (fig. 220).

## BIBLIOGRAFIA

- <sup>1</sup> R. F. MEHL, C. WELLES - Trans. A.I.M.E. 140, 1940, p. 279.
- <sup>2</sup> H. LAPLANCHE - Foundry Trade Journal, n. 1669-1671, 1948.
- <sup>3</sup> H. T. ANGUS - Properties of Cast Iron - BCIRA, 1960.
- <sup>4</sup> A. COLLAUD - Von Roll Mitteilungen 1-4, 1949.
- <sup>5</sup> G. COLA - VIII Convegno Nazionale AIM, Torino, 1958.
- <sup>6</sup> CANELLA, MONTI - Relazione n. 1599 C.S.M., Roma, 1975.
- <sup>7</sup> A. COLLAUD - Von Roll Mitteilungen 3-4, 1954.
- <sup>8</sup> W. WEIS, K. ORTHS - Giesserei Forschung 21, n. 3, 1969.
- <sup>9</sup> A. COLLAUD - Von Roll Mitteilungen 1-4, 1961-1962.
- <sup>10</sup> A. COLLAUD - XXVII Congresso Internazionale di Fonderia, 1960.
- <sup>11</sup> W. PATTERSON - Giesserei S. 385, 1958.
- <sup>12</sup> G. COLA - XXI Congresso Internazionale di Fonderia, 1954.
- <sup>13</sup> E. PLENARD, J. PLESSIER - Fonderie 251, gennaio 1967.
- <sup>14</sup> IKAWA, OHIRA - XXXII Congresso Internazionale di Fonderia, 1965.
- <sup>15</sup> F. BROTZEN, J. F. WALLACE - Machine Design, dicembre 1952.
- <sup>16</sup> J. W. GRANT - BCIRA, Vol. 3, aprile 1950.
- <sup>17</sup> H. MORROGH, J. W. GRANT - Foundry, XI-48.
- <sup>18</sup> H. MAJORS - Trans. A.S.M.E., novembre 1951, febbraio 1954.
- <sup>19</sup> J. KOMMERS - Proc. ASTM, Vol. 30, n. 2, 1930.
- <sup>20</sup> LOCATI - La Metallurgia Italiana, n. 9, 1962.
- <sup>21</sup> O. SCHMIDT, E. J. WEITER - Mechanical Engineering, Vol. 79, 1957.
- <sup>22</sup> J. HODGSON, T. S. EYRE - Wear of cast iron under dry sliding - BCIRA, Report 875, maggio 1967.
- <sup>23</sup> M. KAWAMOTO, K. OKAYASCHI - Wear, 17, 1971, pp. 123-138.
- <sup>24</sup> E. TAKEUCHI - Wear, 15, 1970, pp. 201-208.
- <sup>25</sup> E. PIWOWARSKY - Hochwertiges Gusseisen, Springer, Berlino 1942.
- <sup>26</sup> P. S. LANE - Trans. ASME, 1937.
- <sup>27</sup> Y. N. PAVLOV - Russian Castings Production, 1967, p. 408.
- <sup>28</sup> HOLM, BURWELL - Mechanical Wear, A.S.M., Cap. XIV, 1950.
- <sup>29</sup> T. L. OBERLE - Journal of Metals, giugno 1951, p. 438.
- <sup>30</sup> J. LEONARD - Revue Universelle des Mines, gennaio 1962.
- <sup>31</sup> W. RAUTERKUS - Giesserei, aprile 1961.
- <sup>32</sup> R. GRAHAM - Foundry Trade Journal, giugno 1960.
- <sup>33</sup> H. T. ANGUS, A. D. LAMB - Lubrication-Wear, Conference London, 1959.
- <sup>34</sup> J. J. CAUBET, M. CARTER - Memoires techniques du CETIM, n. 1-196.
- <sup>35</sup> J. J. CAUBET - La Fonderia Italiana, n. 12, 1971.
- <sup>36</sup> C. ENGLISCH - Motortechnische Zeitschrift, dicembre 1952.
- <sup>37</sup> A. COLLAUD - Réflexions sur les propriétés mécaniques des fontes - Fribourg 1975.
- <sup>38</sup> BODART - C.I.R.P., Anno 10°, n. 14.
- <sup>39</sup> W. F. BRANDSMA - Metaalbewerking 2, S. 541, 1936.
- <sup>40</sup> P. MATHON - Fonderie, n. 275, febbraio 1969.
- <sup>41</sup> G. COLA - Rapporto 2176/R, C.S.M., Roma.
- <sup>42</sup> A. DE SY e Coll. - La Fonderie Belge, dicembre 1960.
- <sup>43</sup> J. BELLOT - Ingénieurs de l'Automobile, n. 5, 1969.
- <sup>44</sup> J. VACLAVINEK - Slevarentvi, 12 (8), 1964.
- <sup>45</sup> E. KASCH - Modern Casting, 43, 1963.
- <sup>46</sup> A. MOORE - Foundry Trade Journal, dicembre 1971.
- <sup>47</sup> J. G. HUMPHEYS, R. JELLEY - British Foundryman, gennaio 1962.
- <sup>48</sup> R. VERRIEST - C.R.I.F., Bruxelles, FD-3, ottobre 1965.
- <sup>49</sup> J. VACLAVINEK - Slevarentvi, 12 (8), 1964.
- <sup>50</sup> J. LEGAL, P. MATHON - Fonderie, 289, aprile 1970.
- <sup>51</sup> H. HALL - BCIRA, Vol. 4, n. 12, 1964.
- <sup>52</sup> L. PORTER, P. ROSENTHAL - Trans. A.F.S., Vol. 60, p. 818.
- <sup>53</sup> E. EVANS - BCIRA, Vol. 4, n. 2, 1951.
- <sup>54</sup> J. G. HUMPHEYS - BCIRA, 1961, p. 609.
- <sup>55</sup> J. W. WALLACE, E. EVANS - A.F.S., Preprint n. 57, 9, 1957.
- <sup>56</sup> J. C. MARGERIE, J. COPPOLANI - Revue de Metallurgie, agosto 1965.
- <sup>57</sup> J. G. HUMPHEYS - BCIRA, 1961, p. 609.
- <sup>58</sup> A. MOORE - AFS Cast Metals Research Journal, 1972, p. 15.
- <sup>59</sup> R. W. HEINE - Trans. A.F.S., 1970.
- <sup>60</sup> J. VAN EEGHEM e Coll. - La Fonderie Belge, n. 2, 1976.
- <sup>61</sup> E. LORIA - Trans. A.F.S., Vol. 61, 1953, p. 387.
- <sup>62</sup> V. PULSIFER - Foundry, settembre 1958.
- <sup>63</sup> WAGNER, FRIEDRICH - Giesserei, 1964, 51 (10), pp. 273-275.
- <sup>64</sup> H. LAPLANCHE - Fonderie, n. 297, gennaio 1971.
- <sup>65</sup> H. D. MERCHANT e Coll. - Trans. A.F.S., 1961, p. 241.
- <sup>66</sup> V. PULSIFER - Foundry, settembre 1958.
- <sup>67</sup> O. SCHMIDT, SULLIVAN, TAYLOR - Trans. A.F.S., 1954, p. 62.
- <sup>68</sup> WITTMOSER - Giesserei, ottobre 1956.
- <sup>69</sup> H. HUHLBERGER - Arch. Eisen Huttenwesen, ottobre 1962.
- <sup>70</sup> DE VAUX, M. JEANCOLAS - Fonderie, n. 294, 1970.
- <sup>71</sup> KUSAKAWA, KIM, RONDO - Imono, agosto 1971, p. 666.
- <sup>72</sup> W. HEINE - A.F.S. Metals Research Journal, giugno 1971.
- <sup>73</sup> C. REYNOLDS - Trans. A.F.S., 1957.
- <sup>74</sup> WITTMOSER - Giesserei, agosto 1956, p. 409.
- <sup>75</sup> C. REYNOLDS e Coll. - Trans. A.F.S., 1957, p. 386.
- <sup>76</sup> LEVELINK, A. JULIEN - La Fonderia Italiana, n. 9, 1973.
- <sup>77</sup> A. A. TIMMINS - BCIRA, n. 12, 1947.
- <sup>78</sup> J. WALLACE - Foundry, gennaio 1964.
- <sup>79</sup> J. SZAJDA - BCIRA, 1959, p. 567.
- <sup>80</sup> WITTMOSER, H. A. KRALL, HUTTER - Foundry, novembre 1958.
- <sup>81</sup> D. FORTINO - La Fonderia Italiana, n. 7-8, 1972.
- <sup>82</sup> W. PATTERSON e Coll. - Giesserei, 52 (6), 1965.
- <sup>83</sup> M. D. BRYANT, A. MOORE - The British Foundrymen, giugno 1971.
- <sup>84</sup> J. A. BOSTATER, W. HEINE - Modern Castings, ottobre 1964.
- <sup>85</sup> E. CHAPO - Kohaszah-Ontode, n. 11, 1964. Trad. CTIF, n. 364.
- <sup>86</sup> D. FORTINO - La Fonderia Italiana, n. 3, 1960.
- <sup>87</sup> A. COLLAUD - Mitt. Von Rollsche eisenwerke, giugno 1944.
- <sup>88</sup> G. COLA - Relazione 1114/R, C.S.M., 1971.
- <sup>89</sup> E. EVANS, WERSTER - Journal of Research, Report 376, 1954.
- <sup>90</sup> A. DE SY - La Fonderia Italiana, n. 4, 1963.
- <sup>91</sup> SCORTECCI - La Fonderia Italiana, n. 6, 1963.
- <sup>92</sup> BRINCKMANN, A. HERMITZ - Die Giesserei, aprile 1934.
- <sup>93</sup> DETREZ, CUVILLIER - Fonderie, n. 118, novembre 1955.
- <sup>94</sup> GABEL - Fonderie, n. 107, dicembre 1964.
- <sup>95</sup> CHARBONNIER, MARGERIE - Fonderie, n. 207, maggio 1963.
- <sup>96</sup> DETREZ, CUVILLIER - Fonderie, n. 112, novembre 1955.
- <sup>97</sup> WENDORFF - Hutnik, n. 1, 1965, pp. 4-10.
- <sup>98</sup> G. COLA - La Fonderia Italiana, n. 9, 1975.
- <sup>99</sup> A. HOLZMULLER - Giesserei, 50, n. 15, 1963.
- <sup>100</sup> R. INDRIGO - La Fonderia Italiana, n. 3, 1964.
- <sup>101</sup> H. W. DIETERT - Foundry, agosto 1953.
- <sup>102</sup> GORTON e AUSTIN - Journal d'Informations Techniques CTIF N° 95 Aprile 58.



XII ALTEZZA DEL GETTO SULLA STROZZATURA

XIII ALTEZZA DEL GETTO

LR LINEA DI RIFERIMENTO

XIV ALTEZZA DEL CANALE VERTICALE DI COLATA

XV BASTANTE EFFETTIVO SOTTO LINEARE

III TEMPERATURA UNICA UNICA AL VELLINO

II TEMPERATURA PRIMARIA

I CLASSE UNI 0007

IX TEMPERATURA LIQUIDA PERISTEUTICA

V TEMPERATURA LIQUIDA

VIII TEMPERATURA LIQUIDA

X TEMPERATURA LIQUIDA

LR TEMPERATURA LIQUIDA

XI TEMPERATURA LIQUIDA

XVI TEMPERATURA LIQUIDA

LR TEMPERATURA LIQUIDA

IV TEMPERATURA LIQUIDA

VI TEMPERATURA LIQUIDA

VII TEMPERATURA LIQUIDA

XVII TEMPERATURA LIQUIDA

OMISE IPSEUTICHE SOTTO

10,8	10,2	10,1	10,0	9,9	9,8	9,7	9,6	9,5	9,4	9,3	9,2	9,1	9,0	8,9	8,8	8,7	8,6	8,5	8,4	8,3	8,2	8,1	8,0	7,9	7,8	7,7	7,6	7,5	7,4	7,3	7,2	7,1	7,0	6,9	6,8	6,7	6,6	6,5	6,4	6,3	6,2	6,1	6,0	5,9	5,8	5,7	5,6	5,5	5,4	5,3	5,2	5,1	5,0	4,9	4,8	4,7	4,6	4,5	4,4	4,3	4,2	4,1	4,0	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5	3,4	3,3	3,2	3,1	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3	2,2	2,1	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-0,9	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,4	-1,5	-1,6	-1,7	-1,8	-1,9	-2,0	-2,1	-2,2	-2,3	-2,4	-2,5	-2,6	-2,7	-2,8	-2,9	-3,0	-3,1	-3,2	-3,3	-3,4	-3,5	-3,6	-3,7	-3,8	-3,9	-4,0	-4,1	-4,2	-4,3	-4,4	-4,5	-4,6	-4,7	-4,8	-4,9	-5,0	-5,1	-5,2	-5,3	-5,4	-5,5	-5,6	-5,7	-5,8	-5,9	-6,0	-6,1	-6,2	-6,3	-6,4	-6,5	-6,6	-6,7	-6,8	-6,9	-7,0	-7,1	-7,2	-7,3	-7,4	-7,5	-7,6	-7,7	-7,8	-7,9	-8,0	-8,1	-8,2	-8,3	-8,4	-8,5	-8,6	-8,7	-8,8	-8,9	-9,0	-9,1	-9,2	-9,3	-9,4	-9,5	-9,6	-9,7	-9,8	-9,9	-10,0	-10,1	-10,2	-10,3	-10,4	-10,5	-10,6	-10,7	-10,8	-10,9	-11,0	-11,1	-11,2	-11,3	-11,4	-11,5	-11,6	-11,7	-11,8	-11,9	-12,0	-12,1	-12,2	-12,3	-12,4	-12,5	-12,6	-12,7	-12,8	-12,9	-13,0	-13,1	-13,2	-13,3	-13,4	-13,5	-13,6	-13,7	-13,8	-13,9	-14,0	-14,1	-14,2	-14,3	-14,4	-14,5	-14,6	-14,7	-14,8	-14,9	-15,0	-15,1	-15,2	-15,3	-15,4	-15,5	-15,6	-15,7	-15,8	-15,9	-16,0	-16,1	-16,2	-16,3	-16,4	-16,5	-16,6	-16,7	-16,8	-16,9	-17,0	-17,1	-17,2	-17,3	-17,4	-17,5	-17,6	-17,7	-17,8	-17,9	-18,0	-18,1	-18,2	-18,3	-18,4	-18,5	-18,6	-18,7	-18,8	-18,9	-19,0	-19,1	-19,2	-19,3	-19,4	-19,5	-19,6	-19,7	-19,8	-19,9	-20,0	-20,1	-20,2	-20,3	-20,4	-20,5	-20,6	-20,7	-20,8	-20,9	-21,0	-21,1	-21,2	-21,3	-21,4	-21,5	-21,6	-21,7	-21,8	-21,9	-22,0	-22,1	-22,2	-22,3	-22,4	-22,5	-22,6	-22,7	-22,8	-22,9	-23,0	-23,1	-23,2	-23,3	-23,4	-23,5	-23,6	-23,7	-23,8	-23,9	-24,0	-24,1	-24,2	-24,3	-24,4	-24,5	-24,6	-24,7	-24,8	-24,9	-25,0	-25,1	-25,2	-25,3	-25,4	-25,5	-25,6	-25,7	-25,8	-25,9	-26,0	-26,1	-26,2	-26,3	-26,4	-26,5	-26,6	-26,7	-26,8	-26,9	-27,0	-27,1	-27,2	-27,3	-27,4	-27,5	-27,6	-27,7	-27,8	-27,9	-28,0	-28,1	-28,2	-28,3	-28,4	-28,5	-28,6	-28,7	-28,8	-28,9	-29,0	-29,1	-29,2	-29,3	-29,4	-29,5	-29,6	-29,7	-29,8	-29,9	-30,0	-30,1	-30,2	-30,3	-30,4	-30,5	-30,6	-30,7	-30,8	-30,9	-31,0	-31,1	-31,2	-31,3	-31,4	-31,5	-31,6	-31,7	-31,8	-31,9	-32,0	-32,1	-32,2	-32,3	-32,4	-32,5	-32,6	-32,7	-32,8	-32,9	-33,0	-33,1	-33,2	-33,3	-33,4	-33,5	-33,6	-33,7	-33,8	-33,9	-34,0	-34,1	-34,2	-34,3	-34,4	-34,5	-34,6	-34,7	-34,8	-34,9	-35,0	-35,1	-35,2	-35,3	-35,4	-35,5	-35,6	-35,7	-35,8	-35,9	-36,0	-36,1	-36,2	-36,3	-36,4	-36,5	-36,6	-36,7	-36,8	-36,9	-37,0	-37,1	-37,2	-37,3	-37,4	-37,5	-37,6	-37,7	-37,8	-37,9	-38,0	-38,1	-38,2	-38,3	-38,4	-38,5	-38,6	-38,7	-38,8	-38,9	-39,0	-39,1	-39,2	-39,3	-39,4	-39,5	-39,6	-39,7	-39,8	-39,9	-40,0	-40,1	-40,2	-40,3	-40,4	-40,5	-40,6	-40,7	-40,8	-40,9	-41,0	-41,1	-41,2	-41,3	-41,4	-41,5	-41,6	-41,7	-41,8	-41,9	-42,0	-42,1	-42,2	-42,3	-42,4	-42,5	-42,6	-42,7	-42,8	-42,9	-43,0	-43,1	-43,2	-43,3	-43,4	-43,5	-43,6	-43,7	-43,8	-43,9	-44,0	-44,1	-44,2	-44,3	-44,4	-44,5	-44,6	-44,7	-44,8	-44,9	-45,0	-45,1	-45,2	-45,3	-45,4	-45,5	-45,6	-45,7	-45,8	-45,9	-46,0	-46,1	-46,2	-46,3	-46,4	-46,5	-46,6	-46,7	-46,8	-46,9	-47,0	-47,1	-47,2	-47,3	-47,4	-47,5	-47,6	-47,7	-47,8	-47,9	-48,0	-48,1	-48,2	-48,3	-48,4	-48,5	-48,6	-48,7	-48,8	-48,9	-49,0	-49,1	-49,2	-49,3	-49,4	-49,5	-49,6	-49,7	-49,8	-49,9	-50,0	-50,1	-50,2	-50,3	-50,4	-50,5	-50,6	-50,7	-50,8	-50,9	-51,0	-51,1	-51,2	-51,3	-51,4	-51,5	-51,6	-51,7	-51,8	-51,9	-52,0	-52,1	-52,2	-52,3	-52,4	-52,5	-52,6	-52,7	-52,8	-52,9	-53,0	-53,1	-53,2	-53,3	-53,4	-53,5	-53,6	-53,7	-53,8	-53,9	-54,0	-54,1	-54,2	-54,3	-54,4	-54,5	-54,6	-54,7	-54,8	-54,9	-55,0	-55,1	-55,2	-55,3	-55,4	-55,5	-55,6	-55,7	-55,8	-55,9	-56,0	-56,1	-56,2	-56,3	-56,4	-56,5	-56,6	-56,7	-56,8	-56,9	-57,0	-57,1	-57,2	-57,3	-57,4	-57,5	-57,6	-57,7	-57,8	-57,9	-58,0	-58,1	-58,2	-58,3	-58,4	-58,5	-58,6	-58,7	-58,8	-58,9	-59,0	-59,1	-59,2	-59,3	-59,4	-59,5	-59,6	-59,7	-59,8	-59,9	-60,0	-60,1	-60,2	-60,3	-60,4	-60,5	-60,6	-60,7	-60,8	-60,9	-61,0	-61,1	-61,2	-61,3	-61,4	-61,5	-61,6	-61,7	-61,8	-61,9	-62,0	-62,1	-62,2	-62,3	-62,4	-62,5	-62,6	-62,7	-62,8	-62,9	-63,0	-63,1	-63,2	-63,3	-63,4	-63,5	-63,6	-63,7	-63,8	-63,9	-64,0	-64,1	-64,2	-64,3	-64,4	-64,5	-64,6	-64,7	-64,8	-64,9	-65,0	-65,1	-65,2	-65,3	-65,4	-65,5	-65,6	-65,7	-65,8	-65,9	-66,0	-66,1	-66,2	-66,3	-66,4	-66,5	-66,6	-66,7	-66,8	-66,9	-67,0	-67,1	-67,2	-67,3	-67,4	-67,5	-67,6	-67,7	-67,8	-67,9	-68,0	-68,1	-68,2	-68,3	-68,4	-68,5	-68,6	-68,7	-68,8	-68,9	-69,0	-69,1	-69,2	-69,3	-69,4	-69,5	-69,6	-69,7	-69,8	-69,9	-70,0	-70,1	-70,2	-70,3	-70,4	-70,5	-70,6	-70,7	-70,8	-70,9	-71,0	-71,1	-71,2	-71,3	-71,4	-71,5	-71,6	-71,7	-71,8	-71,9	-72,0	-72,1	-72,2	-72,3	-72,4	-72,5	-72,6	-72,7	-72,8	-72,9	-73,0	-73,1	-73,2	-73,3	-73,4	-73,5	-73,6	-73,7	-73,8	-73,9	-74,0	-74,1	-74,2	-74,3	-74,4	-74,5	-74,6	-74,7	-74,8	-74,9	-75,0	-75,1	-75,2	-75,3	-75,4	-75,5	-75,6	-75,7	-75,8	-75,9	-76,0	-76,1	-76,2	-76,3	-76,4	-76,5	-76,6	-76,7	-76,8	-76,9	-77,0	-77,1	-77,2	-77,3	-77,4	-77,5	-77,6	-77,7	-77,8	-77,9	-78,0	-78,1	-78,2	-78,3	-78,4	-78,5	-78,6	-78,7	-78,8	-78,9	-79,0	-79,1	-79,2	-79,3	-79,4	-79,5	-79,6	-79,7	-79,8	-79,9	-80,0	-80,1	-80,2	-80,3	-80,4	-80,5	-80,6	-80,7	-80,8	-80,9	-81,0	-81,1	-81,2	-81,3	-81,4	-81,5	-81,6	-81,7	-81,8	-81,9	-82,0	-82,1	-82,2	-82,3	-82,4	-82,5	-82,6	-82,7	-82,8	-82,9	-83,0	-83,1	-83,2	-83,3	-83,4	-83,5	-83,6	-83,7	-83,8	-83,9	-84,0	-84,1	-84,2	-84,3	-84,4	-84,5	-84,6	-84,7	-84,8	-84,9	-85,0	-85,1	-85,2	-85,3	-85,4	-85,5	-85,6	-85,7	-85,8	-85,9	-86,0	-86,1	-86,2	-86,3	-86,4	-86,5	-86,6	-86,7	-86,8	-86,9	-87,0	-87,1	-87,2	-87,3	-87,4	-87,5	-87,6	-87,7	-87,8	-87,9	-88,0	-88,1	-88,2	-88,3	-88,4	-88,5	-88,6	-88,7	-88,8	-88,9	-89,0	-89,1	-89,2	-89,3	-89,4	-89,5	-89,6	-89,7	-89,8	-89,9	-90,0	-90,1	-90,2	-90,3	-90,4	-90,5	-90,6	-90,7	-90,8	-90,9	-91,0	-91,1	-91,2	-91,3	-91,4	-91,5	-91,6	-91,7	-91,8	-91,9	-92,0	-92,1	-92,2	-92,3	-92,4	-92,5	-92,6	-92,7	-92,8	-92,9	-93,0	-93,1	-93,2	-93,3	-93,4	-93,5	-93,6	-93,7	-93,8	-93,9	-94,0	-94,1	-94,2	-94,3	-94,4	-94,5	-94,6	-94,7	-94,8	-94,9	-95,0	-95,1	-95,2	-95,3	-95,4	-95,5	-95,6	-95,7	-95,8	-95,9	-96,0	-96,1	-96,2	-96,3	-96,4	-96,5	-96,6	-96,7	-96,8	-96,9	-97,0	-97,1	-97,2	-97,3	-97,4	-97,5	-97,6	-97,7	-97,8	-97,9	-98,0	-98,1	-98,2	-98,3	-98,4	-98,5	-98,6	-98,7	-98,8	-98,9	-99,0	-99,1	-99,2	-99,3	-99,4	-99,5	-99,6	-99,7	-99,8	-99,9	-100,0	-100,1	-100,2	-100,3	-100,4	-100,5	-100,6	-100,7	-100,8	-100,9	-101,0	-101,1	-101,2	-101,3	-101,4	-101,5	-101,6	-101,7	-101,8	-101,9	-102,0	-102,1	-102,2	-102,3	-102,4	-102,5	-102,6	-102,7	-102,8	-102,9	-103,0	-103,1	-103,2	-103,3	-103,4	-103,5	-103,6	-103,7	-103,8	-103,9	-104,0	-104,1	-104,2	-104,3	-104,4	-104,5	-104,6	-104,7	-104,8	-104,9	-105,0	-105,1	-105,2	-105,3	-105,4	-105,5	-105,6	-105,7	-105,8	-105,9	-106,0	-106,1	-106,2	-106,3	-106,4	-106,5	-106,6	-106,7	-106,8	-106,9	-107,0	-107,1	-107,2	-107,3	-107,4	-107,5	-107,6	-107,7	-107,8	-107,9	-108,0	-108,1	-108,2	-108,3	-108,4	-108,5	-108,6	-108,7	-108,8	-108,9	-109,0	-109,1	-109,2	-109,3	-109,4	-109,5	-109,6	-109,7	-109,8	-109,9	-110,0	-110,1	-110,2	-110,3	-110,4	-110,5	-110,6	-110,7	-110,8	-110,9	-111,0	-111,1	-111,2	-111,3	-111,4	-111,5	-111,6	-111,7	-111,8	-111,9	-112,0	-112,1	-112,2	-112,3	-112,4	-112,5	-112,6	-112,7	-112,8	-112,9	-113,0	-113,1	-113,2	-113,3	-113,4	-113,5	-113,6	-113,7	-113,8	-113,9	-114,0	-114,1	-114,2	-114,3	-114,4	-114,5	-114,6	-114,7	-114,8	-114,9	-115,0	-115,1	-115,2	-115,3	-115,4	-115,5	-115,6	-115,7	-115,8	-115,9	-116,0	-116,1	-116,2	-116,3	-116,4	-116,5	-116,6	-116,7	-116,8	-116,9	-117,0	-117,1	-117,2	-117,3	-117,4	-117,5	-117,6	-117,7	-117,8	-117,9	-118,0	-118,1	-118,2	-118,3	-118,4	-118,5	-118,6	-118,7	-118,8	-118,9	-119,0	-119,1	-119,2	-119,3	-119,4	-119,5	-119,6	-119,7	-119,8	-119,9	-120,0	-120,1	-120,2	-120,3	-120,4	-120,5	-120,6	-120,7	-120,8	-120,9	-121,0	-121,1	-121,2	-121,3	-121,4	-121,5	-121,6
------	------	------	------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------







## EFFETTO DELLE TEMPERATURE ELEVATE SULLE PROPRIETÀ MECCANICHE

La ghisa grigia, allo stesso modo degli altri metalli e leghe, diventa più debole alle temperature elevate o, nella maggioranza dei casi, presenta una perdita permanente della resistenza.

Una ghisa ad alta resistenza ed a grana fine subisce in misura minima l'effetto delle alte temperature. Tuttavia, per mantenere costante la resistenza, si impiegano elementi di lega e, di preferenza, elementi che, oltre ad un effetto stabilizzante, conferiscono alla ghisa una certa resistenza all'ossidazione.

La fig. 281 illustra l'effetto delle temperature elevate sulla resistenza a trazione della ghisa comune in confronto con altre ghise debolmente legate. I materiali sono stati portati a temperature elevate, ma non mantenuti per un tempo sufficiente per misurare lo scorrimento.

La resistenza alla compressione è influenzata dalle temperature elevate secondo la fig. 282.

La durezza Brinell rimane inalterata fino a circa 723 K (450 °C). Oltre a questa temperatura la caduta di durezza dipende dal tipo di ghisa e dalla presenza di elementi stabilizzatori, come risulta dalla fig. 283.

Il limite di fatica non presenta una apprezzabile diminuzione fino alla temperatura di 723 K (450 °C).

Le buone caratteristiche di resistenza all'usura alle varie temperature della ghisa grigia sono alla base del suo

diffuso impiego nell'industria motoristica.

Con adeguate aggiunte di elementi di lega si possono ottenere rilevanti resistenze all'usura alle elevate temperature.

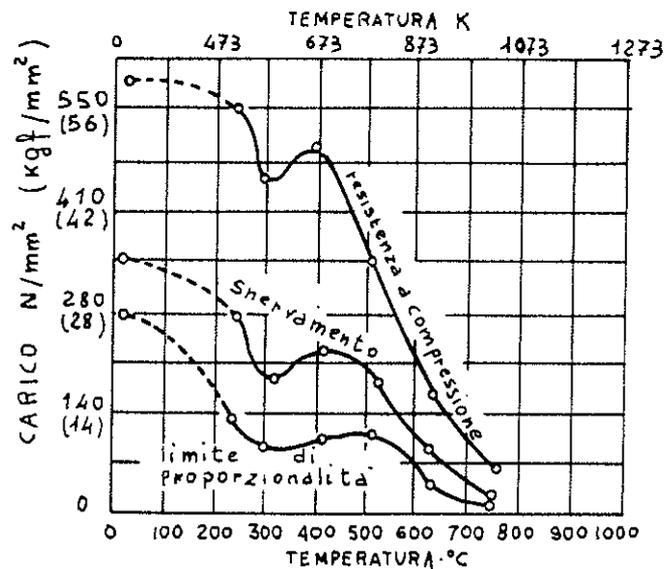


Fig. 282 - Resistenza a compressione delle ghise a temperature elevate.

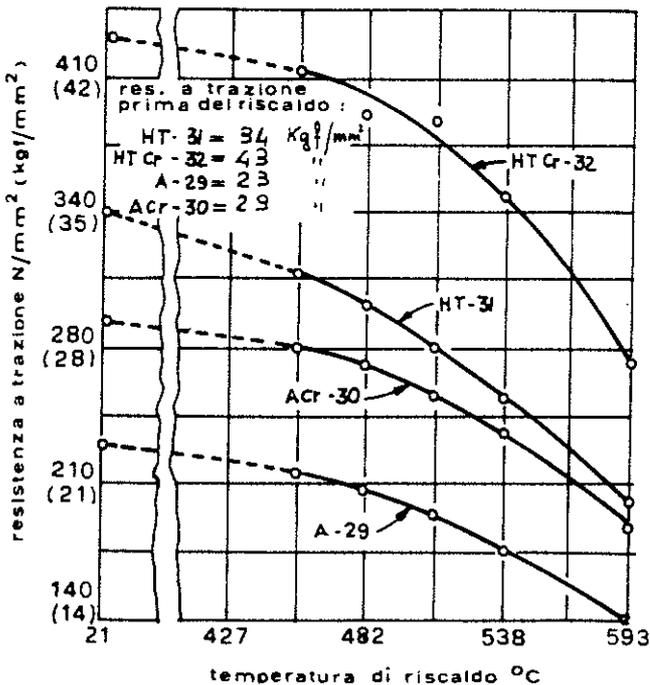


Fig. 281 - Resistenza delle ghise a temperature elevate.

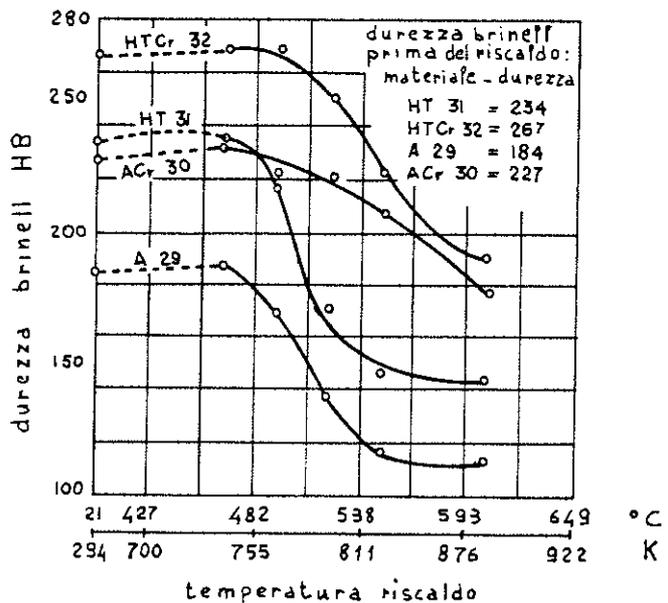


Fig. 283 - Effetto della temperatura di riscaldamento sulla durezza Brinell della ghisa.

## RIGONFIAMENTO DELLA GHISA GRIGIA

Per rigonfiamento della ghisa si intende la tendenza, nel caso di riscaldamento a temperature elevate (specialmente nel caso di riscaldi e raffreddamenti alternati) ad un aumento di volume irreversibile.

Questa tendenza è propria anche di altri materiali metallici.

Per la ghisa grigia comune la variazione di volume raggiunge con il tempo, a partire dalla temperatura di  $573 \div 673$  K ( $300 \div 400$  °C), valori non compatibili con la sicurezza di esercizio del getto.

Si conoscono parecchie cause di questo aumento di vo-

lume della ghisa e si può prevedere, per ogni intervallo di temperatura, il tipo di ghisa adatto, legato o non legato.

I fattori, considerati come cause o come concorrenti al fenomeno di rigonfiamento, sono:

- Grafitizzazione e decomposizione dei carburi.
- Ossidazione e corrosione.
- Trasformazioni allotropiche con espansione e contrazione.
- Gradienti termici.
- Pressione dei gas occlusi.

## INFLUENZA DELLA COMPOSIZIONE CHIMICA E DELLA STRUTTURA

### Carbonio

Con l'aumentare del carbonio diminuisce la temperatura di inizio di decomposizione dei carburi.

### Silicio

Nelle percentuali, che normalmente si trovano presenti nella ghisa, il silicio aumenta la grafitizzazione e, quindi, il rigonfiamento. In totale la crescente somma C + Si ha per effetto la diminuzione della stabilità di volume della ghisa.

Invece le ghise ad alto silicio ( $6 \div 8\%$ ) sono particolarmente resistenti al rigonfiamento per i seguenti motivi:

- La matrice totalmente ferritica non presenta il fenomeno della decomposizione dei carburi.
- L'elevata percentuale di silicio aumenta la temperatura di trasformazione  $\alpha \rightarrow \gamma$  al di sopra del campo di impiego e così si evitano le strutture aperte e la conseguente ossidazione interna e le variazioni di volume.
- La grafite presente è del tipo fine di sopraffusione.
- La matrice metallica è compatta da un punto di vista meccanico.

Queste ghise resistenti al rigonfiamento sono più sensibili ai riscaldi ed ai raffreddamenti alternati.

### Cromo

A causa della sua capacità di ottenere la stabilizzazione dei carburi, il cromo è l'elemento più efficace per ritardare il rigonfiamento della ghisa e diminuire la perdita di resistenza alle elevate temperature di esercizio.

Tenori di cromo di  $0,2 \div 0,4\%$  impediscono il rigonfiamento della ghisa grigia alle temperature fino a 873 K (600 °C).

In generale l'1,5% di cromo ritarda convenientemente le variazioni di volume fino a 1.123 K (850 °C).

### Fosforo

Alcuni autori hanno dimostrato che l'eutettico fosforoso

(steadite), quando è presente come un reticolo continuo, impedisce la penetrazione dei gas ossidanti ed in questo modo aumenta la resistenza al rigonfiamento della ghisa a temperature moderatamente elevate.

### Molibdeno

Il molibdeno è un leggero stabilizzatore dei carburi e, quindi, tende a diminuire il rigonfiamento.

### Altri elementi

In generale gli elementi di lega, che favoriscono la decomposizione dei carburi, agiscono nel senso di aumentare il rigonfiamento delle ghise e, viceversa, tutti gli elementi stabilizzatori dei carburi diminuiscono il rigonfiamento.

Certi elementi sono usati da soli od in combinazione. Si deve notare che il comportamento dei getti di ghisa grigia in vapore surriscaldato è notevolmente peggiore degli stessi getti in altre condizioni di esercizio ad alte temperature.

### Conclusioni

Riassumendo, nel fenomeno dell'aumento di volume della ghisa grigia si può dire che:

- Una notevole parte dell'aumento di volume è da attribuire alla decomposizione della cementite libera e della cementite della perlite.
- Un'altra parte notevole dell'aumento di volume è da attribuire ai processi di ossidazione che avvengono lungo le lamelle di grafite. Queste, quando sono corte e tozze, provocano un aumento di volume maggiore di quando sono piccole e sottili.
- Altra causa del rigonfiamento della ghisa è l'allentamento della struttura a causa delle tensioni. Queste traggono origine dai differenti coefficienti di dilatazione del ferro, della grafite e delle impurezze non metalliche. Dopo che si è verificato un certo allentamento della struttura, si ha un forte rigonfiamento

dovuto ad un crescente processo di ossidazione. Si deve tenere presente che ferro e silicio si ossidano prima del carbonio.

— I gas presenti intorno al getto ed i gas incorporati nella ghisa hanno un ruolo molto modesto da un punto di vista puramente meccanico nel processo di rigonfiamento, ma possono esercitare un'azione catalitica sulla decomposizione dei carburi.

Se i gas sono ossidanti, agiscono alla stessa maniera dell'atmosfera normale. In atmosfera neutra o sotto

vuoto, escludendo forti oscillazioni di temperatura, il rigonfiamento si blocca.

— Un peso specifico elevato della ghisa (poca grafite presente) favorisce la stabilità di volume, opponendosi alla decomposizione dei carburi ed all'entrata dei gas nell'interno dei getti di ghisa.

— Una grafite fine e di tipo flocculare impedisce lo scambio di gas tra getto ed atmosfera e, quindi, il rigonfiamento. Questo tipo di grafite è anche il più adatto dal punto di vista della formazione delle tensioni meccaniche.

## PRODUZIONE DI GHISE STABILI DI VOLUME

Sulla base delle conoscenze attuali i punti principali da tenere presenti nella produzione di ghise stabili di volume sono la stabilizzazione dei carburi e la forma adeguata della grafite.

Queste due condizioni si possono realizzare adottando un basso tenore di carbonio, ma specialmente un basso tenore di silicio, per cui si ottiene una conveniente forma

della grafite ed una elevata densità, e facendo adeguate aggiunte di cromo.

Un'altra possibilità di impedire il rigonfiamento della ghisa è rappresentata dall'applicazione di trattamenti superficiali. Anche l'applicazione di rivestimenti impermeabili ai gas ed aventi lo stesso coefficiente di dilatazione della ghisa è utile per lo stesso scopo.

## RESISTENZA AL CALORE ED AL FUOCO

La rottura di un getto in servizio a temperature elevate può avvenire per ossidazione (scagliatura), rigonfiamento e cedimento meccanico.

L'ossidazione è determinata dall'atmosfera che attacca la superficie del getto e lo distrugge progressivamente.

L'ossidazione può essere ridotta al minimo con l'aggiunta alla ghisa di elementi di lega.

È normale valutare la resistenza al calore della ghisa in base alla sua resistenza quando è esposta all'atmosfera normale, ad una determinata temperatura e per un dato tempo.

È importante ricordare che in pochi casi nella realtà si incontrano queste condizioni di impiego.

I risultati possono essere notevolmente modificati, per esempio, dalla presenza di zolfo e di gas riducenti, dalle condizioni esistenti nella fase di riscaldamento, permanenza in temperatura e raffreddamento, come condensazione di umidità, presenza di ceneri, scorie, fondenti e così via.

Generalmente il fenomeno d'ossidazione non diventa importante fino a quando la temperatura non raggiunge  $873 \div 973$  K ( $600 \div 700$  °C). Oltre  $1.023$  K ( $750$  °C) le ghise non legate sono attaccate rapidamente con velocità crescente.

I tre principali elementi di lega impiegati in questo campo di temperature sono il silicio, il cromo e l'alluminio.

Una certa resistenza all'ossidazione al di sopra dei  $1.023$  K ( $750$  °C) è data da tenori di silicio superiori al

3%, da tenori di cromo superiori all'1% e da tenori di alluminio al di sopra dello 0,9%.

Considerando unicamente il fenomeno dell'ossidazione, un tenore di cromo inferiore all'1,5% ha un significato limitato; il silicio compreso fra il 3,8% ed il 6,5% consente importanti miglioramenti e l'alluminio tra l'1% ed il 7% presenta sostanziali vantaggi, purché siano state superate le difficoltà di fonderia per la produzione di getti.

Si è già considerato il fenomeno del rigonfiamento. Il cedimento meccanico può essere causato da shock termico dovuto a rigonfiamento differenziale o da una completa incapacità di sopportare il carico applicato.

Le possibilità di rottura per shock termico possono essere ridotte mediante l'impiego di un elevato tenore di carbonio che rappresenta un *cuscinetto* di fronte alle improvvise sollecitazioni applicate od impiegando ghise con costituenti duttili come ferrite ed austenite, a seconda del campo delle temperature.

Le rotture per distorsione possono essere evitate, impiegando ghise che presentano un basso rigonfiamento.

Fratture puramente meccaniche possono essere parimenti evitate, conoscendo esattamente le sollecitazioni che il materiale in questione deve sopportare per un dato periodo di tempo e ad una determinata temperatura.

Una indicazione su queste condizioni è data dalla resistenza allo scorrimento.

## MECCANISMO DI OSSIDAZIONE DELLA GHISA ED ADERENZA DELLO STRATO DI OSSIDO

Fondamentalmente, nel corso dell'ossidazione dei metalli si verificano le seguenti reazioni:

- L'ossigeno entra a fare parte della pelle di ossido e questo è possibile soltanto se la sua pressione parziale è più elevata della pressione di dissociazione dell'ossido.
- Il metallo entra nello strato di ossido.
- Nello strato di ossido i movimenti degli elementi avvengono per diffusione.

Per la maggior parte dei metalli, compreso il ferro, la velocità di formazione dello strato di ossido dipende dalla velocità delle reazioni sopra citate ed è proporzionale alla radice quadrata del tempo e cioè:

$$m = K \sqrt{t}$$

dove  $m$  è la quantità di ossido che si forma nell'unità di tempo.

Nella fig. 284 è rappresentato l'andamento della funzione dello strato di ossido nella ghisa in confronto con l'acciaio e la nota resistenza della ghisa all'ossidazione sempre in confronto con l'acciaio.

Alle maggiori temperature la matrice della ghisa si impoverisce sempre più velocemente degli elementi accompagnatori del ferro, i quali entrano nello strato di ossido. Avvicinandosi alla composizione dell'acciaio, la

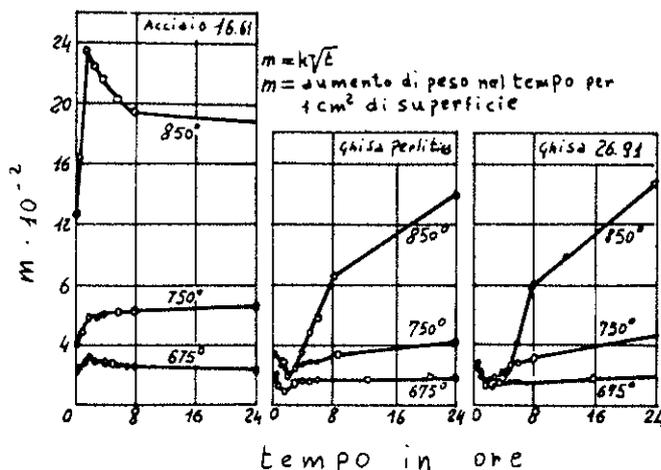


Fig. 284 - Formazione dello strato di ossido sulla ghisa in confronto con l'acciaio.

ghisa presenta un comportamento all'ossidazione simile al medesimo.

La buona resistenza all'ossidazione della ghisa è anche da attribuire al tipo ed all'aderenza dello strato di ossido. L'aderenza di questo strato ha anche un ruolo importante nella resistenza all'arrugginimento.

## SCORRIMENTO VISCOSO

Le ghise, come ogni altro materiale metallico, quando sono sottoposte ad una tensione inferiore al limite di snervamento, si deformano elasticamente in proporzione al valore della tensione applicata. Quando, però, tale tensione è mantenuta per un tempo lungo, si verifica una deformazione plastica conseguente ad uno scorrimento di tipo viscoso del materiale. Tale fenomeno, meglio noto con il nome di *creep*, non ha niente a che vedere con variazioni dimensionali, conseguenti a modificazioni di struttura determinata, ad esempio, dalla temperatura.

Il fenomeno di *creep* è per la ghisa praticamente trascurabile a temperatura ambiente nelle normali condizioni di carico; solo con carichi molto alti si possono avere deformazioni plastiche.

A temperature elevate il *creep* assume, invece, valori apprezzabili.

La prova di scorrimento a caldo è normalizzata nella Norma UNI 5111. Per questi saggi, che possono essere anche effettuati per compressione, vengono distinti due casi in relazione alla temperatura a cui si opera. Il primo, corrispondente a  $T \ll T_f$ , è espresso da una relazione di tipo logaritmica fra la deformazione  $\epsilon$  ed il tempo  $t$  secondo l'equazione:

$$\dot{\epsilon} = \epsilon_0 + a \log(\beta t + 1)$$

dove  $\epsilon_0$  rappresenta la deformazione plastica ottenibile dalla curva carico-deformazione.

La velocità di scorrimento  $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$  decresce in questo caso costantemente nel tempo.

Il secondo caso si riferisce a  $T > 0,3 \div 0,4 T_f$ . La funzione  $\epsilon(t)$ , il cui andamento è indicato in fig. 285, può essere rappresentata dalla seguente equazione:

$$\epsilon = \beta t \frac{1}{3} + Kt$$

Da un esame della curva di fig. 285 si possono individuare 3 stadi che riguardano lo scorrimento viscoso:

- I  $\dot{\epsilon}$  decresce nel tempo (scorrimento transitorio).
- II  $\dot{\epsilon}$  rimane stazionaria (scorrimento stazionario).
- III  $\dot{\epsilon}$  cresce nel tempo fino a rottura del materiale.

In un certo intervallo di temperatura la velocità di flusso stazionario segue una legge di Arrhenius:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \exp(-Q_a/RT)$$

dove  $Q_a$  rappresenta l'energia di attivazione apparente.

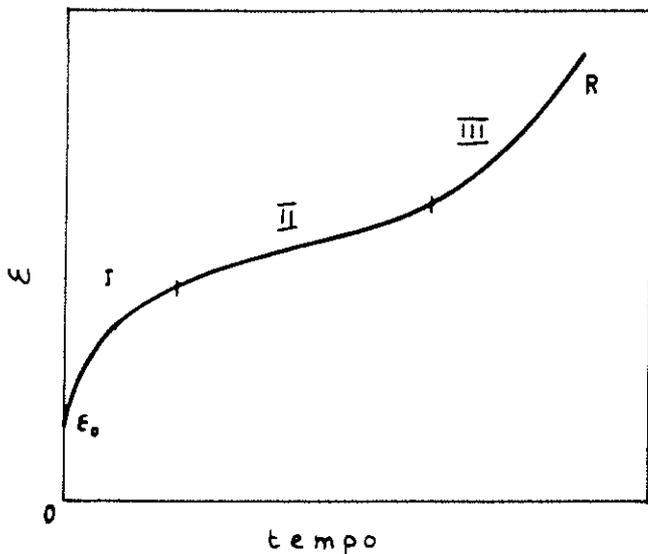


Fig. 285 - Andamento di  $\epsilon(t)$ .

Questo fatto fa considerare che la deformazione plastica nel corso della prova sia un processo attivato termicamente.

In altre parole, lo slittamento delle dislocazioni non è possibile se non nel caso in cui le barriere che esse incontrano sono superate non per un accrescimento di carico, ma per l'energia fornita dall'agitazione termica.

Esistono alcuni metodi di misura dell'energia di attivazione apparente, tuttavia occorre ricordare che  $Q_a$ , nel caso in cui siano fatte misure a varie temperature, risulta una funzione di  $T$ , come indica la fig. 286.

Generalmente, l'energia di attivazione apparente cresce presentando una o più soglie, fatto che induce a pensare che in ognuno di questi intervalli di temperatura lo scorrimento sia determinato da un solo processo che richiede una energia di attivazione  $Q = Q_a$ .

Nel caso di metalli puri una soglia è ben definita quando l'energia di attivazione apparente è uguale all'energia di attivazione per autodiffusione, come risulta in fig. 287.

È evidente, dunque, il controllo del processo di autodiffusione nel fenomeno di *creep*, nel caso dei metalli puri.

Lo scorrimento viscoso alla temperatura, che si sta considerando, prende anche il nome di scorrimento di restaurazione.

Questo nome deriva dal fatto che sono in gioco due processi simultaneamente nel corso dello scorrimento: l'accrescimento e la restaurazione.

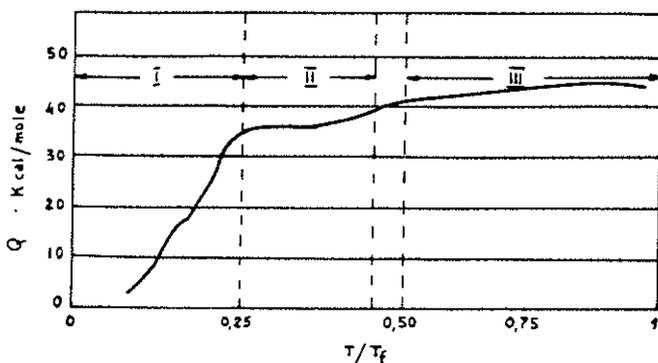


Fig. 286 - Misura dell'energia di attivazione apparente.

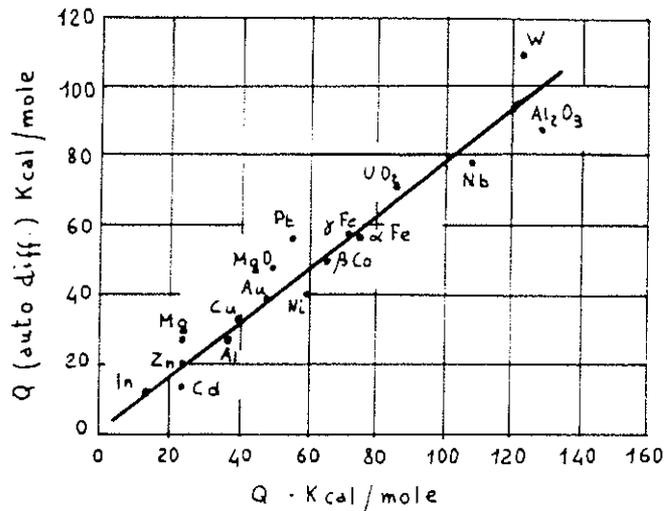


Fig. 287 - Misura dell'energia di attivazione apparente ed energia di attivazione per autodiffusione.

Esaminando ancora la fig. 285, nel tratto I in cui si verifica una diminuzione di  $\dot{\epsilon}$  nel tempo, prevale il primo processo cioè l'accrescimento.

Accrescimento e restaurazione arrivano a bilanciarsi nel II tratto di curva in cui  $\dot{\epsilon}$  resta costante, fatto questo che permette il proseguire della deformazione.

Il meccanismo è molto probabilmente dovuto all'annichilazione delle dislocazioni di segno opposto, che può avvenire in seguito all'aumento di queste.

Lo slittamento delle dislocazioni, che è all'origine della deformazione macroscopica, è dunque regolato dall'aumento delle stesse. È importante osservare che la resistenza allo scorrimento di un metallo puro può essere migliorata aggiungendo degli elementi di lega che entrano in soluzione o formano dei precipitati.

I fattori principali, che intervengono nel processo di *creep*, sono la composizione chimica, l'accrescimento, i trattamenti termici, la dimensione dei grani.

Nelle figg. 288-289 si riportano le curve di *creep* di due ghise grigie ottenute da K. B. Palmer. Le composizioni e le proprietà meccaniche a 293 K (20 °C) ed a 623 K (350 °C) sono riportate nella tab. L.

Esaminando i diagrammi delle figg. 288-289, si nota come quello riferito al campione I di ghisa presenti una velocità di scorrimento è costante per un rilevante numero di ore prima della rottura per un carico di 165,8 N/mm<sup>2</sup> (16,9 kg/mm<sup>2</sup>).

Questo campione corrisponde ad una ghisa grigia contenente Ni e Cr come elementi di lega.

Il campione II di ghisa in cui sono assenti Ni e Cr, alla stessa temperatura ed allo stesso carico, si rompe a trazione dopo un numero di ore molto inferiore al primo e si nota che durante la prova la velocità di scorrimento decresce progressivamente.

Le stesse considerazioni sono valide comparando le prove eseguite sui due campioni sotto carichi diversi in ordine decrescente, benché si assista ad un appiattimento delle differenze di comportamento.

Si può, quindi, notare come la velocità di scorrimento determini il valore dell'allungamento e come la presenza di elementi di lega favorisca la costanza di  $\dot{\epsilon}$  nel tempo.

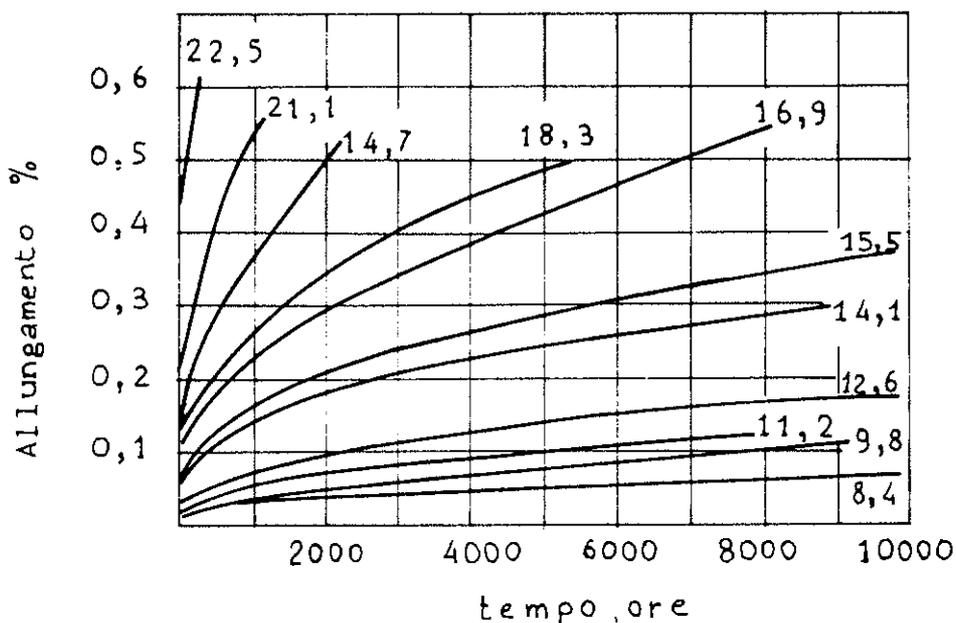


Fig. 288 - Curva di « creep » a 623 K (350 °C) della ghisa I di tab. L.

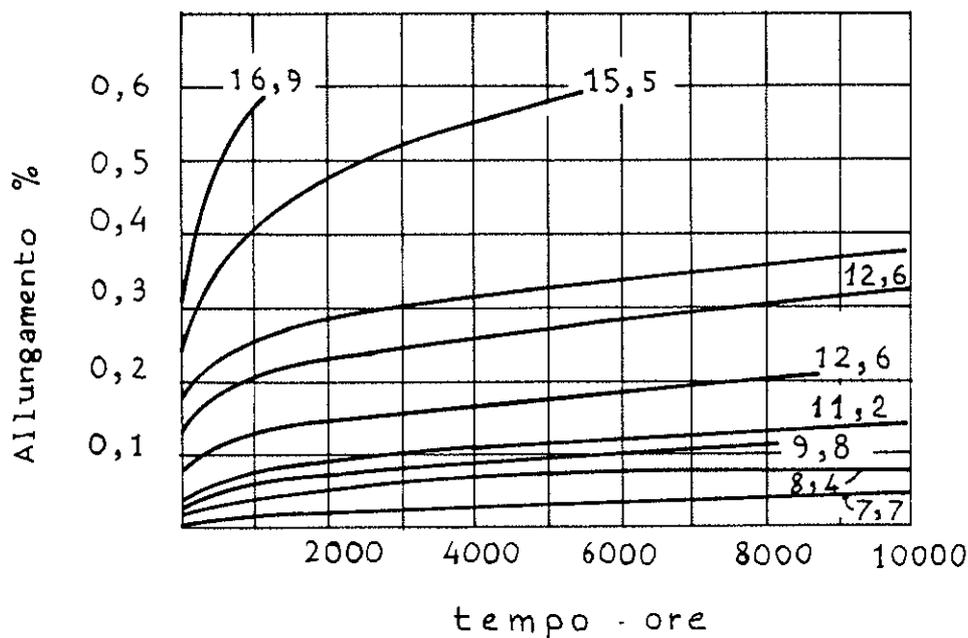


Fig. 289 - Curva di « creep » a 623 K (350 °C) della ghisa II di tab. L.

Tabella L - Composizioni e proprietà meccaniche delle ghise grigie (K. B. Palmer).

Descrizione	Ghisa I	Ghisa II
C	3,19%	3,26%
Si	1,85%	2,24%
Mn	0,41%	0,56%
S	0,092%	0,108%
P	0,12%	0,49%
Ni	1,31%	—
Cr	0,33%	—
Durezza HB	228	215
Carico di rottura a 293 K (20 °C) $\sigma$ N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	275,7 (28,1)	207,0 (21,1)
Carico di rottura a 623 K (350 °C) $\sigma$ N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	283,5 (28,9)	218,8 (22,3)
Allungamento a 293 K (20 °C)	0,54%	0,59%
Totale carico alla rottura a 623 K (350 °C) in N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	10,98 (1,12)	11,77 (1,20)

Tabella L11 - Risultati delle ricerche compiute da H. Kaplanke.

Cim. prove	Analisi chimica %					Struttura			Resistenza a freddo a 289°K (16° C.) e durezza Brinell				Note	
	C	Si	Mn	S	P	Gratie		Temperatura di prova K (°C)	R 10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> (10 <sup>3</sup> kgf/mm <sup>2</sup> )	Temperatura di prova K (°C)	Resistenza			Durezza Brinell a 289°K (16° C.)
						Tipo	u				A	B		
1 R	3.2	1.9	0.7	0.03	0.02	A	130/200	Perlite + tracce di ferrite	289 (-16)	26.0 (2.65)	289 (-16)	1.13 (0.113)	211	Inoculata con 0.5% Si
	268 (-5)	26.4 (2.69)	272 (-1)	1.1 (0.11)	197									
	254 (-19)	26.8 (2.73)	255 (-18)	0.93 (0.093)	197									
	250 (-23)	28.0 (2.85)	224 (-49)	1.08 (0.108)	197									
	231 (-42)	28.0 (2.85)	219 (-54)	0.98 (0.098)	192									
	207 (-66)	28.2 (2.87)	201 (-72)	0.83 (0.083)	201									
	190 (-83)	28.2 (2.85)	173 (-100)	0.73 (0.073)	201									
	180 (-93)	28.6 (2.91)	159 (-114)	0.77 (0.077)	201									
	182 (-111)	29.0 (2.95)												
	2 R	3.08	1.8	0.47	0.032				0.03	D	Perlite + tracce di ferrite	289 (-16)	0.94 (0.094)	
270 (-3)	0.83 (0.083)	270 (-3)	0.83 (0.083)	211										
232 (-21)	0.82 (0.082)	232 (-21)	0.82 (0.082)	211										
230 (-43)	0.83 (0.083)	230 (-43)	0.83 (0.083)	229										
214 (-59)	0.77 (0.077)	214 (-59)	0.77 (0.077)	225										
198 (-75)	0.77 (0.077)	198 (-75)	0.77 (0.077)	212										
169 (-104)	0.78 (0.078)	169 (-104)	0.78 (0.078)	217										
132 (-111)	0.57 (0.057)	132 (-111)	0.57 (0.057)	223										
289 (+16)	0.884 (0.0884)	289 (+16)	0.884 (0.0884)	217										
271 (-2)	0.775 (0.0775)	271 (-2)	0.775 (0.0775)	212										
3 R	3.19	2.09	0.53	0.034	0.03	A	100/120	Perlite + tracce di ferrite	289 (-16)	0.539 (0.0539)	289 (-16)	0.539 (0.0539)	248	Inoculata con 0.5% Si
	273 (-1)	0.539 (0.0539)	273 (-1)	0.539 (0.0539)	245									
	235 (-20)	0.504 (0.0504)	235 (-20)	0.504 (0.0504)	241									
	233 (-40)	0.463 (0.0463)	233 (-40)	0.463 (0.0463)	241									
	216 (-57)	0.36 (0.036)	216 (-57)	0.36 (0.036)	248									
	194 (-78)	0.436 (0.0436)	194 (-78)	0.436 (0.0436)	241									
	153 (-99)	0.422 (0.0422)	153 (-99)	0.422 (0.0422)	248									
	168 (-105)	0.408 (0.0408)	168 (-105)	0.408 (0.0408)	244									
	289 (-6)	0.539 (0.0539)	289 (-6)	0.539 (0.0539)	248									
	275 (-1)	0.539 (0.0539)	275 (-1)	0.539 (0.0539)	245									
4 R	3.07	2.00	0.9	0.077	0.58	A	120/140	Perlite + steadite	289 (-16)	0.49 (0.049)	289 (-16)	0.49 (0.049)	248	Inoculata con 0.5% Si
	272 (-1)	0.49 (0.049)	272 (-1)	0.49 (0.049)	245									
	235 (-20)	0.41 (0.041)	235 (-20)	0.41 (0.041)	241									
	230 (-45)	0.42 (0.042)	230 (-45)	0.42 (0.042)	241									
	211 (-62)	0.42 (0.042)	211 (-62)	0.42 (0.042)	248									
	197 (-76)	0.44 (0.044)	197 (-76)	0.44 (0.044)	241									
	183 (-90)	0.38 (0.038)	183 (-90)	0.38 (0.038)	248									
	168 (-105)	0.40 (0.040)	168 (-105)	0.40 (0.040)	244									
	289 (+6)	0.49 (0.049)	289 (+6)	0.49 (0.049)	248									
	272 (-1)	0.49 (0.049)	272 (-1)	0.49 (0.049)	245									
5 R	3.12	1.92	0.8	0.067	0.63	A	80/100	Perlite + steadite	289 (-16)	0.586 (0.0586)	289 (-16)	0.586 (0.0586)	248	Inoculata con 0.5% Si
	277 (-3)	0.586 (0.0586)	277 (-3)	0.586 (0.0586)	245									
	241 (-24)	0.504 (0.0504)	241 (-24)	0.504 (0.0504)	241									
	235 (-40)	0.463 (0.0463)	235 (-40)	0.463 (0.0463)	241									
	219 (-54)	0.36 (0.036)	219 (-54)	0.36 (0.036)	248									
	175 (-98)	0.436 (0.0436)	175 (-98)	0.436 (0.0436)	241									
	163 (-110)	0.422 (0.0422)	163 (-110)	0.422 (0.0422)	248									
	289 (-6)	0.539 (0.0539)	289 (-6)	0.539 (0.0539)	248									
	272 (-1)	0.539 (0.0539)	272 (-1)	0.539 (0.0539)	245									
	235 (-20)	0.41 (0.041)	235 (-20)	0.41 (0.041)	241									
6 R	3.18	2.31	0.7	0.14	0.67	A	110	Perlite + steadite	289 (-16)	0.626 (0.0626)	289 (-16)	0.626 (0.0626)	248	Inoculata con 0.5% Si
	267 (-6)	0.586 (0.0586)	267 (-6)	0.586 (0.0586)	245									
	254 (-19)	0.538 (0.0538)	254 (-19)	0.538 (0.0538)	241									
	225 (-48)	0.463 (0.0463)	225 (-48)	0.463 (0.0463)	241									
	210 (-63)	0.503 (0.0503)	210 (-63)	0.503 (0.0503)	248									
	187 (-86)	0.436 (0.0436)	187 (-86)	0.436 (0.0436)	241									
	163 (-110)	0.422 (0.0422)	163 (-110)	0.422 (0.0422)	248									
	148 (-125)	0.431 (0.0431)	148 (-125)	0.431 (0.0431)	244									
	289 (+16)	0.626 (0.0626)	289 (+16)	0.626 (0.0626)	248									
	270 (-3)	0.626 (0.0626)	270 (-3)	0.626 (0.0626)	245									
7 R	3.79	3.06	0.63	0.021	0.04	A	230	Perlite + 30% di ferrite	289 (-16)	0.68 (0.068)	289 (-16)	0.68 (0.068)	248	Inoculata con 0.5% Si
	273 (-1)	0.67 (0.067)	273 (-1)	0.67 (0.067)	245									
	240 (-33)	0.65 (0.065)	240 (-33)	0.65 (0.065)	241									
	213 (-60)	0.66 (0.066)	213 (-60)	0.66 (0.066)	241									
	173 (-100)	0.53 (0.053)	173 (-100)	0.53 (0.053)	248									
	160 (-113)	0.45 (0.045)	160 (-113)	0.45 (0.045)	241									
	153 (-120)	0.42 (0.042)	153 (-120)	0.42 (0.042)	248									
	289 (+16)	0.68 (0.068)	289 (+16)	0.68 (0.068)	248									
	270 (-3)	0.67 (0.067)	270 (-3)	0.67 (0.067)	245									
	240 (-33)	0.65 (0.065)	240 (-33)	0.65 (0.065)	241									



Tabella L11 - Risultati delle ricerche compiute da H. Laplanche

Cam- phone	Analisi chimica %						Struttura		Trazione a freddo		Resistenza a freddo a 289 K (-16 °C) e durezza Brinell			Note			
	C	Si	Mn	S	P	A	Grafite		Matrice	Temperatura di prova K (°C)	R 10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> (10 <sup>3</sup> kgf./mm <sup>2</sup> )	Temperatura di prova K (°C)	Resistenza		Durezza Brinell a 289 K (-16 °C)		
							Tipo	u					A freddo 10 <sup>3</sup> J (10 <sup>3</sup> kgm)			A 289 K (16 °C) 10 <sup>3</sup> J (10 <sup>3</sup> kgm)	
1 R	3,2	1,9	0,7	0,03	0,04	A	150/200		Petlite + tracce di ferrite	289 (+ 16) 268 (- 5) 254 (- 19) 290 (- 23) 231 (- 42) 207 (- 66) 190 (- 83) 180 (- 93) 162 (- 111)	26,0 (2,65) 26,4 (2,69) 26,8 (2,73) 28,0 (2,85) 28,0 (2,85) 28,2 (2,87) 28,0 (2,85) 28,6 (2,91) 29,0 (2,95)	289 (+ 16) 272 (- 1) 252 (- 18) 224 (- 49) 219 (- 54) 201 (- 72) 173 (- 130) 159 (- 114)	1,13 (0,113) 1,1 (0,11) 0,93 (0,093) 1,08 (0,108) 0,98 (0,098) 0,85 (0,085) 0,72 (0,072) 0,77 (0,077)	0,91 (0,091) 0,83 (0,083) 0,82 (0,082) 0,83 (0,083) 0,77 (0,077) 0,77 (0,077) 0,78 (0,078) 0,57 (0,057)	0,91 (0,091) 0,90 (0,090) 0,87 (0,087) 1,00 (0,1) 1,00 (0,1) 0,9 (0,09) 0,92 (0,092) 0,91 (0,091)	217 212 201 229 223 212 217 223	Inoculata con 0,5% Si
2 R	3,08	1,8	0,47	0,032	0,03	D			Petlite + tracce di ferrite	289 (+ 16) 270 (- 3) 252 (- 21) 230 (- 43) 214 (- 59) 198 (- 75) 169 (- 104) 132 (- 141)	289 (+ 16) 270 (- 3) 252 (- 21) 230 (- 43) 214 (- 59) 198 (- 75) 169 (- 104) 132 (- 141)	0,91 (0,091) 0,83 (0,083) 0,82 (0,082) 0,83 (0,083) 0,77 (0,077) 0,77 (0,077) 0,78 (0,078) 0,57 (0,057)	0,91 (0,091) 0,90 (0,090) 0,87 (0,087) 1,00 (0,1) 1,00 (0,1) 0,9 (0,09) 0,92 (0,092) 0,91 (0,091)	217 212 201 229 223 212 217 223	Inoculata con 0,5% Si		
3 R	3,19	2,09	0,53	0,034	0,03	A	100/120		Petlite + tracce di ferrite	289 (+ 16) 271 (- 2) 248 (- 15) 235 (- 38) 209 (- 64) 203 (- 70) 167 (- 106) 164 (- 109)	289 (+ 16) 271 (- 2) 248 (- 15) 235 (- 38) 209 (- 64) 203 (- 70) 167 (- 106) 164 (- 109)	0,884 (0,0884) 0,775 (0,0775) 0,802 (0,0802) 0,790 (0,0790) 0,870 (0,0870) 0,844 (0,0844) 0,700 (0,0700) 0,640 (0,0640)	0,83 (0,083) 0,98 (0,098) 0,94 (0,094) 0,84 (0,084) 0,89 (0,089) 0,87 (0,087) 0,87 (0,087) 0,57 (0,057)	217 212 217 217 223 212 219 223	Inoculata con 0,5% Si		
4 R	3,07	2,00	0,9	0,077	0,58	A	120/140		Petlite + stearite	289 (+ 16) 273 (- 0) 253 (- 20) 233 (- 40) 216 (- 57) 197 (- 76) 183 (- 90) 168 (- 105)	289 (+ 16) 273 (- 0) 253 (- 20) 233 (- 40) 216 (- 57) 197 (- 76) 183 (- 90) 168 (- 105)	0,559 (0,0559) 0,539 (0,0539) 0,504 (0,0504) 0,463 (0,0463) 0,436 (0,0436) 0,436 (0,0436) 0,422 (0,0422) 0,408 (0,0408)	0,559 (0,0559) 0,580 (0,0580) 0,572 (0,0572) 0,580 (0,0580) 0,600 (0,0600) 0,545 (0,0545) 0,504 (0,0504) 0,586 (0,0586)	248 248 241 241 248 241 248 255	Inoculata con 0,5% Si		
5 R	3,12	1,92	0,9	0,067	0,63	A	80/100		Petlite + stearite	289 (+ 16) 243 (2,48) 239 (2,54) 241 (- 32) 219 (- 54) 175 (- 98) 163 (- 110)	25,7 (2,62) 24,3 (2,48) 24,9 (2,54) 25,8 (2,63) 26,8 (2,73) 27,4 (2,79)	289 (+ 16) 272 (- 1) 252 (- 19) 230 (- 43) 211 (- 62) 197 (- 76) 183 (- 90)	0,49 (0,049) 0,49 (0,049) 0,41 (0,041) 0,42 (0,042) 0,42 (0,042) 0,44 (0,044) 0,38 (0,038) 0,40 (0,040)	0,49 (0,049) 0,50 (0,050) 0,37 (0,037) 0,52 (0,052) 0,56 (0,056) 0,55 (0,055) 0,54 (0,054) 0,53 (0,053)	241 241 241 241 241 241 241	Inoculata con 0,5% Si	
6 R	3,18	2,31	0,7	0,14	0,67	A	110		Petlite + stearite	289 (+ 16) 267 (- 6) 232 (- 21) 225 (- 48) 29,2 (2,98) 210 (- 63) 187 (- 86) 163 (- 110) 148 (- 125)	27,1 (2,79) 27,9 (2,84) 29,0 (2,96) 29,2 (2,98) 29,6 (3,02) 28,8 (2,94) 30,4 (3,10) 31,1 (3,17)	289 (+ 16) 272 (- 1) 254 (- 19) 228 (- 45) 209 (- 64) 197 (- 76) 167 (- 106) 143 (- 130)	0,626 (0,0626) 0,586 (0,0586) 0,538 (0,0538) 0,463 (0,0463) 0,503 (0,0503) 0,668 (0,0668) 0,560 (0,0560) 0,545 (0,0545) 0,431 (0,0431)	0,626 (0,0626) 0,600 (0,0600) 0,655 (0,0655) 0,667 (0,0667) 0,668 (0,0668) 0,560 (0,0560) 0,545 (0,0545) 0,575 (0,0575)	241 241 235 229 235 235 235	Nessuna inoculazione	
7 R	3,79	3,06	0,63	0,021	0,04	A	230		Petlite + 30% di ferrite	289 (+ 16) 270 (- 3) 240 (- 33) 213 (- 60) 173 (- 100) 160 (- 113) 153 (- 120)	10,9 (1,11) 11,2 (1,14) 10,7 (1,09) 12,0 (1,22) 12,4 (1,26) 12,5 (1,27) 12,8 (1,30)	289 (+ 16) 273 (- 0) 255 (- 18) 233 (- 40) 200 (- 73) 178 (- 53) 159 (- 120)	0,68 (0,068) 0,67 (0,067) 0,65 (0,065) 0,66 (0,066) 0,65 (0,065) 0,42 (0,042) 0,41 (0,041)	0,68 (0,068) 0,70 (0,070) 0,68 (0,068) 0,68 (0,068) 0,72 (0,072) 0,70 (0,070) 0,68 (0,068) 0,72 (0,072)	111 111 116 116 106 111 116 111	Inoculata con 0,5% Si	



## PROPRIETÀ DELLE GHISE ALLE BASSE TEMPERATURE

Le applicazioni del freddo sono divenute via via più importanti nel corso degli ultimi 30 anni, sia nell'industria meccanica che in quella chimica.

L'impiego dei gas liquefatti si è andato sempre più estendendo, con la necessità quindi di utilizzare materiali metallici a temperature dell'ordine di 93 K (— 180 °C) e talvolta anche meno.

P. J. Rickards nel rapporto 910 del BCIRA Journal giunge ad alcune conclusioni di carattere generale veramente interessanti che possono essere così riassunte:

- La microstruttura delle ghise non è in alcun modo influenzata dalle basse temperature.
- La resistenza a trazione delle ghise grigie a grafite lamellare aumenta progressivamente con il diminuire della temperatura fino ad un massimo. A temperature ancora inferiori le resistenze diminuiscono rapidamente fino alla rottura che avviene senza apprezzabili deformazioni permanenti.

Questo massimo della resistenza a trazione è raggiunto fra 123 K (— 150 °C) e 23 K (— 250 °C) nelle ghise grigie inoculate, mentre è decisamente sotto 73 K (— 200 °C) nelle ghise con grafite di sopraffusione e ricotte.

La resistenza a trazione delle ghise con grafite di sopraffusione, non ricotte, sembra continuare ad aumentare sino allo zero assoluto.

- L'aumento nella resistenza a trazione a bassa temperatura provoca un leggero aumento nella deformazione elastica e rottura, sebbene i moduli di elasticità mostrino un piccolo progressivo aumento con la diminuzione della temperatura.
- L'effetto principale dell'abbassamento della temperatura nel rapporto tensione-deformazione delle ghise a grafite lamellare è di aumentare i valori di sollecitazione di prova.

La deformazione totale a rottura diminuisce a tutte le temperature nelle ghise inoculate perlitiche e ricotte ferritiche e nelle ghise con grafite di sopraffusione e ricotte.

Ci si deve attendere, con la diminuzione delle temperature, un iniziale aumento della deformazione totale solo nelle ghise perlitiche con grafite di sopraffusione.

La variazione di queste proprietà con la temperatura dipende dalla relazione tra la deformazione permanente e le variazioni di volume della grafite.

- La resilienza o lavoro compiuto alla rottura normalmente decresce con la temperatura, poiché si verifica una riduzione nella deformazione permanente.

La resilienza diminuisce del 25 ÷ 30% da 273 a 173 K (0 a — 100 °C) nelle ghise inoculate e molto meno nelle ghise con grafite di sopraffusione. Infatti,

la resilienza specifica delle ghise con grafite di sopraffusione aumenta quando la deformazione a rottura aumenta con la diminuzione di temperatura.

- A temperature molto basse, sotto 73 K (— 200 °C), le ghise grigie inoculate divengono completamente fragili e la rottura avviene nel campo elastico senza alcuna apprezzabile deformazione permanente. Nelle ghise con grafite di sopraffusione, particolarmente allo stato grezzo senza alcun trattamento, non si raggiunge mai lo stato di fragilità completa anche in prossimità dello zero assoluto.

Quanto sopra è stato accertato da P. J. Rickards in una sperimentazione assai accurata condotta sulle ghise di tab. LI fuse al forno ad induzione ad alta frequenza con inoculazione di Fe-Si all'80% oppure con sopraffusione provocata da gorgogliamento di argon e colate in forme a verde. I risultati più significativi sono riportati nei diagrammi di cui alle figg. 281-284.

Allo scopo di allargare la quantità dei dati sperimentali disponibili, in tab. LII è riportata una sintesi di quelli raccolti da H. Laplanche.

Essi riportano la resistenza a trazione misurata in  $10^1$  N/mm<sup>2</sup> ( $10^1$  kgf/mm<sup>2</sup>) a diverse temperature, la resilienza (energia di rottura per urto) su barrette senza intaglio misurate in  $10^1$  J ( $10^1$  kgm) a diverse temperature e successivamente a temperatura ambiente nonché la durezza Brinell con sfera di diametro 10 e 3.000 kg.

I campioni 1-2-3-4-5 sono stati prodotti al crogiolo, mentre i campioni 6 e 7 al cubilotto a vento freddo.

Per ulteriori chiarimenti si riporta in fig. 290 un diagramma tracciato da Matting e Krüger relativo alla variazione con la temperatura della durezza Brinell su campioni delle tre ghise riportate in tab. LIII.

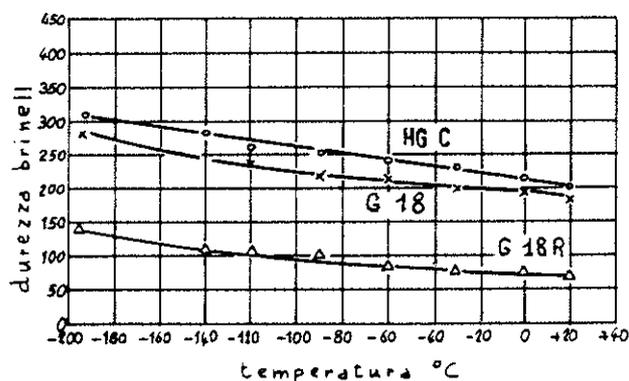


Fig. 290 - Relazione durezza Brinell-temperatura (secondo Matting e Krüger) nelle ghise di tab. LIII.

Tabella LI - Composizione chimica ‰.

Trattamento	C,	Si	Mn	S	P	Ni	Ti
Inoculazione . . . . .	3,25	2,13	0,52	0,031	0,099	—	0,01
Inoculazione . . . . .	3,25	1,77	0,50	0,031	0,097	2,02	0,01
Sotto-raffreddamento . . . . .	2,98	2,13	0,55	0,032	0,093	—	0,21
Sotto-raffreddamento . . . . .	3,00	1,82	0,55	0,030	0,093	2,05	0,22

Tabella LIII - Ghise esaminate da Matting e Krüger.

Tipo	Composizione chimica ‰					Struttura
	C	Si	Mn	P	S	
G 18	3,06	1,56	0,76	0,38	0,1	Perlitica - 5% ferrite-steadite 100% ferrite Grafite fine - Perlite - Sorbite
G 18 R	3,65	1,76	0,55	0,09	0,1	
MGC	3,19	1,76	0,6	0,29	0,148	

### BIBLIOGRAFIA

- H. LAPLANCHE - Caractéristiques des fontes aux très basses températures - La Métallurgie, Vol. 104, n. 4, aprile 1972.
- A. MATTING, U. KRUGER - Ermittlung der mechanischen Eigenschaften von Gusseisenswerkstoffen bei tiefen Temperaturen Giesserei Forschung - n. 1, 1970, pp. 29-37.
- C. GILBERT - Properties of Cast Iron at sub-atmospheric temperatures - Institute of British Foundrymen, 47<sup>th</sup> Annual Meeting Preprint, n. 964. Physical and engineering properties of Cast Iron - BCIRA, 1960.
- Tensile properties of Cast Irons at — 269 °C - BCIRA, 1964, p. 473.
- Caractéristiques mécaniques des fontes aux basses températures - C.T.I.F., marzo 1968, E 02-40.
- H. T. ANGUS - Physical and engineering properties of Cast Iron - Birmingham, 1960.
- F. ROLL e Coll. - Handbuch der Giesserei Technik, Vol. 1, 2<sup>a</sup> parte, p. 163.
- WALTON, PATTERSON - Gusseisen Handbuch, 1963, p. 167.
- HALLET - Journal Iron Steel Institut 170, aprile 1952, pp. 321-329.
- J. W. GRANT - Journal Research Development, BCIRA, n. 3, 1950, pp. 441-445.
- W. C. HESELWOOD, F. B. PICKERING - Iron Steel, n. 24, 1951, pp. 596-600.
- BURGESS, SHRUBSALL - Trans. American Foundrymen Association, n. 50, 1942, pp. 405-445. Gusseisen Handbuch, 1963, p. 166.

## BREVE CENNO SULLA TEORIA DELLA CORROSIONE

La distruzione dei metalli, ad opera dei fenomeni di corrosione, assume grandissima importanza agli effetti dell'economia mondiale; basti pensare che, secondo alcune statistiche dell'Iron and Steel Institute, nel periodo di 30 anni la produzione dei materiali ferrosi (ferro, acciaio e ghisa) deve essere reintegrata quasi al 50% perché distrutta o resa inservibile dalla corrosione. In particolari casi poi, come ad esempio nell'industria petrolifera, si calcolano nel 10% le perdite annue di capitale del materiale ferroso per corrosione.

La corrosione è essenzialmente una reazione elettrochimica fra un metallo ed il mezzo che lo circonda. Com'è noto, il legame atomico dei metalli è tale per cui il nucleo atomico e la nube di elettroni a livelli elettronici più interni saturi sono avvolti dagli elettroni di valenza del livello più esterno, che non sono strettamente vincolati al proprio singolo nucleo atomico. A questa forma di legame è, pertanto, dovuta la notevole reattività chimica dei metalli, in quanto è notevolmente facilitato il passaggio dallo stato metallico allo stato di ione in presenza di qualsiasi agente atto a fissare questo ione libero.

Si deve tenere ben presente che nella corrosione umida sono sempre presenti due elettrodi a diverso potenziale, rappresentati da due punti della struttura metallica elettricamente connessi fra loro, e l'elettrolita (o solvente) che chiude la catena degli elementi galvanici (semicelle), in modo da permettere la circolazione di corrente.

La zona metallica più elettronegativa è quella che ha una tensione di soluzione superiore a quella di equilibrio rispetto all'elettrolita, in quanto è massima la tendenza a mandare in soluzione ioni positivi.

Questa zona assume comportamento anodico (—) e si corrode (cioè manda in soluzione il metallo), in quanto l'uscita della corrente elettrica è materializzata dalla dissoluzione dello stesso in ioni metallici:



La formazione di un film aderente costituito da ossidi, come nel caso dell'ossidazione anodica dell'alluminio, o da prodotti solidi di reazione, rende il metallo più nobile, rallentando la corrosione (passivazione nel metallo).

Le zone invece, dove rientra nella struttura la corrente attraverso il collegamento metallico esterno, assumono comportamento catodico (+) e risultano protette a seguito di una reazione di riduzione:



che fissa gli elettroni liberatisi nel processo di ossidazione (a).

Ognuno dei due processi (a) e (b) ha un suo potenziale caratteristico, e la condizione perché si abbia corrosione è che il potenziale della reazione (a) sia meno nobile di quello della reazione (b).

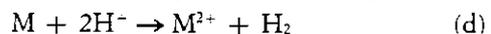
Evidentemente nessuna limitazione è fatta riguardo alla sostanza chimica allo stato ossidato ( $O_x$ ) che figura nella reazione (b), in quanto tutti i sistemi elettrochimici hanno la possibilità di combinarsi fra loro per formare delle pile.

In alcune semplici celle elettrochimiche, ed in particolare nelle soluzioni acquose, che rappresentano la maggior parte dei mezzi corrosivi, il processo catodico di riduzione (b), che è sempre contemporaneo ed opposto alla reazione anodica (a), si manifesta con sviluppo di idrogeno, cioè:



che avviene nei mezzi acidi e provoca la *corrosione acida*.

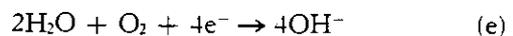
In questo caso la reazione primaria (a) complessiva è:



la scarica di ioni  $H^+$  lascia un eccesso di ioni  $OH^-$  nell'elettrolita.

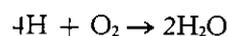
La scarica di ioni  $H^+$  al catodo non sempre dà luogo a sviluppo di gas, in quanto l'idrogeno tende ad essere assorbito dal metallo con l'effetto che il catodo ne diviene saturo, formandosi così una forza elettromotrice inversa per la quale l'idrogeno tende a ritornare in soluzione allo stato ionico, ed in tal caso il catodo rimane polarizzato, con l'effetto della *polarizzazione di concentrazione* che si verifica all'anodo per l'incremento locale di cationi.

Quando l'allontanamento dell'idrogeno dal catodo non può avvenire mediante sviluppo di  $H_2$  gassoso, la depolarizzazione può ancora avvenire mediante l'intervento e la riduzione di ossigeno, dando luogo al tipo di corrosione detto *ad assorbimento di ossigeno* nel quale l'ossigeno si riduce con l'effetto catodico, neutralizzando gli ioni  $H^+$

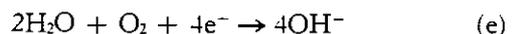


che ha luogo nei mezzi neutri od alcalini.

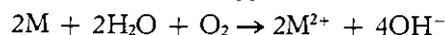
Questa reazione si può spiegare in diversi modi: se si suppone che il primo passo possa essere la scarica di idrogeno, l'effetto può essere considerato nel modo seguente:



e cioè:



In questo caso la somma degli effetti primari anodici e catodici può essere così rappresentata:



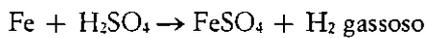
Il fatto che la corrosione sia del tipo a sviluppo di idrogeno oppure ad assorbimento di ossigeno non dipende solo dalla natura del metallo costituente il catodo, ma anche dalla composizione dell'elettrolita e particolarmente dalla concentrazione degli ioni  $H^+$  (pH).

Lo sviluppo di idrogeno è normalmente associato all'attacco da parte di un acido (basso pH). L'assorbimento di ossigeno si verifica normalmente con soluzioni acquose neutre (pH = 7).

In definitiva una cella è costituita da due elettrodi e da un elettrolita di pH dato: l'anodo (—) suscettibile di reagire con l'elettrolita ed il catodo (+) inattaccabile.

Anche gli elettrodi inattaccabili assumono, tuttavia, un definito potenziale, in funzione del carattere più o meno riducente od ossidante dell'elettrolita, quindi: perché una coppia possa sussistere, è necessario che il potenziale delle zone anodiche (tensione di dissoluzione) sia inferiore al potenziale delle zone catodiche, cioè al potenziale d'ossido-riduzione del mezzo corrosivo.

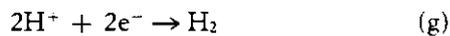
Ora, in relazione alle reazioni (d) ed (e) applicate al caso dei materiali ferrosi, la dissoluzione in un mezzo acido rappresentata dalla reazione chimica:



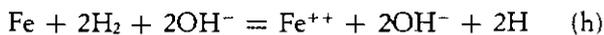
risulterà costituita dalla reazione anodica:



e dalla reazione catodica:



La reazione di corrosione di un materiale ferroso in un liquido neutro aerato è la combinazione delle reazioni (f) e (g) che, scritta in termini ionici, risulta:



mentre, trascritta secondo la terminologia chimica, darà:

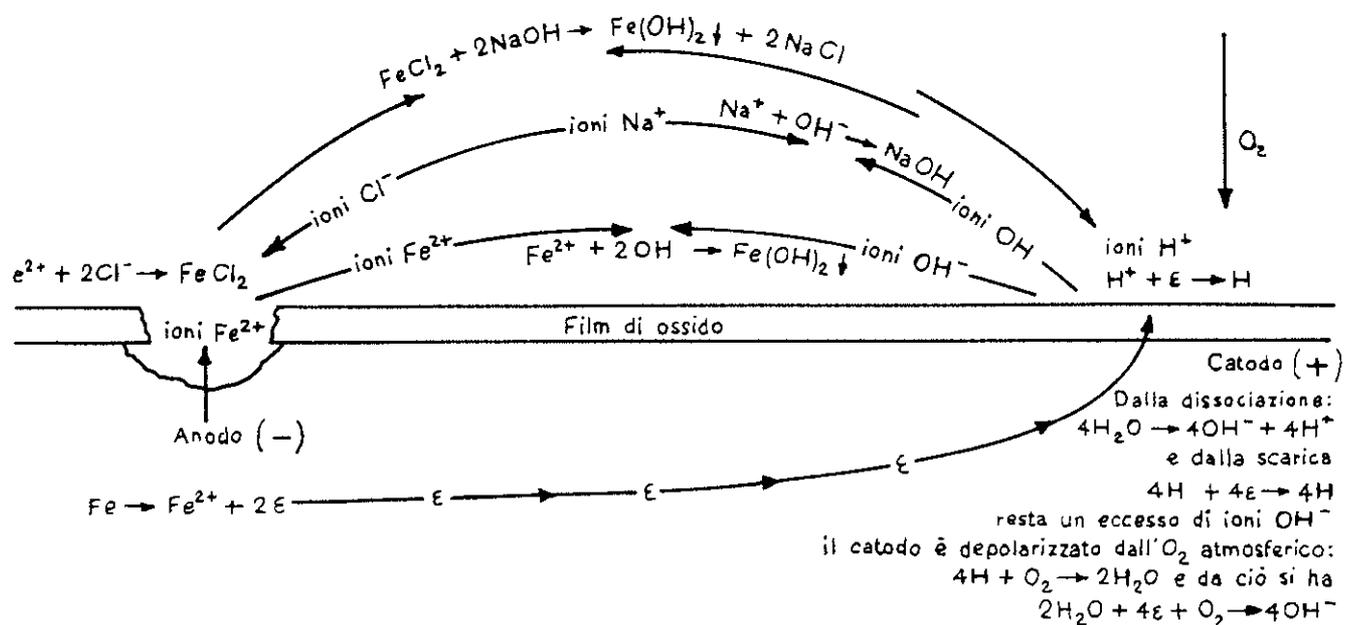
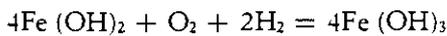
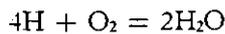


Fig. 291 - Schema di corrosione della ghisa grigia in soluzione di cloruro di sodio areata (acqua di mare). Colla galvanica per rottura del film d'ossido.

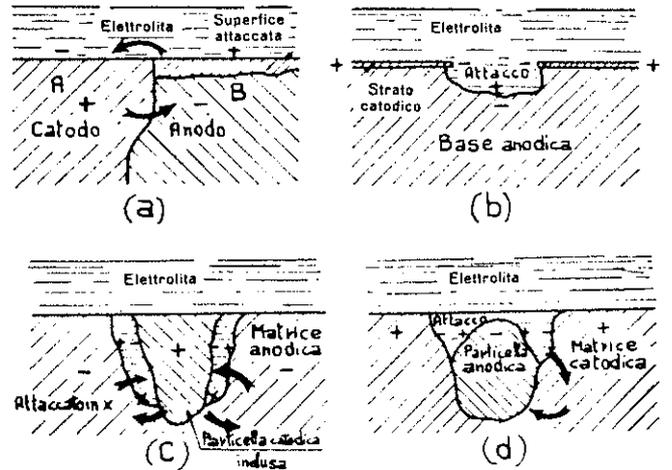


Fig. 292 - Schema di funzionamento di una macropila (a) e di micropile di natura diversa (b, c, d).

Nella fig. 291 sono rappresentati schematicamente i concetti più sopra brevemente esposti.

Nei materiali ferrosi, ed in genere nelle leghe metalliche, l'andamento della corrosione dipende dalla composizione della lega metallica e, pertanto, dalla struttura della medesima che sarà soggetta a corrosione nelle zone catodiche, mentre le zone anodiche resteranno inalterate. A seconda della distanza tra zone anodiche e zone catodiche, si hanno macropile (dette anche coppie galvaniche) e micropile (o pile interne).

Un esempio di coppia galvanica è dato dal collegamento fra rame e ferro in acqua di mare od altro elettrolita; un esempio di pila interna è dato dal contatto fra matrice metallica ferrosa ed il carbonio grafittico delle ghise.

Nella fig. 292 sono schematizzati il funzionamento di una macropila (a) e di 3 micropile di natura diversa (b, c, d). Le frecce indicano il senso della corrente positiva e sono, pertanto, inverse al senso degli elettroni.

Il caso (a) è quello di due metalli con potenziali diversi, accoppiati in un mezzo elettrolitico, che costituiscono una macropila nella quale il metallo A è catodico e quello B anodico. Quest'ultimo è corrosivo su tutta la superficie, ma più profondamente in vicinanza di A.

Il caso (b) rappresenta un metallo ricoperto da uno strato catodico protettivo, che sia scrostato o crepacciato in un punto. La base anodica passa in soluzione, subendo una profonda *vaiolatura* o corrosione localizzata.

Il caso (c) è quello di una fase catodica di limitate dimensioni, quale potrebbe essere un carburo di ferro o fosforo di ferro od una segregazione grafitica, immersa in una matrice metallica anodica, ed esposta alla superficie ad un mezzo elettrolitico. La matrice anodica resterà corrosa in tutto l'interno ed in profondità, così da liberare completamente la fase catodica. Come verrà illustrato più avanti, nel caso delle ghise con grafite lamellare, nelle quali la fase catodica (lamelle di grafite) attraversa tutta la matrice, la corrosione continuerà a progredire.

Il caso (d) è il caso inverso di una fase catodica immersa in una matrice anodica. La prima si corrode gradualmente fino a lasciare una cavità contenente i prodotti della corrosione.

A causa dei fenomeni di polarizzazione che avvengono al passaggio della corrente nell'interfase metallo-soluzione, il potenziale di un elettrodo varia con il variare della corrente circolante e, come in tutti i fenomeni fisici, detta variazione di potenziale si oppone al passaggio della corrente che l'ha generata. Di conseguenza, il potenziale delle zone anodiche risulterà *nobilizzato*, mentre sarà *anobilizzato* quello delle zone catodiche.

Ad un certo valore di corrente i due potenziali si eguagliano (potenziale di corrosione): tale valore rappresenta la densità di corrente massima che può circolare nelle pile. La differenza tra il valore del potenziale di elettrodo senza circolazione di corrente e quello con corrente circolante, costituisce la sovratensione  $\omega$  per il processo di elettrodo considerato.

Per molti processi di elettrodo, la relazione fra la sovratensione  $\omega$  e la densità di corrente  $D$  è del tipo:

$$\omega = a + b \log D \quad (\text{legge di Tafel})$$

dove  $a$  e  $b$  sono delle costanti.

La fig. 293 rappresenta graficamente il fenomeno descritto e prende il nome di diagramma di Evans dove:

—  $E_c$  = potenziale delle aree catodiche senza circolazione di corrente;

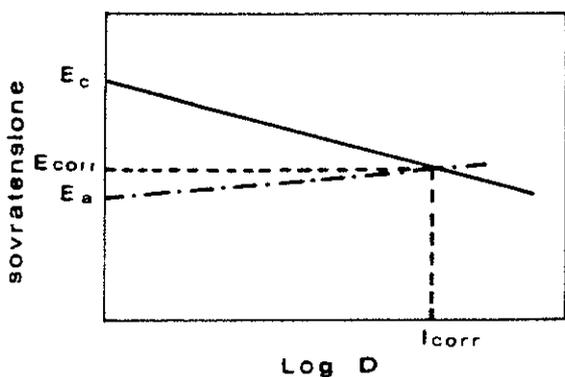


Fig. 293 - Diagramma di Evans.

—  $E_a$  = potenziale delle aree anodiche senza circolazione di corrente;

—  $E_{corr}$  = potenziale di corrosione;

—  $I_{corr}$  = corrente di corrosione corrispondente ad  $E_{corr}$ ;

—  $D$  = densità di corrente.

Poiché la velocità delle reazioni elettrochimiche che avvengono all'anodo ed al catodo di ogni pila interna sono proporzionali alla densità di corrente (flusso di corrente per unità di area), le aree degli anodi e dei catodi determinano questo valore quando sia fissata la quantità di corrente che passa attraverso gli anodi ed i catodi.

L'estensione delle superfici degli anodi e dei catodi può influenzare anche la quantità di corrente nei circuiti, perché quanto più è estesa l'area di un catodo tanto più grande sarà la possibilità di avere un contatto con l'ossigeno disciolto che può funzionare da depolarizzante. In generale, si può dire che, quando le reazioni catodiche controllano la velocità di corrosione, l'area dei catodi assume grandissima importanza; se, poi, l'area degli anodi si mantiene pressoché costante, la velocità di corrosione può aumentare e diminuire proporzionalmente all'aumento od alla diminuzione dell'area dei catodi.

Tutti i metalli sono caratterizzati da un potenziale di elettrodo, che li distingue in metalli nobili (catodici) o meno nobili (anodici), riferito all'elettrodo normale ad idrogeno come punto di zero arbitrario, i quali sono riportati nella tab. LIV.

Ne consegue che qualsiasi materiale meno nobile (anodico), e nel caso particolare qualsiasi materiale ferroso, indipendentemente dalla sua struttura, può essere reso più nobile alligandolo con elementi più nobili, quale nichel e rame. Questi elementi di lega in certe percentuali formano soluzioni solide con il ferro, il quale assume un potenziale catodico che sarà compreso tra il suo proprio caratteristico e quello dell'elemento alligante, ciò che può costituire una non trascurabile protezione galvanica.

Tabella LIV - Serie elettrochimica dei metalli.

Descrizione	Ione considerato	Potenziale normale d'elettrodo (in soluzione di normale attività ionica e riferito all'elettrodo normale idrogeno come punto di zero arbitrario)
Oro . . . . .	Au <sup>+++</sup>	+ 1,36
Platino . . . . .	Pt <sup>++++</sup>	probabile sopra + 0,86
Mercurio . . . . .	(Hg) <sup>++</sup>	+ 0,799
Argento . . . . .	Ag <sup>+</sup>	+ 0,798
Rame . . . . .	Cu <sup>++</sup>	+ 0,344
Idrogeno (1 atm) . . . . .	H <sup>+</sup>	± 0,000 (zero arbitrario)
Piombo . . . . .	Pb <sup>++</sup>	— 0,12
Stagno . . . . .	Sn <sup>++</sup>	— 0,14
Nichel . . . . .	Ni <sup>++</sup>	— 0,23
Cadmio . . . . .	Cd <sup>++</sup>	— 0,40
Ferro . . . . .	Fe <sup>++</sup>	— 0,44
Cromo . . . . .	Cr <sup>++</sup>	— 0,56
Zinco . . . . .	Zn <sup>++</sup>	— 0,762
Alluminio . . . . .	Al <sup>+++</sup>	— 1,33
Magnesio . . . . .	Mg <sup>++</sup>	— 1,55
Sodio . . . . .	Na <sup>+</sup>	— 2,715
Potassio . . . . .	K <sup>+</sup>	— 2,924
Litio . . . . .	Li <sup>+</sup>	— 2,959

Nella fig. 294 è rappresentata la serie galvanica di alcuni metalli e leghe in acqua di mare.

Anche materiali non metallici, che potrebbero erroneamente essere ritenuti chimicamente inerti, sono elettroliticamente attivi; questo è il caso del carbonio grafittico che, quando si trova allo stato finemente poroso e suddiviso, costituisce uno dei materiali catodici più efficienti conosciuti, in quanto riunisce la nobiltà del suo potenziale elettrochimico con un'area superficiale assai estesa per unità di peso.

Il potenziale del carbonio grafittico misurato da vari Autori, a confronto della semicella di calomelano saturo in soluzione di cloruro di sodio al 3%, è dell'ordine di + 200 e fino a + 385 millivolts, e poiché il potenziale del ferro in soluzione di cloruro di sodio alla temperatura ambiente è di - 650 a - 700 millivolts è evidente che in un circuito aperto la differenza di potenziale fra ferro e grafite, in queste condizioni, è dell'ordine di 1 V. In un circuito chiuso, quale si presenta in un circuito galvanico, la differenza di potenziale verrà notevolmente ridotta in conseguenza della polarizzazione della superficie catodica.

Infine, bisogna tenere presente che non è necessario che un elettrolita sia liquido perché possa agire come tale; esso può anche essere un solido permeabile e saturo, come nel caso delle *pile a secco*. Una tale condizione si ha quando il metallo è sepolto sotto terra; l'humus, con i suoi acidi organici ed i suoi sali, rappresenta appunto il mezzo corrosivo capace di chiudere i circuiti delle pile, siano esse interne o no.

Persino il fenomeno dell'aerazione differenziale, dovuta a fessurazioni del terreno od a presenze locali di microrganismi, può partecipare alla corrosione dei metalli sotterrati, confermando ancora una volta che l'humus permette lo svolgersi di tutti i fenomeni che avvengono negli elettroliti liquidi. Nel terreno esistono anche *correnti telluriche* generate da differenze di potenziale esistenti tra terreni di differente composizione chimica.

Nel suolo circolano, inoltre, correnti elettriche provenienti da fughe di circuiti di superficie, dette *correnti vaganti*, derivanti, ad esempio, dai circuiti delle tranvie e ferrovie elettrificate, e da macchine elettriche che usano il terreno come *massa*. Dette correnti, dopo avere percorso i metalli sotterrati (per esempio tubazioni, rivestimenti, cavi, rotaie, ecc.), li abbandonano per fare ritorno, sempre attraverso il terreno, al secondo polo delle macchine generatrici. Nel punto in cui tali correnti lasciano il metallo per rientrare nel mezzo conduttore, avvengono dei fenomeni corrosivi talvolta tanto accentuati da provocare la foratura delle tubazioni e dei rivestimenti dei cavi.

Tutto ciò accennato, e senza volere scendere ulteriormente in dettaglio sulla teoria della corrosione, si ritiene opportuno elencare e spiegare i vari tipi di fenomeni corrosivi che si verificano nelle applicazioni industriali.

### Corrosione galvanica

Di due metalli immersi in un elettrolita e costituenti circuito, quello meno nobile si corrode (anodo) ed il più nobile è protetto (catodo).

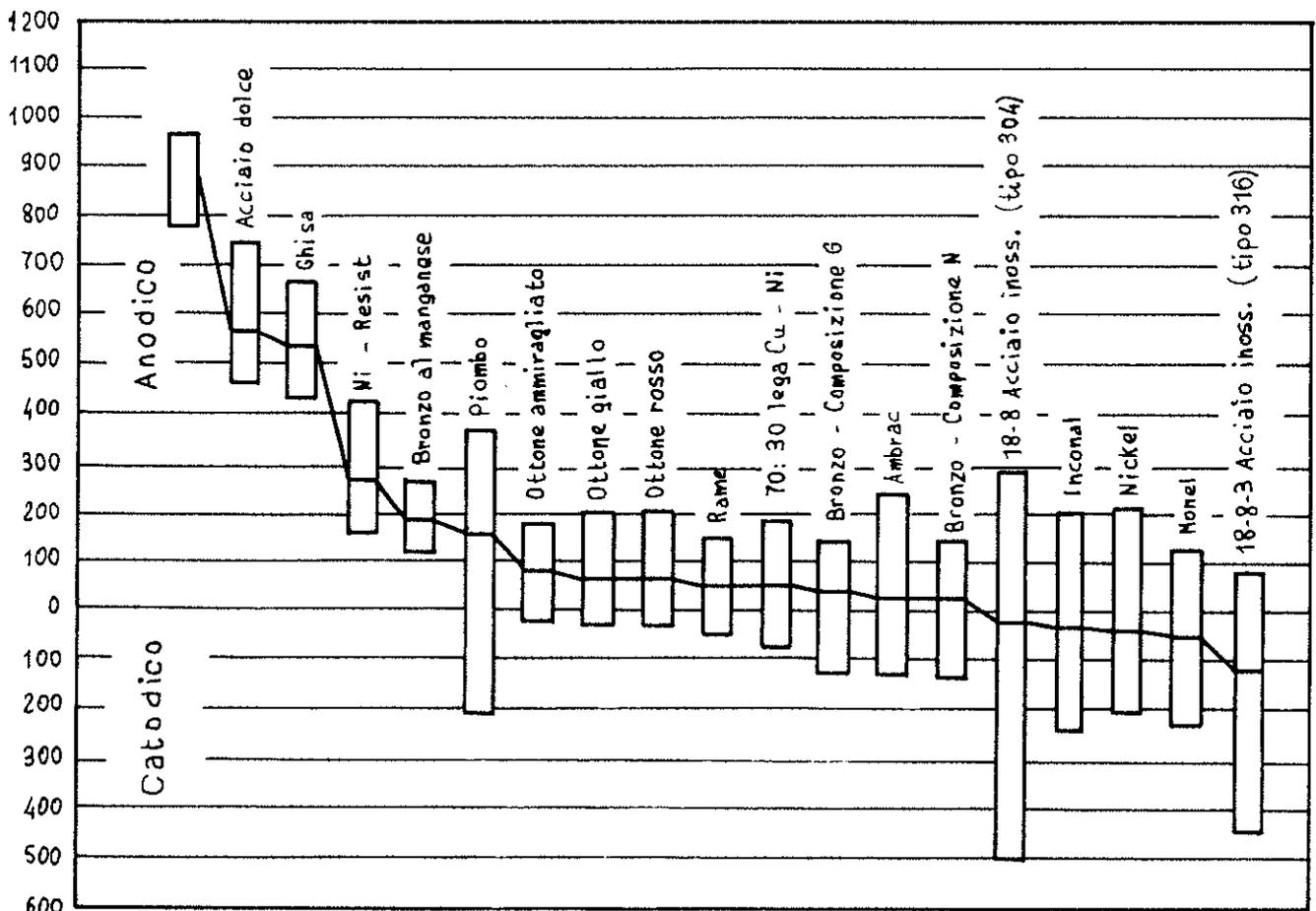


Fig. 294 - Serie galvanica dei metalli e leghe in corrente d'acqua di mare.

La corrosione cessa quando interviene la polarizzazione catodica (+) o l'ossidazione anodica (—). La presenza di ossigeno, l'aprirsi ed il chiudersi del circuito esterno, il bagnasciuga, cause termiche e meccaniche contribuiscono ad impedire la polarizzazione. La corrosione sarà tanto maggiore quanto più piccole sono le resistenze del circuito, quanto maggiore è la conducibilità dell'elettrolita, quanto più vicini sono anodo e catodo, quanto maggiore è l'area dell'anodo rispetto a quella del catodo.

#### **Squilibri di concentrazione**

Se l'elettrolita presenta differenze di concentrazione variabili da punto a punto, si producono sul metallo differenze di potenziale che generano corrosione delle parti a contatto con la concentrazione maggiore.

Altrettanto accade in presenza di elettroliti la cui temperatura varia da punto a punto (pile termodifferenziali), ricordando anche che, per ogni grado di temperatura, l'attività corrosiva aumenta di circa il 10%.

#### **Corrosione per celle a gas**

Si ricollega al caso precedente e si ha quando l'elettrolita, per squilibri di pressione o di temperatura, contiene diverse quantità di gas disciolti ( $O_2$ ,  $CO_2$ , ecc.).

#### **Corrosione per aerazione differenziale**

È una variazione del caso precedente che si ha quando l'elettrolita è diversamente aerato da punto a punto, si corrode la parte meno aerata. Quando però l'elettrolita è in movimento, si possono corrodere le parti più aerate, soprattutto con i metalli nei quali la ionizzazione è lenta (rame e sue leghe).

#### **Corrosione per differenza di sollecitazione**

Se il metallo immerso nell'elettrolita presenta zone scariche ed altre sollecitate, si ha corrosione in quelle più sollecitate, e sotto sforzi ciclici si spezza anche il film protettivo.

#### **Correnti vaganti**

La corrente vagante esce da un conduttore, entra nell'elettrolita e rientra nel conduttore, provocando la corrosione nel punto in cui esce dal conduttore.

#### **Corrosione microgalvanica**

Quando un metallo è formato da varie fasi ed è in presenza di un elettrolita, si generano nel metallo delle micropile con conseguenti corrosioni anodiche.

#### **Corrosione per differente velocità dell'elettrolita**

Quando ad uno dei due conduttori l'elettrolita è fermo ed all'altro è in moto, quest'ultimo sarà soggetto alla corrosione.

#### **Corrosione per cavitazione**

Quando l'elettrolita ed il metallo sono dotati di un moto di valore relativamente elevato, è possibile il distacco della vena fluida e la formazione di difetti nel flusso del liquido (cavità). Queste cavità (bolle vuote) contengono vapore a bassa pressione e quando scompaiono per implosione determinano un collasso che si traduce in urti ritmici sul metallo, provocando corrosione ed erosione sia per asportazione di film protettivi, sia per la formazione di micropile tra cristalli differenzialmente sollecitati, sia per fatica.

#### **Corrosione intercristallina**

È un caso particolare della corrosione microgalvanica ed avviene per la formazione di pile locali fra centro del cristallo ed i suoi bordi, fra cristallo ed impurezza, fra cristalli segregati, fra cristalli grossi e quelli più piccoli, il tutto favorito da sollecitazioni.

#### **Attacco da microrganismi**

La corrosione per attacco da microrganismi è caratteristica delle acque stagnanti, dei bacini di carenaggio, di certi porti, di certi estuari, ed è generalmente dovuta alla liberazione di  $H_2S$  per opera di batteri.

## **I FENOMENI DI CORROSIONE**

Dopo quanto esposto, i fenomeni di corrosione della ghisa ad opera degli elettroliti possono essere spiegati con l'esistenza di coppie voltaiche presenti nella composizione eterogenea di questo materiale, essenzialmente nelle coppie matrice metallica-grafite, matrice metallica-fosforo di ferro fra le quali ha importanza preminente la coppia matrice-grafite nella quale la grafite si comporta come un metallo nobile.

Per matrice metallica si intende il complesso strutturale dei vari costituenti cristallografici della ghisa entro la cui massa si trovano sparse le formazioni di fosfuri, ed in quantità molto maggiore le lamelle di grafite.

Di minore importanza sono, invece, le coppie elementari cementite-ferrite; grafite-ferrite; cementite-perlite, ecc.

Se ora in luogo di considerare il comportamento di una coppia elementare, si suppone un getto di ghisa immerso, è chiaro che in corrispondenza di ogni singola lamella di grafite e di ogni altro elemento cristallino, si formerà una coppia locale, la cui forza elettro-motrice sarà all'incirca quella della corrispondente coppia elementare. La corrosione si inizierà, quindi, nelle zone attigue ai costituenti che hanno funzione catodica e si andrà man mano estendendo fino ad interessare l'intera superficie del getto.

L'idrogeno generato dalla corrosione si accumulerà nelle zone catodiche, polarizzandole parzialmente o totalmente, e diminuendo con ciò la velocità della corrosione che si propagherà con velocità differenti nei vari casi o si arresterà od eventualmente sarà accelerata dall'intervento di agenti depolarizzanti.

Data la complessità strutturale della ghisa ed a causa delle differenze di strutture locali, che dipendono dagli spessori, dallo stato delle superfici, dalla forma dei getti, dalle condizioni di colata, ecc., l'entità della corrosione risulta dall'integrazione delle singole corrosioni locali dovute alle singole coppie e dalle condizioni in cui i fenomeni corrosivi avvengono; per questi motivi non è possibile definire in modo generale i fenomeni corrosivi, ma è necessario prendere in esame ciascun caso particolare; si ritiene, pertanto, di considerare i più comuni agenti corrosivi, descrivendo il comportamento delle ghise comuni e l'influenza dei diversi componenti.

È noto che il ferro chimicamente puro resiste meglio di qualsiasi altro prodotto siderurgico ai più vari agenti corrosivi, mentre l'acciaio ordinario è facilmente corrodibile.

Le ghise si ossidano all'aria molto più lentamente dell'acciaio, anche perché lo strato superficiale di ossidi di ferro idrati costituisce talvolta uno strato protettivo che rallenta l'azione corrosiva.

In alcuni casi, con l'accumularsi di uno strato costituito dalle lamelle di grafite residue dalla dissoluzione della porzione metallica ed intrappolate nello strato di ossido, aumenta la resistenza alla corrosione.

Questo strato residuo di grafite costituisce un fattore determinante della resistenza alla corrosione della ghisa.

La fig. 295 rappresenta in qual modo l'otturazione dei pori degli strati residui di grafite può diminuire la velocità della corrosione a confronto dell'acciaio dolce dopo una velocità iniziale maggiore. Quando questa otturazione dei pori non si verifica, ciò che avviene in condizioni anormali, e cioè quando le dimensioni e la distribuzione delle segregazioni di grafite permettono l'infiltrazione del mezzo corrosivo fino a contatto delle parti metalliche del getto, la presenza della grafite liberatasi

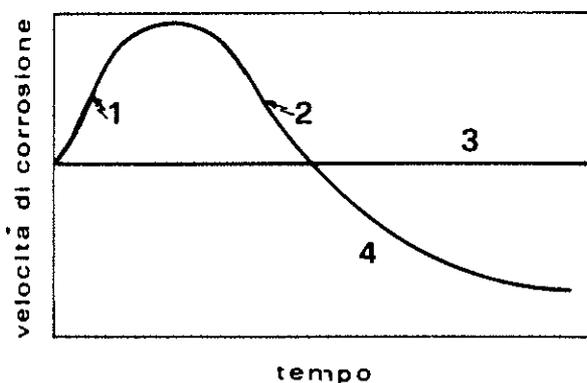


Fig. 295 - Influenza della grafite nella ghisa grigia sulle velocità di corrosione in funzione del tempo in confronto con l'acciaio dolce.

- 1 - La grafite inizialmente accelera la corrosione.
- 2 - I residui della corrosione grafitica rallentano la corrosione.
- 3 - Acciaio dolce.
- 4 - Ghisa grigia.

dalla matrice metallica, costituendo un elemento catodico molto attivo, incrementa l'azione elettrochimica e l'attacco prosegue con velocità uguale a quella iniziale ed anche notevolmente accelerata, causando quel tipo di corrosione detta *corrosione grafitica*.

In questi casi il getto si presenta leggermente arrugginito in superficie, ma in effetti gli elementi corrodibili, cioè solubili della matrice metallica, risultano completamente disciolti e scomparsi, ed il getto, pur conservando la forma apparente, è costituito solo da una fragilissima spugna o scheletro di grafite e degli altri microcostituenti insolubili.

Anche la composizione chimica non uniforme del getto, le inclusioni non metalliche, lo stato della superficie del getto, l'aderenza dello strato d'ossido, come la differente concentrazione e la velocità di agitazione del mezzo corrosivo possono produrre una corrosione irregolare e diminuire l'efficacia di uno strato protettivo.

I fattori essenziali del fenomeno della corrosione sono la natura e la velocità dell'azione corrosiva. La corrosione può presentarsi uniforme, come accade frequentemente, o differenziata o localizzata sotto forma di vaiolatura. Il tipo di corrosione dipende dal metallo e dal mezzo corrosivo. Agli effetti pratici è soprattutto importante determinare il tempo durante il quale l'organo, o la parte della ghisa, deve assicurare la sua funzione in servizio in modo soddisfacente.

La velocità della corrosione uniforme si esprime in mm/anno, per quella localizzata o che dà luogo a vaiolatura, il fattore da tenere in maggiore considerazione è la massima profondità della corrosione.

### Influenza della struttura e della composizione chimica

La differenza essenziale del tipo di corrosione fra la ghisa grigia e l'acciaio è dovuta alla presenza, nella ghisa, delle lamelle di grafite ed al suo tenore di silicio molto più alto. La struttura perlitica, specie se molto fine ed uniforme, contribuisce alla formazione di uno strato protettivo che conferisce al getto una buona resistenza alla corrosione. Al contrario, una struttura grossolana contenente grafite in grosse lamelle e ricca di porosità e di discontinuità, quali fessure, inclusioni di scorie, facilita la penetrazione degli elementi aggressivi nel corpo del getto.

È evidente, perciò, che l'applicazione di tecnologie di fusione che favoriscano la grafitizzazione, le aggiunte moderate alla ghisa grigia di elementi di lega che contribuiscano a formare una matrice perlitica più fine, più compatta, e più uniforme, e di una grafite ben distribuita, di forma e di dimensioni più adatte, ne migliori la resistenza alla corrosione.

Risultati analoghi si possono ottenere anche con l'applicazione di sistemi di fusione o di inoculazione e procedimenti tecnologici adatti come, ad esempio, con i sistemi tipo Meehanite, e con sistemi di colata che favoriscano la formazione di una crosta superficiale uniforme, liscia e compatta relativamente temprata rispetto agli strati interni, come si ottiene colando con sistemi raffreddanti.

È altrettanto indubbio che la ghisa bianca resiste meglio alla corrosione della ghisa grigia.

## Influenza di altri fattori sulla corrosione

La velocità della corrosione aumenta con l'aumento della temperatura e della velocità di spostamento del mezzo aggressivo.

L'aumento della temperatura aumenta sostanzialmente la ionizzazione della soluzione aggressiva e la solubilità dei prodotti della corrosione.

Lo spostamento del mezzo aggressivo rinnova il contatto di questo mezzo fresco ed aerato con la superficie della ghisa e può distruggere od allontanare lo strato protettivo di ossido e di grafite. A velocità di scorrimento molto elevate, quali si hanno nelle pompe, nei ventilatori e negli ugelli degli ammortizzatori, alla superficie delle pale di rotor o di agitatori, la turbolenza strappa il film protettivo della ghisa e si genera una corrosione rapida ed accentuata da fenomeni eventuali di erosione.

Una elevata velocità relativa fra il mezzo aggressivo ed il getto provoca delle pressioni alternate che si succedono con grande frequenza e possono generare l'erosione per cavitazione.

In presenza di liquidi, una improvvisa caduta locale di pressione può provocare una ebollizione spontanea con formazione di numerosissime piccole bolle di vapore, la cui esplosione a contatto del metallo produce un gran numero di shocks del liquido contro la superficie, accelerandone la corrosione.

La corrosione od erosione per cavitazione alle grandi velocità di esercizio è frequente nelle pompe, nelle turbine, nelle valvole a saracinesca e nelle eliche navali.

Aumentando la durezza della ghisa e migliorandone la resistenza, ricorrendo ad una composizione chimica appropriata, è possibile diminuire gli effetti di questo tipo di corrosione, essendo tuttavia preferibile evitare i fenomeni di cavitazione, ricorrendo ad un disegno accuratamente studiato dei getti.

Si vedrà ora distintamente il comportamento della ghisa grigia a fronte dei diversi ambienti ed agenti corrosivi.

## Corrosione atmosferica

La velocità della corrosione atmosferica dipende dalla composizione, dall'umidità relativa dell'atmosfera, dalla presenza di gas eterogenei e di particelle solide, vale a dire dallo stato della polluzione nell'aria e dall'inquinamento atmosferico.

Una umidità relativa superiore al 70% accelera la corrosione, anche senza che si presentino gocce d'acqua di condensazione alla superficie dei getti; l'anidride solforosa presente in molte atmosfere industriali ne è un acceleratore molto attivo; e così pure i cloruri presenti nelle atmosfere marine.

Generalmente si è riscontrato che la massima profondità di corrosione della ghisa grigia nelle atmosfere industriali molto inquinate interessa uno spessore di 0,13 mm all'anno, mentre nelle zone di campagna non supera 0,025 mm all'anno ed è intermedia nelle atmosfere marine.

In qualsiasi condizione, tuttavia, la ghisa grigia si ossida all'aria molto più lentamente dell'acciaio dolce come è chiaramente rappresentato nel diagramma di fig. 296, ciò si è sempre constatato quando ci si è trovati nella necessità di smontare cancellate, ringhiere, statue,

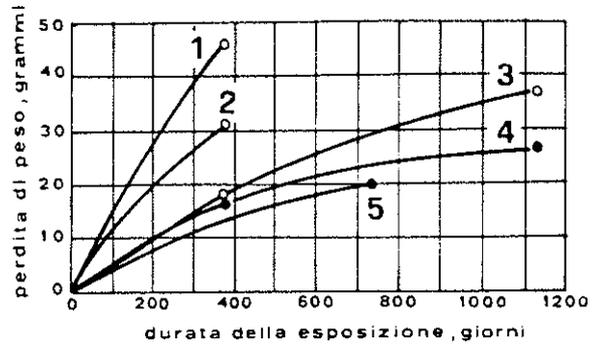


Fig. 296 - Prove di corrosione di campioni in atmosfera marina.

- 1 - Acciaio dolce con 0,02% Cu.
- 2 - Acciaio al rame con 0,2% Cu.
- 3 - Ghisa sferoidale.
- 4 - Ghisa grigia.
- 5 - Acciaio debolmente legato ad alta resistenza.

ponti ed altri manufatti facenti parte di opere pubbliche esposte per molti anni all'atmosfera, anche di località costiere, nei quali le parti di ghisa non presentavano fenomeni considerevoli di corrosione, mentre le parti di ferro si erano pressoché completamente distrutte nello stesso periodo di tempo.

Questa maggiore resistenza è attribuita al fatto che i prodotti della corrosione che si formano sulla superficie dei getti di ghisa grigia esposti all'atmosfera vi esercitano una notevole protezione, che è attribuita in modo preferenziale alla grafite che vi forma una copertura, ed all'eventuale presenza di fosforo, nichel, cromo e rame quando questi elementi vi si trovino in quantità apprezzabile.

Si osserva, tuttavia, che non tutte le ghise grigie offrono la medesima resistenza alla corrosione dell'atmosfera marina. Nelle banchine di molti vecchi porti si possono osservare alcuni vecchi cannoni di ghisa impiegati come bitte d'ormeggio, rimasti tuttora senza tracce di corrosione profonda, mentre negli stessi luoghi altre bitte di fusione più recente sono profondamente corrose.

Se ne deduce che la ghisa fusa probabilmente al forno a riverbero, con cariche composte di ghisa al carbone di legna, ed in definitiva con tenori di zolfo assai scarsi, e con struttura prevalentemente perlitica fine, resiste meglio della ghisa ordinaria nelle atmosfere marine.

La ghisa bianca presenta la massima resistenza alla corrosione.

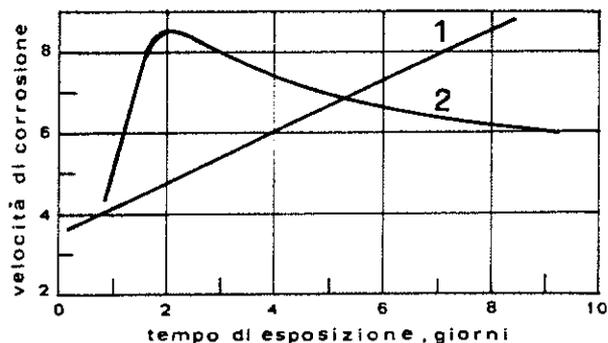


Fig. 297 - Effetto del tempo di esposizione sulla velocità di corrosione in acido solforico allo 0,5% a temperatura ambiente.

- 1 - Ghisa sferoidale.
- 2 - Ghisa grigia.

Tabella LV - Valori di perdite per corrosione atmosferica, espressi in mg/dm<sup>2</sup>/d.

Ambiente	Rurale	Urbano	Industriale			Marino	
Ferro	—	25	—	—	15 ÷ 19	—	—
Acciaio	10	—	16	34	24 ÷ 32	36	27
Ghisa grigia	—	14 ÷ 21	—	32	11 ÷ 12	6	—
Ghisa bianca	—	1 ÷ 3	—	13	—	—	—
Ghisa sferoidale perlitica	6	—	13	—	—	9	10
Ghisa sferoidale ferritica	9	—	12	—	—	—	16

Nella tab. LV sono riportati i valori di perdite per corrosione atmosferica espressi in mg/dm<sup>2</sup>/d.

Come già detto, notevole importanza agli effetti della resistenza alla corrosione ha anche la natura fisica e strutturale della crosta superficiale, generalmente più compatta degli strati interni, e la sua integrità.

La superficie di un getto fuso con struttura perlitica presenta una maggiore resistenza di un simile getto con struttura ferritica, ed in entrambi i casi tale resistenza è ridotta se le superfici sono lavorate di macchina, anche se la resistenza alla corrosione è sempre superiore a quella che può presentare l'acciaio dolce laminato.

La resistenza alla corrosione atmosferica della ghisa grigia è leggermente superiore a quella della ghisa sferoidale, come è rappresentato nella fig. 297.

L'aggiunta di piccole quantità di elementi di lega, agenti come affinanti della struttura della matrice e grafitizzanti, migliora leggermente la resistenza; l'aggiunta di grandi percentuali di elementi di lega può aumentare notevolmente tale resistenza, ma incrementa notevolmente il costo del materiale, e ciò non è generalmente conveniente, in quanto le ghise grigie per sé stesse possiedono già una buona resistenza alla corrosione atmosferica.

### Corrosione nelle acque naturali ed industriali

La buona resistenza della ghisa grigia alla corrosione nelle acque naturali è principalmente dovuta alla sua capacità di rivestirsi di uno strato protettivo di carbonato di calcio; di conseguenza le acque dure non vi esercitano alcuna azione corrosiva.

Se l'acqua è addolcita con l'usuale procedimento di scambio delle basi e l'anidride carbonica non ne è stata eliminata, essa può diventare leggermente corrosiva.

La ghisa grigia è impiegata da secoli con ottimi risultati per le condotte d'acqua, come dimostrano, ad esem-

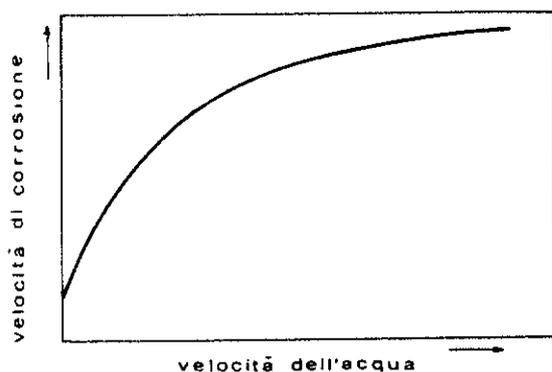


Fig. 298 - L'influenza della velocità del liquido corrosivo sulla velocità di corrosione della ghisa grigia nell'acqua di mare.

pio, le tubazioni per l'acqua installate da Luigi XIV a Versailles nel 1664 ed ancora attualmente in servizio.

L'azione corrosiva, che esercitano le acque industriali e comunque le acque usate, sulla ghisa grigia dipende soprattutto dai materiali che vi si trovano disciolti, ed è generalmente maggiore se questi hanno carattere acido piuttosto che alcalino. I cloruri presenti in acque acide ne aumentano l'aggressività. Le acque di miniera a reazione acida, che contengono in soluzione dei sali ferrosi, sono molto corrosive.

La velocità della corrosione si incrementa notevolmente, passando dai valori molto bassi dell'acqua distillata calma, a valori ben più elevati quando si tratti di immersioni alternate in acque marine.

La velocità di corrosione della ghisa grigia nell'acqua marina è relativamente modesta essendo la profondità di corrosione di 0,12 ÷ 0,25 mm/anno in acqua di mare calma e non inquinata, ed incrementandosi rapidamente con la velocità di ricambio dell'acqua in acque agitate o fluenti, come conseguenza della accresciuta presenza di ossigeno, e del fatto che i prodotti della corrosione sono distaccati ed allontanati dalla superficie metallica ad opera dell'azione dilavante dell'acqua come rappresentato nella fig. 298. Nei casi in cui, tuttavia, i prodotti della corrosione, costituiti prevalentemente da residui di grafite, possano essere trattenuti sulla superficie metallica, essi vengono a costituire una buona protezione contro il proseguire della corrosione.

Anche in questi casi, le ghise a struttura ferritica sono meno resistenti di quelle a struttura perlitica.

In particolari condizioni ambientali, tuttavia, la corrosione assume caratteristiche distruttive quando si manifesta sotto la forma della cosiddetta *corrosione grafica*.

Come già accennato, la corrosione si inizia nella matrice metallica della ghisa che passa in soluzione, lasciando sulla superficie del getto uno strato poroso costituito da grafite, residui carboniosi provenienti dalla decomposizione dei carburi, steadite, cioè eutettico di fosfuro di ferro, insolubile.

Generalmente lo strato superiore a contatto con il mezzo corrosivo, quando questi sia sufficientemente ricco di ossigeno, è costituito da ossido idrato ferrico insolubile, di colore bruno, che circonda quasi completamente la grafite, e lo strato inferiore costituito da ossido idrato ferroso solubile, così come è rappresentato nella fig. 299.

In questo caso lo strato superiore, costituito da ossido idrato ferrico insolubile e da grafite, viene a costituire un buon mezzo protettivo contro il procedere della corrosione.

Quando, invece, la corrosione si effettua in un ambiente sostanzialmente neutro e la concentrazione dell'ossigeno adiacente alla superficie metallica è abbastanza

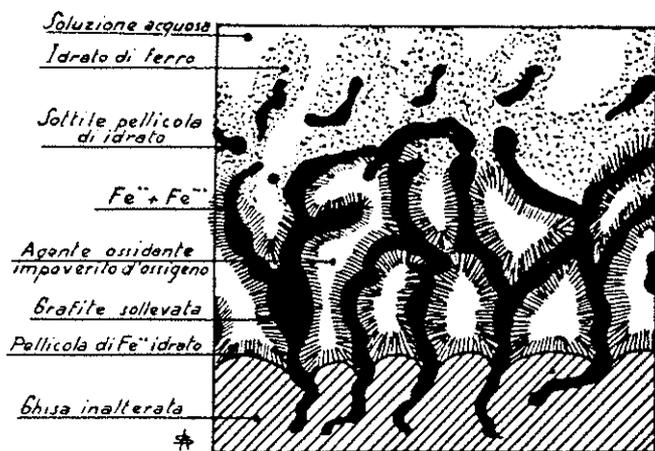


Fig. 299 - Schema del processo di arrugginimento della ghisa, secondo Roll.

bassa, non si ha l'immediata trasformazione dell'ossido idrato ferroso solubile in ossido idrato ferrico insolubile, prima che l'idrossido ferroso si sia potuto allontanare dalla superficie del getto e, di conseguenza, la precipitazione di ruggine insolubile avviene lontano dal contatto della superficie metallica, la quale, non protetta, continua a corrodersi.

In questo caso, che si presenta anche in alcuni casi di corrosione in acqua di mare, gli elementi insolubili, e non metallici, della struttura della ghisa costituiti, come detto, da grafite, silice idrata formatasi dal silicio, steadite e residui carboniosi, vengono a costituire uno scheletro spugnoso che mantiene completamente la forma e la dimensione del getto originale che, essendo stato svuotato dalla materia metallica resistente, non offre più alcuna resistenza ed è divenuto fragilissimo.

Questo tipo di *corrosione grafittica*, detto anche *addolcimento della ghisa*, o *addolcimento grafittico* si riscontra spesso negli oggetti immersi nell'acqua marina da lungo tempo, da 30 a 50 anni o più, come quelli provenienti da naufragi.

Oltre che dall'acqua di mare questi fenomeni sono stati riscontrati anche ad opera di acque fluviali, degli acidi humici dei terreni agrari, e del solfato di calcio.

L'aggiunta di elementi di lega può contribuire a meglio controllare la corrosione della ghisa nell'acqua marina. Il rame ed il cromo riducono la corrosione della ghisa. Ghise altolegate, delle quali si parlerà in un prossimo volume, come la ghisa austenitica, o la ghisa ad alto tenore di cromo, offrono un'ottima resistenza all'ac-

qua marina anche a temperature elevate, od in acque molto aerate.

### Corrosione nel terreno

La corrosione della ghisa grigia nei terreni costituisce un fenomeno complesso che ha richiesto l'esecuzione di numerosi studi diretti a determinare la durata delle tubazioni di ghisa interrate in luoghi differenti, dai quali tuttavia è praticamente impossibile ricavare dati quantitativi generali.

La velocità della corrosione nei terreni dipende dalla loro permeabilità e dalla loro conducibilità elettrica, dall'azione dovuta al contatto dei diversi materiali contenuti nei terreni e dalla concentrazione dei gas, dei sali, degli acidi e dei composti organici disciolti nelle acque sotterranee.

Generalmente i terreni aerati e ben drenati corrodono poco la ghisa grigia, al contrario i terreni argillosi ed impermeabili sono più corrosivi. In condizioni particolarmente aggressive si può verificare la corrosione perforante che può essere accelerata da un contatto irregolare con il terreno, e dalla presenza di correnti vaganti, e che può essere evitata dall'interposizione di un rivestimento isolante fra il getto ed il terreno.

Un'aggiunta di 3% di nichel rallenta notevolmente l'inizio della corrosione in terreni limitatamente drenati ed a bassa resistività elettrica.

Nel caso che la ghisa grigia sia corrosa rapidamente dal terreno, disciogliendosi la matrice metallica, si avrà un accumulo superficiale di grafite in modo particolare nei terreni contenenti cloruri e solfati.

La velocità di corrosione varia notevolmente a secondo della natura del terreno, e si può dire, in modo molto approssimativo, che su un terreno ben aerato essa può essere da 0,05 mm/anno, mentre può raggiungere 1 mm/anno in una argilla compatta impregnata d'acqua.

La microstruttura delle tubazioni di ghisa grigia non ha una grande influenza sulla resistenza alla corrosione nel terreno, tuttavia le tubazioni di ghisa colate in forme di sabbia, e pertanto caratterizzate da struttura più grossolana, si corrodono in misura maggiore rispetto alle tubazioni colate centrifugate in conchiglie che hanno una struttura più serrata. Per lo stesso motivo la ghisa con struttura perlitica si corrode di meno di quella con struttura ferritica.

Il peggioramento della resistenza alla rottura delle tubazioni di ghisa grigia non è proporzionale all'entità della corrosione, ma è notevolmente maggiore.

## LE APPLICAZIONI DELLA GHISA GRIGIA NELL'INDUSTRIA

Premesso che la ghisa grigia non è un materiale completamente incorrodibile agli agenti chimici, acidi, basici, sali, sia inorganici che organici, ed altri elementi ambientali industriali, allo stesso modo come lo sono materiali quali il platino, il piombo, gli acciai inossidabili ecc., si deve tenere presente che: nessun metallo o lega può resistere indifferentemente agli attacchi corrosivi di tutti gli agenti chimici in tutte le condizioni,

ed il prezzo elevato dei metalli ricchi e delle leghe altolegate non li rendono economicamente impiegabili in molte applicazioni industriali.

Per quanto riguarda le ghise grigie, si tratta, invece, di un materiale che trova con successo impiego nell'industria per resistere a mezzi aggressivi perché:

— A fronte di certe applicazioni esse presentano una notevole resistenza alla corrosione.

— Per altre applicazioni, anche se esse sono in un qualche modo corrodibili, il loro costo è assai più basso di quello di altri metalli o leghe, ed anche aumentando considerevolmente lo spessore del getto per aumentarne la durata, ne risulta sempre un costo competitivo.

La durata in servizio minima richiesta ad una apparecchiatura e la velocità massima di corrosione accettabili dipendono anche dalla facilità di sostituzione dell'apparecchio stesso. Quando il mezzo aggressivo lavorato corre il pericolo di essere contaminato dai prodotti di corrosione della ghisa e, quindi, non è ammessa la minima corrosione, si potrà proteggere la superficie della ghisa con rivestimenti metallici, ceramici od organici.

### Corrosione della ghisa grigia negli acidi

Le ghise grigie non legate presentano solo una debole resistenza alla corrosione degli usuali acidi minerali concentrati e mediamente concentrati, come è schematicamente rappresentato nella fig. 297 per l'acido solforico diluito. La velocità di corrosione è molto elevata nel caso dell'acido cloridrico a qualsiasi concentrazione e temperatura. Negli acidi molto diluiti, la presenza dell'aria e di altri agenti ossidanti accresce la velocità di corrosione. Per limitare la velocità di corrosione delle soluzioni acide moderatamente aerate a 0,25 mm/anno, la loro concentrazione non deve essere superiore a 0,001 N.

Alcuni acidi concentrati, quali l'acido solforico, l'acido nitrico, l'acido cromico e l'acido fosforico industriale grezzo danno luogo alla formazione di uno strato protettivo che conferisce alla ghisa una soddisfacente resistenza alla corrosione, a condizione che sia limitata la velocità di deflusso degli acidi. La ghisa grigia presenta una buona resistenza all'attacco dell'acido solforico con concentrazione, in peso, superiore al 65% perché lo strato di solfato formatosi inizialmente è insolubile nell'acido concentrato; di conseguenza, se l'acido è diluito a concentrazioni inferiori al 60%, il solfato di ferro diventa solubile e la corrosione prosegue rapidamente. L'anidride solforica libera ( $SO_3$ ) delle torri di assorbimento degli impianti di oleum, o sviluppantesi da quest'ultimo (acido solforico concentrato fumante) non accresce la velocità della corrosione, ma può dare luogo alla formazione di cricche, dovute ad un accrescimento del tenore di zolfo nelle lamelle di grafite. Lo zolfo si diffonde nella matrice ferrosa per assorbimento entro le lamelle di grafite, piuttosto che nelle interfacce fra grafite e matrice.

Un'aggiunta di antimonio superiore all'1% aumenta la resistenza alla corrosione della ghisa grigia alle soluzioni di acido solforico al 15% e di acido acetico al 10%, come è schematicamente indicato nella fig. 300.

Tuttavia, l'aggiunta abbastanza consistente di questo elemento rende necessario un aumento dello spessore minimo ammissibile del getto.

La ghisa grigia oppone una buona resistenza all'attacco dell'acido nitrico alla concentrazione 65 ÷ 70%. Per concentrazioni dal 45 al 55% si ha un attacco iniziale che successivamente si arresta, pur tuttavia è prudente adottare delle precauzioni, specie a temperatura elevata.

A temperatura moderata la ghisa grigia oppone una eccellente resistenza alle miscele nitranti di acidi con-

centrati, costituite da acido nitrico ed acido solforico con circa il 20% di acqua; in altre miscele con il 60% di acido nitrico ed il 10% di acido solforico si ha una corrosione inferiore a 0,1 mm/anno alla temperatura di 383 K (110 °C).

Le ghise grigie hanno una buona resistenza alla corrosione, provocata dall'acido cromico anche se diluito.

L'acido fosforico puro attacca le ghise grigie a qualsiasi temperatura e concentrazione, al contrario esse presentano una resistenza soddisfacente all'acido fosforico industriale grezzo che contiene alcune impurezze inibitrici quali l'arsenico.

Le ghise grigie sono normalmente impiegate nella costruzione di elementi di colonne di distillazione nella produzione dell'acido acetico e degli acidi grassi, ma le soluzioni diluite e areate degli acidi organici quali l'acetico, l'ossalico, il citrico, il lattico le corrodono con velocità tanto rapida da renderne antieconomico il loro impiego. La corrosione, provocata sulle ghise grigie da parte degli acidi organici presenti nel catrame di carbon fossile, è generalmente limitata da 0,05 a 0,25 mm/anno a 643 K (370 °C).

Come già accennato, piccole aggiunte di elementi di lega migliorano la resistenza alla corrosione della ghisa grigia, in quanto favoriscono la formazione di una struttura perlitica più fine e compatta ed una distribuzione più dispersa ed uniforme della grafite. A questo scopo, alcuni Autori consigliano, per quanto riguarda la resistenza agli acidi, delle ghise grigie non legate, un giusto rapporto fra Cc e Cg che è indicato fra il 2,5 e 3, con un carbonio totale possibilmente basso, ad esempio con un Cc = 0,95% il Cg dovrebbe essere compreso fra 2,1 e 2,6%.

Con l'aumentare del tenore di silicio fino all'1,3 ÷ 1,4% aumenta la resistenza alla corrosione acida.

Per il manganese il tenore optimum si aggirerebbe sullo 0,75%.

Il fosforo agisce favorevolmente sulla resistenza degli acidi diluiti, però danneggia la resistenza al fuoco, quindi non deve superare lo 0,2 ÷ 0,3%: lo zolfo è sempre dannoso ed il suo tenore deve essere tenuto possibilmente inferiore allo 0,07%.

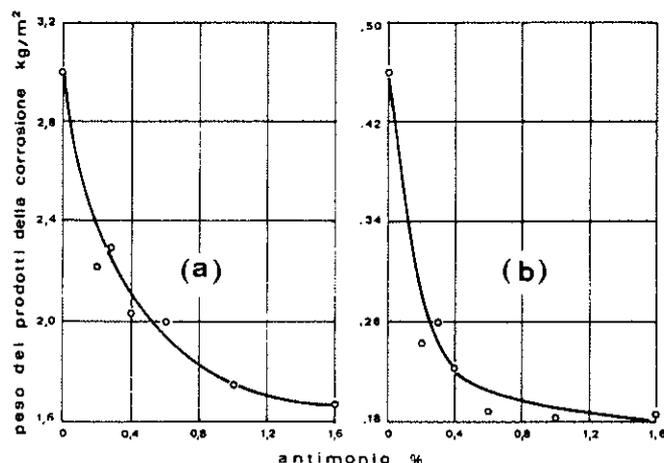


Fig. 300 - Influenza del tenore di antimonio sulla corrosione della ghisa grigia in acido solforico al 15% (a) e di acido acetico al 10% (b).

Le ghise altolegate, quali le ghise austenitiche ad alto tenore di nichel, cromo e rame, i tipi Microsilol con aggiunte di silicio ed alluminio; quelle ad elevato tenore di silicio, e le altre ad elevato tenore di cromo presentano particolari doti di resistenza alla corrosione provocata da determinati singoli acidi inorganici ed organici a temperature ambiente od a temperature elevate, ma di esse si parlerà in un prossimo volume riservato alle ghise speciali.

### Corrosione della ghisa grigia negli alcali

La resistenza delle ghise grigie alla corrosione delle soluzioni alcaline è generalmente buona ed analoga a quella degli acciai nelle medesime condizioni. Le ghise non sono minimamente corrose dalle soluzioni alcaline diluite a qualsiasi temperatura, ma le soluzioni calde di concentrazione superiore al 30% le attaccano con svolgimento di idrogeno. Perché la velocità di corrosione non superi 0,2 mm/anno, la temperatura deve essere inferiore a 353 K (80 °C) e la concentrazione al 70%. La corrosione raggiunge 1,2 fino a 2,5 mm/anno per le soluzioni bollenti di concentrazione superiore al 50%.

La soda caustica fusa alla temperatura di 923 K (650 °C) attacca la ghisa ad una velocità iniziale molto elevata, dell'ordine di 20 mm/anno, che però diminuisce rapidamente con l'uso. Per questo motivo la ghisa, avente la composizione: C = 2,90 ÷ 3,10%; Cg = 2,20 ÷ 2,60%; Si = 2,40 ÷ 2,60%; Mn = 0,3 ÷ 0,4%; P e S minimo, è adottata per la fabbricazione dei bottiglioni e delle bacinelle per la concentrazione e la fusione della soda e della potassa caustica fuse.

Queste bacinelle, fuse con adeguato spessore, hanno una durata tanto lunga che ne rende economico l'impiego malgrado il loro notevole peso; esse, inoltre, possono essere opportunamente riparate, quando vi si formino delle corrosioni perforanti localizzate e rimesse in esercizio, prolungandone notevolmente la durata.

Nella fig. 301 è schematizzata l'influenza degli elementi comuni sulla durata della ghisa grigia alle corrosioni della soda caustica fusa, e nella fig. 302 quella degli elementi di lega. Come si vede, la ghisa migliore per queste applicazioni è caratterizzata da un tenore di carbonio relativamente basso, da un tenore di silicio del 2,50%, anche l'aggiunta di un tenore dell'1 ÷ 1,3% Ni,

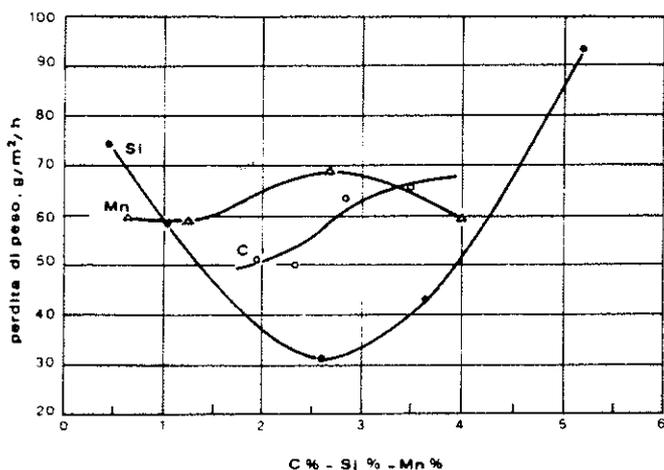


Fig. 301 - Influenza del tenore di C, Si, Mn sulla corrosione in soda caustica fusa.

o del 2 ÷ 2,5% Cr migliora sensibilmente la resistenza della ghisa alla corrosione della soda caustica fusa. L'aggiunta di cromo, tuttavia, va limitata perché dà luogo ad una struttura trotata poco elastica e troppo sensibile agli shocks termici.

Le ghise grigie sono notevolmente impiegate anche per contenere altri prodotti alcalini quali l'ammoniaca. Le ghise austenitiche ad alto tenore di nichel resistono ancora meglio alla corrosione alcalina. Non resistono, invece, le ghise ad alto tenore di silicio o di cromo.

### Corrosione delle ghise grigie nelle soluzioni saline

Molti sali e soluzioni saline non esercitano rilevante azione corrosiva sui recipienti di ghisa grigia che li contengono. I sali che si idrolizzano formando una soluzione alcalina, quali i cianuri, i silicati, i carbonati, i bicarbonati ed i solfuri, sono assai poco corrosivi per le ghise grigie. La corrosione con i sali che si idrolizzano formando soluzioni acide è molto maggiore, soprattutto con quei sali che si ossidano, e se le soluzioni sono areate.

I cloruri ed i solfati formano soluzioni neutre poco corrosive. I cloruri ed i solfati fortemente acidi, e soprattutto quelli ossidanti, come i ferrici e mercurici, e che si idrolizzano facilmente, sono molto più aggressivi. I sali ossidanti (cromati, nitriti, nitrati e permanganati), sono poco corrosivi in soluzioni neutre, ma lo sono molto nelle soluzioni acide. I sali di ammonio sono molto corrosivi, ma la velocità di corrosione è notevolmente ridotta in presenza di ammoniaca libera.

Anche a fronte dell'attacco corrosivo da parte di particolari soluzioni saline, le ghise altolegate — quali le austenitiche, quelle ad alto tenore di silicio e quelle ad alto tenore di cromo — presentano una superiore resistenza alla corrosione e sono utilizzate in casi particolari.

### Corrosione delle ghise grigie nei composti organici e solforati

Le ghise grigie trovano frequentemente impiego nella costruzione di elementi di apparecchi per la lavorazione di alcool metilico, etilico, butilico, ed amilico, e della glicerina. L'alcool diluito con acqua, in presenza di aria, può provocare una leggera corrosione.

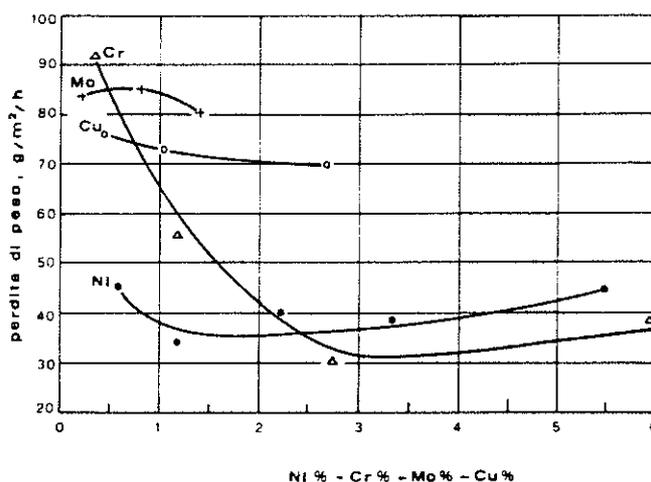


Fig. 302 - Influenza del tenore di Ni, Cr, Mo, Cu sulla corrosione in soda caustica fusa.

La glicerina conservata in serbatoi di leghe ferrose cambia leggermente di colore. L'olio minerale grezzo non corrode le ghise grigie, salvo che non abbia un elevato contenuto di zolfo. L'esperienza ha dimostrato che nelle apparecchiature degli impianti di distillazione degli oli minerali nelle quali si ha condensazione d'acqua e formazione di sali e di acidi, l'impiego della ghisa grigia è duraturo ed economico, perché per quanto vi sia una certa corrosione, questa si manifesta in modo uniforme ed il forte spessore conferito ai getti assicura all'apparecchio una lunga durata di servizio.

Le ghise grigie sono utilmente impiegate anche per la costruzione di parti di impianti di raffinazione dello zolfo che, in servizio, non oltrepassino la temperatura di 473 K (200 °C), a condizione che nello zolfo liquido non vi sia presenza di aria e nello zolfo solido non vi sia acqua, in quanto l'acqua darebbe luogo alla formazione d'acido solforico più o meno diluito, ciò che porta alla distruzione del getto in pochi mesi.

La velocità di corrosione della ghisa grigia nello zolfo liquido varia con la temperatura: essa è inferiore a 0,01 mm/anno a 403 K (130 °C), a 0,68 mm/anno a 533 K (260 °C) ed è superiore a 10 mm/anno a 723 K (450 °C).

Nell'industria le ghise grigie hanno sostituito economicamente molti altri metalli e leghe molto più costose che, tuttavia, non prestano migliore servizio e sono utilizzate in numerosissime applicazioni, anche se sono soggette ad una certa corrosione soprattutto a temperature elevate, come ad esempio negli apparecchi per la fabbricazione di bisolfuro di carbonio.

### **Corrosione delle ghise grigie nei metalli fusi**

Molto spesso le ghise grigie sono impiegate per i crogioli di fusione e le vasche di trasporto di metalli e di leghe fuse quali il piombo, lo zinco, il cadmio, il magnesio e l'alluminio, e pertanto si trovano a diretto contatto con tali metalli allo stato liquido a temperature elevate.

La durata in servizio di recipienti di ghisa grigia, impiegati come contenitori di metalli fusi, può essere ridotta dai seguenti tipi di reazioni:

- Dissoluzione uniforme della superficie solida ferrosa nel metallo allo stato di fusione.
- Formazione diretta di leghe sotto l'aspetto di films e strati di diffusione di composti intermetallici che diano luogo alla formazione di scorie.
- Penetrazione intergranulare da parte del metallo liquido.
- Corrosione ad opera degli oligoelementi contaminanti contenuti nel metallo fuso o delle sue impurezze (quali ossigeno o zolfo).
- Corrosione-erosione meccanica ad opera del fluire del metallo fuso.
- Diffusione di contatto risultante dalla saldatura del metallo agli elementi di ghisa.

Alcuni metalli hanno la proprietà di disciogliere il ferro, ma questo fenomeno è sempre tanto lento da fare considerare sempre economico l'impiego di crogioli e di vasche di ghisa grigia.

Per queste applicazioni, comunque, la temperatura, cui i contenitori sono impiegati, è di essenziale importanza, in quanto qualsiasi aumento della temperatura accelera la velocità di corrosione.

I bruschi riscaldamenti e raffreddamenti alternati sottopongono i contenitori di ghisa grigia a fenomeni di fatica termica che possono manifestarsi con cricche e rotture che ne diminuiscono la durata in esercizio.

Il comportamento della ghisa grigia dipende anche dalla temperatura e dall'ambiente atmosferico esterno ai crogioli di ghisa e dall'adozione di eventuali rivestimenti protettivi atti a prevenire i fenomeni corrosivi; infatti, rivestendo i contenitori con rivestimenti protettivi di alluminio, di silice od altri adatti, si riesce ad evitare i fenomeni di dissoluzione o di corrosione.

Anche l'adozione di ghise con elevato tenore di cromo e di molibdeno serve ad aumentare la durata di questi contenitori. Le ghise con alto tenore di alluminio sono state consigliate come particolarmente resistenti ed adatte per i contenitori di metalli fusi.

Un trattamento di preossidazione all'aria a 1.133 K (860 °C) o di calorizzazione (alluminizzazione) delle superfici esterne dei recipienti migliorano la resistenza alla corrosione della ghisa.

Le ghise grigie offrono una buona resistenza all'attacco del piombo liquido fino a 773 K (500 °C); al contrario, al di sopra di 1.173 K (900 °C) tale resistenza è quasi scomparsa; buona resistenza all'attacco del sodio e del potassio liquidi fino a circa 773 K (500 °C); buona resistenza alla corrosione del magnesio fuso fino ad una temperatura poco al di sopra della sua temperatura di fusione ed una modesta resistenza a 1.073 K (800 °C); buona resistenza all'attacco del cadmio fuso fino a 973 K (700 °C); solo limitata resistenza all'attacco dello stagno liquido a 533 K (260 °C).

La velocità di dissoluzione del ferro nello zinco è, invece, molto rapida se si supera la temperatura di 753 K (480 °C).

La ghisa grigia, fra tutte le leghe ferrose, è il materiale consigliabile per i crogioli e le vasche di mantenimento allo stato liquido dell'alluminio e delle leghe leggere.

Aggiunte dallo 0,5 al 2,5% di molibdeno possono migliorare la resistenza della ghisa grigia alla corrosione provocata dai metalli allo stato liquido, quali lo zinco, il piombo e l'alluminio.

### **La ghisa grigia nelle applicazioni dell'industria chimica**

Si elencano alcuni prodotti chimici nella cui fabbricazione la ghisa grigia — generalmente avente struttura finemente perlitica, quale ad esempio i tipi Meehanite, od avente composizione e struttura opportunamente adatte ad alcuni casi particolari — può essere vantaggiosamente impiegata:

- Acqua di mare.
- Acque piovane in genere.
- Salamoia sodica.
- Liscivia salata.
- Liscivie sodiche o potassiche.
- Acque industriali non acide.
- Sciacquature varie.
- Soluzioni saponose.
- Paste di sapone e saponi vari.
- Per la costruzione di bitte d'ancoraggio, eliche marine, tubazioni d'ogni tipo, valvole, contenitori diversi, ecc.

- Acido cianidrico gassoso ed in soluzione.
- Cianuro di potassio.
- Per la costruzione di contenitori ed apparecchiature diverse, autoclavi; facenti parte di apparecchiature per la produzione di acido cianidrico atto ad operazioni di disinfestazione.
- Acido solforico diluito ed a concentrazioni diverse sia a caldo che a freddo.
- Miscele di acido solforico e nitrico per nitratura di composti organici.
- Solfato ferroso.
- Solfato d'alluminio.
- Solfato d'ammonio.
- Solfato acido di calcio.
- Solfato acido di magnesio.
- Solfato di magnesio.
- Solfato di sodio.
- Solfito di sodio.
- Solfato di potassio.
- Solfuro di sodio.
- Iposolfito di sodio.
- Idrogeno solforato.
- Per la costruzione di autoclavi per nitratura, di elementi di torri di assorbimento, di vasche di concentrazione per acidi solforici di ricupero dalle operazioni di nitratura mediante evaporazione a caldo dell'acqua di diluizione, di bacinelle per solfato, di agitatori, valvole ed apparecchi diversi.
- Soluzioni alcaline diverse.
- Ammoniaca e soluzioni.
- Soluzioni di soda e di potassa caustica a qualsiasi concentrazione e temperatura.
- Soda caustica e potassa caustica fuse.
- Soluzioni di carbonato sodico o potassico.
- Soluzione di acido carbonico.
- Acqua o latte di calce.
- Per la costruzione di bottiglioni e bacinelle di concentrazione e di fusione dei prodotti anidri, per tubazioni e valvole, agitatori, ecc.
- Cloruro di ammonio.
- Cloruro di bario.
- Bicloruro di mercurio.
- Cloruro di calcio.
- Clorato di calcio.
- Ipoclorito di calcio.
- Tetracloruro di carbonio.
- Cloruro di sodio.
- Cloruro di zinco.
- Cloruro di zinco acido.
- Nitrato di ammonio.
- Nitrato di bario.
- Oli minerali grezzi in genere.
- Prodotti di distillazione degli oli minerali quali benzine, oli lubrificanti, metano, butano, eptano, ecc.
- Gas liquidi in genere.
- Catrami di carbone fossile.
- Oli di catrame e prodotti della loro distillazione, quali benzolo, toluolo, creosato, ecc.
- Oli e prodotti resinosi, qual'è l'olio di trementina.
- Oli vegetali in genere, sia di spremuta che di estrazione con solventi.
- Olio di lino.

Per la lavorazione di prodotti alimentari, quali:

- Sughì di diffusione zuccherina nella lavorazione delle barbabietole.

- Melassa.
- Soluzione zuccherina.
- Lievito di birra.
- Acido citrico.
- Acidi grassi in genere.

Altri prodotti organici, quali:

- Pasta di legno.
- Cellulosa.
- Amido.
- Colle vegetali ed animali.
- Soluzioni di nitro-cellulosa.

Inoltre, molte altre sostanze chimiche e naturali.

### **Parti di macchinario interessanti l'industria chimica suscettibili di essere costruite in ghisa grigia perlitica**

Si ritiene utile indicare nel seguente elenco le parti di macchinario e di impianti che possono essere costruite in ghisa grigia in alcuni processi industriali:

<i>Prodotto industriale</i>	<i>Macchinario</i>
Zucchero di barbabietola	Apparecchi vari
Butanolo	Pompe
Cloruro di calcio	Pompe Valvole ed accessori Evaporatori Recipienti di concentrazione
Arseniato di calcio	Apparecchi per spegnere la calce Apparecchi di essiccazione Apparecchi per macinare
Zucchero raffinato	Apparecchi di dissoluzione Pompe Filtri meccanici Evaporatori Tubature Storte
Bisolfuro di carbonio	Pompe Condensatori Valvole ed accessori
Tetracloruro di carbonio	Valvole Storte ed apparecchi di reazione Condensatori Pompe Tubature
Acetato di etile	Pompe
Soda caustica elettrolitica e cloruro	Salamoia Pompe Valvole ed accessori Recipienti di caustificazione
Sale di glauber	Pompe
Zolfo	Viti senza fine per trasportare zolfo nel forno
Iodio	Pompe Valvole ed accessori

Olio di lino	Cilindri macinatori: ghisa raffreddata in conchiglia Tini Filtri		Vasche per il trattamento della liscivia Serbatoi degli acidi grassi Pompe per gli acidi grassi
Metanolo	Tubatura Pompe Valvole ed accessori Compressori	Cromato di sodio e bicromato	Evaporatori Cristallizzatori Apparecchi per tritare e macinare Pompe Tubature Valvole ed accessori
Acido nitrico	Dal nitrato di sodio ed acido solforico: Storte		Tini di cristallizzazione Valvole Bacinelle di fusione Evaporatori Vasche Vasche di solubilizzazione Pompe Valvole ed accessori
Nafrolina	Pompe Tubature Tini	Solfuro di sodio	Vasche di solubilizzazione Pompe Valvole ed accessori
Solfato di potassio	Tubature Pompe Evaporatori Filtri		Vasche di solubilizzazione Pompe Valvole ed accessori
Caucciù	Laminatoi di combinazione e di decomposizione (cilindri di ghisa in conchiglia) Rulli di ghisa raffreddata in conchiglia Rulli per macinare Rulli per raffinare ed essiccare	Nitrato di sodio	Pompe Tubature Pompe Valvole ed accessori
Materie plastiche	Impastatrici Mescolatori Calandre coppie cilindri in ghisa temprata in conchiglia	Acido tannico ed altri estratti Fosfato trisodico	Apparecchi di essiccazione Cristallizzatori
Sale	Evaporatori o tini Pompe	Seta artificiale (viscosa)	Apparecchi di bagnatura Zangole Presse per filtri Pompe Macchine per filatura
Acido stearico	Presse a filtri Evaporatori Apparecchi di distillazione Presse	Resine di legno e rementina Bianco di biacca	Pompe Valvole ed accessori Cilindri Tubature Venrole
Acido solforico	Pompe per acido solforico Pompe per lo zolfo Refrigeranti Assorbitori = 98 ÷ 100% solamente Valvole Vasche di concentrazione degli acidi provenienti dalle nitrazioni	Acido carbonico SO <sub>2</sub> e SO <sub>3</sub> HCl	Tini e coperchi per distillatori Valvole Generatore
Sapone	Agitatori Filtro Evaporatori di salamoia		In genere anche per molti altri ambienti corrosivi: recipienti, pale mescolatrici, apparecchi per stirare la stoffa, apparecchiature varie, torri di frazionamento, tubature, camicie e pistoni per pompe.

## BIBLIOGRAFIA

- Gray and Ductile Iron Casting Handbook - Gray and Ductile Iron Founders Society Inc., Cleveland (USA).
- Manuel des Fontes Moulées - Centre d'Information des Fontes Moulées. Editions des Industries de la Fonderie, Paris 16, 12 Avenue Raphael.
- G. COLA - Scelta delle leghe calcoidiche per pompe navali - C.S.M., Roma, 55.512, R 3/70.
- E. MORTARA, F. CAMUNCOLI - Contributo allo studio della corrosione in acqua di mare e petrolio grezzo della ghisa sferoidale all'1,5% di Ni - La Fonderia Italiana, Vol. XIV, n. 5, 1965, pp. 181-193.
- W. A. WESLEY, H. R. COPSON, F. L. LAQUE - Some consequences of graphitic corrosion of cast iron - Research Division The International Nickel Co. Inc., Metals and Alloys, dicembre 1936, pp. 1-7.
- A. PRATI - La coppia galvanica alluminio-grafite nella corrosione delle leghe leggere - Istituto Sperimentale Metalli Leggeri, Novara, pp. 639-643.
- G. SOMIGLI - Resistenza delle ghise al calore ed alla corrosione - La Fonderia Italiana, n. 4, 1952, pp. 122-135.
- R. I. HIGGINS - Environmental Factors Conducive to Graphitic Corrosion - BCIRA, Foundry Atmospheres Section, Report n. 535.
- J. VIPON DAVIES - Graphitic Corrosion of Cast Iron - The Iron Age, 13 ottobre 1921, pp. 942-943.
- A. REGE', V. RIVA - Sulla corrosione della ghisa nell'acido solforico, nitrico, cloridrico e nella soda caustica - Atti 2° Congresso Nazionale A.I.M., maggio 1948, pp. 81-100.

## **Saldatura, brasatura e taglio termico**

- PREMESSA
- OPPORTUNITA' E NECESSITA' DI SALDATURA DELLA GHISA
- SCOPI DEI DEPOSITI DI SALDATURA
- CLASSIFICAZIONE E DEFINIZIONE DEI DIFFERENTI PROCEDIMENTI DI GIUNZIONE A CALDO APPLICABILI ALLA GHISA
- CICLI TERMICI IMPOSTI DALL'OPERAZIONE DI SALDATURA
- FATTORI CONDIZIONANTI L'OPERAZIONE DI SALDATURA DELLA GHISA
- POROSITA'
- SALDATURA IN REGIME CALDO
- SALDATURA A FREDDO DELLA GHISA
- SALDATURA DELLA GHISA GRIGIA CON I PROCEDIMENTI DI SALDATURA ALL'ARCO DI RECENTE SVILUPPO
- PROCEDIMENTI DI SALDATURA CHE IMPIEGANO COME PRINCIPALE SORGENTE DI CALORE UN METALLO D'APPORTO PORTATO A FUSIONE A TEMPERATURA ELEVATA
- ALTRI PROCEDIMENTI DI SALDATURA
- BRASATURA DELLA GHISA GRIGIA
- TAGLIO TERMICO DELLA GHISA GRIGIA
- CONCLUSIONE
- BIBLIOGRAFIA



## PREMESSA

La ghisa, ed in particolare la ghisa grigia con grafite lamellare, è considerata un materiale non saldabile, nello stretto significato che si dà a questo termine riferito agli acciai dolci; ma con opportuni accorgimenti e precauzioni anche la ghisa grigia può venire saldata.

Le notevoli difficoltà, che si oppongono ad una facile saldatura della ghisa, sono dovute all'elevato tenore di carbonio della matrice metallica ed alla presenza di carbonio libero sotto forma di grafite lamellare.

È noto che la presenza di grafite libera è causa di:

- Discontinuità della matrice metallica più o meno accentuata, a seconda della quantità e dimensioni delle particelle di grafite.
- Concentrazione degli sforzi in corrispondenza delle estremità assottigliate delle lamelle di grafite che dà origine ad effetti di intaglio che possono provocare la lacerazione della matrice metallica.
- Addensamento delle linee di tensione in talune zone della matrice metallica, compresa fra le particelle di grafite, variabile a seconda della loro distribuzione.

Per questi motivi la ghisa grigia con grafite lamellare non possiede limite di snervamento, non si lascia deformare plasticamente a freddo, presenta un trascurabile allungamento; da ciò dipende l'incapacità di assorbire eventuali tensioni, comunque generantisi; essa non riesce, cioè a differenza dell'acciaio, a deformarsi plastificando punte di tensione che possono incrementarsi rapidamente, fino a superare la resistenza del materiale, provocandone la rottura.

Nei getti di ghisa grigia sono quasi sempre presenti delle tensioni interne, specie quando i getti sono di forma complicata, con sezioni e spessori differenti; quando, poi, a queste tensioni originarie si sommano le tensioni provocate da gradienti termici, ed in generale la distribuzione non uniforme di temperature fra una limitata zona localizzata, fortemente riscaldata, come accade durante l'operazione di saldatura, e le zone ad essa adiacenti che rimangono fredde, possono verificarsi nel getto dei guasti maggiori di quelli che si volevano riparare.

## OPPORTUNITÀ E NECESSITÀ DI SALDATURA DELLA GHISA

La saldatura della ghisa grigia può rivestire 4 differenti aspetti:

- La riparazione per conto dell'utilizzatore di parti di macchine e meccanismi comunque rotti.
- Il riempimento, presso l'officina di lavorazione meccanica, di soffiature, porosità, coni di ritiro, o comunque di difetti di compattezza constatati nel corso della lavorazione meccanica.
- La riparazione di getti risultati con difetti di fonderia presso il produttore.
- L'utilizzazione di parti di ghisa per costruzioni miste.

Si può esaminare, ora, ciascuno di questi punti:

- 1 - La riparazione di parti di ghisa rotte ha lo scopo di ripristinare la funzionalità di una qualsiasi parte meccanica per ricondurla nuovamente alle prestazioni originarie.

In questo caso è sufficiente conferire di nuovo alla parte le originarie caratteristiche di dimensioni, forma e resistenza, senza nessuna altra esigenza. Sarà, perciò, possibile scegliere il sistema di saldatura ritenuto più appropriato, ed impiegare quale materiale di apporto quello considerato più adatto ad ottenere

il risultato prefissato, prescindendo dalla natura del materiale stesso e soprattutto dal suo colore che, anche se del tutto differente da quello della ghisa, non può comportare alcun inconveniente, in quanto, trattandosi di una parte di macchina già usata, sarà sufficiente ottenerne il ripristino, anche se la riparazione resterà nettamente visibile.

- 2 - Il riempimento di difetti, constatati su getti di macchine in corso di lavorazione, può essere consentito solo quando siano consenzienti l'officina di lavorazione ed il cliente. In questo caso il giunto saldato non solo deve possedere caratteristiche meccaniche, per quanto possibile, analoghe a quelle della ghisa base saldata, ma, poiché i difetti si constatano al momento della lavorazione meccanica, è da presumere che la superficie lavorata debba rimanere in vista (ad esempio i prismi e le slitte di una macchina utensile) e perciò sarà anche necessario che il colore della parte riparata, e conseguentemente del materiale di apporto, sia pressoché identico a quello della ghisa base, così da rendere il meno evidente possibile la zona saldata ad un esame oculare superficiale.

- 3 - Generalmente il fonditore rinuncia a riparare i getti che gli siano risultati difettosi; in qualche caso, tuttavia, ed in particolare quando trattasi di getti di grossa mole e di costo elevato, si dovrà esaminare l'opportunità di una riparazione, facendola precedere da un calcolo di convenienza, ed in caso positivo scegliendo il procedimento di riparazione ritenuto più adatto.
- 4 - L'impiego di getti di ghisa, quali elementi da incorporare direttamente entro complessi saldati per realizzare strutture miste con parti di metallo diverso, può verificarsi quando:

- il disegno è tale che la struttura non può essere realizzata economicamente in un solo getto;
- le esigenze tecniche impongono una eterogeneità di caratteristiche della struttura che solo l'associazione della ghisa ad un altro metallo o lega metallica permette di ottenere.

Il primo caso è molto raro; il secondo è più interessante; tuttavia, date le difficoltà di giunzione, è raramente adottato, ma per quanto l'assemblaggio di getti di ghisa con altri possa essere delicato e costoso, vi sono degli specifici casi, quali certe strutture tubolari, nelle quali la costruzione mista con elementi di ghisa grigia è facile e conveniente.

## SCOPI DEI DEPOSITI DI SALDATURA

Gli scopi dei depositi di saldatura possono essere 3 e precisamente:

- Ottenere giunzioni meccanicamente resistenti.
- Ottenere riporti di saldatura di riempimento nei quali non sia necessaria una particolare resistenza.
- Realizzare superfici dure atte a resistere a sollecitazioni di usura per abrasione, per urti o per rotolamento con materiali duri.

Per il primo caso è necessario che il materiale d'apporto possieda caratteristiche meccaniche analoghe a quel-

le della ghisa base, che il procedimento di saldatura non modifichi le caratteristiche del materiale base in prossimità della saldatura, e che la lavorabilità meccanica della zona saldata sia sufficientemente buona.

Per il secondo caso, trattandosi generalmente di riporti per riempimenti, non ha tanta importanza l'ottenimento di caratteristiche meccaniche ottimali, quanto una buona lavorabilità meccanica ed un colore simile a quello del materiale base.

Per il terzo caso si dovranno adottare dei materiali di apporto adatti ad ottenere lo scopo indicato.

## CLASSIFICAZIONE E DEFINIZIONE DEI DIFFERENTI PROCEDIMENTI DI GIUNZIONE A CALDO APPLICABILI ALLA GHISA

Si possono distinguere due grandi procedimenti di assemblaggio a caldo:

- La saldatura autogena o saldatura per fusione.
- La brasatura o giunzione senza fusione.

I giunti con essi ottenuti si chiamano semplicemente saldature e brasature, anche perché l'attuale orientamento porta a sopprimere l'aggettivo qualificativo *autogena*.

Con il nome di *saldatura* si intende qualsiasi procedimento mediante il quale si ottenga la più intima interpenetrazione e diffusione dei bordi delle parti metalliche da congiungere, applicando il calore, la pressione, o entrambi questi agenti, sia per collegamento diretto (cioè senza materiale di apporto), sia con l'intervento di un materiale di collegamento (metallo di apporto). Il procedimento di saldatura si suddivide in numerosi sotto-classi definite dalla natura delle sorgenti di energia termica impiegate per portare i bordi metallici da congiungere alla temperatura di giunzione che può corrispondere o no a quella di fusione.

Per quanto riguarda i procedimenti applicabili alla ghisa, si potrà distinguere in:

- Saldatura alla fiamma.
- Saldatura all'arco elettrico.

- Saldatura elettrica a resistenza.
- Saldatura alluminotermica.
- Saldatura per scorrimento di metallo fuso.

Le saldature possono essere omogenee od eterogenee, nel primo caso si cerca di realizzare l'identità sia della composizione che delle caratteristiche delle parti da congiungere e del metallo d'apporto; nel secondo caso si trascura volutamente questa identità, sia che le parti da congiungere siano di materiali differenti, sia che siano dello stesso materiale, adottando comunque un materiale d'apporto di natura differente.

A loro volta i procedimenti di *brasatura* si distinguono in:

- Brasatura dolce, che impiega quali materiali di apporto e di giunzione, leghe a punto di fusione inferiore a 673 K (400 °C) (leghe a base di stagno).
- Brasatura forte o saldabrasatura, che impiega invece leghe a punto di fusione superiore a 673 K (400 °C) (quali bronzi, ottoni, rame).

Con il nome di brasatura si intende un procedimento di giunzione sempre eterogenea che si realizza mediante l'intervento di un sottilissimo velo, di spessore capillare, costituito da una lega metallica con punto di fusione più

basso dei metalli da congiungere, che è fatto scorrere allo stato liquido fra i minimi interspazi esistenti fra i lembi metallici da assemblare.

Le caratteristiche della brasatura possono riassumersi brevemente in quanto segue:

- Il metallo d'apporto si stende sulle superfici da congiungere *bagnandole*, e la sua solidificazione effettua la giunzione.
- La brasatura si effettua sia in maniera simultanea su tutte le zone del giunto, sia in maniera progressiva, ma per zone molto larghe, portando le superfici da assemblare a temperatura superiore al punto di fusione del metallo d'apporto ed inferiore a quello della parte metallica più fusibile da assemblare.
- Le superfici da assemblare devono essere molto ben preparate e pulite ed avvicinate in modo da lasciare fra esse solo uno spazio capillare.

— È quasi sempre necessario l'intervento di un fondente, atto a disciogliere gli ossidi metallici e le impurezze superficiali.

— I bordi congiunti conservano la loro forma originaria e la giunzione fra i materiali base e la lega d'apporto può avvenire per la formazione di una lega di transizione, o semplicemente a seguito di fenomeni di adesione per compenetrazione capillare e di assorbimento.

— Mentre il giunto ottenuto mediante saldatura non può essere sciolto se non distruggendolo con taglio meccanico od alla fiamma, quello ottenuto per brasatura può essere sciolto semplicemente riportandolo alla temperatura di fusione del materiale di apporto, e ciò senza provocare deformazioni delle parti congiunte.

## CICLI TERMICI IMPOSTI DALL'OPERAZIONE DI SALDATURA

È opportuno non perdere di vista due caratteristiche particolari della ghisa grigia, entrambe connesse alla presenza della grafite libera nel metallo, che condizionano la saldatura:

- Inattitudine del metallo a sopportare sensibili allungamenti dovuti alle dilatazioni termiche, cui conseguono delle tensioni troppo elevate.
- Al contrario, possibilità di sopportare degli shocks termici severi localizzati.

Ne conseguono due tecnologie opposte di esecuzione:

- Saldatura in regime caldo (od a caldo): caratterizzata da forte concentrazione di calore, ed esecuzione ra-

pidata, adottando tuttavia tutte le precauzioni atte ad evitare il formarsi di tensioni interne e deformazioni eccessive, ed a garantire le condizioni più favorevoli del successivo raffreddamento. È questo il procedimento con il quale si pone l'obbiettivo di realizzare la migliore omogeneità possibile del giunto.

- Saldatura in regime freddo (od a freddo): caratterizza un procedimento con il quale si cerca di conferire la minore concentrazione possibile di calore, operando per shocks termici localizzati e sufficientemente distanziati nel tempo per non provocare il riscaldamento completo del getto.

## FATTORI CONDIZIONANTI L'OPERAZIONE DI SALDATURA DELLA GHISA

I fattori condizionanti l'operazione di saldatura della ghisa sono essenzialmente due:

- Un fattore metallurgico (qualità della giunzione).
- Un fattore meccanico (contrazioni o deformazioni durante e dopo l'operazione di saldatura).

### Fattore metallurgico

La presenza di un elevato tenore di carbonio, per la maggior parte presente sotto forma di lamelle di grafite, condiziona l'operazione di saldatura.

Le lamelle di grafite conferiscono alla ghisa alcune caratteristiche preziose quali: un buon comportamento allo sfregamento, una grande capacità di smorzamento delle vibrazioni, una notevole insensibilità all'intaglio, una assoluta resistenza alla deformazione, ed in particolare un'ottima lavorabilità alla macchina utensile dovuta sia

alle qualità lubrificanti della grafite che alla frantumabilità del truciolo.

Per conservare queste caratteristiche è necessario che il ciclo termico di saldatura sia seguito da un raffreddamento sufficientemente lento, in quanto quando la ghisa subisce un raffreddamento rapido, partendo dallo stato liquido, il carbonio non ha il tempo di separarsi come grafite, ma, in tutto od in parte, rimane allo stato di carbonio combinato (cementite o ledeburite) e dà luogo ad una struttura bianca o trotata, molto dura, fragile e non lavorabile, che interessa non solamente il cordone di saldatura, ma anche una zona vicina, e cioè la zona in cui il materiale base è giunto a fusione e si è poi raffreddato rapidamente. Di conseguenza il giunto risulta fragile e non lavorabile.

In realtà in un giunto di saldatura su ghisa si distinguono sempre 3 zone (fig. 303):

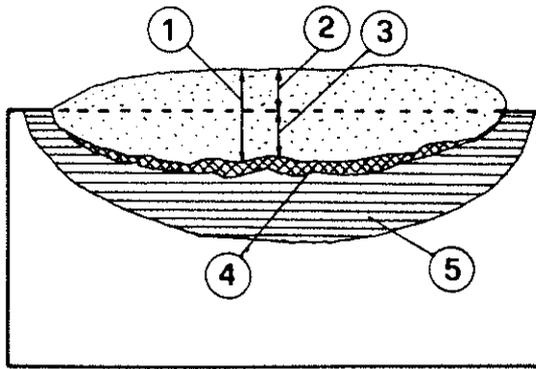


Fig. 303 - Schizzo di una sezione trasversale delle varie zone di una saldatura rappresentante il cordone depositato in posizione piana su una superficie di ghisa.  
 1 - Metallo depositato per saldatura.  
 2 - Sovrametallo proveniente dal materiale d'apporto.  
 3 - Penetrazione della saldatura nel metallo di base.  
 4 - Zona fusa del metallo di base.  
 5 - Zona termicamente influenzata.

a) la zona di fusione: costituita dal materiale base che è stato portato allo stato liquido e si è mescolato, all'atto della fusione, con il materiale d'apporto impiegato. Vi sarà cioè, se si impiega un elettrodo di acciaio dolce, tutta una susseguenza graduale di composizioni: da 0,1 a 3,5% C e da 0,3 a 2% Si o più, con la comparsa delle caratteristiche delle ghise bianche a basso tenore di carbonio, le quali, come chiaramente indicato anche dal diagramma di Maurer, sono caratterizzate da una struttura cementitica o ledeburitica dura e fragile, in maniera continua, come rappresentato in fig. 304, a partire dalla ghisa base ed interessando tutta la zona di transizione, nella quale il materiale di apporto è penetrato e si è mescolato con il materiale base, e nell'attigua zona termicamente influenzata nella quale il raffreddamento della saldatura, dalle temperature superiori a 1.173 K (900 °C), è avvenuto con notevole velocità. La formazione della grafite nella ghisa è condizionata dalla presenza di un adeguato tenore di carbonio e di silicio, oltre che da una lenta velocità di raffreddamento, e poiché il silicio si ossida facilmente durante i procedimenti di saldatura, i metalli di apporto dovranno contenerne un eccesso, per compensare quella parte che ne viene ossidata. Altri elementi di lega possono avere influenza sulla formazione della cementite, e pertanto gli elementi formanti carburi

dovranno essere presenti in limiti ridottissimi per evitare la formazione di strutture fragili;

b) la zona di fusione parziale e la zona termicamente influenzata: nella zona di fusione parziale si ha la mescolanza di una piccola parte del materiale base. La fusione parte generalmente dalle interfacce tra le lamelle di grafite e la parte metallica, ed è in questa zona che, a seguito del raffreddamento rapido, specie nella saldatura ad arco, si ha la formazione dei carburi.

La zona termicamente influenzata è quella porzione immediatamente vicina alla zona di fusione parziale, che non è riscaldata a temperatura sufficientemente elevata da arrivare a fusione. La temperatura che vi si raggiunge è tuttavia sufficientemente elevata da superare il punto critico (linea  $S_1 - K_1$  del diagramma Ferro-Carbonio) cioè superiore a 1.173 K (900 °C) così da trasformare la struttura metallica nella fase ferro  $\gamma$  (austenitica). Alle temperature di poco superiori al punto critico le lamelle di grafite non subiscono particolari alterazioni; a temperature più elevate, ed ove il materiale sia mantenuto per un tempo apprezzabile nel campo delle temperature di austenitizzazione, anche le lamelle di grafite si disciolgono, almeno parzialmente, ed il carbonio si diffonde nell'austenite. Successivamente, a seguito del rapido raffreddamento si avrà facilmente la formazione di strutture martensitiche, quali quelle rappresentate nella fig. 304 della zona di contatto, e nella fig. 305 della zona termicamente influenzata immediatamente adiacente alla prima.

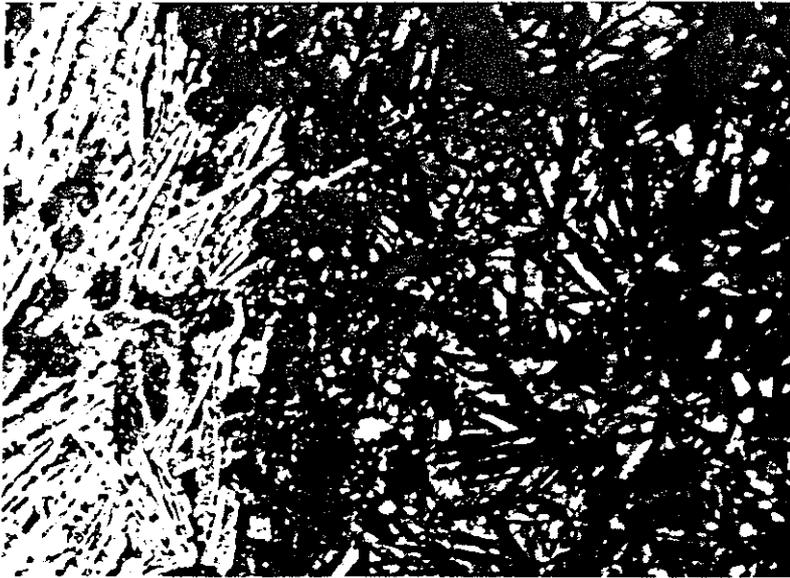
In conclusione, la composizione della zona fusa è determinata dal tipo di materiale d'apporto e dall'entità della sua diffusione e diluizione del materiale base. In determinate condizioni, e particolarmente quando si usa come materiale d'apporto dell'acciaio dolce, la zona fusa acquista una temprabilità sufficiente a produrre strutture martensitiche all'atto del raffreddamento, come quelle che si vedono nelle figg. 304 e 305. Quando, invece, si usano materiali d'apporto non ferrosi (nichel e sue leghe, leghe di rame) si evita generalmente la formazione di martensite e si limita la formazione della struttura cementitica o ledeburitica ad una zona assai ristretta.

### Fattore meccanico

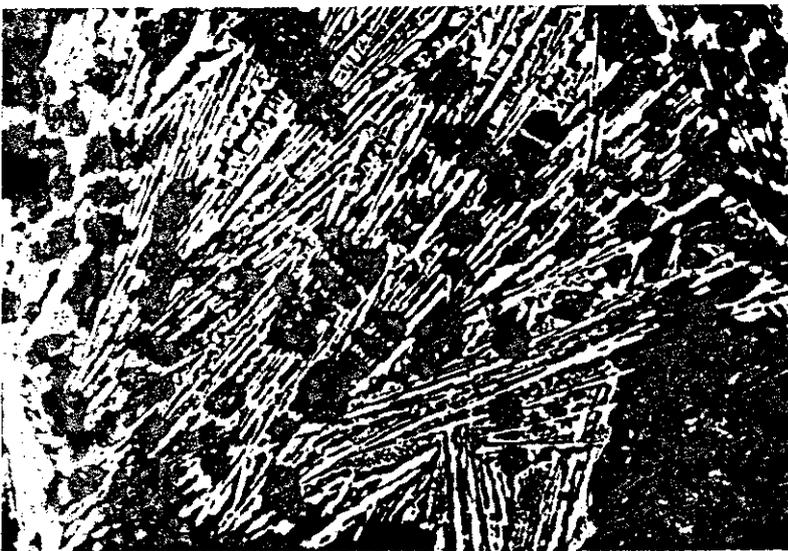
Le elevate velocità di riscaldamento e di raffreddamento, tipiche dei procedimenti di saldatura, inducono nei getti di ghisa delle tensioni di notevole elevatezza, anche perché generalmente i getti di ghisa sono di forme complesse e presentano elevata rigidità.

Durante la fase di riscaldamento il materiale base circondante la saldatura si dilata rapidamente. La conseguente contrazione meccanica del getto, sotto la spinta degli sforzi di dilatazione della zona di saldatura, può produrre la distorsione del metallo in questa zona. In fase di raffreddamento la sezione di questa zona non può ritornare alle sue dimensioni originali e ne deriveranno elevatissime tensioni interne con conseguenti deformazioni e più facilmente rotture. Anche le contrazioni dovute alla solidificazione del materiale d'apporto contribuiscono alla formazione di queste tensioni.

È, pertanto, evidente che materiali poco duttili quali sono le ghise grigie, non possono sopportare grandi deformazioni per dilatazione, ed è perciò necessario agire



a)

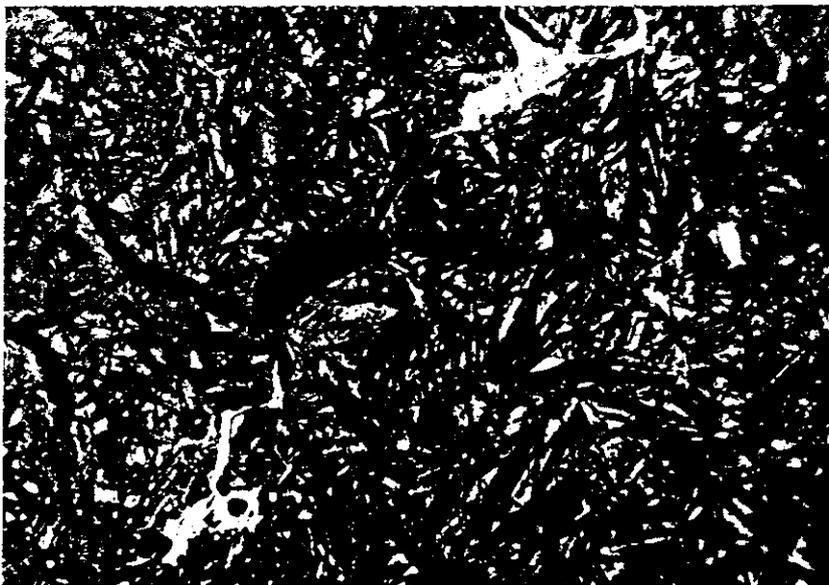


b)

Attacco Nital

x 600

Fig. 304 - a) Zona di contatto fra ghisa base e materiale d'apporto.  
 b) Zona di contatto fra ghisa base e materiale d'apporto.  
 — Carburi nella zona di fusione.  
 — Martensite nell'adiacente zona termicamente influenzata.



Attacco Nital

x 600

Fig. 305 - Zona della ghisa base termicamente influenzata - Martensite.

con particolare precauzione per evitare che durante l'operazione di saldatura si producano delle incrinature o delle rotture sia durante la fase di riscaldamento che in fase di raffreddamento.

Il sistema più semplice e sicuro, atto a ridurre il pericolo di rotture e distorsioni nell'esecuzione del procedimento di saldatura in regime caldo, consiste nel ridurre le velocità di riscaldamento e di raffreddamento durante il procedimento di saldatura, unitamente alla scelta delle più adatte temperature di preriscaldamento dei getti, di controllo delle temperature durante l'operazione di saldatura, e nell'adozione di adatti trattamenti termici dopo la saldatura. Lo studio delle tensioni d'origine termica

dimostra che se qualsiasi ripartizione termica intensa in qualsiasi direzione è dannosa, una ripartizione termica lineare, a gradiente costante, estesa a tutta la sezione del getto, si effettua senza formazioni di tensioni. Ciò si effettua in pratica mediante un riscaldamento lento da una sorgente di calore diffusa che avvolga tutto il getto; allo stesso modo come si procede, per esempio quando il vetraio preriscalda lentamente, fino a rammollimento, un particolare di vetro per poi saldarlo.

È pertanto tenendo conto di questo concetto che si prendono le opportune precauzioni per effettuare la saldatura della ghisa grigia con grafite lamellare in regime caldo.

## POROSITÀ

Un altro difetto, che può verificarsi durante la saldatura ed in modo particolare entro le zone che sono arrivate allo stato di fusione, è la presenza di soffiature e porosità dovute alla presenza di gas che sono rimasti intrappolati nel metallo. Questi gas possono essere originati dall'atmosfera che circonda i materiali in fusione, dalla decomposizione di idrocarburi o di altri gas impiegati; da umidità dei materiali d'apporto o dei fondenti impiegati; dalla presenza di umidità, oli od altri idrocarburi sulle superfici che partecipano alla saldatura, o da reazioni fra il materiale d'apporto ed ossidi come la ruggine, od altri materiali come sabbia, scorie, ecc.

Particolari precauzioni nell'esecuzione della saldatura possono ridurre al minimo la formazione di soffiature nel cordone di saldatura. Inoltre, la porosità può essere ridotta al minimo se si mantiene allo stato liquido il materiale nella zona e nel momento di saldatura, per un tempo sufficiente a permettere lo svolgimento e l'uscita dei gas dal cordone di saldatura prima della sua solidificazione.

La presenza di questi ed altri difetti nella saldatura non deve essere considerata come una conseguenza del procedimento per sé stesso, ma piuttosto come il risultato di una tecnica d'esecuzione maldestra.

## SALDATURA IN REGIME CALDO

### Preriscaldamento dei getti da saldare

Il preriscaldamento dei getti di ghisa grigia che devono essere saldati è operazione indispensabile quando si vogliono prevenire i difetti di cui si è detto.

Una più lenta velocità di raffreddamento della zona di fusione, durante la solidificazione, dà tempo al materiale di raggiungere una struttura più equilibrata, evitando la formazione di carburi, e così pure una più lenta velocità di raffreddamento dell'intero getto fino alle temperature più basse riduce la formazione di martensite.

In conseguenza, anche le tensioni dovute alla dilatazione delle zone di saldatura risultano ridotte quando si adotti una velocità di raffreddamento lenta.

Il preriscaldamento può essere localizzato o totale su tutto il getto. Quando la sezione che deve essere saldata è irrigidita in una sola direzione, e gli elementi che la irrigidiscono sono chiaramente identificabili, è sufficiente preriscaldare solo questi elementi in modo da farli dilatare pressappoco di una entità corrispondente all'area che dovrà essere saldata (fig. 306 a).

Quando, invece, l'area che dovrà essere saldata è irrigidita in ogni direzione, sarà opportuno effettuare il preriscaldamento di tutto il getto (fig. 306 b).

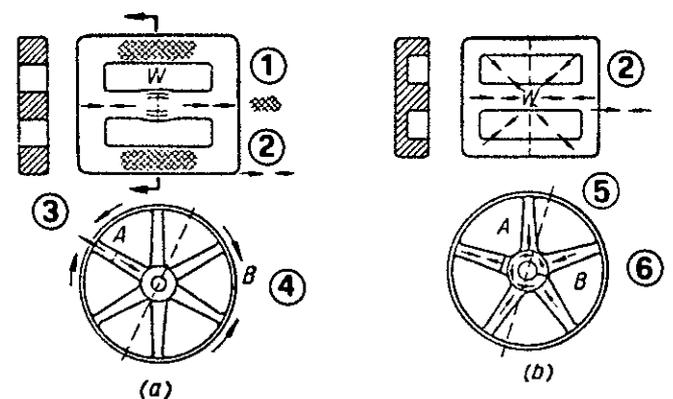


Fig. 306 - Schema di saldatura di getti di ghisa.

- (a) Con riscaldamento localizzato.
- (b) Con riscaldamento totale del getto.
- W - Saldatura.
- 1 - Calore fornito dalla saldatura.
- 2 - Direzione delle tensioni.
- 3 - Saldatura del raggio A.
- 4 - Saldatura del cerchio B.
- 5 - Saldatura del mozzo di base A.
- 6 - Saldatura del mozzo B.

La temperatura di preriscaldamento dipende dalla forma e dalle caratteristiche strutturali del getto, dal procedimento di saldatura impiegato e dalla qualità del materiale d'apporto adottato. Getti molto pesanti e grandi assorbono grandi quantità di calore, per conduzione, dalla zona di saldatura alimentandone la velocità di raffreddamento, perciò la temperatura di preriscaldamento deve essere tanto maggiore quanto maggiore saranno la grandezza ed il peso del getto, tenendo anche presente che getti di forma complicata caratterizzati da pareti di differente sezione e conseguentemente da cicli di raffreddamento non uniformi, necessitano di un preriscaldamento a temperatura più elevata, anche per prevenire l'insorgere di tensioni interne. Anche la sezione del cordone di saldatura determina la scelta della temperatura di preriscaldamento, perché cordoni lunghi e di considerevole spessore sono maggiormente suscettibili alle rotture in quanto, nella fase di contrazione, possono sviluppare tensioni eccessive.

In conclusione, è sempre più opportuno operare con cordoni corti così da evitare una eccessiva accumulazione di tensioni interne. La temperatura di preriscaldamento dovrà intendersi anche come temperatura di lavoro da mantenersi costante per tutto il tempo dell'operazione di saldatura.

Nel caso di getti semplici con spessori uniformi delle pareti è sufficiente preriscaldare a  $673 \div 773$  K ( $400 \div 500$  °C), per getti più complicati e più grandi la temperatura dovrà essere aumentata a  $833 \div 873$  K ( $560 \div 600$  °C).

La velocità di riscaldamento ammissibile dipende dal peso, dalla struttura e dallo spessore delle pareti del getto. In linea di massima si possono dare le seguenti indicazioni:

- Getti semplici e piccoli o di media grandezza con spessori di parete uniformi:  $373 \div 393$  K/h ( $100 \div 120$  °C/h).
- Getti piccoli o di media grandezza, ma con spessori di pareti differenti:  $353 \div 373$  K/h o meno ( $80 \div 100$  °C/h).
- Getti di ghisa pesanti e complicati:  $323 \div 353$  K/h ( $50 \div 80$  °C/h).

Ad operazione di saldatura terminata, quando il getto è anche leggermente raffreddato, esso è nuovamente riscaldato fino a circa  $823$  K ( $550$  °C) allo scopo di distenderne le tensioni interne insorte durante l'operazione, e si mantiene a regime per circa  $1 \div 2$  h. Anche il raffreddamento successivo deve avvenire lentamente ed in

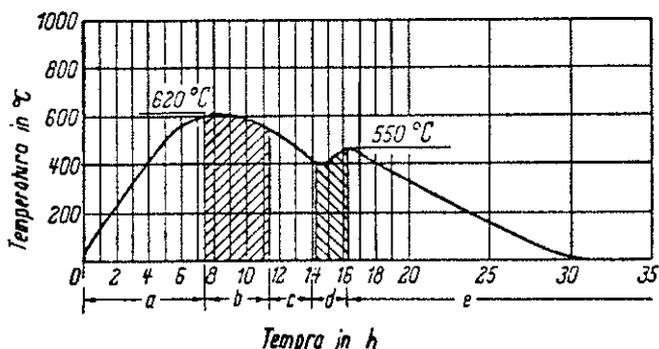


Fig. 307 - Ciclo termico della saldatura a caldo della ghisa.

- a - Tempo di preriscaldamento.
- b - Durata della saldatura.
- c - Tempo d'attesa.
- d - Tempo del riscaldamento di distensione.
- e - Tempo di raffreddamento a temperatura ambiente.

luogo chiuso senza circolazione d'aria, per evitare l'insorgere di nuove tensioni nella zona interessata dalla saldatura.

La fig. 307 rappresenta l'andamento della temperatura desiderabile per la saldatura di grossi getti di ghisa.

Con il preriscaldamento totale del getto a ciclo termico adatto, come indicato, non solo si evita l'insorgere di tensioni che potrebbero portare a rotture, ma si ottiene anche un giunto saldato perfettamente lavorabile all'utensile, sano ed a tenuta stagna, caratterizzato dalla struttura di una buona ghisa grigia con segregazioni di grafite ben formate.

### Mezzi e procedimenti per il preriscaldamento

Il preriscaldamento localizzato, che si effettua solo su piccoli getti, può essere fatto mediante cannelli a fiamma, bruciatori o torce a gas, elementi riscaldanti a resistenza elettrica, opportunamente posizionati, o mediante focolare a carbone di legna od a carbone coke. In questi ultimi casi l'area, che dovrà essere preriscaldata, è inscatolata, mediante pezzi di lamiera, lasciando un'apertura per l'accesso dell'aria; questa scatola è riempita con carbone di legna o coke che sono accesi.

Anche nel preriscaldamento localizzato si deve avere cura che ogni parte del getto sia riscaldata e successivamente raffreddata uniformemente e soprattutto gradualmente.

Il preriscaldamento totale del getto, qualsiasi siano le sue dimensioni, è effettuato in forni provvisori od in forni in muratura, fosse od altri dispositivi, a seconda della disponibilità, a condizione che detti mezzi siano tali da consentire l'esecuzione dell'operazione senza richiedere l'estrazione del getto, ma con lo stesso getto contenuto nel forno.

Termoelementi con coppie termoelettriche in cromel-alumel con pirometro galvanometrico indicatore a dispositivo potenziometrico registratore consentono una

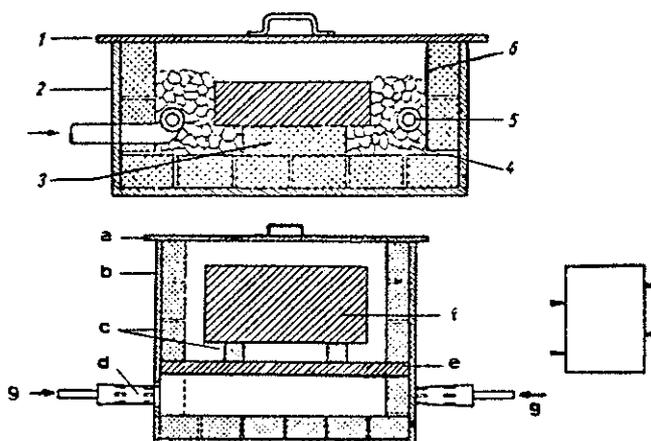


Fig. 308 - Forno per il preriscaldamento dei getti nella saldatura a caldo della ghisa.

- 1 - Coperchio di lamiera.
- 2 - Cassa di lamiera.
- 3 - Rivestimento refrattario in mattoni di chamotte.
- 4 - Coke.
- 5 - Anello cassa d'aria.
- 6 - Getto da riparare.
- a - Coperchio di lamiera.
- b - Cassa di lamiera.
- c - Rivestimento refrattario in mattoni di chamotte.
- d - Bruciatori.
- e - Piastra di ghisa.
- f - Getto da riparare.
- g - Gas.

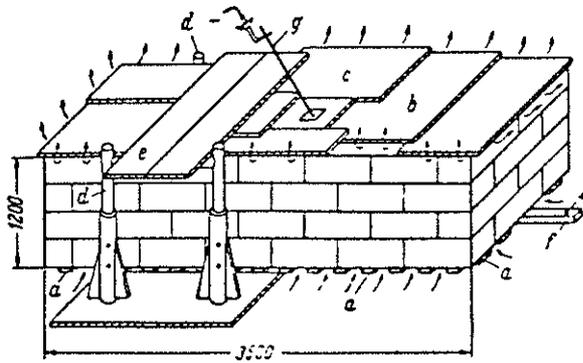


Fig. 309 - Forno in mattoni ed accessori per la saldatura a caldo della ghisa. Sistemazione per la saldatura di un getto posizionato sul suolo della fonderia.

- a - Traversini piatti di ghisa.
- b - Copertura.
- c - Placche singole di copertura.
- d - Supporti tubolari.
- e - Lamiere di acciaio ricoperte di amianto.
- f - Collegamento della corrente elettrica.
- g - Pinza portaelettrodo.

sorveglianza dell'andamento termico. Tale controllo può essere effettuato anche mediante leghe fusibili a temperature variabili da 323 a 873 K ( $50 \div 600^\circ\text{C}$ ), di 50 in  $50^\circ\text{C}$ , che si pongono a contatto della superficie del getto, e che si trovano in commercio sotto forma di nastro, placchette e matite.

Quali combustibili si possono impiegare: preferibilmente carbone di legna che richiede poca aria per l'accensione, dà una temperatura dolce e regolare, non produce fumo o fuliggine e non dà luogo ad alcun deposito suscettibile di danneggiare la saldatura, e le cui ceneri sono facilmente allontanabili e non danno luogo a incrostazioni; in alternativa possono essere usati: carbone coke, coke di lignite, olio combustibile, propano, metano, gas illuminante o gas di gasogeno.

Le figg. 308 e 309 danno una rappresentazione schematica dei contenitori in lamiera e dei forni provvisori adottati allo scopo.

La fig. 310 rappresenta uno di tali forni adottati per la riparazione mediante saldatura della superficie di una incastellatura per motore Diesel marino a 6 cilindri della potenza di 125.034,66 W (170 CV).

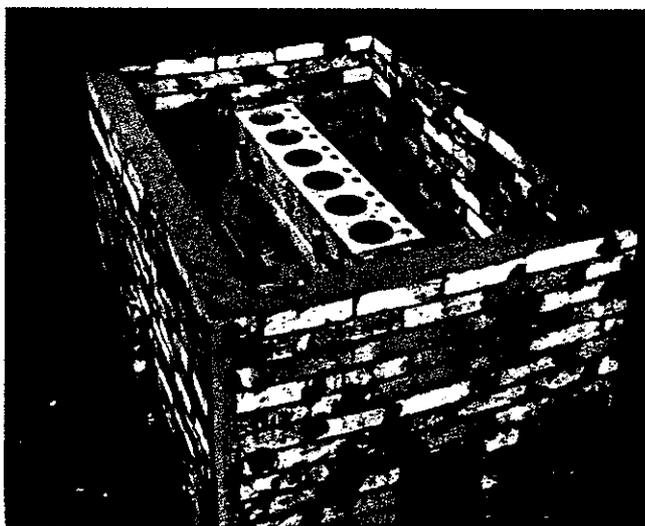


Fig. 310 - Tipo di forno adottato per la saldatura.

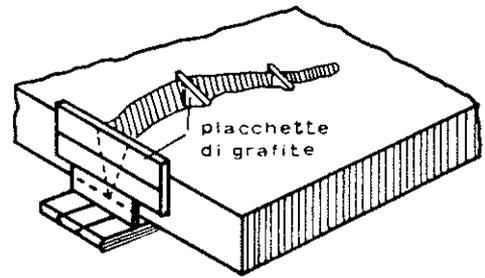


Fig. 311 - Formatura ricostruttiva di una cavità mediante saldatura in sezioni isolate.

### Preparazione della zona da congiungere

La zona difettosa, rotta o mancante del getto che deve essere riparato mediante saldatura, è preventivamente pulita a mezzo di utensili ad aria compressa od elettrici, come scalpelli, mole od altri, così da mettere a nudo il metallo sano, eliminando gli spigoli e le disuguaglianze di spessore. Le cricche sono arrestate mediante un foro all'estremità, le cricche piccole superficiali sono asportate prima o durante la saldatura. Le cricche grosse e passanti sono aperte mediante lavorazione meccanica, fino a ricavare un cianfrino a forma di V o di U, e si sottopone alla radice inferiore una lastrina di grafite sintetica (carbone di storta): la zona da saldare è eventualmente ripartita in varie sezioni mediante queste placchette di grafite (fig. 311).

Per quanto riguarda il cianfrino nel caso dei giunti di testa, deve essere più largo di quello consueto per la saldatura di parti di acciaio. Per il cianfrino a V l'angolo deve essere compreso fra  $80$  e  $90^\circ$  e di  $30^\circ$  per i cianfrini ad U con un raggio di base da 4,8 a 6,4 mm. Allo scopo di diminuire le deformazioni, nel caso della saldatura di grossi spessori, è raccomandabile operare con giunti ad X, con giunti a doppia U così come rappresentato nella fig. 312.

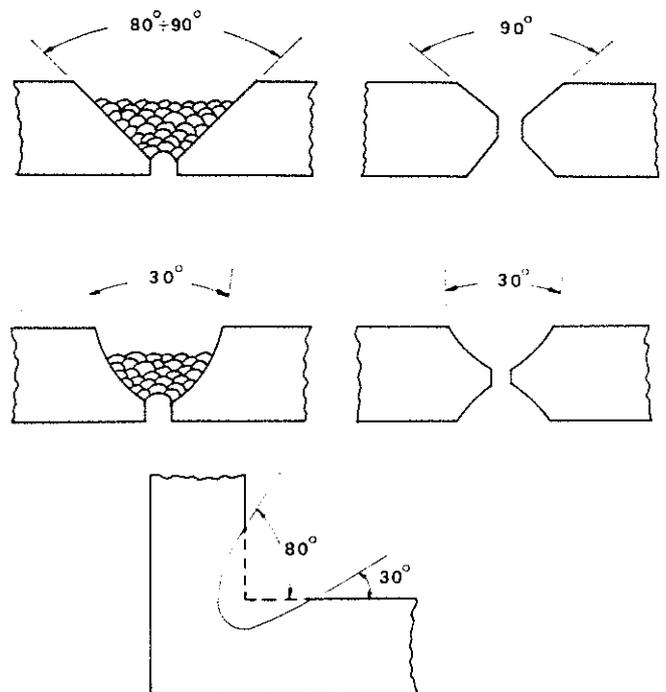


Fig. 312 - Saldatura di grossi spessori congiunti ad X e congiunti a doppia U.

## Tecnica di deposizione del materiale d'apporto

Per l'esecuzione del procedimento di saldatura a caldo si possono adottare entrambi i sistemi: saldatura alla fiamma od a gas e saldatura elettrica ad arco.

Per la saldatura alla fiamma ossiacetilenica, il cui campo di impiego si limita agli spessori uguali o minori di 30 mm, sono impiegati gli usuali cannelli ossiacetilenici alimentati con acetilene ed ossigeno.

Per la saldatura ad arco è necessario disporre di fonti di energia elettrica molto abbondanti, perché, come si dirà più avanti, quando si operi con elettrodi di grande diametro necessitano intensità di corrente fino a 1.200 A. Con questo sistema è preferibile operare con corrente continua sia da generatore che raddrizzata, che può essere erogata anche da più unità da 300, 500 o 600 A collegate in parallelo.

Quando si devono impiegare elettrodi costituiti da bacchette di materiale d'apporto molto grosse, la conduzione della corrente non è effettuata usando le solite pinze portaelettrodi (fig. 313), con le quali, normalmente, si impiegano elettrodi rivestiti, ma si usano grosse bacchette nude, un lato delle quali deve essere lavorato con il metallo ben pulito, per garantire il migliore contatto elettrico per l'adduzione della corrente attraverso un conduttore di grafite (fig. 314).

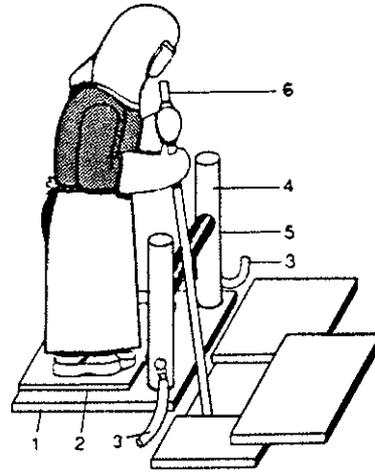


Fig. 314 - Saldatura ad arco a caldo con conduttore di corrente di grafite.  
1 - Piastra di acciaio di base.  
2 - Piastra isolante.  
3 - Cavo.  
4 - Conduttori di grafite, agenti come supporti.  
5 - Grafite di contatto.  
6 - Materiale d'apporto.

## Procedimenti di saldatura con gas

Nella saldatura a gas, il getto è fuso localmente ed il cordone di saldatura è depositato mediante l'apporto di metallo di una bacchetta apposita che è fusa nella fiamma, generalmente ottenuta bruciando gas acetilene in ossigeno puro in un attrezzo ben noto detto cannello ossiacetilenico. La fiamma ossiacetilenica è caratterizzata dalla più elevata temperatura ottenibile nella combustione dei gas più comuni che raggiunge sulla punta del dardo i 3.373 K (3.100 °C), ma tuttavia non si avvicina a quella dell'arco elettrico.

La fiamma ossiacetilenica ha due vantaggi sulle fiamme che impiegano come combustibili altri idrocarburi meno costosi:

- Come conseguenza della formazione endotermica dell'acetilene, la velocità di propagazione della combustione è molto elevata, e la concentrazione della reazione di combustione avviene in uno spazio molto limitato, conferendo la temperatura più elevata alla punta del dardo.
- Per il medesimo motivo, la combustione totale è suddivisa in due fasi nettamente distinte: una prima combustione a volumi uguali di acetilene e di ossigeno secondo la reazione:  $\text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2 \text{N}_2 = \text{CO}_2 + \text{N}_2 + 284,58 \text{ MJ (68.000 Cal)}$  e  $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2 \text{N}_2 = \text{H}_2\text{O} + 2 \text{N}_2 + 200,88 \text{ MJ (48.000 Cal)}$ . La prima fase è concentrata nel *dardo* della fiamma, la seconda costituisce il *pennacchio*. L'erogazione *neutra* (con volumi uguali di acetilene ed ossigeno) si ottiene iniziando con un eccesso di acetilene (fiamma luminosa) e riducendo gradualmente questo gas fino ad ottenere un dardo con contorni netti. Generalmente si usa la fiamma neutra; tuttavia, in certi casi si può scegliere od una fiamma ossidante (in eccesso di ossigeno) od una leggermente riducente (in eccesso di acetilene).

La fiamma riducente, e leggermente carburante, che corrisponde al momento della regolazione quando il dardo, prima di assumere l'aspetto a contorni netti, presenta una punta leggermente floscia; aspetto che si nota facilmente e che è facile da conservare per tutta la durata

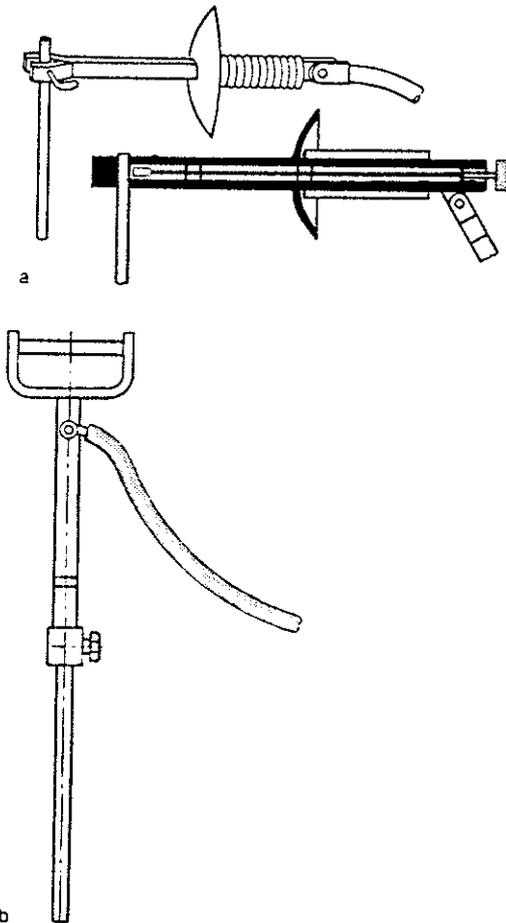


Fig. 313 - Pinze portaelettrodi di vario tipo per la saldatura elettrica ad arco a caldo della ghisa.  
a - Pinze portaelettrodi per elevate intensità di corrente.  
b - Pinza portaelettrodo per lavoro di saldatura pesante con elettrodi di grande diametro.

del lavoro, è preferibile per evitare qualsiasi ossidazione sia della ghisa base che del metallo d'apporto fusi, in quanto, in caso diverso, si avrà una certa ossidazione del metallo fuso, quando la fiamma è mossa in su e in giù sopra la zona da saldare, con calo dei tenori di silicio, di manganese e di carbonio nel materiale depositato nel cordone di saldatura e formazione degli ossidi di silicio e di manganese, entrambi caratterizzati da punto di fusione molto più elevato di quello del metallo fuso e perciò facilmente causa della formazione di inclusioni non metalliche, costituite da scorie, nel cordone di saldatura, con conseguente decadimento delle caratteristiche di resistenza.

Benché la regione più calda della fiamma sia la punta del dardo, durante la saldatura, questa è mantenuta ad una distanza di  $0,5 \div 1$  cm dalla superficie del bagno (a seconda della potenza della fiamma), facendo bene attenzione di non immergere il dardo, né di lasciarlo in contatto con il bagno, e ciò per evitare un surriscaldamento ed evitare un eccessivo calo del silicio.

Per garantire il preriscaldamento necessario, specie quando si operi con preriscaldamento localizzato, è opportuno iniziare con un consumo di acetilene piuttosto elevato di  $140$  l/h/mm di spessore del getto da saldare; ma dato che la temperatura del getto si alza nel corso della saldatura, la fiamma sarà progressivamente ridotta durante il lavoro. Quando, invece, il getto sia già stato preriscaldato al rosso e sia mantenuto a detta temperatura a mezzo di una sorgente di calore ausiliaria, come nel caso del preriscaldamento preventivo e completo, non è necessario iniziare con un maggiore consumo di acetilene.

Nella tab. LVI sono elencati alcuni dati di riferimento per la saldatura a gas.

La saldatura autogena può essere utilizzata solo per la ghisa grigia e per la ghisa sferoidale. I getti di ghisa malleabile a cuore bianco od a cuore nero, che sono ottenuti mediante un trattamento termico, sarebbero strutturalmente alterati da questo procedimento di saldatura. Terminata la saldatura, quando la temperatura del getto è scesa al disotto di  $923$  K ( $650$  °C), è opportuno riscaldare nuovamente il getto fino ad una temperatura di  $923$  K ( $650$  °C) e mantenerlo per  $1 \div 2$  h, quindi lasciarlo raffreddare tanto lentamente che tutte le sue parti, anche se di spessori molto differenti, si trovino sempre ad una stessa temperatura. In generale la velocità di raffreddamento non dovrebbe superare i  $293 \div 298$  K/h ( $20 \div 25$  °C/h) fino alla temperatura di  $673$  K ( $400$  °C). Al di sotto di questa temperatura si può raffreddare più rapidamente.

Tabella LVI - Dati relativi alle saldature autogene a gas.

Spessore trasversale del getto da saldare mm	Punta del cannello No.	Diametro della bacchetta di materiale di apporto mm	Consumo di acetilene l/h
fino a 6	5	4	$425 \div 850$
da 6 a 9	da 6 a 9	da 5 a 6	850
da 9 a 14	da 9 a 14	da 6 a 8	1.250
da 14 a 20	da 9 a 14	da 6 a 8	1.850
da 20 a 30	da 14 a 20	da 8 a 10	2.400
oltre 30	da 20 a 30	da 10 a 15	3.000

Quando per qualsiasi motivo non sia possibile effettuare questo trattamento termico di distensione, il getto, terminata l'operazione di saldatura autogena a caldo, deve essere lasciato raffreddare lentamente nel forno, ricoprendolo con coperture di amianto, cenere od altri materiali isolanti.

#### Materiali d'apporto per la saldatura autogena a gas

Quali materiali di apporto per la saldatura a gas sono impiegate bacchette di ghisa nude colate in sabbia, di sezione rotonda o quadra, dette di ghisa siliciosa, in quanto la loro composizione è caratterizzata da tenori di carbonio e di silicio piuttosto elevati e ciò sia per compensare le perdite per ossidazione di tali elementi durante la saldatura sia per assicurare una struttura grigia, esente da zone dure temprate, nel materiale del giunto saldato. La composizione generalmente adottata, prescritta dalla Norma tedesca DIN 2301, è la seguente:  $Ct = 3 \div 3,6\%$ ;  $Si \geq 3\%$ ;  $Mn = 0,5 \div 0,8\%$ ;  $P \leq 0,6\%$ ;  $S \leq 0,1\%$ .

Generalmente si trovano in commercio bacchette di ghisa aventi la seguente composizione:  $Cr = 3,20 \div 3,70\%$ ;  $Si = 3,5 \div 4\%$ ;  $Mn = 0,5 \div 0,8\%$ ;  $P = 0,5 \div 0,7\%$ ;  $S \leq 0,1\%$ .

Una aggiunta di  $0,5 \div 1\%$  Cu, elemento perlitizzante, favorisce la formazione di una struttura perlitico-ferritica, con segregazione di grafite molto fine, caratterizzata da ottime caratteristiche di resistenza.

#### Flusso o fondente per la saldatura autogena a gas

Come è stato accennato, all'atto della fusione della ghisa base o della bacchetta d'apporto nel pozzetto di saldatura, una piccola parte del silicio e del manganese si ossidano a contatto della fiamma e dell'atmosfera, formando ossidi aventi un punto di fusione elevato che non fondono alla temperatura del metallo e che resterebbero imprigionati nel materiale del cordone di saldatura come inclusioni non metalliche con conseguente degradazione della resistenza.

È, pertanto, necessario operare con l'apporto di flussi fondenti atti a combinarsi a caldo con detti ossidi, formando composti a basso punto di fusione che possono scorificare allo stato liquido e che, per il loro peso specifico minore di quello del metallo liquido, si raccolgano alla superficie del cordone e lascino il metallo depositato sano e compatto.

Il fondente appropriato per la saldatura della ghisa a caldo deve possedere le seguenti caratteristiche: un punto di fusione ed una temperatura reattiva di  $323$  a  $373$  K ( $50 \div 100$  °C) inferiore alla temperatura di fusione della ghisa; un peso specifico, allo stato liquido, molto inferiore a quello del metallo fuso; non deve dare luogo alla formazione di schiuma o di spruzzi a contatto della bacchetta o del materiale base arroventati; una buona capacità solvente per gli ossidi; i suoi residui devono essere facilmente allontanabili dal materiale depositato; deve mantenere le sue caratteristiche attive anche dopo lungo tempo.

Questi flussi sono generalmente costituiti da miscele in parti pressoché uguali di carbonato sodico  $Na_2CO_3$  e bicarbonato sodico  $NaHCO_3$  allo stato anidro, cui può essere aggiunto borace od acido borico sempre anidri, cioè calcinati, per allontanarne l'acqua di cristallizzazione, ed eventualmente piccole quantità di quarzo o di ossido

di ferro in polvere. In altri tipi di fondente, alla consueta base di carbonato e bicarbonato sodico in parti uguali, possono essere aggiunte una piccola percentuale di solfato ammonico, o di cloruro di sodio, e maggiore percentuale fino ad un massimo del 15% di polvere di ferro.

Ottimi fondenti approntati da ditte specializzate si trovano comunemente in commercio.

### Saldatura elettrica ad arco

Il procedimento di saldatura all'arco elettrico è di questo secolo, e non poteva essere diversamente, dato che le applicazioni dell'energia elettrica erano assai limitate alla fine dello scorso secolo.

La saldatura all'arco elettrico applicata all'acciaio prende origine dagli studi di Slavianoff (russo, 1898) e di Kiehlberg (svedese, 1907), ma si è sviluppata solo a partire dal 1925 quando comparvero sul mercato generatori di energia elettrica rotanti e statici (le saldatrici) pratici ed economici.

Dati i risultati assai favorevoli riscontrati nella saldatura dell'acciaio, venne naturale l'idea di applicare questo procedimento alla saldatura della ghisa, impiegando elettrodi fatti da una bacchetta di ghisa grigia della medesima composizione delle bacchette impiegate nella saldatura autogena a gas, rivestita con un rivestimento adatto a conferire le consuete caratteristiche elettriche all'elettrodo, tale cioè da assicurare l'accensione dell'arco e la sua stabilità, e funzionante; allo stato fuso, da flusso fondente e scorificante.

L'arco elettrico della lunghezza da 3 a 6 mm che scocca fra l'estremità dell'elettrodo, fissato alla pinza portaelettrodo (fig. 313) isolata tenuta a mano, ed il getto da saldare sviluppa una temperatura di circa 4.273 K (4.000 °C) e più che supera quella della fiamma a gas.

Il calore sviluppato dall'arco è però localizzato in una area circoscritta al punto d'impatto dell'arco ove avviene la fusione sia dell'elettrodo che di una limitata area del materiale base del pezzo da riparare. Alla temperatura di 4.273 K (4.000 °C) dell'arco anche gli ossidi metallici sono disciolti nel bagno di fusione dal quale sono poi eliminati, in quanto si combinano con i materiali del rivestimento dell'elettrodo, scorificando alla superficie del cordone di saldatura. L'agitazione del bagno fuso portato ad alta temperatura, che è dovuta alle reazioni che avvengono fra gli ossidi metallici ed il carbonio della ghisa con sviluppo di gas, aiuta lo sviluppo e l'eliminazione dei gas.

L'impiego di elettrodi costituiti da bacchette di ghisa *nude* non rivestite (fig. 314) è possibile esclusivamente saldando su getto preriscaldato al rosso mediante una sorgente di calore ausiliaria come già detto in precedenza, senza di che non si otterrebbe né l'accensione né la stabilità dell'arco.

Il metallo del giunto è costituito da una mescolanza del metallo d'apporto dell'elettrodo e del metallo base del getto da riparare, e la sua composizione è influenzata dal grado di diluizione con il metallo di base, vale a dire dalla penetrazione dell'arco nel metallo base.

Questo procedimento è applicabile in ogni localizzazione e, se applicato a freddo, può essere utilizzato per piccole riparazioni anche su getti non smontati dalle macchine ed in sito. Esso permette di saldare non solamente

in piano orizzontale, ma in tutte le posizioni e cioè in verticale ed in sopratesta perché il metallo è depositato molto velocemente e non rimane allo stato liquido per un tempo apprezzabile.

Dal momento che con questo procedimento si riscalda solamente un'area molto limitata del getto, si può limitare il preriscaldamento dello stesso quando ciò serve solo a contrastare le tensioni dovute a dilatazione e contrazione, in modo particolare poi quando si impiegano elettrodi non ferrosi, come si dirà più avanti.

In definitiva, questo procedimento presenta tutti i vantaggi e gli inconvenienti della saldatura ossiacetilenica a caldo con l'aggiunta di esigenze maggiori per ciò che concerne la qualità e la preparazione e, per il saldatore esperto, una minore versatilità e rapidità di esecuzione; tuttavia, la saldatura ad arco della ghisa in regime caldo, con elettrodi di ghisa di composizione chimica simile a quella del getto da saldare, ma con un tenore maggiorato di silicio, permette di ottenere, usando precauzioni analoghe a quelle adottate per la saldatura ossiacetilenica, riparazioni e giunzioni dotate delle medesime caratteristiche del metallo base del getto.

### Preparazione della zona da congiungere

Si effettua nello stesso modo già descritto precedentemente, foggiando i bordi da congiungere con cianfrini a V o ad U come rappresentato nella fig. 312, con la sola differenza che, in questo caso, l'angolo del cianfrino dovrà essere maggiorato per assicurare una più comoda manualità dell'elettrodo e la rimozione della scoria e degli altri materiali aderenti dalla superficie del cordone.

Per quanto riguarda le temperature e le modalità del preriscaldamento e del raffreddamento prima, durante e dopo l'operazione di saldatura, valgono le indicazioni date precedentemente per la saldatura a gas.

### Materiali d'apporto per la saldatura elettrica ad arco a caldo della ghisa

Gli elettrodi sono generalmente di due tipi:

— Bacchette di ghisa aventi la medesima composizione di quelle indicate per la saldatura ossiacetilenica, rivestite con un rivestimento supercompressso applicato per estrusione alla pressa, come per gli elettrodi ad anima di acciaio comunemente impiegati per la saldatura degli acciai, il quale ha la molteplice funzione di facilitare l'accensione dell'arco e di renderlo stabile sia in corrente continua che corrente alternata, di fornire al bagno metallico, durante la fusione, eventuali elementi di lega, e di agire come materiale fondente e scorificante per l'eliminazione degli ossidi metallici e dei gas del bagno, infine di ricoprire il cordone di saldatura di uno strato di scoria calda ed isolante che ostacola un raffreddamento troppo rapido della saldatura. Tale rivestimento può essere a base di grafite ed altri costituenti fondenti e fluidificanti, od a base di carbonato e fluoruro di calcio a reazione basica e desolforante. Gli elettrodi rivestiti hanno la lunghezza standard di 45 cm nei diversi diametri dell'anima di ghisa da 4 mm a 12 mm.

Talvolta, per ottenere una maggiore produttività oraria in kg/h si impiegano anche elettrodi aventi diametro di 18 e 20 mm sia nudi che rivestiti (fig. 314) e di lunghezza maggiore.

- Elettrodi cosiddetti sintetici caratterizzati da un'anima di filo di acciaio dolce per elettrodi per saldatura dell'acciaio, e da un rivestimento contenente materiali carburanti e leghe apportanti silicio atti a combinarsi con l'acciaio della bacchetta all'atto della fusione nell'arco, depositando una ghisa grigia la cui composizione può variare, a seconda della proporzione dei diversi materiali costituenti il rivestimento, del suo spessore e delle condizioni di saldatura entro i seguenti limiti:  $Ct = 2,65 \div 3,10\%$ ;  $Cg = 2,10 \div 2,54\%$ ;  $Si = 3,7 \div 4,5\%$ ;  $Mn = 0,45 \div 0,55\%$ ;  $P = \text{tracce} \div 0,07\%$ ;  $S = 0,03 \div 0,12\%$ .
- L'elettrodo può anche essere scelto di composizione tale da accompagnarsi perfettamente alla composizione della ghisa base del getto, e ciò è consigliabile per le ghise speciali ad alta resistenza, per quelle nelle quali è richiesta una elevata resistenza all'usura, per le ghise speciali medio od alto-legate, come ad esempio le ghise austenitiche. Generalmente il metallo depositato, trattandosi in ogni caso di ghisa, è molto fluido e scorrevole, ricoperto da un leggero strato di scoria, che può essere poi facilmente rimosso con la saldatura calda o fredda.

In condizioni normali, su ghisa grigia, la saldatura ha una struttura fine di durezza compresa fra 170 e 220 Brinell.

Le figg. 315 e 316 rappresentano (x 100) la struttura nella zona di transizione fra ghisa base e materiale d'apporto, senza attacco e con attacco Nital, di una saldatura eseguita con elettrodo di tipo sintetico. Le figg. 317 e 318 rappresentano, ad ingrandimento di 200, la struttura della zona di transizione fra ghisa e materiale d'apporto di altre saldature dello stesso tipo, infine la fig. 319 rappresenta, ad ingrandimento di 200, la struttura del materiale d'apporto.

Come si può constatare, tali strutture sono caratteristicamente di ghisa grigia con segregazioni grafitiche ben formate anche nel materiale d'apporto.

Nella tab. LVII sono riassunte le caratteristiche della corrente elettrica da adottare per la saldatura ad arco con i suddetti tipi di elettrodi consigliabili per la saldatura sugli spessori indicati.

La corrente elettrica è erogata da una comune saldatrice ad arco sia a corrente alternata che a corrente continua. Nel caso dei trasformatori di corrente che erogano corrente alternata, occorre tenere presente che la curva di tensione è cadente e, pertanto, poiché generalmente dette macchine sono dimensionate per una tensione secondaria di non più di  $50 \div 60$  V, questa, ad arco acceso, si potrà ridurre a  $25 \div 30$  V, insufficienti per garantire la stabilità dell'arco. In tal caso è necessario impiegare un trasformatore per saldatura che abbia non meno di 85 V al secondario, adatto anche per la fusione di elettrodi con rivestimento basico, oppure una saldatrice a tensione costante, o meglio ancora preferire la corrente continua, sia da generatore rotante che raddrizzata, collegando l'elettrodo al polo positivo.

È comunque sempre consigliabile adottare l'elettrodo del minimo diametro possibile, compatibilmente con lo spessore della saldatura da effettuarsi.



Fig. 315 - Struttura di una saldatura eseguita con elettrodo di tipo sintetico.  
Ghisa base: ghise A-C  
Materiale d'apporto: ghise D

- zona del giunto

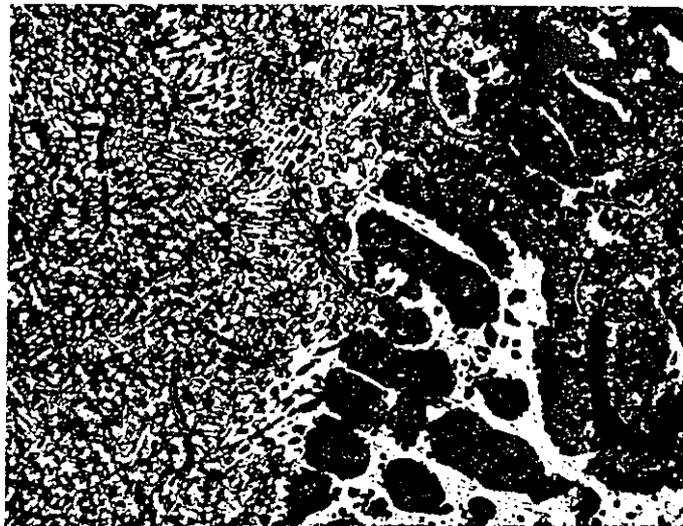


Attacco Nital

Fig. 316 - Struttura di una saldatura eseguita con elettrodo di tipo sintetico.  
Ghisa base: perlite, steadite, cementite, grafite A-C.  
Materiale d'apporto: ferrite, perlite, grafite eutettica

x 100

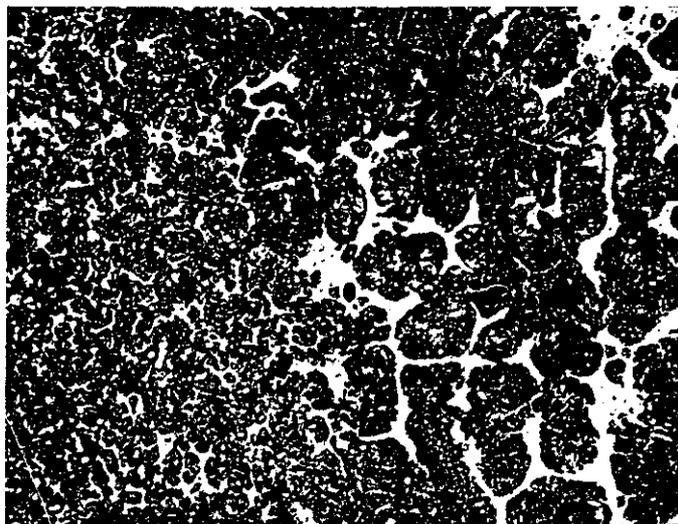
- assenza di carburi



Attacco Nital

x 200

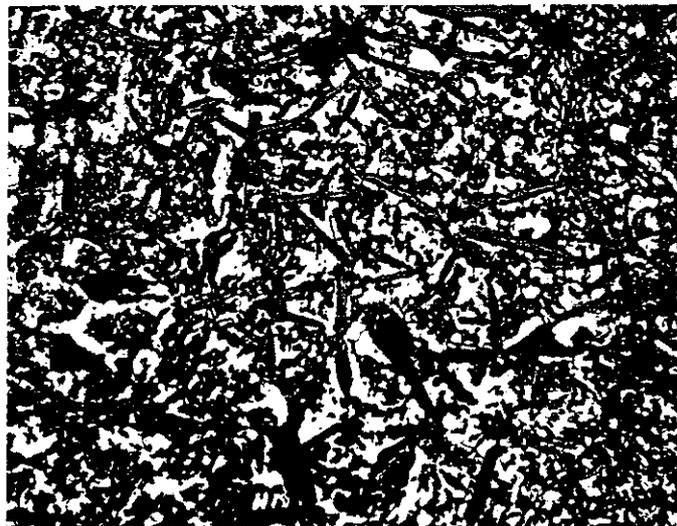
Fig. 317 - Struttura della zona di transizione fra ghisa e materiale d'apporto.  
Ghisa base: perlite, steadite, carburi, grafite A 1  
Materiale d'apporto: ferrite, grafite A 4



Attacco Nital

x 200

Fig. 318 - Struttura della zona di transizione fra ghisa e materiale d'apporto.  
Ghisa base: perlite, carburi, grafite A 2  
Materiale d'apporto: ferrite, perlite, grafite A 5



Attacco Nital

x 200

Fig. 319 - Struttura del materiale d'apporto.  
Deposito di materiale d'apporto: ferrite, perlite, grafite A 5

Tabella LVII - Caratteristiche della corrente elettrica da adottare per la saldatura ad arco.

Spessore del giunto mm	> 6	da 6 a 15	da 10 a 30	da 25 a 50	da 40 a 100	da 50 a 200	> 100
Diametro dell'anima metallica dell'elettrodo mm	3,25	4	6	8	10	12	15
Intensità di corrente A	100 ÷ 150	150 ÷ 180	200 ÷ 250	280 ÷ 350	400 ÷ 600	550 ÷ 900	800 ÷ 1.200

## SALDATURA A FREDDO DELLA GHISA

### Principi

Notevole importanza nella saldatura a freddo della ghisa grigia con grafite lamellare riveste la temperatura del materiale base all'inizio del lavoro di saldatura, che generalmente corrisponde alla temperatura ambiente. Nel corso del lavoro di saldatura il getto deve riscaldarsi il meno possibile, mentre è consigliabile un trattamento termico successivo.

Nella pratica si è riscontrato che un leggero preriscaldamento fino a circa  $373 \div 473$  K ( $100 \div 200$  °C) può essere molto vantaggioso, in quanto questa lieve temperatura di lavoro migliora la giunzione del materiale riportato con il materiale base, e riduce la durezza della zona di transizione del cordone di saldatura. Una appropriata conduzione del preriscaldamento può ridurre notevolmente le contrazioni della saldatura. Nei getti che possono dilatarsi e contrarsi liberamente può bastare un leggero preriscaldamento localizzato e ridotto alla zona che dovrà essere saldata.

In questo caso, in realtà si dovrebbe parlare più esattamente di saldatura a media temperatura, anche se, nella pratica, vi si applicheranno i principi della saldatura a freddo.

La saldatura a freddo della ghisa può essere adottata solamente quando non sia indispensabile ottenere, nel giunto, le caratteristiche di uniformità strutturale e di resistenza che si possono raggiungere mediante la saldatura a caldo. Occorre, tuttavia, tenere il dovuto conto che questo procedimento risulta molto più rapido, molto più economico, assai più facile da eseguire, analogamente alla saldatura su acciaio, spesso non richiede lo smontaggio e lo spostamento del getto da riparare, ed è effettuabile con una qualsiasi posizione di saldatura.

Date queste premesse, si può affermare che, salvo casi ben definiti, l'impiego di materiali d'apporto di opportuna scelta, e la mano di un operatore molto esperto, è opportuno adottare questo procedimento solo per lavori di riparazione, e non per la saldatura di difetti di fonderia su getti nuovi.

La resistenza a trazione di giunti di ghisa saldati a freddo, senza l'intervento di altri collegamenti a spina e salvo l'impiego di materiali speciali, varia a seconda del materiale base fra  $30 \div 80$  N/mm<sup>2</sup> ( $3 \div 8$  kgf/mm<sup>2</sup>), dunque sensibilmente al disotto del valore della ghisa base, inoltre i giunti di ghisa saldati a freddo, anche se spinati, si prestano difficilmente alle sollecitazioni di fatica. Come si vedrà, per motivi metallurgici e tecnologici, per la saldatura a freddo della ghisa, si impiegano preferibilmente materiali d'apporto di natura differente dalla ghisa base.

### Preparazione della zona da saldare

La preparazione dei lembi da saldare avviene in modo simile a quanto già detto per la saldatura a caldo. Per aumentare la superficie di collegamento fra il cordone di saldatura ed il materiale base, si adottano angoli maggiori del cianfrino, un sovrappessore maggiore del giunto ed una maggiore larghezza dello strato ricoprente superiore di quelli consueti per la saldatura dell'acciaio. Occasionalmente le pareti del giunto sono scanalate per aumentarne la superficie di collegamento. Se la giunzione saldata dovrà essere non solo solida, ma anche capace di trasmettere forze di una certa entità, è consigliabile applicare sui fianchi del cianfrino dei mezzi ausiliari meccanici, generalmente delle spine, o prigionieri avvitati, così come schematicamente raffigurati nelle figg. 320 e 321.

### Procedimenti di saldatura

#### Saldatura alla fiamma con gas

La saldatura a freddo della ghisa grigia con la fiamma a gas, la quale riscalda localmente in modo eccessivo, è in generale da evitare, anche se è adottata, come si dirà in seguito, per la saldo-brasatura. Solo in casi eccezionali, e solamente quando si devono saldare delle leve o delle barre che non siano vincolate, si può adoperare anche la saldatura a freddo alla fiamma.

#### Saldatura a gas con getto di polvere

Un altro procedimento di saldatura autogena alla fiamma è la saldatura a gas con getto di polvere.

Il cannello che si impiega in questo caso è rappresentato nella fig. 322. La polvere metallica è contenuta in una tramoggetta di plastica applicata al centro del cannello al disopra di un sistema di iniezione. L'accesso dell'ossigeno e dell'acetilene è controllato dalle solite valvole. L'ossigeno è introdotto fino all'iniettore nel quale si crea una depressione che aspira la polvere nella corrente di ossigeno. L'acetilene è poi miscelato da ultimo nella camera di miscelazione, e ciò anche per evitare il pericolo di esplosioni. La polvere è trascinata dalla miscela dei gas attraverso la fiamma fino al getto da riparare. L'alimentazione di polvere può essere variata, regolando la depressione a mezzo di una leva. Nella fiamma la polvere è portata a fusione e depositata sulla superficie del getto dove, per diffusione superficiale, si formano delle leghe resistenti ed omogenee.

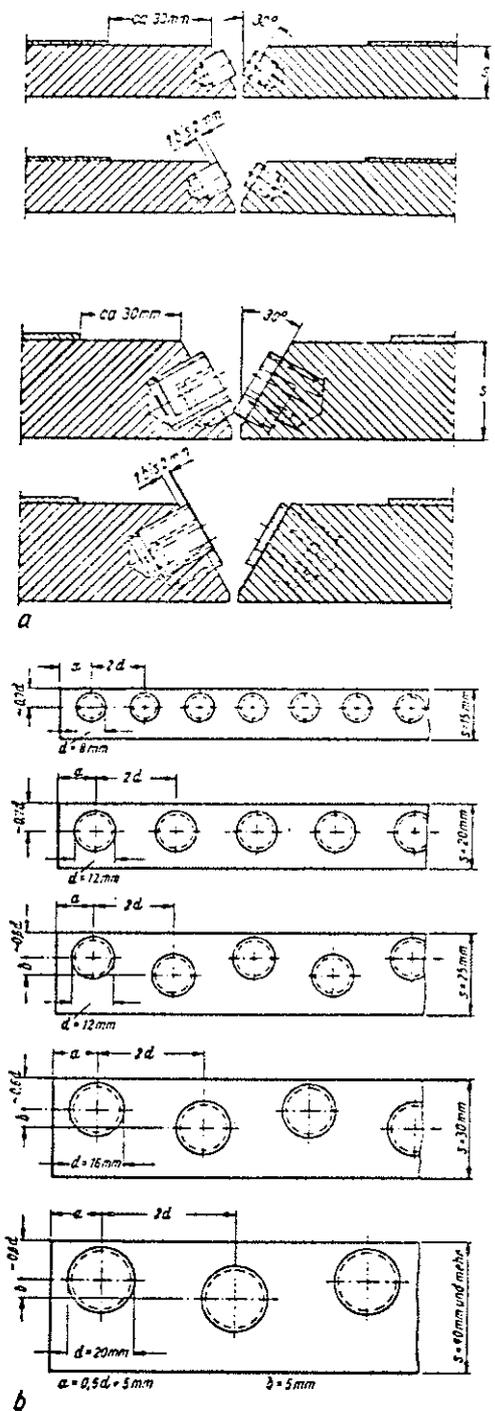


Fig. 320 - Posizionamento dei prigionieri per la saldatura a freddo della ghisa. Disposizione dei prigionieri sui lati del canfrino a seconda dello spessore.  
 a - Vista in sezione.  
 b - Vista sul fianco del canfrino.

Generalmente le leghe in polvere sono caratterizzate da punto di fusione inferiore a quella del metallo base, e l'abbassamento di detta temperatura di fusione si ottiene mediante aggiunte di boro e di silicio.

Generalmente il procedimento è adottato per saldature di riporto e di metallizzazione, in quanto consente di produrre strati negli spessori da 0,5 e 5 mm con superfici lisce, e di adottare miscele di polveri metalliche di leghe dure resistenti all'usura atte a formare superfici con durezza fino a 76 HRC, od altre leghe atte

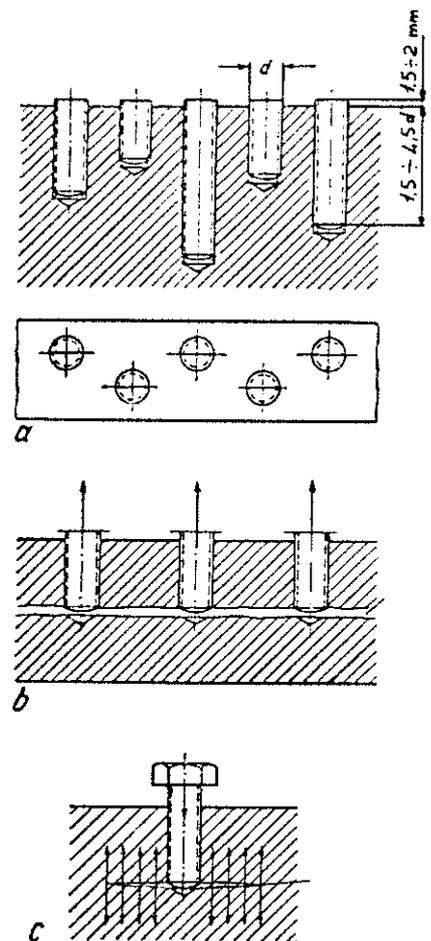


Fig. 321 - Posizionamento dei prigionieri nella saldatura a freddo della ghisa.  
 a - La differente profondità e posizione dei fori diminuisce il pericolo di rottura.  
 b - Pericolo di rottura causato dall'eccessiva diminuzione dello spessore sotto i prigionieri.  
 c - Pericolo di rottura provocato da un eccessivo tiraggio dei prigionieri.

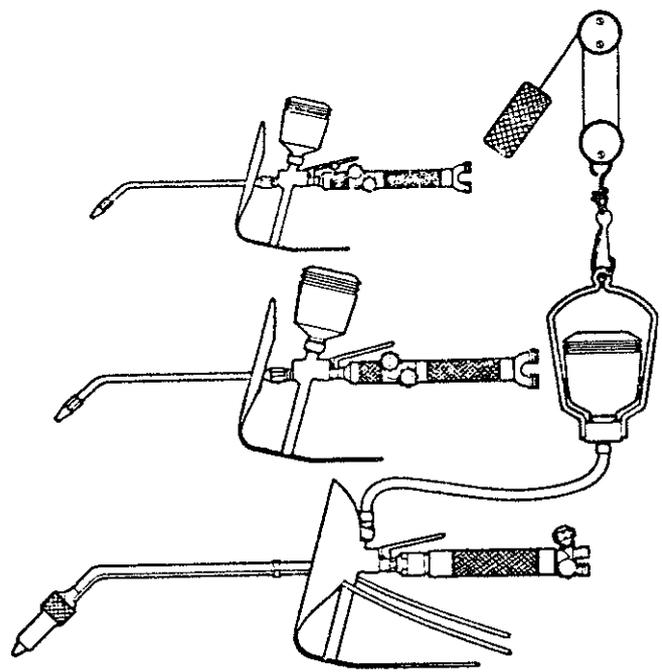


Fig. 322 - Tipi di cannelli per saldatura alla polvere.

a formare superfici resistenti alla corrosione ed alla ossidazione a temperature elevate. Nelle saldature di giunzione della ghisa, questo procedimento è stato adottato per rivestire le superfici dei cianfrini da congiungere con uno strato di nichel dello spessore di  $1,5 \div 2$  mm, proseguendo poi il giunto con l'apporto di nichel od anche d'acciaio, con ciò evitando la formazione di carburi nella zona di transizione fra metallo base e metallo di apporto.

### Saldatura elettrica ad arco

Quando non sia necessario ottenere nel giunto caratteristiche di resistenza simili a quelle del metallo base, si preferisce adottare il sistema di saldatura ad arco a freddo, procedimento più pratico, che può essere condotto in qualsiasi posizione, più rapido e meno costoso di qualsiasi altro.

Il procedimento di saldatura ad arco a freddo è possibile, perché la fusione del metallo base, sotto l'arco, è localizzata, e si realizza senza eccessivi inconvenienti sia durante il riscaldamento che durante il raffreddamento del getto, purché siano osservate determinate condizioni operative. D'altra parte, però, presenta l'inconveniente di un riscaldamento troppo brusco seguito da raffreddamento rapido che genera strutture assai dure (caratterizzate dalla presenza di carburi e di martensite), nella zona termicamente influenzata del metallo base, adiacente al metallo d'apporto, la cui larghezza è funzione del procedimento e del tipo di elettrodo. La scelta del tipo di elettrodo è dettata dalle sollecitazioni alle quali il getto sarà sottoposto nell'impiego e, generalmente, gli elettrodi differiscono dal metallo base sia per quanto riguarda il filo d'apporto sia per il rivestimento, il quale, fondendo con il metallo, può dare luogo ad una lega ancora differente. In generale perciò, la saldatura elettrica della ghisa a freddo è una saldatura con materiale d'apporto di natura diversa, spesso costituito da leghe non ferrose e, per questo motivo, si dovrà in realtà parlare di brasatura anziché di saldatura.

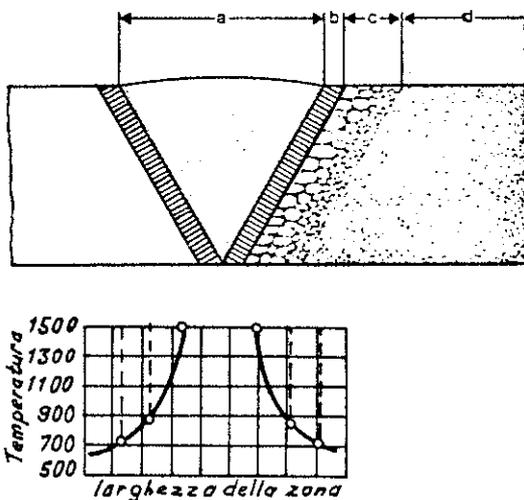


Fig. 323 - Strutture delle varie zone di un cordone di saldatura.  
 a - Puro materiale d'apporto che, ai lati, si miscela parzialmente con il materiale di base.  
 b - Zona fusa del materiale di base.  
 c - Zona termicamente influenzata del materiale di base con formazione di grossa cristallizzazione.  
 d - Materiale base non trasformato.

Concludendo, si può affermare che:

- La giunzione ottenuta con questo procedimento di saldatura non è quasi mai costituita da materiale omogeneo, dal momento che il metallo d'apporto non è della medesima qualità del metallo base.
- Non possono essere ristabilite le caratteristiche iniziali della ghisa nel giunto e, di conseguenza, la riparazione non può soddisfare che a limitate esigenze.
- Le temperature elevate dell'arco elettrico e del metallo d'apporto possono risultare nocive al metallo base, modificandone la struttura nelle zone di transizione, ed i fenomeni di contrazione dovranno essere ridotti al minimo.

La fig. 323 schematizza le zone di fusione e di trasformazione della struttura, in corrispondenza alla ripartizione delle temperature raggiunte durante il procedimento di saldatura ad arco, e spiega il motivo per cui, in un materiale come la ghisa caratterizzato da un tenore di carbonio da 2,5 al 4%, si formino delle strutture molto dure nella zona di transizione, per limitare le quali il principio essenziale consiste nel ridurre al minimo possibile l'apporto localizzato di calore.

### Tecnica di deposizione del materiale d'apporto

Il sistema di deposizione del materiale d'apporto nel cordone di saldatura influenza notevolmente gli effetti termici, sia che si operi a caldo, ed ancor più se si opera a freddo senza preliminarmente opportuno riscaldamento del getto.

È pertanto necessario che la temperatura del getto base non salga eccessivamente per l'accumulo del calore sviluppato dall'arco, e che si mantenga entro limiti che consentano di toccare con la mano nuda la superficie del getto nelle immediate vicinanze della zona di saldatura senza provare la sensazione di scottatura.

Le regole fondamentali, per osservare questa condizione, sono le seguenti:

- A differenza del caso della saldatura a caldo è necessario impiegare elettrodi più sottili che sia possibile, cioè del diametro di  $2,5 \div 3,25$  mm dell'anima metallica con il minimo amperaggio possibile, in modo da apportare al getto la minore quantità di calore nell'unità di tempo.
- Occorre scegliere il tipo della corrente da impiegare nella saldatura e la polarità da collegarsi all'elettrodo. Generalmente è consigliabile la corrente continua con l'elettrodo collegato al polo positivo.
- Si tenga presente che, diminuendo la lunghezza dei cordoni, si evita l'accumulo delle tensioni.
- Mantenere un arco di media lunghezza e saldare con l'elettrodo in posizione verticale sul pozzetto di saldatura, e non inclinato, allo scopo di assicurare una buona penetrazione e miscelazione fra materiale d'apporto e metallo base. Condurre il cordone dritto senza alcun movimento di andirivieni, come si usa invece per l'acciaio.
- Si martelli leggermente ogni tratto di cordone ancora caldo (fig. 324) al rosso.
- Come già detto, cordoni longitudinali non devono essere depositati in una unica soluzione, ma a tratti così come rappresentato nella fig. 325 a. I cordoni di riporto sovrapposti devono essere depositati in

**Volume II: Ghise grigie**

**Capitolo VII**

## **Resistenza alla corrosione**

- BREVE CENNO SULLA TEORIA DELLA CORROSIONE
- I FENOMENI DI CORROSIONE
- LE APPLICAZIONI DELLA GHISA GRIGIA NELL'INDUSTRIA
- BIBLIOGRAFIA

A cura di: Aldo Regè



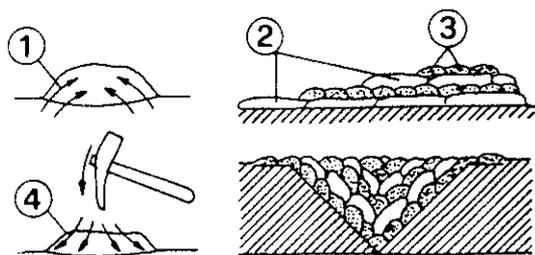


Fig. 324 - Saldatura a freddo della ghisa.

- 1 - Effetto delle contrazioni.
- 2 - Cordoni longitudinali.
- 3 - Cordoni trasversali.
- 4 - Effetto della martellatura (distensione).

senso trasversale sui primi così come schematizzato nelle figg. 325 b e 325 c al fine di diminuire il pericolo della formazione di cricche di ritiro. Gli uni e gli altri non devono essere depositati contigui, ma distanziati fra loro come indicato dalla numerazione della fig. 325 c. In nessun caso i terminali dei brevi segmenti di cordone devono giacere sullo stesso pia-

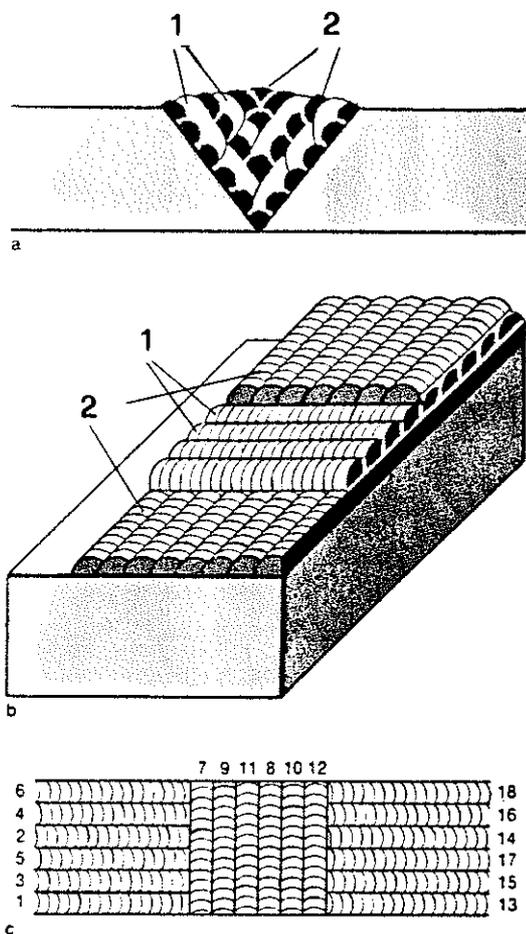


Fig. 325 - Successione dei cordoni di saldatura nei casi di saldature a strato singolo od a più strati.

- a - Cordone a V.
- b - Saldatura di riporto a più strati.
- c - Saldatura di riporto su una grande superficie con l'indicazione della sequenza dei cordoni.
- 1 - Cordoni trasversali.
- 2 - Cordoni longitudinali.

no, ma ogni fine ed ogni inizio di detti segmenti devono risultare sfalsati, e mai la fine di un segmento di un cordone successivo deve sovrastare l'inizio del cordone precedente.

La temperatura del getto non dovrà mai superare i 343 K (70 °C) circa, interrompendo sistematicamente a tale scopo il lavoro di saldatura per apportare il minimo incremento di calore, per evitare che si stabilisca una eccessiva differenza di temperatura fra il getto e la zona del cordone.

### Materiali d'apporto per la saldatura elettrica ad arco a freddo della ghisa

Come già accennato, per la saldatura a freddo della ghisa si impiegano preferibilmente, per motivi metallurgici, dei materiali d'apporto di natura completamente differente da quella del materiale da saldare. Nella tab. LVIII sono classificati i tipi di metalli e di leghe impiegati per gli elettrodi rivestiti adottati per la saldatura della ghisa a freddo.

Nella tab. LIX sono indicate le composizioni chimiche delle diverse anime metalliche dei diversi tipi di elettrodi, secondo l'unificazione americana dell'ASTM e AWS.

Gli elettrodi per saldatura ad arco della ghisa hanno i soliti diametri dell'anima metallica, normalizzati per tutti gli elettrodi, di 2-2,5-3,25-4,5 mm e lunghezza di 250-300-350-450 mm crescente con il diametro. Essi sono ricoperti con un rivestimento che può essere di spessore sottile così da non richiedere un incremento di calore per la fusione, ed in questo caso possono essere fusi solamente in corrente continua collegati al polo positivo, o con un rivestimento piuttosto spesso per renderne possibile la fusione sia con corrente alternata che con la corrente continua sempre al polo positivo, e per quei tipi nei quali i materiali contenuti nel rivestimento devono entrare in lega con il metallo della barretta metallica all'atto della fusione, per i quali lo spessore del rivestimento è proporzionale all'apporto di tali elementi di lega ed all'azione che se ne richiede.

Tabella LVIII - Metalli d'apporto per la saldatura della ghisa a freddo.

Leghe a base ferrosa	Leghe a base di nichel	Leghe a base di rame
Ghisa grigia	Nichel	Rame-stagno (bronzo)
Acciaio con rivestimento a base di grafite	Ferro-nichel	Cuproalluminio (bronzo di alluminio)
Acciaio con rivestimento carburante e silicizzante formante ghisa grigia	Rame-nichel (metallo Monel)	
Acciaio con rivestimento ferritizzante e carburigeno		
Acciaio con rivestimento basilico		
Acciaio al cromo-nichel alto-legato		

Tabella LIX - Composizioni chimiche delle anime metalliche degli elettrodi per saldature ad arco a freddo della ghisa grigia secondo ASTM e AWS.

Simbolo ASTM	Simbolo UNI	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Fe %	Mo %	Ni %	Cu %	Cr %	Sn %	Al %	Pb %	Altro elemento % <sup>1</sup>	Note
Anime metalliche di ghisa																
RCI ECI RCIA	G 25 UNI 5007	3,25 ÷ 3,50 3,25 ÷ 3,50	2,75 ÷ 3 2 ÷ 2,50	0,60 ÷ 0,75 0,50 ÷ 0,70	0,50 ÷ 0,75 0,20 ÷ 0,40	≤ 0,10 ≤ 0,10	resto resto	tracce 0,25 ÷ 0,45	tracce 1,20 ÷ 1,60	— —	— —	— —	— —	— —	— —	Per saldature libere non vincolate (difetti e piccole riparazioni).
Anime metalliche di acciaio dolce o legato																
ESt 304 (AISI) 310 (AISI)	X8CrNi1910 UNI 4047 X8CrNi2520 UNI 4047	≤ 0,15 ≤ 0,08 ≤ 0,25	≤ 0,03 ≤ 1,00 ≤ 1,5	≤ 0,30 ÷ 0,60 ≤ 2,00 ≤ 2,00	≤ 0,4 ≤ 0,045 ≤ 0,045	≤ 0,04 ≤ 0,03 ≤ 0,03	resto resto resto	— — —	— 8 ÷ 12 19 ÷ 22	— — —	— 18 ÷ 20 24 ÷ 26	— — —	— — —	— — —	— — —	Per saldature libere non vincolate (difetti e piccole riparazioni). Cordone di saldatura a struttura austeniti- ca. Lavorabile e privo di cricche. Colore si- milare.
Anime metalliche costituite da leghe di nichel																
ENiCZ ENiFeCI ENiCuA ENiCuB		≤ 2,00 ≤ 2,00 0,35 ÷ 0,55 0,35 ÷ 0,55	4,00 4,00 0,75 0,75	1,00 1,00 2,25 2,25	— — — —	0,03 0,03 0,025 0,025	8,00 resto 3,0 ÷ 6,0 3,0 ÷ 6,0	— — — —	85,00 minimo 45 ÷ 60 50 ÷ 60 50 ÷ 70	2,50 2,50 35 ÷ 45 25 ÷ 35	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	Di più largo impiego. Saldatura lavorabile e priva di cricche. A- dati sia per ripara- zioni e giunzioni.
Anime metalliche costituite da leghe di rame																
ECuSnA ECuSnC ECuAl-A2		— — —	— — 0,10	— — —	0,10 ÷ 0,35 0,05 ÷ 0,35 —	— — —	— — 1,5	— — —	— — —	— — —	4,8-5,8 7-9 —	≤ 0,01 ≤ 0,01 9-11	≤ 0,02 ≤ 0,02 ≤ 0,02	— — —	— — —	Di più largo impiego. Occorre un modesto pre-riscaldamento e raffreddamento lento.

## SALDATURA DELLA GHISA GRIGIA CON I PROCEDIMENTI DI SALDATURA ALL'ARCO DI RECENTE SVILUPPO

Sono noti i sistemi di saldatura ad arco, sperimentati prevalentemente negli Stati Uniti e nell'Unione Sovietica nel periodo di tempo dal 1935 al 1950 e successivamente ancora oggi in via di perfezionamento. I quali, a differenza del metodo manuale con elettrodi ricoperti, si sono sviluppati come procedimenti automatici o semi-automatici trovando impiego, con grande successo, nella saldatura di ogni genere di metallo e di leghe.

Si prenderanno in considerazione i 4 procedimenti moderni di saldatura ad arco:

### Saldatura ad arco con protezione di gas

Il procedimento impiega in sostituzione del rivestimento dell'elettrodo, o di un altro materiale ricoprente, come elemento protettivo dell'arco, un gas inerte che avvolge l'arco, il materiale d'apporto, e la zona di fusione proteggendoli dall'ossidazione per contatto con l'aria, ciò che permette di ottenere un cordone di saldatura nudo, lucido e pulito senza scoria ricoprente.

Nello sviluppo del procedimento sono stati adottati gas inerti di tipo diverso, quali argon ed elio, e non necessariamente inerti, come alcune miscele di gas, o leggermente attivi come l'anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ). Il procedimento si suddivide in due specifici sistemi:

#### *Saldatura con elettrodo non consumabile di tungsteno (Tungsten Inert Gas - T.I.G.)*

L'elettrodo è costituito da un filo di tungsteno che non si consuma in maniera apprezzabile durante l'uso nell'arco.

L'arco si accende fra l'estremità dell'elettrodo di tungsteno, collegato ad un polo della corrente ed il getto da saldare collegato all'altro polo. Il metallo d'apporto è costituito da una bacchetta o da un filo, la cui estremità è portata nell'arco dove fonde, protetto, unitamente al bagno di saldatura, dalla corrente del gas protettivo.

Il gas protettivo è generalmente l'argon.

#### *Saldatura con elettrodo metallico consumabile (Metallic Inert Gas - M.I.G.)*

È un procedimento analogo a quello precedente, nel quale l'elettrodo di tungsteno è sostituito da un filo metallico fusibile, che è alimentato automaticamente in modo continuo, da un aspo o da una bobina su cui è avvolto, e condotto mediante apposito alimentatore o rullini zigrinati, attraverso un cavo fino alla torcia ove l'arco si accende fra l'estremità del filo ed il getto da saldare, ove si sviluppa una corrente di argon che lo avvolge e protegge.<sup>1</sup>

### Saldatura ad arco sotto scoria (ad arco sommerso)

Il filo di apporto, analogamente ai procedimenti M.I.G. e M.A.G. si svolge automaticamente da una bobina, od un aspo, ed è condotto in una torcia. La sua estremità è condotta sulla zona da saldare ove si innesca un arco voltaico fra detta estremità del filo che fonde ed il getto base. L'arco è automaticamente ricoperto da un fondente granulare che parzialmente fonde a contatto dell'arco che resta coperto da questo flusso. L'energia è erogata in parte sotto forma d'arco ed in parte per passaggio della corrente nel fondente che, a caldo ed allo stato fuso, diventa elettroconduttore.

L'arco non è visibile ed è condotto del tutto automaticamente, e non manualmente. Il procedimento è adattabile alla saldatura della ghisa grigia in regime caldo.

Il procedimento è già stato impiegato in U.R.S.S. per depositare degli strati di ghisa bianca per ricariche dure, ed è spesso impiegato per la ricostruzione mediante ricarica di cilindri da laminatoio usurati.

<sup>1</sup> Se si impiega invece un gas attivo ( $\text{CO}_2$ ), si ha la variante indicata con la sigla M.A.G. (Metallic Active Gas), conosciuto anche sotto il nome di saldatura in  $\text{CO}_2$ .

## PROCEDIMENTI DI SALDATURA CHE IMPIEGANO COME PRINCIPALE SORGENTE DI CALORE UN METALLO D'APPORTO PORTATO A FUSIONE A TEMPERATURA ELEVATA

Si possono distinguere due procedimenti; uno molto vecchio detto: saldatura per scorrimento o saldatura alla siviera; ed uno moderno, la saldatura alluminotermica.

### Saldatura per scorrimento e saldatura alla siviera

È il procedimento più antico adottato in fonderia per rimediare ai più comuni difetti sui getti fusi e per la ricostruzione di parti mancanti sui getti, dovuta sia a rottura, sia a mancanza di metallo durante la fusione.

Il procedimento permette di ottenere delle zone saldate e dei riporti a perfetta tenuta, con durezza e caratteristiche di resistenza perfettamente allineate a quelle del getto, pertanto facilmente lavorabili meccanicamente, e con colore esattamente uguale a quello del metallo del getto, con il vantaggio di non richiedere alcun materiale ed alcuna tecnica diversa da quelle proprie della fonderia.

Il procedimento è facilmente applicabile a qualsivoglia metallo o lega ed in particolare alla ghisa grigia purché siano osservate le seguenti condizioni:

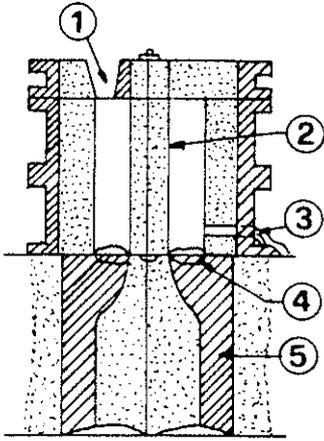


Fig. 326 - Disegno in sezione della formatura per l'applicazione mediante saldatura per scorrimento di un collo ad un cilindro per gomma.

- 1 - Bacino di colata.
- 2 - Anima per collo cavo.
- 3 - Foro di uscita del metallo.
- 4 - Sovrammetallo da fondere.
- 5 - Cilindro originale da riparare.

- Preparazione della zona da saldare analoga a quanto detto per la saldatura a caldo con il sistema ossiacetileno, cioè arrestare la cricca mediante un foro terminale, lavorare all'utensile, od alla mola, i bordi fino a mettere a nudo il metallo sano, conformandoli a cianfrino.

Nel caso di giunzioni fra elementi separati, questi sono imbastiti provvisoriamente nella posizione voluta, mediante mezzi meccanici appropriati.

- Preriscaldamento omogeneo del getto fino al rosso scuro, usando gli stessi mezzi indicati per la saldatura a caldo.
- Fare scorrere liberamente la ghisa liquida ad alta temperatura sui bordi da saldare prima di effettuare il riempimento della forma che costituisce la saldatura propriamente detta.

Questo sistema di saldatura un tempo assai generalizzato, è attualmente impiegato sempre di meno, in quanto sostituito dagli altri procedimenti, ma resta sempre valido quando si tratti di ricostruire dei getti di grande spessore e pesanti, quali i colli di cilindri di laminatoio, come rappresentato nelle figg. 326-327-328.



Fig. 327 - Il cilindro dopo la distaffatura, a saldatura avvenuta.

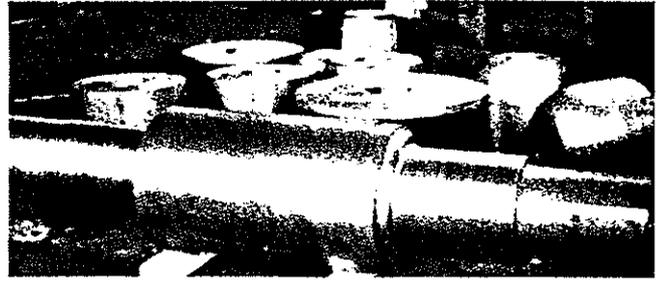


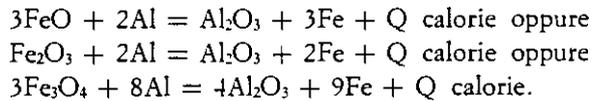
Fig. 328 - Il cilindro finito dopo finitura per lavorazione meccanica.

### Saldatura alluminotermica

La saldatura alluminotermica è così chiamata nelle diverse lingue:

- Thermit Schweissung (in tedesco)
- Thermit Welding (in inglese)
- Soudure Aluminothermique (in francese) che tuttavia distingue due sottocategorie e cioè: Soudure Calorite per la saldatura alluminotermica in serie e Fusalgie per la saldatura di singoli getti.

La saldatura alluminotermica è la saldatura alla siviera nella quale il metallo liquido anziché essere approntato in un forno fusorio classico, è preparato per riduzione di ossido di ferro mediante alluminio metallico, secondo la reazione:



Generalmente, per considerazioni relative alla temperatura di inizio della reazione (1.273 K) (1.000 °C), si preferisce usare una miscela dei primi due ossidi o, per facilità di disponibilità degli stessi, una miscela dei tre. La temperatura che si raggiunge varia da 2.773 a 3.023 K (2.500 ÷ 2.750 °C) a seconda della miscela di ossidi. La miscela normalmente usata è costituita da ossido di ferro e da alluminio metallico granulare (0,5 ÷ 2 mm di diametro) in proporzioni appropriate. Ad esempio: 800 g FeO + 200 g Al = 620 g di Fe + 380 g Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 750 g Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 250 g Al = 530 g di Fe.

In definitiva il risultato della reazione esotermica, che è accesa in un punto portato a 1.273 K (1.000 °C) elettricamente o mediante accensione di magnesio metallico e che si propaga rapidamente, è costituito da ferro metallico allo stato liquido che si raccoglie al fondo del crogiolo di reazione, a motivo del suo maggiore peso specifico, e da allumina che galleggia alla sua superficie sotto forma di scoria molto più leggera. In tal modo si ottiene, nel tempo di 1 min, del metallo allo stato fuso ad una temperatura dell'ordine di 2.273 K (2.000 °C), anche in quantità considerevoli, limitate unicamente dalla capacità del crogiolo di reazione.

Per la saldatura su parti di ghisa non si dovrà tuttavia disporre di ferro o acciaio, ma di ghisa, ciò che è possibile ottenere aggiungendo nella miscela ferroleghe, come ferro-silicio, e materiali carburanti, o contemporaneamente silicio carburante come carburo di silicio in quantità tali da agire opportunamente sulla composizione del metallo, e rottami o torniture di ghisa che servono a diminuire la temperatura del bagno metallico in modo tale da impedire che il carbonio, durante la reazione, non

prenda il posto dell'alluminio. A tale scopo è quindi necessario operare con miscele perfettamente definite e costanti.

Con sufficiente pratica è possibile ottenere un metallo avente la composizione voluta, come è ottenibile con qualsiasi forno fusorio classico.

Un metallo a temperatura così elevata colato fra i lembi di parti che devono essere saldate preriscaldati a 1.023 K (750 °C), e contenuti in una forma di sabbia silicea da

fonderia, nella quale siano state praticate adatte tirate d'aria, consentirà la saldatura diretta.

Il procedimento è analogo a quello precedente di saldatura alla siviera, con la differenza che l'elevata temperatura del metallo d'apporto — 2.673 K (2.400 °C) in luogo di 1.873 K (1.600 °C) — permette di limitare il lavaggio per scorrimento di metallo al minimo, o di farne a meno, con conseguente maggiore velocità nel riempimento della forma che può compiersi in 12 o 30 s (fig. 329).

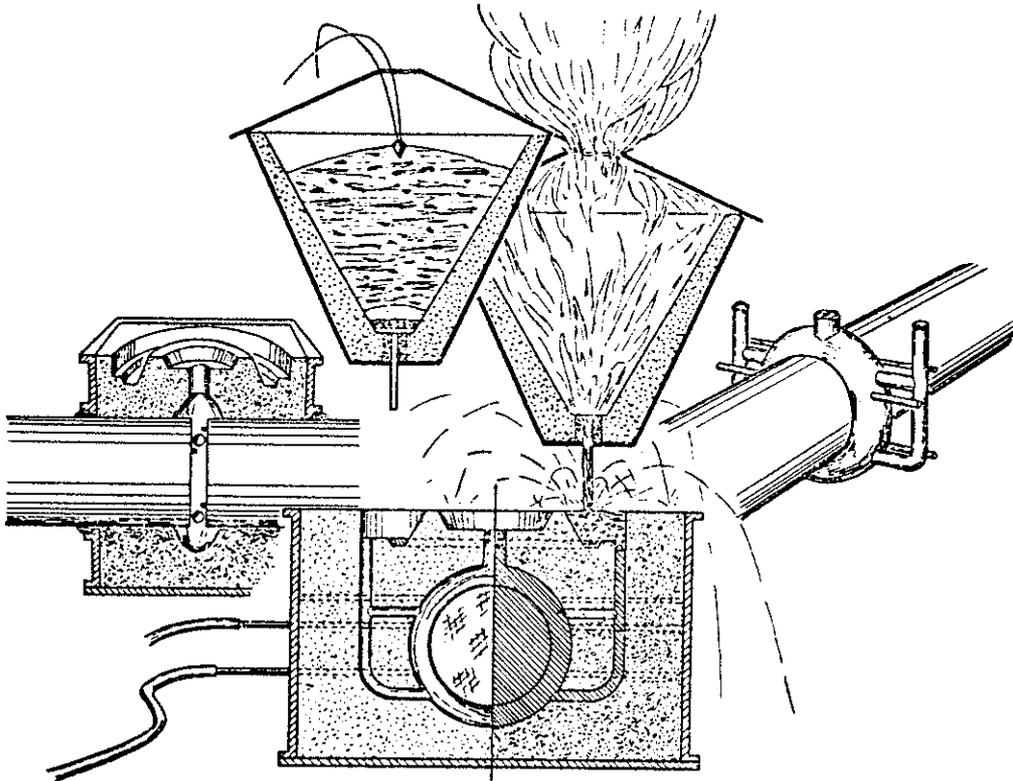


Fig. 329 - Schema di saldatura alluminio-termica della ghisa.

## ALTRI PROCEDIMENTI DI SALDATURA

### Saldatura elettrica a resistenza

Il procedimento di saldatura a resistenza, che ha trovato innumerevoli applicazioni per gli acciai, le leghe di alluminio e di rame, si può suddividere in varie branche: saldatura per punti, saldatura a rulli, saldatura a proiezione o per rilievi, saldatura di testa a scintillio, saldatura di testa per resistenza pura, e saldatura a percussione, ma nel campo delle ghise risulta interessante solamente la saldatura di testa a scintillio, ed in minore misura, solo per saldature miste con acciaio, anche la saldatura per punti.

#### *Saldatura di testa a scintillio - Procedimento*

I getti da saldare ( $A_1$  e  $A_2$  di fig. 330) sono stretti fra le ganasce di due morse porta-corrente di bronzo, raffreddate ad acqua, una delle quali fissa e l'altra mobile. Le

superfici dei getti da saldare devono essere ben pulite, senza alcuna presenza di ruggine, o materiali estranei, possibilmente di fresca lavorazione meccanica, e ciò per assicurare il migliore contatto elettrico fra morse e pezzi.

I getti sono montati facendoli sporgere dalle morse con sporgenze predeterminate per consentire il consumo di materiale nella fase di scintillio, ed il controllo del riscaldamento della zona da saldare.

Inserendo la corrente, la morsa motrice porta automaticamente a contatto le superfici dei due getti con una leggera pressione che chiude il circuito. Fra le superfici a leggero contatto si innescano e si spengono alternativamente e con rapida frequenza una moltitudine di archi elettrici con forte sviluppo di scintille di metallo combusto, mediante i quali le superfici da saldare sono progressivamente portate alla temperatura di saldatura fra 1.523 ÷ 1.623 K (1.250 ÷ 1.350 °C).

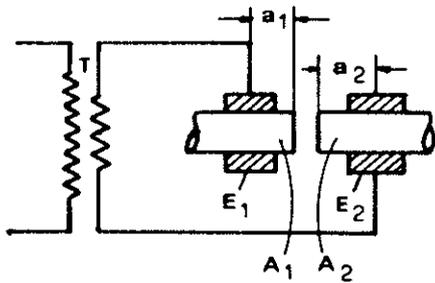


Fig. 330 - Schema di saldatura di testa a scintillio. I due pezzi da congiungere A1 e A2 sono serrati da due morse portacorrente, raffreddate ad acqua E1 e E2, dalle quali sporgono a distanza predeterminata. Una delle morse è mobile.

Il fenomeno di scintillio provoca il consumo di uno spessore apprezzabile delle superfici da saldare, provocandone il perfetto allineamento e la più completa pulizia.

Interviene automaticamente a questo punto uno sforzo di compressione che, comprimendo le superfici fra loro, ne assicura la giunzione per fusione locale.

Effettuata la saldatura, si interrompe automaticamente la corrente.

Il raffreddamento del getto può essere regolato sulla macchina stessa, e la zona di saldatura può essere sottoposta a ricottura o rinvenimento mediante pulsazioni intermittenti di corrente, così da fare risolvere tutte le eventuali strutture dure formatesi per un raffreddamento troppo rapido, ottenendo un giunto facilmente lavorabile.

Nel caso della saldatura della ghisa grigia è opportuno che il metallo liquido o pastoso che si è formato sulle superfici da congiungere sia totalmente estromesso nella fase di compressione sotto forma di bave, e ciò per evitare che esso, raffreddandosi rapidamente, dia luogo alla formazione di ghisa bianca dura.

Questo procedimento è stato adottato per saldare delle flange di ghisa grigia su tubi di ghisa grigia centrifugati, delle scatole per cuscinetti in due metà, ed è adatto generalmente per congiungere due getti aventi uguale sezione trasversale di giunzione.

La sua facilità e rapidità di esecuzione lo rende appropriato per lavori di grande serie, anche perché le macchine necessarie a questo genere di lavoro sono molto costose e pertanto precipuamente adatte per produzioni assai veloci e costituite da un sufficiente volume di prodotto.

Le macchine sono completamente programmate e controllate elettronicamente ed il ciclo di saldatura risulta del tutto riproducibile.

### Procedimenti di giunzione in fase solida

La giunzione è effettuata senza portare a fusione le superfici da congiungere ed applicando delle determinate pressioni. Le temperature raggiunte in questi procedimenti non sono tali da superare il punto di fusione. In conseguenza di ciò le strutture delle saldature di ghisa grigia non presentano zone di carburi. Fanno parte di questi procedimenti: la saldatura per compressione, la saldatura a frizione, la saldatura per esplosione, la saldatura per diffusione, la saldatura mediante ultrasuoni e la saldatura idrodinamica.

Solo alcuni fra questi procedimenti sono adattabili per saldare parti di ghisa grigia fra di loro e, poiché nella saldatura in fase solida non si ha formazione di un pozzetto di saldatura nel quale si mescolano allo stato liquido i metalli base delle due superfici da saldare, questi procedimenti sono particolarmente adatti per la giunzione di parti di ghisa con parti di metalli differenti.

## BRASATURA DELLA GHISA GRIGIA

Precedentemente si è precisato ciò che si intende per brasatura dei metalli.

Il procedimento è adottato sia per congiungere delle parti di ghisa fra loro, sia per unire uno o più parti di ghisa ad elementi di altri materiali quali acciaio, acciaio inossidabile, leghe di nichel, leghe di rame, zinco o metalli teneri.

Le superfici dei getti da congiungere mediante brasatura devono essere avvicinate a distanze dell'ordine di

$$\frac{5}{100} \text{ a } \frac{2}{10} \text{ mm al massimo, così da costituire distanze}$$

capillari entro le quali il metallo di brasatura sia distribuito per attrazione capillare, ciò che richiede una preparazione assai precisa. La qualità della brasatura non dipende solo dal posizionamento geometrico, ma anche dallo stato delle superfici, in quanto le superfici metalliche devono essere vive ed esenti da ogni sporcizia, grasso o qualsiasi altra impurezza.

Notevole difficoltà nella brasatura della ghisa grigia è costituita dalla presenza della grafite lamellare che ostacola l'intimo contatto fra il metallo brasante e le superfici da congiungere, il che richiede la necessità di trattamenti abrasivi od ossidanti atti ad eliminare la grafite dalle superfici. Il procedimento di brasatura si suddivide nelle seguenti classi.

### Brasatura dolce

Con questo termine si definisce l'operazione di brasatura quando la temperatura di fusione della lega di brasatura, del tutto convenzionale e scelta arbitrariamente, si mantiene inferiore a 673 K (400 °C).

Secondo i testi americani questo limite di temperatura è indicato in 644 K (371 °C). Con questo tipo di brasatura si ottengono giunzioni dotate di basse caratteristiche fisico-meccaniche.

La brasatura dolce impiega come metalli di apporto e di giunzione leghe Sn-Pb la cui composizione può variare entro limiti assai ampi, dotate di un intervallo di fusione da 455 a 598 K (182 ÷ 325 °C), oppure anche leghe Zn, Cd, Sn, Bi, Sb, ecc.

È comprensibile che in questo caso non si raggiunge il punto di fusione della ghisa e pertanto non si formano strutture dure a base di carburi, ma non si raggiungono neppure temperature superiori al punto critico e pertanto non si avrà neppure alcuna variazione della struttura della matrice della ghisa.

Nel caso dell'impiego delle leghe brasanti dolci il flusso decapante generalmente usato è costituito da una soluzione di cloruro di zinco idrato; oppure da una miscela di cloruri di zinco e di ammonio, la cui azione decapante è dovuta allo sviluppo di acido cloridrico e cloro.

In commercio si trovano anche paste decapanti di consistenza cremosa, costituite da cloruro di zinco ed ammonio sospesi in un veicolo organico molle quali vaselina, o duro come paraffina e colofonia.

### **Brasatura forte**

Si effettua a temperature superiori a 673 K (400 °C) e dà luogo a giunzioni dotate di caratteristiche meccaniche sensibilmente più elevate di quelle ottenute con la brasatura dolce.

La brasatura forte si suddivide come segue.

#### *Brasatura a bassa temperatura*

Si effettua nel campo delle temperature inferiori a 973 K (700 °C) ed impiega come metalli di apporto molte e differenti leghe a base di argento, e cioè leghe binarie Cu-Ag; leghe ternarie Cu-Zn-Ag e leghe quaternarie Cu-Zn-Cd-Ag, nonché leghe Ag-Mn quando si tratti di congiungere ghisa con acciai inossidabili.

Le leghe a base di argento che fondono in un campo di temperatura compreso fra 723 e 923 K (450 ÷ 650 °C), cioè notevolmente inferiore alla temperatura di austenizzazione della ghisa, evitano la formazione di zone dure a struttura di carburi ed il generarsi di eccessive tensioni interne.

#### *Brasatura ad alta temperatura*

Si effettua in un campo di temperature superiori a 1.173 K (900 °C) ed impiega leghe di apporto di basso costo del tipo Cu-Zn cioè gli ottoni, di composizione diversificata, anche con aggiunta di piccole quantità di metalli diversi come Fe, Mn, Sn, Si, ecc.

Il rame costituisce un ottimo materiale per brasatura, ma nel caso della ghisa presenta l'inconveniente di fondere a temperatura troppo elevata e di apportare perciò trasformazioni troppo importanti alla struttura della ghisa.

Anche il bronzo al 6% Sn che fonde a 1.200 K (927 °C) può essere adottato con successo.

L'adozione delle leghe di rame (ottoni e bronzi) nella brasatura o nella saldobrasatura della ghisa riduce grandemente il pericolo delle tensioni residue e delle conseguenti rotture nella fase di raffreddamento, in quanto

l'elevato grado di plasticità elastica di tali leghe consente loro di plastificare le tensioni.

Unitamente al metallo d'apporto, l'operazione di brasatura della ghisa richiede la presenza di un fondente, o flusso, che ha il compito di pulire e disossidare le superfici da congiungere così da renderle adatte a farsi bagnare dalle leghe fuse, assicurandone il contatto più intimo. Tale fondente è generalmente costituito da una miscelazione di tetraborato sodico anidro e di acido bórico. L'adozione di leghe di brasatura a temperature inferiori a 1.073 K (800 °C) (leghe d'argento), ha reso necessario potere disporre di flussi decapanti che fondessero a temperature più basse di quelle delle solite miscele di borace ed acido bórico, e ciò si è ottenuto aggiungendovi piccole quantità di cloruri, fluoruri e fosfati alcalini.

Il metallo d'apporto può essere fornito sotto forma di filo, bacchette fuse, nastro, anche in sagome preformate, o polvere.

### *Saldobrasatura*

Si intende con questo nome sempre la giunzione di parti metalliche mediante un materiale di apporto di natura differente, caratterizzato da un punto di fusione inferiore a quello del metallo da congiungere, ma effettuato non a temperatura leggermente superiore a quella di fusione del metallo d'apporto e non valendosi dei fenomeni di capillarità, come già detto, ma fondendo il metallo d'apporto a temperatura notevolmente superiore, e prossima a quella del metallo da congiungere, così da portare a fusione anche i lembi di quest'ultimo. In questo caso i metalli d'apporto (gli stessi indicati per la brasatura, tranne le leghe contenenti zinco) sono costituiti da bacchette di un certo diametro che possono essere fuse sia con il cannello ossiacetilenico sia elettricamente, quali gli elettrodi per la saldatura ad arco di cui si è già detto. In questo caso non è necessario che i lembi da congiungere siano a distanza riavvicinata, anzi la preparazione del giunto si effettua esattamente come descritto per il caso della saldatura ad arco.

### **I mezzi di riscaldamento**

Per la brasatura dolce con impiego di leghe di stagno e piombo si usano i classici utensili detti saldatore, costituiti da un blocco di rame affilato su un lato, e fissato su un supporto che è riscaldato al rosso.

In questo stesso caso, ma in comune con la brasatura forte, possono essere impiegati come mezzi di riscaldamento: il cannello ossiacetilenico, inizialmente con fiamma ossidante per bruciare la grafite libera, e poi, in fase di brasatura, con fiamma riducente per leggero eccesso di acetilene; forni a muffola, spesso in atmosfera controllata e con suola motrice con zone di preriscaldamento e di raffreddamento, adatti per fortissime produzioni di serie; riscaldamento elettrico ad induzione od a resistenza; forni a bagno di sale, a base di miscele di cloruri e fluoruri; riscaldamento ad immersione in bagno fuso di lega brasante, particolarmente adatto per la stagnatura o la zincatura.

## TAGLIO TERMICO DELLA GHISA GRIGIA

Il taglio termico della ghisa grigia all'ossigeno, od all'arco, è generalmente limitato a lavori di riparazione, di demolizione o di suddivisione di grossi getti di ghisa in pezzi di dimensioni adatte alla carica dei cubilotti. Il suo impiego in lavori costruttivi è però assai limitato, anche perché, a differenza dei getti di acciaio, le materozze dei getti di ghisa sono staccate a colpi di mazza.

I procedimenti di taglio impiegati sono sostanzialmente due:

- Taglio all'ossigeno che si basa sulla reazione chimica di combustione del ferro nell'ossigeno a temperatura elevata.
- Taglio per fusione localizzata senza combustione.

### Taglio all'ossigeno

Questo procedimento è a sua volta suddiviso in due tipi a seconda della sorgente termica impiegata per avviare il taglio, e cioè *alla fiamma* quando è impiegata a questo scopo la combustione di determinati combustibili gassosi, ed *all'arco* quando, invece, si impiega un arco elettrico innescato fra un elettrodo ed il getto da tagliare, anche se in quest'ultimo caso sia impiegato ossigeno.

In realtà si incontrano notevoli difficoltà nel taglio termico della ghisa grigia, dovute alla composizione della stessa ed al fatto che essa ha una temperatura di fusione molto inferiore a quella dell'acciaio ed è dotata di elevata fluidità.

In conseguenza di ciò, è stato necessario apportare delle modifiche al classico procedimento di taglio all'ossigeno comunemente adottato per gli acciai, per renderlo industrialmente possibile nel caso della ghisa.

### Taglio alla fiamma

Il taglio alla fiamma ossiacetilenica dell'acciaio costituisce una tecnologia nata agli inizi del secolo e che attualmente è estesamente impiegata in lavori costruttivi. Solo in tempi molto recenti il procedimento è stato esteso anche alla ghisa, superando le predette difficoltà con l'adozione di tecniche particolari. Nel taglio ad ossigeno il calore è fornito da una fiamma generata mediante un cannello di tipo analogo a quelli adottati per la saldatura, salvo un diverso dimensionamento e posizionamento degli ugelli d'uscita del gas combustibile (acetilene, metano, propano) e dell'ossigeno. La fig. 331 rappresenta schematicamente la punta di un cannello da taglio. L'ossigeno impiegato deve essere di purezza elevata (99,5% o più), in quanto da essa dipendono le velocità di taglio ed il consumo di ossigeno.

La principale limitazione a questo procedimento consiste nella qualità del taglio ottenibile; quando l'unico scopo è la separazione in parti, non riveste alcuna importanza la larghezza e l'aspetto del taglio, e quando l'entità del tempo non ha importanza, questo procedimento può essere utilmente adottato nel caso della ghisa grigia.

È necessario preriscaldare completamente ed accuratamente la superficie d'inizio del taglio e la sezione ove il taglio sarà effettuato; in particolare il punto d'inizio, per un diametro di circa  $12 \div 20$  mm, deve essere preriscaldato quasi fino a fusione. In alcuni casi è opportuno preriscaldare l'intero getto.

### Taglio con aggiunta di filo di ferro

Questo procedimento si basa sul fatto che, fondendo ed ossidando nella fiamma un filo di acciaio dolce a basso tenore di carbonio, le particelle liquide ossidate aumentano la temperatura della superficie della ghisa al valore necessario per consentire l'inizio del taglio. È tuttavia necessario che l'operatore possa azionare il cannello con una mano ed il filo d'acciaio con l'altra, oppure che l'apparecchio sia munito di adatto alimentatore automatico del filo in modo continuo nella fiamma.

Anche in questo caso, per uguale spessore a confronto dell'acciaio, il cannello impiegato per la ghisa grigia è caratterizzato da un ugello di taglio di maggiore diametro e di una fiamma più potente.

### Ossitaglio alla polvere

È il procedimento più moderno e più efficace, e consiste nell'iniettare nell'incavo del taglio una polvere che facilita il taglio. In tentativi successivi sono state impiegate polveri scoricanti costituite da miscele di carbonati e bicarbonati alcalini, o polveri abrasive costituite da silice, ma nel caso della ghisa grigia il risultato definitivo è stato ottenuto impiegando polvere di ferro, la quale, analogamente a quanto detto per il precedente procedimento, attiva la combustione.

La fig. 332 rappresenta schematicamente un impianto di taglio alla polvere. La polvere è convogliata, mediante un gas ausiliario, aria o azoto, ad un ugello anulare del cannello, la cui estremità è mantenuta a circa  $30 \div 40$  mm dalla superficie del getto. Si apre dapprima l'arrivo della polvere in modo da depositarne un poco sul getto, per favorire l'immediata accensione del taglio all'istante dell'arrivo dell'ossigeno.

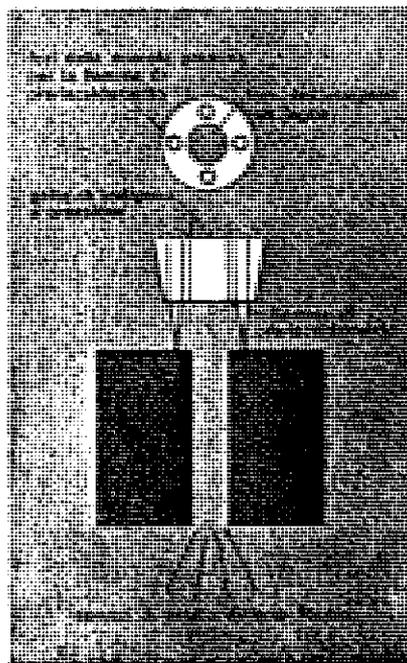


Fig. 331 - Schema che rappresenta la punta di un cannello da taglio.

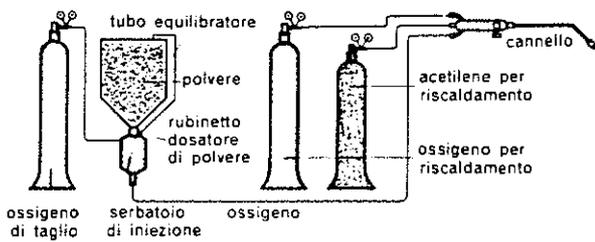


Fig. 332 - Rappresentazione schematica di impianto per taglio ad ossigeno con fondente (polvere che è proiettata con l'ossigeno).

Con questo sistema si possono realizzare tagli stretti e regolari in maniera rapida, e si possono tagliare spessori superiori a 1 m, esso è perciò particolarmente adatto per il taglio delle materozze di getti molto grossi e pesanti.

Per l'esecuzione di piccoli tagli è raccomandabile, e per l'esecuzione di grossi tagli è indispensabile, dotare il cannello di un dispositivo di traslazione automatica per ottenere un lavoro più regolare e consentire la protezione dell'operatore. Questo procedimento genera notevole quantità di fumi e perciò deve essere effettuato all'aperto od in un capannone molto arieggiato. Nella tab. LX sono indicati alcuni parametri relativi all'ossitaglio della ghisa grigia con polvere di ferro.

#### Foratura e taglio mediante lancia ad ossigeno

Per tagliare grosse materozze o spezzare getti di ghisa di grandi dimensioni, si adotta il sistema a fori allineati. A tale scopo si impiega una lancia ad ossigeno formata da un tubo di ferro di 5 mm di diametro interno e di 3 ÷ 4 m di lunghezza contenente in tutta la sua lunghezza 3 fili di acciaio dolce di 2 mm di diametro, collegata mediante un tubo flessibile ad una batteria di bombole di ossigeno dotate di un riduttore regolato ad una pressione di 8 o 15 · 10<sup>5</sup> Pa (8 o 15 bar). Un piccolo cannello ausiliario arroventa l'estremità di questo tubo, che è appoggiata e spinta fortemente sul getto da tagliare. Nello stesso tempo si apre improvvisamente l'arrivo dell'ossigeno, a contatto del quale il tubo ed i fili contenuti bruciano e lanciati dalla corrente d'ossigeno bruciano la ghisa. Si affonda quindi il tubo nel foro che si forma rigirandovelo per facilitare l'evacuazione delle scorie che sono proiettate verso i due operatori, i quali dovranno essere protetti con uno scudo attraversato da un foro per il passaggio della lancia. In questo modo si può effettuare un foro di 20 o 25 mm di diametro in 1 min su uno spessore di 40 cm, con il consumo di 2 m di tubo e 4 m<sup>3</sup> di ossigeno.

Si esegue una serie di fori ravvicinati seguendo la prevista linea di taglio, e si pone subito in ciascun foro una spina conica, intanto che il getto è ancora caldo. Raffred-

dandolo quindi bruscamente con un getto di acqua fredda lo si fa scoppiare, provocandone la rottura lungo la prevista linea di taglio.

#### Taglio per fusione localizzata senza combustione

##### Taglio all'arco di carbone

Il taglio per semplice fusione seguendo una traccia segnata sul getto è un sistema artigianale che può essere applicato ai getti di ghisa grigia. Quale fonte di calore si adotta l'arco elettrico in corrente alternata, acceso fra elettrodi di grafite del diametro da 6 a 20 mm con una intensità di corrente dipendente dal diametro dell'elettrodo secondo la formula:

$I = 30 \times d$  in mm, ancora meglio è l'impiego di corrente continua con elettrodo collegato al polo negativo.

È evidente che tali elettrodi dovranno essere supportati da speciali pinze, data l'elevata intensità di corrente in gioco.

Questo procedimento necessita di una particolare manualità per allontanare dalla zona del taglio il metallo fuso.

L'uso di elettrodi di grafite superficialmente ramati, limitandone il surriscaldamento, ne limita il consumo.

L'elettrodo di grafite può essere sostituito vantaggiosamente da elettrodi di acciaio dolce da taglio rivestiti con un rivestimento costituito da materiali fondenti che fluidificano la ghisa fusa, facilitandone l'eliminazione. Un tipo di questi elettrodi è dotato di un rivestimento a base di termita che eroga una maggiore quantità di calore per facilitare il taglio.

##### Il taglio al plasma

È attualmente applicato per il taglio degli acciai inossidabili, è stato sperimentato anche per la ghisa grigia. Questo procedimento si vale delle altissime temperature sviluppate fra la torcia al plasma ed il getto da tagliare. Fino ad ora, però, l'alto costo delle apparecchiature e dell'operazione medesima e la sua delicatezza non lo fanno applicabile alla ghisa.

##### Taglio all'arco elettrico

In sostanza anche i precedenti sistemi di taglio per fusione si effettuano con l'impiego diretto od indiretto dell'arco elettrico e, pertanto, dovrebbero essere classificati nello stesso paragrafo.

##### Procedimento Arc-air

Impiega un elettrodo di grafite a superficie ramata, allo scopo di aumentarne la durata, per innescare un arco

Tabella LX - Parametri relativi all'ossitaglio della ghisa grigia con polvere di ferro.

Spessore da tagliare mm	Diametro ugello mm	Pressione ossigeno in bar	Velocità in m/h	Consumi per m di taglio	
				ossigeno in m <sup>3</sup>	polvere in kg
10	2,0	3,0	11,0	0,75	0,8
50	2,5	3,5	6,0	2,20	2,1
150	3,0	4,5	3,5	6,25	4,0
500	4,5	7,0	1,5	46,00	27,0

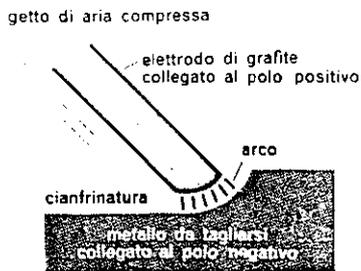


Fig. 333 - Rappresentazione schematica del sistema di taglio Arcair.

elettrico fra questo ed il getto da tagliare, fondendolo; il metallo fuso allo stato liquido è, quindi, allontanato dal taglio mediante un getto di aria compressa che esce da un ugello situato posteriormente all'elettrodo, così come rappresentato nella fig. 333. Il procedimento è applicabile alla ghisa grigia a condizione di impiegare la corrente alternata in luogo della corrente continua, ed elettrodi di grafite ad impasto ionizzante in luogo dei normali elettrodi adatti per la corrente continua. Le intensità di corrente sono dell'ordine di 250 a 400 A, a seconda del diametro dell'elettrodo ed il consumo d'aria di circa 80 m<sup>3</sup>/h a 7 · 10<sup>5</sup> Pa (7 bar).

## CONCLUSIONE

La ghisa grigia sotto vari aspetti si comporta nella saldatura in modo essenzialmente diverso dall'acciaio:

- Ha un basso punto di fusione ed un elevato grado di fluidità; presenta nella struttura quantità variabile di grafite e manca dello stato intermedio plastico a caldo caratteristico dell'acciaio.
- Ha un modulo di elasticità nettamente più basso e variabile, a seconda del valore della resistenza a trazione.
- Presenta un trascurabile allungamento, per cui le tensioni interne originatesi dalla contrazione della zona saldata non sono assorbibili plasticamente.
- La struttura della ghisa dipende fortemente dalla velocità di raffreddamento della zona saldata e di quella influenzata termicamente: si rende necessario, in molti casi, un lento preriscaldamento seguito da un lento raffreddamento per evitare rotture od alterazioni strutturali con caduta della lavorabilità.

Se si tengono in debito conto le sopracitate particolarità, si può affermare che la saldatura della ghisa riesce altrettanto omogenea di quella eseguita sull'acciaio.

I procedimenti più impiegati per la saldatura della ghisa grigia illustrate nel presente capitolo si possono riepilogare come segue:

- Saldatura a caldo per cricche estese: ossiacetilenica o ad arco elettrico con preriscaldamento e raffreddamento lento.
- Saldatura a freddo o semifreddo per piccoli difetti: ossiacetilenica e più frequentemente arco elettrico.
- Saldatura per scorrimento: per grosse cavità o grossi riporti con preriscaldamento e raffreddamento lento. Ghisa liquida da siviare. Procedimento alluminotermico.
- Saldature speciali: ad arco protetto con gas inerti od attivi (CO<sub>2</sub>) per saldature di serie.

Il pregiudizio non ancora superato che la ghisa grigia sia poco saldabile ha limitato sinora l'impiego alla riparazione di getti rotti in servizio oppure di getti difettosi.

È possibile prevedere nel futuro un estendersi della saldatura alle costruzioni miste: ghisa ed acciaio od altri metalli, per realizzazioni, entro i limiti di convenienza tecnico-economica, meccanicamente più perfezionate e più corrispondenti alle sollecitazioni di esercizio.

## BIBLIOGRAFIA

- Gray and Ductile Iron Casting Handbook - Gray and Ductile Iron Founders Society Inc., Cleveland (USA).
- Manuel des Fontes Moulées - Editions Techniques des Industries de la Fonderie, Paris 16, 12 Avenue Raphael.
- H. GRUNDMANN - Schweißen von Gusseisen Werkstoffen und Grauguss - Deutscher Verlag für Schweisstechnik G.m.b.h., Duesseldorf.
- Soudages des Fontes - Bulletin de documentation technique. Centre Technique des Industries de la Fonderie, Paris 16, 12 Avenue Raphael.
- M. T. MORELLE - Soudage des Fontes et particulièrement des Fontes Grises - Etude Bibliographique. Editions Techniques de la Fonderie, Paris 16, 12 Avenue Raphael.
- W. H. BRUCKNER - Metallurgie of Welding - Sir Isaac Pitman e Sons Ltd., London.
- Soudage de la Fonte à Graphite Lamellaire - Centre Technique des Industries de la Fonderie, Paris 16, 12 Avenue Raphael.
- Soudage des Fontes et particulièrement des Fontes Grises - Centre Technique des Industries de la Fonderie, Paris 16, 12 Avenue Raphael.
- D. GLIZMANENKO, G. YEVSEYEV - Gas Welding and Cutting - Peace Publishers, Moscow.
- R. KRANKE - Stand der Graugusschweisseung - Schweisstechnik, 12, n. 10, 1962, pp. 469-473. Parte 2<sup>a</sup>, 12, n. 12, 1962, pp. 571-574. Parte 3<sup>a</sup>, 13, n. 2, 1963, pp. 81-85.
- F. RICHTER - Gusseisen Kaltschweißen mit Hicel und Cupfernichel ferritischen Elektroden - Schweisstechnik, 15, n. 8, 1964, pp. 349-350.
- H. GRANJON - Soudabilité des Fontes à la lumière des diagrammes de transformation au refroidissement continu - Réunion franco belge sur l'emploi conjugué des matériaux moulés et du soudage, Bruxelles 11, 12 maggio 1970. Soudage et Techniques Connexes 1-2, 1971.
- H. WIRTZ - Schweißen von Gusseisen mit Lamellengraphit - Zentrale für Gussverwendung Mitteilungen, n. 1112/1502, Duesseldorf.
- H. WIRTZ - Stand der Technik des Schweißens von Gusseisen mit Lamellengraphit - Giesserei 54, n. 23, 1967, pp. 609-618.
- Tesi di laurea inedite - Università di Trieste, Facoltà di Ingegneria, Specializzazione Ingegneria Chimica, Istituto di Chimica Applicata (Relatore prof. dr. Aldo Regé, Incaricato Esterno Stabilizzato di Tecnologia dei Metalli).
- A. G. BIANCO - Sulla possibilità di ottenere giunzioni validamente resistenti su ghisa grigia meccanica a grafite lamellare mediante procedimenti di saldatura ad arco a freddo - Anno Accademico 1970-1971.
- F. DUBINI - Realizzazione di giunzioni mediante saldatura ad arco senza preriscaldamento di tipi di ghisa di qualità differente tra di loro e con acciaio - Anno Accademico 1971-1972.
- L. ZAMBON - Saldatura di testa a scintillio di vari tipi di ghisa a grafite lamellare, malleabile, sferoidale. Caratteristiche meccaniche e trasformazioni strutturali - Anno Accademico 1973-1974.
- G. DELLA ROSA - Saldatura di testa a scintillio fra metalli differenti. Caratteristiche meccaniche e trasformazioni strutturali - Anno Accademico 1974-1975.

**Volume II: Ghise grigie**  
**Capitolo IX**

## **Lavorazione alle macchine utensili**

- INTRODUZIONE
- CONSIDERAZIONI SULLA LAVORAZIONE
- BIBLIOGRAFIA

A cura di: Alfonso Bruno  
Ruggero Chiara



## INTRODUZIONE

Nel Volume 1° *Metallurgia generale* ed in alcuni Capitoli di questo volume, sono stati ampiamente illustrati le morfologie strutturali delle ghise in genere, i procedimenti di inoculazione nonché i vari trattamenti termici delle ghise con i relativi criteri di scelta.

In questo Volume si sono in particolare considerati i vari andamenti metallurgici del processo di produzione delle ghise grigie e si sono valutati gli aspetti tecnici ed economici relativi, nonché le loro influenze sulle caratteristiche e proprietà desiderate sul prodotto finale, compresa la lavorabilità all'utensile. Infatti, sono stati esaminati i metodi per la determinazione del grado di lavorabilità delle ghise e si sono puntualizzate le influenze delle strutture e di alcuni elementi di lega sulla lavorabilità stessa.

Il quadro teorico-operativo di carattere metallurgico, che è stato così formulato, trova un'applicazione di notevole importanza quando si deve affrontare il complesso problema della lavorazione delle ghise grigie alle macchine utensili. Qui, infatti, è messo alla prova pratica tutto quanto è stato detto e ripetuto sulle caratteristiche e proprietà delle ghise, sui loro componenti strutturali, le durezza, i tipi di grafite, le influenze degli elementi di lega, ecc., che giocano un ruolo determinante agli effetti dei risultati ottenibili con la lavorazione meccanica (consumo di utensili, tempi di lavorazione, ecc.).

Come si vede, la lavorazione meccanica dei getti di ghisa grigia non è una operazione completamente al di fuori della competenza del fonditore. Basta pensare che proprio la caratteristica di buona lavorabilità è molte volte la ragione principale della scelta di questo materiale.

Per il fonditore non è tanto questione di ottenere un riconoscimento generico di lavorabilità del prodotto,

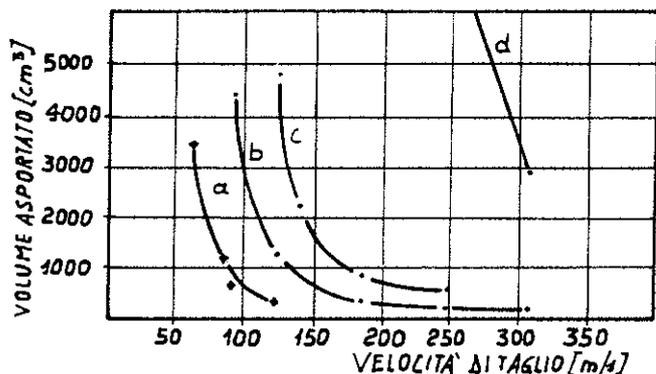


Fig. 334 - Influenza della microstruttura e della velocità di taglio sul volume di materiale asportato in lavorazione di tornitura.  
 a - 80% di perlite fine e 20% di ferrite; 265 HB.  
 b - 50% di perlite-ferrite; 215 HB.  
 c - 40% di perlite e 60% di ferrite; 207 HB.  
 d - 100% di ferrite; 170 HB.

quanto di venire incontro, caso per caso, alle richieste del cliente che adotta sempre più frequentemente macchine e metodi sofisticati per ridurre i tempi e migliorare la finitura e la precisione.

Perciò è opportuno approfondire l'argomento della lavorazione meccanica dei getti di ghisa grigia con una rassegna dei metodi, delle macchine e delle caratteristiche degli utensili impiegati.

È inevitabile, a questo scopo, introdurre concetti e grandezze poco familiari ai fonditori. Ma si vedrà l'utilità di tutto questo nella discussione con i clienti dai quali si otterrà maggiore rispetto e, forse, un prezzo migliore.

Nelle figg. 334 e 335 è posta in evidenza l'influenza dei più importanti costituenti strutturali nelle lavorazioni di tornitura e fresatura sul volume di materiale asportato dall'utensile prima del suo decadimento. Il volume di materiale asportato esprime la durata dell'utensile.

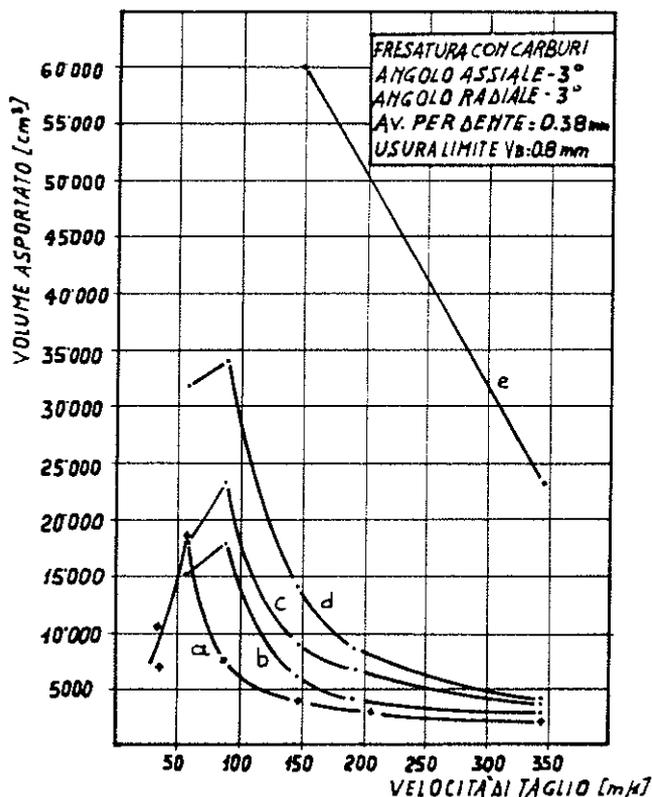


Fig. 335 - Influenza della microstruttura e della velocità di taglio sul volume di materiale asportato in lavorazione di fresatura.  
 a - Perlite media + 5% di carburi liberi; 240 HB.  
 b - Perlite fine; 217 HB.  
 c - Perlite media; 217 HB.  
 d - Perlite grossolana; 195 HB.  
 e - Ferrite; 130 HB.

Dall'esame delle figure si deduce che, con l'aumentare della durezza dei singoli costituenti, aumenta l'usura per abrasione dell'utensile e diminuisce, quindi, la sua durata, come nel caso della perlite fine, più dura di quella grossolana. Vanno, invece, ricordati, come favorevoli per la lavorazione, la grafite e la ferrite; in particolare, la grafite determina una discontinuità della matrice della ghisa grigia, favorendo la rottura del truciolo e la lubrificazione dell'utensile.

Questi favorevoli effetti della grafite sulla lavorabilità possono, tuttavia, ridursi od annullarsi nei casi in cui si verificano nel getto particolari anomalie che influiscono negativamente sulla durata dell'utensile durante la lavorazione.

In sintesi, si ricordano le principali:

— Presenza di zone temprate, e quindi molto dure, sugli spigoli del getto ed in corrispondenza di sezioni sottili. Queste si incontrano più frequentemente nei getti di piccolo spessore o di forma complessa od in ghise ad alta resistenza; possono essere efficacemente ovviate ricorrendo all'impiego di procedimenti di inoculazione o di ricottura già esaminati precedentemente. Si può ricordare che la ricottura ad alte temperature può alterare le dimensioni originali dei

getti di ghisa, in presenza anche di svergolamenti, con conseguenti difficoltà per la loro lavorazione. Così pure dicasi per l'eventuale presenza di residui di ossidazione sulla superficie dei getti ricotti.

— Presenza di residui sabbiosi aderenti alla superficie del getto. In tal caso l'uso di utensili in carburo si dimostra più efficace per la migliore resistenza all'abrasione.

— Rigonfiamenti del getto, come conseguenza di forme inadeguate. Essi si rivelano particolarmente dannosi nelle lavorazioni complesse, come la brocciatura, dove si utilizzano basse velocità di taglio od anche in quelle dove, per ottenere un'elevata produzione, si deve ricorrere a velocità piuttosto elevate. Il metallo in eccesso, presente in corrispondenza dei rigonfiamenti, produce dei carichi improvvisi sull'utensile, compromettendone la durata. Tale inconveniente si verifica anche per effetto di uno sfasamento nella linea di divisione dei getti od in presenza di cavità di risucchio.

A questi ultimi si associa sovente un incremento di durezza che può indurre, ad esempio in operazione di foratura, la punta ad eccessivi sforzi ed anche alla rottura improvvisa.

## CONSIDERAZIONI SULLA LAVORAZIONE

Le ghise grigie hanno un buon comportamento in tutte le principali lavorazioni con asportazione di truciolo. In particolare allo stato ricotto, possono essere lavorate con alte velocità di taglio. Anche con strutture di tempra le condizioni di taglio possono essere scelte con una certa tranquillità, tra quelle che consentono di mantenere ancora una discreta produttività.

Tutto ciò può essere espresso in termini di durata degli utensili, di finitura superficiale e di sforzi di taglio. Questi 3 fattori, infatti, permettono di definire la lavorabilità di un materiale. Nei paragrafi successivi si esporranno su di essi alcune considerazioni, desunte dalla pratica industriale, che ne giustificano l'importanza.

### Sforzi di taglio

Gli sforzi di taglio costituiscono un metodo indiretto per la valutazione della lavorabilità di un materiale. L'interesse, con cui sono raccolti e discussi, è motivato dal fatto che per mezzo di essi è possibile giustificare alcuni possibili errori di lavorazione, riscontrabili sui getti finiti e permettere una scelta ragionata della macchina utensile da impiegare. Infatti, valori elevati degli sforzi di taglio possono provocare una diminuzione della precisione di lavorazione a causa di flessioni del getto, un peggioramento della finitura superficiale a causa di vibrazioni ed infine rotture premature degli utensili.

Parlando di forze di taglio, ci si riferisce di solito alle 3 componenti, secondo cui può scomporsi la forza totale che agisce sul tagliente impegnato in lavorazione. Facendo riferimento allo schema riportato in fig. 336, si nota che la forza risultante è scomposta in 3 componenti, dirette secondo i 3 assi (x, y e z) di un triedo, che ha

l'origine sul vertice dell'utensile, e precisamente  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ .

La  $F_x$  è la *forza principale di taglio*, diretta tangenzialmente al getto nel verso della velocità ed assorbe la maggior parte della potenza.

La  $F_y$ , detta anche *forza di repulsione* o normale, è diretta secondo l'asse dell'utensile ed è orientata in modo da esercitare sull'utensile stesso un'azione tendente ad allontanarlo dal getto.

La  $F_z$  o *forza di avanzamento* è diretta secondo l'asse del getto ed è orientata in modo da opporsi all'avanzamento. La potenza assorbita è molto piccola. In linea di principio la  $F_x$  è sempre la più elevata, la  $F_y$  ha valori

compresi tra  $\frac{1}{2}$  e  $\frac{1}{4}$  di  $F_x$ , mentre  $F_z$  ha valori

compresi tra  $\frac{1}{3}$  e  $\frac{1}{6}$  di  $F_x$ .

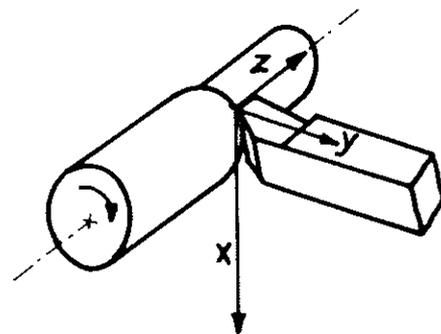


Fig. 336 - Scomposizione della forza che il getto applica all'utensile nelle 3 direzioni x, y, z.

Tabella LXI - Sforzi specifici di taglio K, rilevati su alcuni tipi di ghisa a grafite lamellare.

Tipo di ghisa	Profondità di passata P (mm)													
	0,063	0,08	0,1	0,125	0,16	0,20	0,25	0,315	0,40	0,50	0,63	0,80	1,00	1,25
	Forza di taglio specifica K <sub>s</sub> (N/mm <sup>2</sup> )													
G 10	1,070	1,040	1,010	980	950	920	900	870	840	820	800	770	750	730
G 15	1,700	1,610	1,540	1,470	1,400	1,330	1,270	1,210	1,150	1,100	1,050	1,000	950	910
G 20	2,040	1,920	1,810	1,720	1,610	1,530	1,440	1,360	1,280	1,210	1,150	1,080	1,020	960
G 25	2,380	2,240	2,110	1,990	1,870	1,760	1,660	1,570	1,470	1,390	1,310	1,230	1,160	1,100

In genere gli sforzi di taglio, rilevati con dinamometri, sono elaborati in modo da ricavare le pressioni specifiche di taglio, che esprimono il rapporto tra le forze in gioco e la sezione di truciolo e sono espresse in N/cm<sup>2</sup>.

Questi valori sono mediamente costanti per ogni materiale, ma possono anche aumentare fino a raddoppiarsi impiegando utensili con affilature non adatte, o raggiungere addirittura il 300% con utensili eccessivamente usati od adottando condizioni di taglio molto onerose.

Normalmente per le ghise grigie si hanno valori di pressione specifica di taglio inferiori di circa il 50% di quelle corrispondenti ad un acciaio non legato tipo C45.

È possibile, quindi, impiegare macchine utensili di minore potenza ovvero potere sfruttare con maggiore tranquillità le caratteristiche delle macchine utensili a disposizione.

Alcuni valori delle pressioni specifiche di taglio rilevate su alcuni tipi di ghise grigie sono riportate in tab. LXI.

Un altro aspetto importante degli sforzi di taglio è quello legato alla potenza assorbita in lavorazione. In tab. LXII sono riportati alcuni valori caratteristici per le ghise grigie; tali valori si riferiscono alla potenza all'utensile, che è circa il 75% di quella disponibile, e con utensili ben affilati. Le differenze tra le varie lavorazioni e per diverse durezza possono considerarsi trascurabili qualora intervenga l'usura dell'utensile, o si abbiano a disposizione macchine utensili in non perfette condizioni.

Tabella LXII - Potenza di taglio con utensile affilato e per avanzamenti da 0,2 a 0,3 mm per dente.

Tipo di lavorazione	Potenza HP/cm <sup>1</sup> · min		
	160 ÷ 193 HB	193 ÷ 220 HB	220 ÷ 240 HB
Tornitura	0,036	0,042	0,045
Piallatura	0,027	0,030	0,033
Foratura	0,033	0,036	0,039
Fresatura	0,036	0,039	0,042

### Finitura superficiale

Con il termine *finitura superficiale* si definisce quell'insieme di caratteristiche come la rugosità, l'ondulazione, le profondità dei picchi, la distanza piccovalle, la lucentezza, ecc., che individuano la *bontà* di una superficie ottenuta per lavorazione meccanica. Alcune di queste caratteristiche come la rugosità, l'ondulazione, ecc., sono misurabili mediante opportuni strumenti, mentre altre, come ad esempio la lucentezza, sono dei parametri soggettivi e vanno considerati come indici apparenti della qualità della superficie ottenuta.

Il parametro più comunemente usato per valutare la finitura superficiale è la rugosità, definita come media aritmetica « Ra » dei valori assoluti delle deviazioni del profilo reale rispetto alla linea media. Esso è rappresentato schematicamente in fig. 337.

Nel caso delle ghise la rugosità Ra è peggiore di quella ottenibile sugli acciai, a pari condizioni di lavoro, perché durante la lavorazione, specialmente in condizioni di taglio gravose, la grafite è scalzata dalla matrice e, quindi, la superficie assume un aspetto poroso. Di conseguenza i valori di Ra risultano più elevati. Occorre osservare che questo inconveniente può risultare non svantaggioso in alcuni casi, come per accoppiamenti scorrevoli; può invece creare qualche problema nel caso del montaggio di anelli di tenuta, ecc.

I valori limiti ottenibili per le ghise grigie dipendono dalla morfologia e dalle dimensioni della perlite. Essi sono compresi, nel caso ottimale di lucidatura metallografica, nell'intervallo 0,2 ÷ 0,05 μ. Nella tab. LXIII sono riportati alcuni valori di rugosità ottenibili nelle principali lavorazioni meccaniche.

Per quel che riguarda la scelta delle condizioni di lavorazione da impiegare, valgono gli stessi criteri adottati per gli acciai. In particolare, la rugosità diminuisce al crescere della velocità di taglio ed al diminuire dell'avanzamento; è poco influenzata dalla profondità di passata e dal tipo di fluido da taglio eventualmente impiegato. Migliora al crescere del raggio dell'utensile e della precisione con cui gli utensili sono affilati.



Fig. 337 - Rugosità delle superfici e definizioni relative (Ra).

Tabella LXIII - Rugosità (Ra) ottenibile in alcune lavorazioni meccaniche.

Tipo di lavorazione	Dimensioni delle lamelle di grafite ASTM 4	
	Matrice ferritica 130 HB	Matrice perlitica 185 HB
Tornitura di sgrossatura	1,5 ÷ 5,0	1,25 ÷ 3,0
Tornitura di finitura	1,5 ÷ 3,0	3,0 ÷ 2,25
Fresatura di sgrossatura	3,25 ÷ 7,25	2,5 ÷ 7,0
Fresatura di finitura	3,25 ÷ 4,25	2,5 ÷ 4,75
Rettificazione di sgrossatura	0,375 ÷ 0,625	0,375 ÷ 0,625
Rettificazione di finitura	0,2 ÷ 0,3	0,2 ÷ 0,3

**Durata degli utensili**

Nelle lavorazioni meccaniche ad asportazione di truciolo, la durata degli utensili impiegati è uno dei parametri più significativi per valutare la convenienza, dal punto di vista economico e produttivo, di una lavorazione.

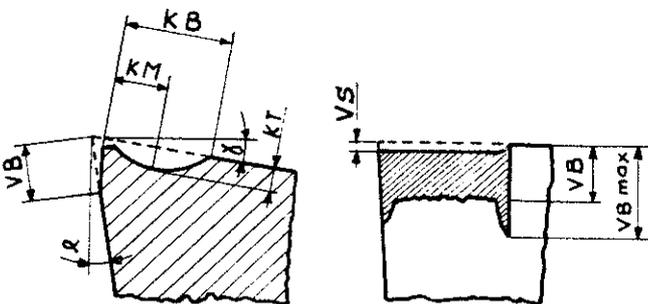
La durata è definita come tempo effettivo di lavoro dell'utensile, prima della sua sostituzione per crollo dello spigolo tagliente o per usura.

Il criterio di usura normalmente accettato consiste nel raggiungimento di valori di usura sul fianco dell'ordine di 0,5 ÷ 1 mm o della profondità del cratere nel caso particolare di utensili in carburi sinterizzati.

Si riporta, nella fig. 338, uno schema di utensile con i principali tipi di usura e le grandezze misurabili. In fig. 339 sono rappresentate le usure rispettivamente sul fianco e sul petto (cratere) di un utensile in carburo sinterizzato.

La durata dell'utensile è funzione, com'è noto, di vari parametri quali: il tipo e la struttura del materiale in lavoro, degli utensili e della loro affilatura, nonché delle condizioni di taglio. Per quel che riguarda l'influenza della struttura del materiale, si è fatto cenno in precedenza. Va ricordata inoltre l'influenza, non trascurabile, dello stato della macchina utensile e delle dimensioni del getto in lavoro, che devono ottemperare ovviamente a criteri ottimali (buona rigidità della macchina, non eccessiva snellezza dei getti in lavoro, ecc.).

La relazione che lega la durata dell'utensile ai vari parametri è sintetizzata, in prima approssimazione, dalla legge di Taylor:



SEZIONE A-B

Fig. 338 - Schema di usura sul fianco e sul petto di un utensile da tornio.

$$VT^n = C$$

(1)

dove:

V = velocità di taglio  $\left(\frac{m}{min}\right)$

T = durata dell'utensile (min)

n = esponente dipendente dalle condizioni di taglio, dal materiale in lavoro e dall'utensile

C = costante di Taylor, che esprime la velocità di taglio cui corrisponde la durata di 1 min.

In un diagramma doppio logaritmico la legge di Taylor è rappresentata da una retta, con pendenza pari a n.

Nella fig. 340 è messa in evidenza la variazione percentuale della durata dell'utensile al variare della velocità di taglio. È evidente la notevole influenza dell'esponente n; maggiore è il suo valore e minore è l'effetto della variazione di velocità di taglio sulla variazione di durata.

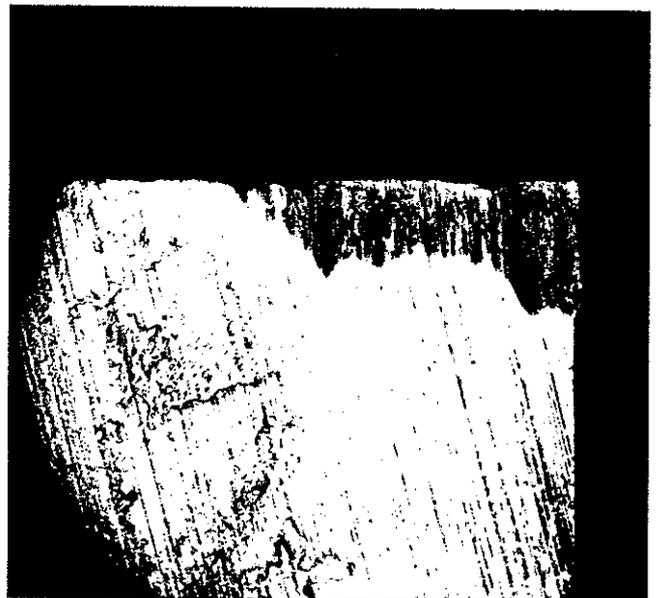
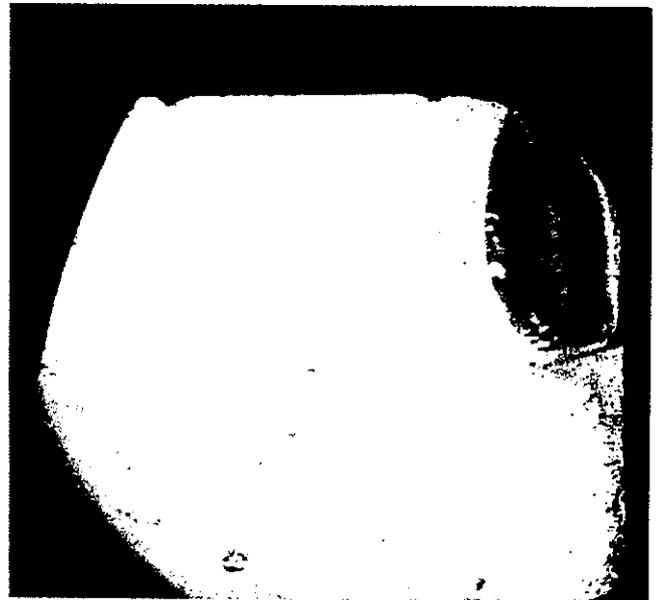


Fig. 339 - Usura sul petto e sul fianco di un utensile da tornio.

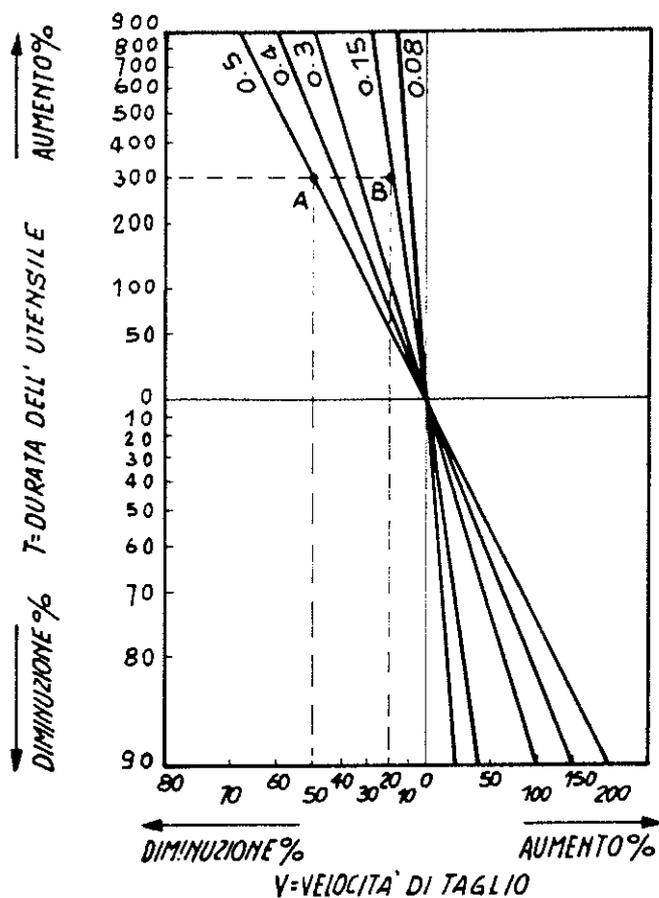


Fig. 340 - Variazione percentuale della durata dell'utensile con la velocità per esponenti  $\eta$  da 0 a 0.5.

La pendenza, inoltre, varia al variare dei materiali per utensili. I valori sono mediamente 0,18 per acciai rapidi, 0,3 per carburi e 0,5 per ceramici.

Altre considerazioni possono essere fatte a proposito della scelta delle condizioni ottimali di taglio. Ricordando che in generale il costo di una lavorazione è dato dalla somma di 2 termini, di cui uno esprime il costo macchina e l'altro il costo dell'utensile, si possono tracciare le curve rappresentative di fig. 341.

Una curva durata-velocità, con un alto valore dell'esponente, appiattisce la curva b, e di conseguenza quella generale c, spostando verso destra il minimo, avvicinandolo quindi alla velocità di massima produzione.

Ciò permette di potere scegliere la velocità economica, quella cioè corrispondente al minimo costo, in un intervallo più ampio, senza eccessive penalizzazioni in termini di costi. Nei paragrafi successivi saranno esaminati i materiali per utensili, l'affilatura e le condizioni di taglio in modo da potere avere dei dati di base per una corretta impostazione della lavorazione. Tali dati, ricavati sia dalla letteratura che dalla pratica industriale, vanno considerati con un certo spirito critico, ricordando che esprimono valori generalizzati.

### Materiali per utensili

Nelle lavorazioni della ghisa possono essere usati tutti quei tipi di materiali per utensili comunemente impiegati nella pratica industriale: acciai rapidi, carburi sinterizzati e ceramici.

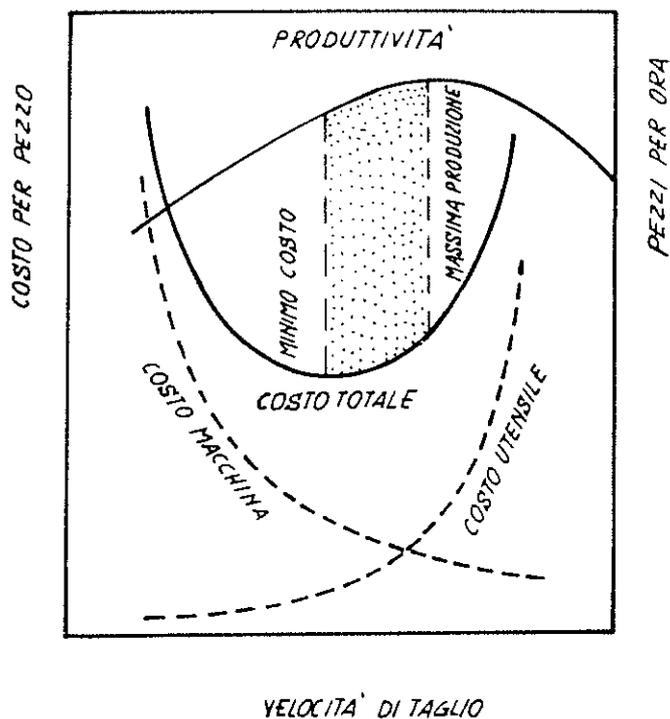


Fig. 341 - Andamento della curva dei costi e della produttività in funzione della velocità di taglio.

La scelta di un tipo rispetto ad un altro è dettata da considerazioni di economicità di lavorazione e di produttività. Passando da un materiale all'altro, infatti, si esaltano alcune caratteristiche, meno altre: ad esempio, la resistenza all'usura, passando dagli acciai rapidi ai ceramici, aumenta notevolmente, mentre diminuisce sensibilmente la resistenza agli urti. In ogni caso non va dimenticato che la scelta di un materiale per utensile è sempre vincolata al tipo di lavorazione che si vuole effettuare, alle condizioni di lavoro che si vogliono o si possono adottare, al tipo ed alla qualità della macchina che si ha a disposizione.

### Acciai rapidi

Gli acciai rapidi sono impiegati nelle principali lavorazioni meccaniche e sono insostituibili nella foratura, maschiatura ed in alcune operazioni di fresatura, cioè in quelle lavorazioni per le quali si richiedono utensili di complessa geometria, e con ottime caratteristiche meccaniche.

Nella tab. LXIV sono riportate le analisi chimiche dei tipi più comunemente impiegati. Come si vede, sono usati solo quelli al molibdeno ed, in particolare, per lavorazioni di ghise con durezza fino a  $190 \div 220$  HB non è necessario passare ai tipi più qualificati al cobalto.

Per ghise ad alta resistenza e durezza elevata sono da preferire i tipi al Co, quali lo M33, M41 e T15. Quest'ultimo tipo è quello in grado di risolvere i problemi più difficili, però è di non facile rettificabilità con mole normali; richiede, infatti, l'impiego di mole Borazon.

### Carburi sinterizzati

Gli utensili in carburi sinterizzati sono largamente impiegati nelle lavorazioni meccaniche per la loro elevata

Tabella LXIV - Classificazione degli acciai rapidi per la lavorazione della ghisa.

Tipo AISI	Composizione percentuale					
	C	W	Mo	Cr	V	Co
M1	0,80	1,50	8,00	4,00	1,00	—
M2	0,85	6,00	5,00	4,00	2,00	—
M7	1,00	1,75	8,75	4,00	2,00	—
M10	0,90	—	8,00	4,00	2,00	—
M33	0,90	1,50	9,50	4,00	1,15	8,00
M41	1,10	6,75	3,75	4,25	2,00	5,00
M42	1,10	1,50	9,50	3,75	1,15	8,00
M43	1,25	1,75	8,75	3,75	2,00	8,25
M44	1,15	5,25	6,25	4,25	2,25	12,00
T15	1,50	12,00	—	4,00	5,00	5,00

resistenza all'usura e la loro durezza, che ne permettono l'impiego a velocità da 2 a 3 volte superiori a quelle adottate per gli acciai rapidi.

I carburi sinterizzati sono classificati secondo le norme ISO, in 3 diverse qualità a seconda del materiale da lavorare: P per gli acciai da costruzione, M per acciai austenitici, per quelli fusi e le ghise, e K esclusivamente per le ghise. Inoltre, ogni qualità è contrassegnata da numeri (gradi) che variano da 0,1 a 60, e che individuano alcune caratteristiche meccaniche: una maggiore resistenza all'usura è indicata da un numero superiore, mentre una maggiore tenacità da un numero inferiore.

In tabella LXV sono riassunti i gradi più comunemente usati per la ghisa grigia ed alcuni suggerimenti d'impiego.

Occorre porre particolare attenzione al fatto che la denominazione non corrisponde ad una specifica composizione, ma a qualità meccaniche, individuate secondo criteri relativi. È molto difficile, quindi, effettuare un raffronto tra qualità *eguali* di marche diverse, per cui è sempre conveniente consultare le tabelle di conversione ed effettuare prove di confronto.

Tabella LXV - Qualità e grado dei carburi sinterizzati consigliati per le lavorazioni delle ghise.

Denominazioni ISO	Materiali in lavorazione	Condizioni di lavoro
K 01	Ghisa grigia di durezza elevata, ghisa in conchiglia	Tornitura e foratura di finitura, fresatura di finitura, raschiatura.
K 10	Ghisa grigia (HB > 220 kg/mm <sup>2</sup> ).	Tornitura, fresatura, foratura, spinatura, alesatura, raschiatura, brocciatura.
K 20	Ghisa grigia (HB < 220 kg/mm <sup>2</sup> ).	Tornitura, fresatura, piattatura, spinatura, raschiatura, alesatura e brocciatura richiedenti un'elevata tenacità del carburo.
K 30	Ghisa grigia con durezza bassa.	Tornitura, fresatura, piattatura, stozzatura, condizioni di taglio sfavorevoli; possibilità di elevati valori degli angoli di taglio.

## Ceramiche

I materiali ceramici, composti essenzialmente da ossidi di alluminio, costituiscono la classe di materiali per utensili caratterizzati dalla più elevata durezza e resistenza all'usura. Tuttavia, la loro elevata fragilità ne ha condizionato, sino ad ora, la diffusione. Nelle lavorazioni delle ghise hanno però ottenuto un certo successo, in particolare nella lavorazione dei tamburi-freno, dei dischi-freno, dei volani, ecc.

Ciò perché è stato possibile il loro uso in condizioni ottimali, trattandosi di getti fusi con piccoli sovrammontaggi; sono state impiegate, infatti, elevate velocità di taglio, piccoli avanzamenti e deboli profondità di passata. Per la lavorazione delle ghise è consigliabile l'impiego di ceramiche miste (nere) composte da ossidi di alluminio e carburi di titanio, con durezza più elevate e con resistenza agli shock termici tale da poterla impiegare in presenza di fluidi da taglio.

## Fluidi da taglio

Normalmente la ghisa è lavorata senza fluidi da taglio, tranne in alcune lavorazioni a tagli fortemente vincolati come la foratura, la maschiatura e la filettatura.

Infatti in presenza di un truciolo estremamente frazionato, l'impiego dei fluidi da taglio provoca la formazione di una densa poltiglia, fortemente abrasiva e quindi dannosa per le guide e gli accoppiamenti delle macchine utensili.

Attualmente, però, l'impiego dei fluidi da taglio sta trovando una progressiva applicazione, soprattutto nelle lavorazioni ad alte velocità.

Infatti, elevate asportazioni di materiali causano l'ammucchiarsi dei trucioli sul tagliente, aumentandone di molto la temperatura. Il fluido risulta, quindi, vantaggioso, in quanto facilita lo smaltimento del truciolo, abbassa la temperatura del tagliente, aumentandone quindi la durata.

Occorre ricordare, tuttavia, che la ghisa può reagire con i fluidi da taglio. In particolare, la grafite ha affinità con l'olio dell'emulsione e tende ad estrarlo, mentre alcuni composti di metalli alcalini — quali il calcio, il magnesio, presenti in piccole percentuali nelle ghise grigie — reagiscono con l'acqua, formando acetilene e gas di odore sgradevole.

Negli ultimi tempi sono stati sviluppati alcuni fluidi, solubili in acqua, con forte azione detergente che dovrebbero avviare in parte ad alcuni dei più gravi inconvenienti.

## Utensili e parametri di lavorazione

Nei paragrafi successivi saranno prese in esame le lavorazioni più rappresentative cui è sottoposta la ghisa grigia, indicando per ognuna di esse la geometria di affilatura degli utensili e le condizioni di taglio più idonee.

I dati riportati vogliono essere un'indicazione di prima approssimazione, per un corretto approccio inteso all'ottimizzazione del lavoro da effettuare.

Quale premessa generale ai valori riportati si ricorda che la velocità di taglio e l'avanzamento sono i parametri più importanti sui quali è necessario intervenire per potere influire sul rendimento economico di una lavorazione.

La profondità di passata, in genere, deve essere scelta tra le più alte possibili, compatibilmente con la robu-

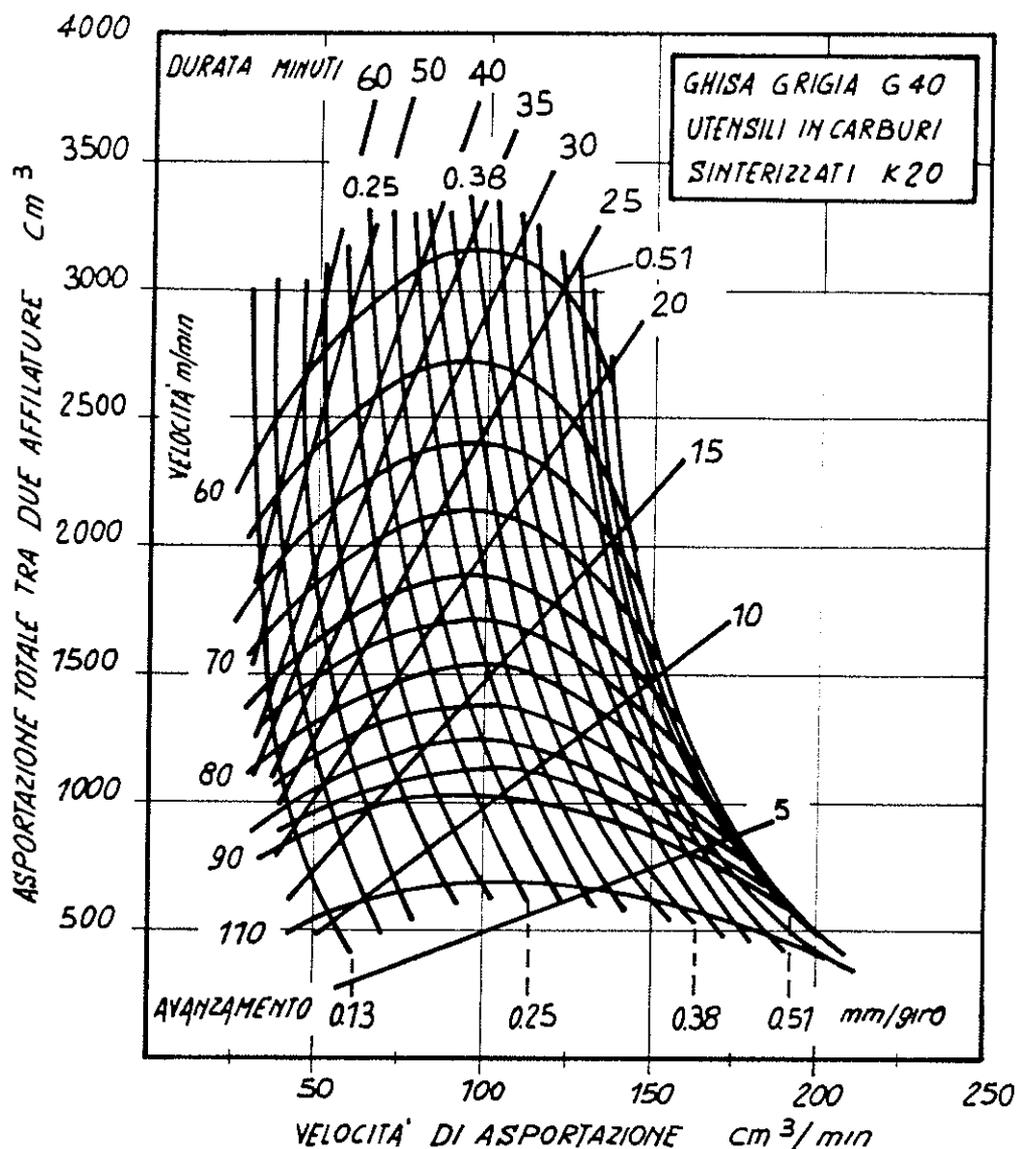


Fig. 342 - Relazione tra i parametri di lavorazione e le asportazioni nella tornitura della ghisa G40. Dati ricavati per una profondità di passata  $p = 4,5$  mm e fino ad un'usura sul fianco dell'utensile pari a 0,25 mm.

stezza e la potenza della macchina utensile a disposizione, a meno che non si tratti di una lavorazione particolare per la quale l'obiettivo principale sia essenzialmente una buona finitura superficiale.

Nel caso sia necessario, a pari durata, aumentare l'asportazione totale, occorre incrementare l'avanzamento e ridurre la velocità di taglio. Il diagramma di fig. 342, che si riferisce alle lavorazioni di tornitura, chiarisce tale procedimento. Infatti, le condizioni ottimali dal punto di vista dell'asportazione sono spostate verso basse velocità di taglio. L'aumento dell'avanzamento influisce positivamente sull'asportazione fino ad un massimo, oltre al quale l'influenza diventa negativa.

La scelta, invece, delle condizioni ottimali, dal punto di vista economico, è più complessa e va fatta tenendo conto, oltre che della produttività, anche del costo degli utensili, degli impianti, ecc. In genere, le condizioni di massima economicità si hanno a velocità più basse di quelle corrispondenti alla massima produzione.

È da ricordare, inoltre, che per un buon rendimento in lavorazione la durata dell'utensile deve essere di almeno  $3 \div 7$  volte il tempo relativo al cambio dell'utensile.

## Tornitura

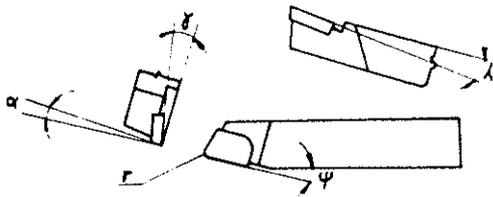
La tornitura è una tra le più diffuse lavorazioni ad asportazione di truciolo e di solito precede tutte le altre lavorazioni cui è sottoposto un particolare meccanico. In fig. 343 è riportato lo schema di un utensile da tornio tipo con l'indicazione dei principali angoli di affilatura.

Su di essi si ritiene opportuno riportare alcune considerazioni che ne sottolineano l'importanza e che possono essere estese anche ad altri tipi di utensili.

### Angolo di attacco ( $\Psi$ )

Tale angolo garantisce una graduale entrata ed uscita dell'utensile dal getto. Esso è sempre presente, a meno che non sia richiesta l'esecuzione di uno spigolo vivo.

Normalmente sono usati angoli che vanno da  $15^\circ$  a  $45^\circ$ ; valori superiori causano un aumento della forza assiale (avanzamenti) e radiale, con pericolo di flessioni del getto. Gli utensili circolari presentano un angolo di attacco variabile e sono adatti per l'impiego in condizioni di taglio interrotto; consentono avanzamenti più elevati ed una buona finitura superficiale.



Un inserto quadrato con  $\Psi = 15^\circ$  avrà  $\alpha_s = 15^\circ$ , mentre uno triangolare con  $\Psi = 15^\circ$  avrà  $\alpha_s = 45^\circ$  o con  $\Psi = 0^\circ$  avrà  $\alpha_s = 30^\circ$ .

#### Angolo di spoglia principale ( $\psi$ )

Per gli utensili di acciaio rapido tale angolo è generalmente positivo, perché si ottiene una buona azione di taglio alle basse velocità.

Per gli utensili di carburi sinterizzati sono consigliati angoli negativi, sia per le elevate velocità cui sono impiegati sia per la loro fragilità che richiede angoli di taglio robusti.

In generale, comunque, l'impiego di utensili con angoli negativi di spoglia è sconsigliato per quei particolari in lavoro nei quali si abbia la presenza di pareti sottili od uno sfavorevole rapporto diametro-lunghezza.

#### Angolo di spoglia inferiore ( $\alpha$ )

Tale angolo impedisce il tallonamento dell'utensile con la superficie lavorata. È normalmente compreso tra  $5^\circ$  e  $11^\circ$ , all'aumentare di tale angolo si hanno valori dell'usura sul fianco più piccoli, perché si riduce l'area di strisciamento della faccia di affilatura sulla superficie lavorata, aumenta però il pericolo di infragilire lo spigolo tagliente.

#### Raggio

Il raggio deve essere il più grande possibile, per ottenere buone finiture superficiali. I valori normali sono compresi tra 0,4 e 3 mm. Valori più elevati possono causare fenomeni di vibrazioni autoeccitate o flessioni su getti sottili. Per gli inserti in carburi sinterizzati il raggio va da 0,4 a 1,6 mm.

#### Smusso sui taglienti

Per aumentare la resistenza dello spigolo tagliente in utensili di carburi o ceramici, spesso sono eseguiti degli smussi o cianfrini su tutta la lunghezza dei taglienti. Più duro è il materiale in lavoro, minore deve essere l'estensione dello smusso.

Per i ceramici i valori sono di circa  $20^\circ$  di spoglia negativa con una larghezza di  $0,2 \div 0,3$  mm.

Nelle tabb. LXVI e LXVII sono riportate, per i diversi tipi di ghise grigie, alcune condizioni di taglio consigliate per la tornitura con utensili monotaglienti e di forma.

ANGOLI DI AFFILATURA PER UTENSILI DA TORNO			
		DUREZZA HB	
		170 ÷ 200	200 ÷ 300
<b>ACCIAI RAPIDI</b>			
ANGOLO DEL TAGLIENTE PRINCIPALE	$\psi$	15	15
ANGOLO DI SPOGLIA INFERIORE	$\alpha$	5	5
ANGOLO DI SPOGLIA SUPERIORE	$\gamma$	10	8
ANGOLO D'INCLINAZIONE	$\lambda$	5	5
<b>CARBURI SINTERIZZATI</b>			
<b>BRASATI</b>			
ANGOLO DI SPOGLIA SUPERIORE	$\gamma$	6	6
ANGOLO D'INCLINAZIONE	$\lambda$	0	0
<b>INSERTI</b>			
ANGOLO DEL TAGLIENTE PRINCIPALE	$\psi$	15	15
ANGOLO DI SPOGLIA INFERIORE	$\alpha$	5	5
ANGOLO DI SPOGLIA SUPERIORE	$\gamma$	-5	-5
ANGOLO D'INCLINAZIONE	$\lambda$	-5	-5

Fig. 343 - Schema di un utensile da tornio. Tipo e geometria di affilatura.

#### Angolo di spoglia secondario ( $\alpha_s$ )

Quest'angolo, che segue il tagliente principale, è utile ai fini di una buona finitura superficiale. Esso è modificabile solo negli utensili di acciaio rapido o di carburi brasati; può raggiungere valori di  $1^\circ$  qualora si richieda una buona finitura, normalmente si usano angoli di  $10 \div 15^\circ$ . Valori superiori sono sconsigliati per non assottigliare troppo lo spigolo tagliente.

Negli inserti i valori dell'angolo di spoglia secondario dipendono dalla forma dell'utensile che può essere quadrata o triangolare, e dal posizionamento del porta-utensile. Le placchette quadrate, con un angolo al vertice di  $90^\circ$ , sono più robuste di quelle triangolari con angoli al vertice di  $60^\circ$ .

Tabella LXVI - Condizioni di lavoro consigliate per la tornitura della ghisa grigia. Tornitura con utensili monotaglienti. Velocità consigliata (m/min).

Durezza HB	Sgrossatura $p = 4$ mm $a_p = 0,4$ mm/giro			Finitura $p = 0,5$ mm $a_p = 0,015$ mm/giro		
	Carburi K 10			Carburi K 01		
	Acciaio rapido	Brasati	Inserti	Acciaio rapido	Brasati	Inserti
110 ÷ 140	50	150	170	60	190	220
150 ÷ 190	30	110	130	45	150	176
190 ÷ 220	20	90	110	35	110	130
220 ÷ 260	15	70	90	25	90	110
260 ÷ 320	10	45	40	15	50	60

Tabella LXVII - Condizioni di lavoro consigliate per la tornitura della ghisa grigia. Tornitura con utensili di forma.

Durezza HB	Utensili in acciaio rapido				Utensili in carburi K 10			
	Vt m/min	Avanzamenti in mm/giro per larghezze di utensili 1 - 4 mm			Vt m/min	Avanzamenti in mm/giro per larghezze di utensili 1 - 4 mm		
		1,2	2,5	4		1,2	2,5	4
110 ÷ 140	35	0,2	0,15	0,1	110	0,4	0,3	0,2
150 ÷ 190	20	0,15	0,1	0,1	90	0,3	0,25	0,175
190 ÷ 220	15	0,1	0,1	0,05	70	0,175	0,175	0,12
220 ÷ 260	10	0,075	0,05	0,035	50	0,12	0,1	0,075
260 ÷ 320	5	0,05	0,035	0,035	30	0,11	0,085	0,06

Nel diagramma di fig. 342, per la ghisa G 40, i dati di lavorazione sono stati riportati sotto forma di un diagramma, nel quale le durate, la velocità di taglio e l'avanzamento, sono correlati con l'asportazione.

Un tale diagramma permette di stimare facilmente l'influenza dei vari parametri di taglio, sia sull'asportazione per unità di tempo che su quella totale. Inoltre, permette di individuare la velocità di taglio più conveniente per un certo avanzamento e viceversa, ed è facile verificare che i valori più elevati di asportazione si ottengono usando gli avanzamenti più alti possibile, riducendo nel contempo la velocità di taglio.

### Foratura

La foratura della ghisa si effettua generalmente impiegando utensili di acciaio rapido normale od al cobalto nel caso di getti di elevata durezza. In fig. 344 è riportato lo schema di una punta ad elica con l'indicazione dei principali angoli di affilatura ed i valori consigliati per le diverse durezze del materiale da lavorare.

I valori riportati sono d'impiego generale e possono essere modificati in alcuni casi particolari come per la foratura profonda, che richiede un angolo dell'elica «  $\gamma$  » più elevato ed uno scarico del nocciolo.

L'impiego di punte di carburi sinterizzati non è molto diffuso a causa dell'elevato costo rispetto a quelle di acciaio rapido e per la notevole cura richiesta nell'impiego e nella riaffilatura.

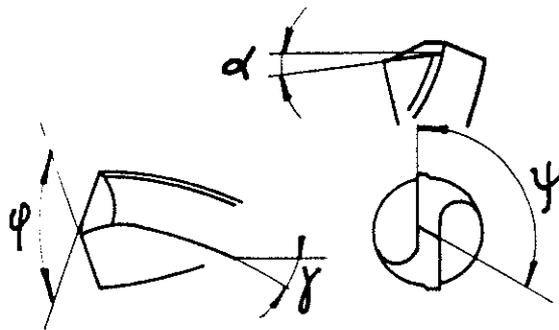
Nella tab. LXVIII (a, b, c) sono riportati i dati di lavoro per i principali tipi di ghisa grigia, impiegando rispettivamente punte ad elica normali in acciaio rapido, in carburi, e punte cannone per foratura profonda.

I dati riportati nella tab. LXVIII (a, b) si riferiscono a lunghezze di foratura normali, cioè con il rapporto lunghezza foratura-diametro di foratura non superiore a 3.

### Alesatura

L'alesatura è una lavorazione che ha come obiettivo di migliorare la precisione dimensionale e la finitura di un foro.

L'utensile, rappresentato in fig. 345, ha 2 o più gole, parallele od inclinate rispetto all'asse, che danno origine ai taglienti ed alle cave per la raccolta dei trucioli: gli utensili impiegati nella lavorazione della ghisa sono di acciaio rapido e di carburi sinterizzati sia brasati che a lame riportate e registrabili. Questi ultimi sono normalmente impiegati nella produzione di grandi lotti.



DUREZZA	ANGOLO DI PUNTA	ANGOLO DI SPOGLIA	ANGOLO DI NOCCILO	ANGOLO DELL'ELICA	TIPO DI AFFILATURA
110-225	118	8 ÷ 12	125 ÷ 135	24 ÷ 32	STANDARD
225-400	118	10 ÷ 12	125 ÷ 135	24 ÷ 32	STANDARD
	$\psi$	$\alpha$	$\psi$	$\gamma$	

Fig. 344 - Schema di una punta ad elica e geometria di affilatura.

Tabella LXVIII - Condizioni di taglio consigliate per la foratura della ghisa grigia.

a - Punta ad elica in acciaio rapido tipo M 1, M 7 e M 10.

Durezza HB	V <sub>t</sub> m/min	Avanzamenti in mm/giro per diametri di foratura					
		4	6	12	25	35	50
110 ÷ 140	45	0,075	0,15	0,25	0,35	0,45	0,55
150 ÷ 190	30	0,075	0,12	0,2	0,3	0,35	0,35
190 ÷ 220	30	0,075	0,12	0,2	0,3	0,35	0,35
220 ÷ 290	25	0,05	0,1	0,15	0,25	0,3	0,35

b - Punta ad elica in carburi sinterizzati grado K 20.

Durezza HB	V <sub>t</sub> m/min	Avanzamenti in mm/giro per diametri di foratura					
		4	6	12	25	35	50
110 ÷ 140	75	0,075	0,15	0,25	0,35	0,45	0,55
150 ÷ 220	65	0,075	0,12	0,2	0,3	0,35	0,35
220 ÷ 260	50	0,05	0,1	0,15	0,25	0,3	0,35
250 ÷ 320	30	0,025	0,075	0,12	0,22	0,3	0,3

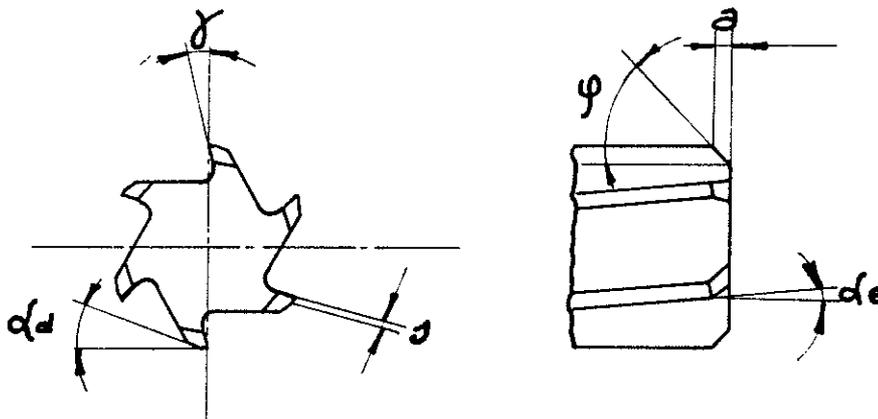
c - Punta a cannone in carburi sinterizzati grado K 20.

Durezza HB	V <sub>t</sub> m/min	Avanzamenti in mm/giro per diametri di foratura			
		6	6-12	12-18	25-50
110 ÷ 140	115	0,02	0,035	0,075	0,15
150 ÷ 220	90	0,02	0,035	0,075	0,15
220 ÷ 260	65	0,012	0,025	0,05	0,075

Nella tabella della fig. 345 sono riportati gli angoli di affilatura più usuali. Trattandosi in genere di una lavorazione di finitura, occorre provvedere ad un buon centraggio del foro rispetto all'utensile, e curare che il foro, realizzato in lavorazioni precedenti, non abbia eccessivi errori di rotondità od elevate deviazioni rispetto al suo asse, difficilmente correggibili dall'alesatore. Nelle

produzioni di grandi serie sono molto usati gli alesatori flottanti, che permettono piccoli spostamenti sia assiali che angolari, in modo da adeguarsi a piccoli errori di centraggio, o ad allineamenti non perfetti.

Inoltre, qualora occorra alesare fori di lunghezza maggiori di 2 volte il diametro, è necessario provvedere ad una guida per l'utensile.



DUREZZA	SPESSORE DEL BORDINO s [mm]	IMBOCCO		SPOGLIA RADIALE (γ)	ANGOLO DELL'ELICA (αe)	SPOGLIA DORBALE (αd)
		ANGOLO (ψ)	LUNGHEZZA a [mm]			
110-330	0,10 ÷ 0,63	45°	1,57	0 ÷ 10	0 ÷ 10	5 ÷ 5

Fig. 345 - Geometria raccomandata per alesatori in acciaio rapido.

Tabella LXIX - Condizioni di taglio consigliate per l'alesatura di ghise grigie.

a - Alesatori in acciaio rapido tipo M 1, M 2 e M 7 per durezza superiori ai 240 HB è consigliato il tipo T 15.

Durezza HB	V <sub>t</sub> m/min	Avanzamento (mm/giro) per diametri di alesatura di (mm)					
		3	6	12	24	36	50
110 ÷ 140	35	0,15	0,15	0,25	0,35	0,5	0,6
190 ÷ 220	20	0,1	0,15	0,25	0,35	0,5	0,6
220 ÷ 260	15	0,075	0,12	0,15	0,25	0,35	0,5

b - Alesatori in carburi sinterizzati tipo K 20.

Durezza HB	V <sub>t</sub> m/min	Avanzamento (mm/giro) per diametri di alesatura di (mm)					
		3	6	12	24	36	50
110 ÷ 140	100	0,1	0,15	0,25	0,35	0,5	0,6
190 ÷ 220	50	0,1	0,15	0,25	0,35	0,5	0,6
220 ÷ 260	40	0,075	0,12	0,15	0,25	0,35	0,5

Nella tab. LXIX (a, b) sono riportati gli avanzamenti e le velocità di taglio consigliate per alesare alcuni tipi di ghise grigie, con alesatori in acciaio rapido e in carburi.

Il sovrametallo da asportare, non riportato in tabella, è sempre dell'ordine di qualche decimo (0,1 ÷ 0,2 mm). Può arrivare a valori di 0,4 ÷ 0,5 per fori di diametro superiore a 25 ÷ 30 mm.

Occorre osservare che il maschio deve lavorare alle più elevate velocità, permesse dal tipo di macchina impiegata, dal tipo di materiale in lavoro e dal tipo di fluido refrigerante. L'elevata velocità non solo migliora la precisione del filetto effettuato, ma aumenta anche la durata dell'utensile, riducendone le rotture che in genere sono causate da una lavorazione troppo lenta.

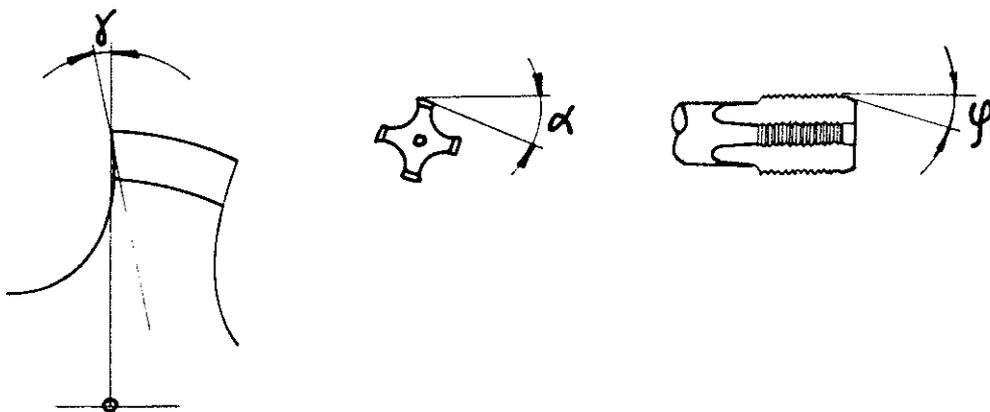
### Maschiatura

Per la maschiatura di particolari di ghisa sono consigliati maschi in acciaio rapido, con angoli di spoglia sul petto  $\gamma = 0^\circ$  nel caso di impieghi generali e  $\gamma = 3^\circ \div 5^\circ$  per impieghi su ghisa grigia ricotta.

In fig. 346 sono riportati il disegno dell'utensile ed alcune indicazioni sui valori usuali dei principali angoli di affilatura. In tab. LXX sono riportate le velocità consigliate.

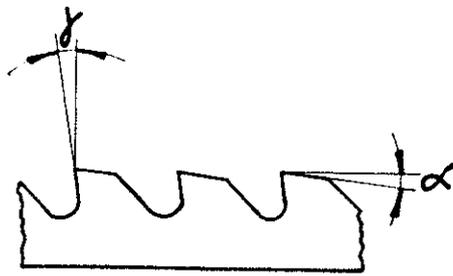
Tabella LXX - Velocità di taglio ed avanzamenti consigliati nella maschiatura di ghise grigie con utensili in acciaio rapido tipo M 1, M 7 e M 10.

Tipo di ghisa	Durezza HB	Velocità di taglio m/min
G 20	110 ÷ 140	15
G 30	150 ÷ 190	13
G 35 - G 40	190 ÷ 220	12
G 50	220 ÷ 260	10
G 60	250 ÷ 320	4



DUREZZA	ANGOLO DI SPOGLIA $\gamma$	ANDAMENTO DELLA GOLE	NUMERO GOLE	SPOGLIA INBOCCO $\alpha$	ANGOLO D'INBOCCO $\phi$
110-320	0 ÷ 5	DIRITTE	4	6	18°

Fig. 346 - Schema di un maschio filettatore e geometria di affilatura.



DUREZZA	ANGOLO DI SPOGLIA PRINCIPALE ( $\gamma$ )	ANGOLO DI SPOGLIA SECONDARIA ( $\alpha$ )
110-320	8-12	2-3

Fig. 347 - Geometria raccomandata per broccee.  
I valori si riferiscono ai denti sgrossatori e semi-finitori.

### Brocciatura

La brocciatura è una lavorazione con un utensile di forma, dotato di una serie di taglienti trasversali che è spinto o tirato dentro un foro, in modo da realizzare il profilo desiderato mediante un'azione di taglio trasversale.

La broccia è, quindi, un utensile multitagliente, che effettua un lavoro sia di sgrossatura che di finitura, e ciò lo rende estremamente complesso e costoso. Per questo motivo tale lavorazione è impiegata essenzialmente nei casi di grande serie e numerosi sono i particolari di ghisa che si prestano ad essere brocciati.

Durante la lavorazione, a causa del gran numero di denti in lavoro, le forze in gioco sono rilevanti, perciò occorre porre particolare cura nel bloccaggio del getto sulla macchina, evitando di staffare su superfici di spessore sottile.

Nella fig. 347 è riportato un disegno schematico dei denti sgrossatori di una broccia ed i valori raccomandati per i principali angoli di affilatura. Il valore dell'angolo di spoglia principale diminuisce per i denti finitori, per i quali vale  $\gamma = 1/2^\circ - 0^\circ$ , così pure l'angolo di spoglia secondario che per i finitori vale  $\alpha_s = 1/2$ .

Nella tab. LXXI sono riportati le velocità e gli avanzamenti consigliati.

Tabella LXXI - Velocità di taglio ed avanzamenti consigliati per la brocciatura di ghise grigie con utensili in acciaio rapido tipo M2 o T5 e T15 per durezza superiori ai 240 HB.

Durezza HB	Velocità di taglio m/min	Avanzamenti mm/giro
110 ÷ 140	10	0,13
150 ÷ 190	10	0,1
190 ÷ 220	8	0,075
220 ÷ 260	6	0,075
250 ÷ 320	5	0,05

### Fresatura

Le principali operazioni di fresatura che si effettuano sulle ghise sono la spianatura, la contornatura ed il taglio di scanalature, per le quali si usano rispettivamente frese a spianare, cilindriche ed a disco. I primi 2 tipi di utensile possono essere sia in acciaio rapido che in carburi sinterizzati, mentre le frese a disco sono costruite, per la maggior parte, in acciaio rapido, anche se cominciano ad avere una buona diffusione quelle con inserti in carburi sinterizzati.

Nelle figg. 348 e 349 sono riportati alcuni disegni schematici degli utensili ed i valori degli angoli principali di affilatura.

Un fattore importante nelle frese è il numero di denti, che deve essere tale da assicurare un contatto il più possibile continuo con il getto in lavoro. Nel caso delle ghise, grazie al loro truciolo sbriciolato, è possibile, a pari diametro, impiegare frese con un numero di denti più elevato. Ciò, a pari condizioni di lavoro, assicura un avanzamento per dente minore che favorisce una migliore finitura superficiale.

È necessario, però, che l'affilatura sia effettuata con molta precisione, per garantire una sezione di truciolo il più possibile costante.

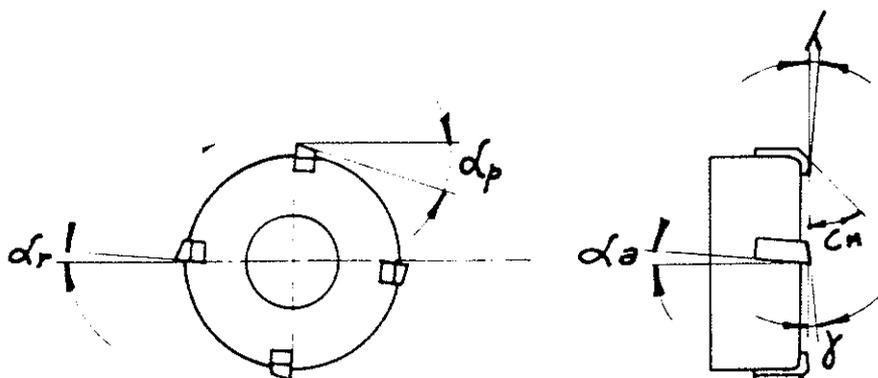
Nelle tabb. LXXII, LXXIII, LXXIV sono riportate le condizioni di taglio suggerite per i 3 tipi di fresatura.

In generale, si può osservare che tra le frese in acciaio rapido, quelle a disco sopportano una maggiore velocità di taglio, mentre quelle a spianare sono impiegate con avanzamenti più alti. Nel caso, invece, delle frese in carburi, quelle a spianare sopportano le condizioni più gravose.

È opportuno, inoltre, precisare a proposito del modo di lavorare delle frese, che la separazione tra moto di alimentazione, dato al getto, e velocità di taglio, data all'utensile, consente di fresare in 2 modi diversi: con fresatura in concordanza od in opposizione, schematizzate in fig. 350.

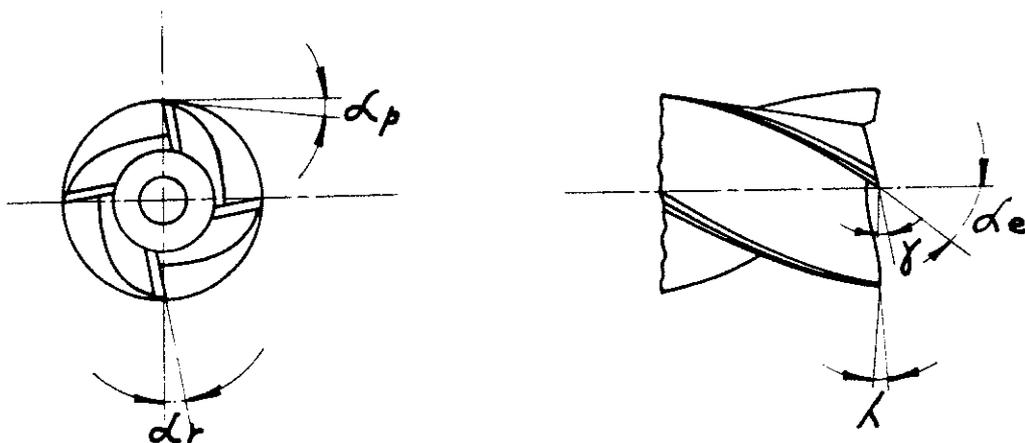
Quest'ultima dà il vantaggio di un più favorevole imbocco dell'utensile (spessore iniziale del truciolo pari a zero), e permette alla risultante delle forze di riprendere i giochi della tavola. È consigliabile, quindi, nella fresatura di fusioni con superfici molto scabre e con forti inclusioni di sabbia.

La fresatura in concordanza, invece, è una lavorazione più gravosa, che richiede macchine più robuste dotate di dispositivi di ripresa dei giochi. Consente, però, l'uso di utensili con angoli di spoglia positivi con conseguente riduzione della potenza di taglio, favorisce l'allontanamento dei trucioli dalla zona di lavoro e riduce la possibilità di danneggiare la superficie già lavorata. Richiede l'impiego di bloccaggi per i getti in lavoro più semplici, in quanto il getto stesso tende ad essere schiacciato sulla tavola delle forze in gioco.



	ACCIAI RAPIDI	CARBURI IN PLACCHETTA	CARBURI BRASATI	
DUREZZA	110 - 400	110 - 400	110 - 400	
SPOGLIA ASSIALE	20 ÷ 30	5 ÷ 11	5 ÷ 10	$\alpha_a$
SPOGLIA RADIALE	-5 ÷ -10	-5 ÷ -11	5 ÷ -10	$\alpha_r$
ANGOLO DI ATTACCO	—	—	45	$C_n$
ANGOLO DI SCARICO FRONT.	—	—	5 ÷ 10	$\lambda$
ANGOLO DI SPOGLIA INFER.	—	—	4 ÷ 7	$\gamma$
SPOGLIA PERIFERICA	—	—	4 ÷ 7	$\alpha_p$

Fig. 348 - Fresa a spianare.



DUREZZA	ANGOLO ELICA ( $\alpha_e$ )	SPOGLIA RADIALE ( $\alpha_r$ )	ANGOLO DI SCARICO FRONTALE ( $\lambda$ )	ANGOLO DI SPOGLIA INFERIORE ( $\gamma$ )	SPOGLIA PERIFER. ( $\alpha_p$ )
110-330	35	12	3	3 ÷ 7	6

Fig. 349 - Fresa cilindrica frontale.

Tabella LXXII - Condizioni di taglio consigliate per la fresatura di spianatura delle ghise grigie.

a - Utensili in acciaio rapido tipo M 2 e M 7.

Durezza HB	Sgrossatura p = 4 mm		Finitura p = 0,5 mm	
	Velocità di taglio m/min	Avanzamento mm/giro	Velocità di taglio m/min	Avanzamento mm/giro
110 ÷ 140	60	0,4	75	0,35
150 ÷ 190	35	0,4	45	0,35
190 ÷ 220	30	0,3	40	0,25
220 ÷ 250	20	0,25	25	0,2
250 ÷ 320	10	0,2	15	0,13

b - Utensili in carburi grado K 20 per durezza maggiori di 240 HB è consigliato il grado K 10.

Durezza HB	Velocità di taglio m/min		Avanzamento mm/giro	Velocità di taglio m/min		Avanzamento mm/giro
	Brasati	Inserti		Brasati	Inserti	
110 ÷ 140	150	170	0,5	200	230	0,45
150 ÷ 190	130	140	0,5	170	200	0,45
190 ÷ 220	110	130	0,4	150	170	0,35
220 ÷ 260	100	110	0,25	130	150	0,2
250 ÷ 320	40	50	0,2	60	65	0,12

Tabella LXXIII - Condizioni di taglio consigliate per la fresatura di ghise grigie con frese cilindriche.

a - Frese in acciaio rapido tipo M 2 per durezza superiori ai 220 HB è consigliato il tipo T 15.

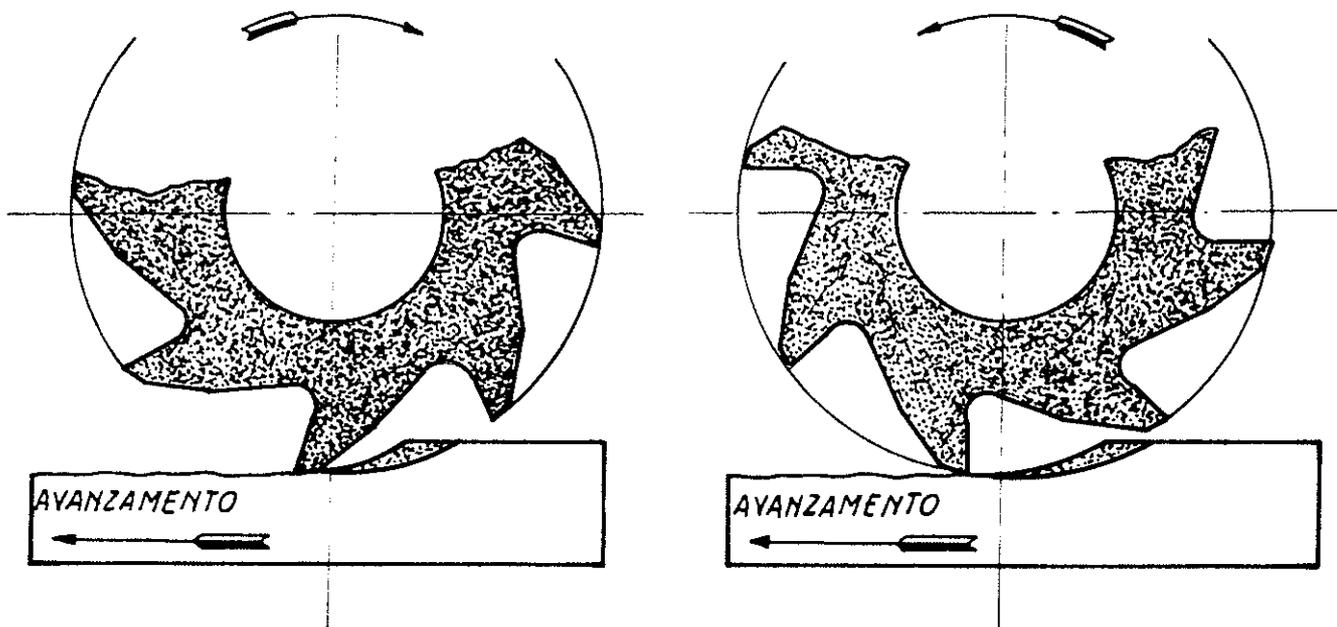
Sgrossatura profondità di passata p = 1,5 mm						Finitura profondità di passata p = 0,4 mm				
Durezza HB	V <sub>t</sub> m/min	Avanzamenti mm/giro per diametro fresa in mm				V <sub>t</sub> m/min	Avanzamenti mm/giro per diametro fresa in mm			
		6	12	18	20-25		6	12	18	20-25
110 ÷ 140	45	0,05	0,1	0,15	0,2	60	0,02	0,05	0,12	0,17
150 ÷ 190	30	0,05	0,07	0,12	0,17	40	0,02	0,05	0,1	0,15
190 ÷ 220	25	0,05	0,07	0,1	0,12	30	0,02	0,05	0,08	0,1
220 ÷ 260	20	0,05	0,06	0,07	0,1	25	0,02	0,04	0,05	0,08
250 ÷ 320	10	0,02	0,05	0,07	0,1	15	0,01	0,02	0,05	0,08

b - Frese in carburi sinterizzati.

Sgrossatura profondità di passata p = 1,5 mm						Finitura profondità di passata p = 0,4 mm				
Durezza HB	V <sub>t</sub> m/min	Avanzamenti mm/giro per diametro fresa in mm				V <sub>t</sub> m/min	Avanzamenti mm/giro per diametro fresa in mm			
		6	12	18	20-50		6	12	18	20-50
110 ÷ 140	150	0,05	0,12	0,22	0,25	200	0,02	0,07	0,18	0,22
150 ÷ 190	115	0,05	0,1	0,18	0,2	150	0,02	0,07	0,12	0,18
190 ÷ 220	90	0,05	0,1	0,15	0,2	120	0,02	0,07	0,12	0,18
220 ÷ 260	75	0,05	0,07	0,1	0,15	95	0,02	0,05	0,08	0,12
250 ÷ 320	40	0,02	0,06	0,1	0,12	50	0,01	0,04	0,08	0,1

Tabella LXXIV - Condizioni di taglio consigliate per la fresatura di ghise grigie con frese a disco in acciaio rapido tipo M 2 o M 7.

Durezza HB	Sgrossatura profondità di passata p = 4 mm		Finitura profondità di passata p = 0,5 mm	
	Velocità di taglio m/min	Avanzamento mm/giro	Velocità di taglio m/min	Avanzamento mm/giro
110 ÷ 140	60	0,35	75	0,3
150 ÷ 190	35	0,35	55	0,3
190 ÷ 220	30	0,3	45	0,25
220 ÷ 260	20	0,25	35	0,2
250 ÷ 320	15	0,17	20	0,12



**FRESATURA IN CONCORDANZA**

**FRESATURA IN OPPOSIZIONE**

Fig. 350 - Schema di fresatura in concordanza ed in opposizione.

### Rettificatura

Recenti sviluppi hanno incrementato notevolmente il numero delle applicazioni pratiche della finitura mediante abrasivi.

La rettificatura è ora comunemente usata come operazione di finitura per i getti, rimpiazzando la lavorazione ad asportazione di truciolo vera e propria. Quest'uso si è diffuso a causa dello sviluppo avuto dalle mole, della maggiore potenza delle macchine rettificatrici, e della possibilità di realizzare getti con tolleranze dimensionali più ristrette.

Sebbene la finitura diretta dei getti per mezzo della rettificatura abbia delle limitazioni, offre tuttavia numerosi vantaggi dove si può applicare. La tolleranza di rettifica può essere così piccola da offrire le dimensioni finite, al contrario dei sovrametalli necessari per la lavorazione ad asportazione di truciolo.

Le superfici interrotte, come quelle che presentano scanalature od aperture, non offrono inconvenienti alla rettificatura ed in effetti sono vantaggiose nel tendere a ridurre la potenza di rettificatura richiesta per lo stesso volume di metallo asportato. I getti sottoposti, per una maggior resistenza all'usura, a trattamento termico od induriti in superficie per mezzo di una flammatura o per induzione, possono essere finiti di rettifica. Un tipico esempio è la rettificatura di precisione di guide di macchine utensili.

Riassumendo, vi sono 3 ragioni fondamentali per l'uso della rettifica nella lavorazione delle ghise:

- Ottenere finiture superficiali non facilmente ottenibili con lavorazioni ad asportazione di truciolo.
- Rimpiazzare la lavorazione ad asportazione di truciolo con un'operazione di finitura più economica.
- Finire tipi di ghise che sono troppo dure per essere lavorate con macchine ad asportazione di truciolo.

### Parametri di lavorazione

Come per qualunque lavorazione, un buon risultato alla rettifica è subordinato alla messa a punto ottimale delle condizioni operative. Ad esempio, la scelta dei parametri di lavoro dipende dal tipo di ghisa da lavorare come pure la scelta del tipo di mola più adatta è condizionata dal tipo di microstruttura del materiale o dalla sua durezza. Infatti, la superficie del getto può essere rigata od addirittura deformata dall'uso di un tipo improprio di mola.

A tale proposito si ricorda che l'abrasivo, costituente principale delle mole, per adempiere la sua funzione di taglio, deve soddisfare i requisiti di durezza, di resistenza all'usura e di tenacità.

L'abrasivo più adatto per la rettifica di getti di ghisa può essere a base di carburo di silicio o di ossido d'alluminio. La scelta per ottenere risultati ottimali dipende oltre che da considerazioni economiche, dal tipo di lavorazione che si effettua e dal livello di finitura che si vuole raggiungere.

Una caratteristica importante dell'abrasivo è la *granulazione*, ossia la dimensione del grano. Essa influisce notevolmente sul grado di finitura delle superfici lavorate. La misura della grandezza dei grani abrasivi è indicata da un numero che esprime la quantità dei fili del setaccio che è servito per vagliarli. Di conseguenza i valori più alti esprimono una granulazione più fine. La resistenza dell'impasto, chiamata impropriamente *durezza*, è invece progressivamente espressa da lettere dell'alfabeto.

Nella tab. LXXV ne è riportata schematicamente la classificazione.

Per quanto riguarda le condizioni di taglio, occorre, come in ogni lavorazione, stabilire i valori migliori della velocità di taglio ( $V_t$ ) (periferica della mola), della velocità periferica del getto ( $V_p$ ), dell'avanzamento assiale del getto e della mola, della profondità di passata.

Tabella LXXV - Schema di classificazione mola.

1	2	3	4	5	6
Tipo di abrasivo	Granulazione	Resistenza impasto	Struttura mola	Impasto	Sigla
A	46	K	8	V	x
	Grossa	Fine	Compatta	V Vetrificato o ceramico	
	10	70	1	S Silicato	
	12	80	2	B Bachelite	
	14	90	3	E Elastico	
	16	100	4	M Metallico	
	16	120	5		
	20	150	6		
	24	180	7		
			8		
A Alundum (A)					
Carburo di Boro (B)					
Carborundum (C)					
Diamante (D)-46					
		Molto tenero	Medio	Duro	Durissimo
		DEFG	LMNO	PQRS	TUVW-XYZ
		Tenero			
		HIJK			

Si ricorda, inoltre, che la potenza di taglio non dipende dalla velocità  $V_t$ , mentre il consumo specifico è inversamente proporzionale al quadrato della velocità  $V_t$ . È conveniente, quindi, lavorare con la massima velocità di taglio, compatibilmente con la resistenza dell'impasto della mola. Anche la velocità del getto deve essere scelta con molta cura, perché influisce sensibilmente sui risultati della lavorazione. Infatti, mentre il consumo della mola non dipende da essa, lo spessore del truciolo asportato da un grano della mola, la forza di taglio e la potenza assorbita sono tutti funzione della velocità del getto.

Il limite superiore della  $V_p$  è dato dalla potenza disponibile della macchina e dal valore dello spessore del truciolo che aumenta con l'aumentare di  $V_p$ , provocando una maggiore usura della mola. Il limite inferiore della  $V_p$  è subordinato al tempo di lavorazione, che deve essere mantenuto entro valori economici, ed al pericolo di *impasto* della mola che si verifica quando lo spessore del truciolo è ridotto. Anche la  $V_p$  dipende dal tipo di lavorazione e dal materiale da lavorare. I metodi più comuni di rettificazione sono: rettificazione piana, cilindrica, senza centri ed interna (figg. 351, 352, 353, 354).

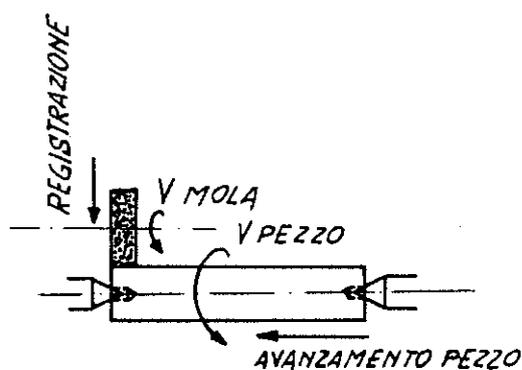


Fig. 351 - Schema di lavorazione della rettificatrice per superfici cilindriche esterne.

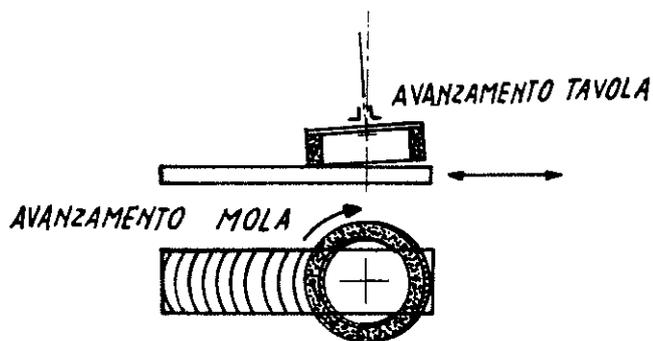


Fig. 353 - Schema di lavorazione della rettificatrice con mola ad azione frontale. L'asse di rotazione può essere verticale, nel qual caso la rigatura della superficie lavorata è incrociata.

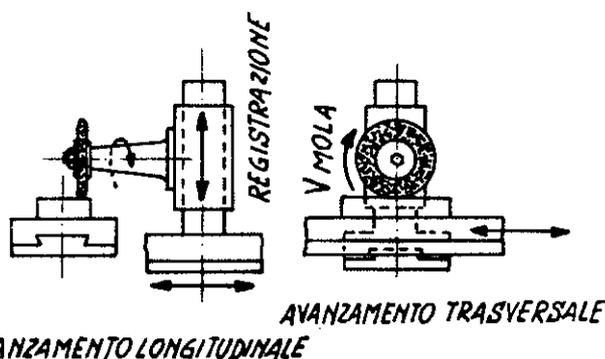


Fig. 352 - Schema di lavorazione della rettificatrice per piani con mola ad azione periferica.

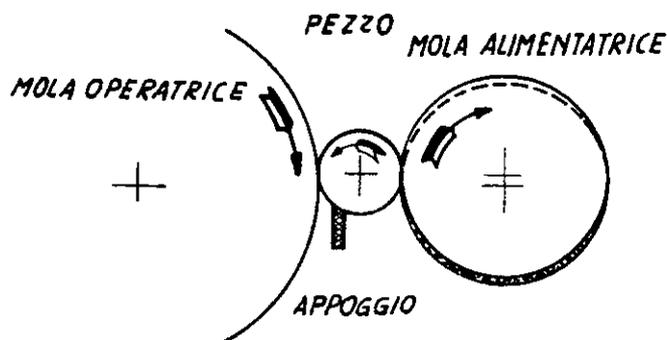


Fig. 354 - Schema di lavorazione della rettificatrice senza centri.

## Rettificazione piana

Il termine è usato per indicare una rettifica di superfici piane. Può essere effettuata con mole ad asse verticale, orizzontale od a disco.

Nel primo caso, a causa della vasta zona di contatto tra mola e getto, la scelta della mola è molto importante. Le mole (a tazza, cilindriche od a segmenti) hanno leganti vetrificati con ossidi abrasivi di alluminio o carburi di silicio.

I primi sono da preferirsi per le ghise molto dure. Le dimensioni del grano vanno da 24 a 80, con grani più piccoli per finiture più spinte. Le durezze vanno da F a N, impiegando i grani più morbidi per le elevate aree di contatto. Nella rettificazione piana ad asse orizzontale, molto impiegata per spianare e sagomare, sono utilizzate mole con legante vetrificato con grani abrasivi in ossido di alluminio o carburi di silicio con dimensioni da 46 a 80. Il grado di durezza va da H a K con i valori minori per elevate asportazioni, ed i più alti per rettifiche di forma o per mantenere spigoli vivi.

La rettifica con mole a disco è effettuata quando sono richieste delle superfici piane senza precisi riferimenti dimensionali con altre superfici. Sono impiegate mole con legante resinoidi con grani abrasivi in carburi di silicio e dimensioni che vanno da 16 a 220 a seconda della finitura richiesta.

La durezza va da L a P a seconda dell'asportazione richiesta. Tali mole sono spesso attrezzate con rattivatori per pulirle con continuità. La tab. LXXVI riporta alcuni dati orientativi relativi alle condizioni di lavoro.

## Rettificazione cilindrica

Le mole impiegate per la rettificazione cilindrica sono realizzate con leganti vetrificati o resinoidi. Per la sgrossatura la dimensione del grano va da 24 a 36 e la durezza da M a Q.

Per la finitura le dimensioni del grano e la durezza variano al variare dei valori di rugosità richiesti e delle dimensioni del getto.

Tabella LXXVI - Condizioni di lavoro consigliate per la rettifica cilindrica di ghise grigie.

a - Rettifica di interni.

Durezza HRC	Velocità mola m/s	Velocità pezzo m/min	Avanzamento a tuffo mm/passata sul Ø	Tipo di mola
Fino a HRC 45	30 ÷ 35	55 ÷ 80	Sgrossatura 0,05 Finitura 0,005	A 46 J V
Da HRC 45 a 54	30 ÷ 35	55 ÷ 80	Sgrossatura 0,05 Finitura 0,005	A 46 J V

b - Rettifica di esterni.

Durezza HRC	Velocità mola m/s	Velocità pezzo m/min	Avanzamento a tuffo mm/passata sul Ø	Tipo di mola
Fino a HRC 45	30 ÷ 35	25 ÷ 40	Sgrossatura 0,05 Finitura 0,02	A 60 L V
Da HRC 45 a 54	30 ÷ 35	25 ÷ 40	Sgrossatura 0,05 Finitura 0,02	A 60 L V

Nella rettificazione cilindrica di interni si impiegano, invece, di preferenza mole con ossidi di alluminio. La corretta scelta del grano e della durezza va fatta in funzione delle relative differenze di diametro fra il foro e la mola, come pure della finitura richiesta. Le dimensioni del grano vanno da 30 a 60, le durezze consigliate da K a N.

Nelle tabb. LXXVII e LXXVIII si riportano alcuni dati orientativi relativi alle condizioni di lavoro.

Tabella LXXVII - Condizioni di lavoro consigliate per la rettifica tangenziale di ghise grigie.

Durezza HB	Velocità mola m/s	Velocità tavola m/min	Avanzamento discendente mm/passata		Avanzamento trasversale mm/passata	Tipo di mola
			Sgrossatura	Finitura		
Fino a HRC 45	30 35	16 30	0,07	0,02	1 ÷ 10*	A 46 I V
Da HRC 45 a 54	30 35	16 30	0,05	0,01	1 ÷ 10**	A 46 I V

\* Avanzamento massimo pari a 1/3 della larghezza mola.  
\*\* Avanzamento massimo pari a 1/5 della larghezza mola.

Tabella LXXVIII - Condizioni di lavoro consigliate per la rettifica a tuffo di tutti i tipi di ghise grigie.

Velocità mola m/s	Avanzamento del pezzo mm/min	Avanzamento sul diametro mm/passata		Mola di regolazione		Tipo di mola
		Sgrossatura	Finitura	Angolo	Giri/min	
30 ÷ 35	2.000 3.100	0,12	0,04	4	40	C 60 J V A 60 J V

## BIBLIOGRAFIA

- M. KRONENBERG - Machining Science and Application, Pergamon Press, 1969.
- G. F. MICHELETTI - Tecnologie generali. Lavorazioni ad asportazioni di truciolo - Levrotto e Bella, 1958.
- F. A. ISNARDI - Utensili da tornio - Etas Kompass, 1967.
- G. F. MICHELETTI - Il taglio dei metalli - Vol. I, U.T.E.T., 1968.
- G. BOOTHROYD - Fundamentals of Metal Machining - Edward Arnold Ltd.
- Metals Handbook - VIII Edizione, Machining, 1967.
- Tool Engineers Handbook - II Edizione, McGraw-Hill, 1951.
- A.S.M. Tool Steels - III Edizione, Reinhold Publishing Corporation, 1962.
- G. STADE - Technologie des Schleifens - Carl Hans Verlag, 1962.
- W. HANFE - Schnellarbeitsstähle - Carl Hans Verlag, 1972.
- I. WITTHOFF - L'outil de coupe en carbure métallique - Dunod, 1956.
- P. S. HOUGHTON - Grinding Wheels & Machines - A.M.I. Mech. E.

**Volume II: Ghise grigie**

**Capitolo X**

## **Rivestimenti metallici**

- GENERALITA'
- TRATTAMENTI PRELIMINARI
- RIVESTIMENTI ELETTROLITICI
- NICHELATURA CHIMICA
- TRATTAMENTI A FUOCO
- TRATTAMENTI DI CONVERSIONE
- TRATTAMENTI DI DIFFUSIONE
- SMALTATURA
- METALLIZZAZIONE SUPERFICIALE

A cura di: Giorgio Bonicelli  
Carlo Alberto Goria  
Marino Selli



## GENERALITA'

Il requisito più importante per un manufatto è spesso costituito da caratteristiche particolari della sua superficie, come l'aspetto, la resistenza alla corrosione od all'usura.

Anche per i getti di ghisa può verificarsi questa eventualità. Nel caso in cui non sia conveniente ottenere le caratteristiche sopracitate agendo sulla composizione chimica o mediante trattamenti termici, si ricorre al riporto in superficie di materiali adatti per l'applicazione particolare.

Scopo fondamentale delle tecniche dei rivestimenti superficiali è quello di ottenere una sufficiente aderenza tra il materiale di rivestimento e la ghisa di base.

I rivestimenti della ghisa possono essere così classificati:

— Rivestimenti a freddo: sono quelli nei quali non è variata la temperatura del materiale di riporto né del materiale di base e l'aderenza dell'uno all'altro è af-

fidata alle forze atomiche o molecolari. Rientrano in questa categoria i rivestimenti protettivi contro l'ossidazione (oli e vernici varie) e la verniciatura a freddo in senso lato, i rivestimenti metallici ottenuti per elettrodeposizione o riduzione catalitica o per *spostamento* od i cosiddetti trattamenti di conversione.

— Rivestimenti a caldo: per questi rivestimenti il getto od il materiale di riporto od entrambi sono riscaldati a temperature elevate (in alcuni casi per il materiale di apporto fino alla fusione) in modo da procurare una salda adesione od addirittura una reazione chimica con gli strati superficiali della ghisa, tale da dare luogo alla formazione di un composto con le proprietà volute. In quest'ultimo caso è più preciso parlare di trattamento superficiale che non di rivestimento.

A queste categorie appartengono i procedimenti di riporto a spruzzo, per immersione, spolvero, diffusione, vulcanizzazione, smaltature, ecc.

## TRATTAMENTI PRELIMINARI

I getti di ghisa, che devono subire un trattamento superficiale, possono essere sottoposti a processi di pulitura meccanica i quali si presentano estremamente facili, in quanto la superficie metallica è in grado di resistere molto bene all'azione abrasiva di particelle metalliche e non, scagliate a forte velocità contro di esse.

Processi di sabbatura, granigliatura, pallinatura e simili sono naturalmente impiegati sia per ripulire la superficie dei getti dai residui della colata che per ravvivare la superficie in vista di un trattamento specifico.

Qualora, poi, il getto abbia subito trattamenti termici o sia stato lavorato meccanicamente, occorrono trattamenti di pulitura che asportino gli strati superficiali di ossidi e di materiali oleosi senza alterare eccessivamente la geometria del getto.

A questo scopo esistono trattamenti di pulitura non meccanici.

Tra questi ultimi si citano i seguenti.

### Trattamenti in sali fusi

Questo tipo di trattamento ha, in genere, lo scopo di rimuovere la grafite dalla superficie della ghisa ed è normalmente effettuato in bagni fusi di nitrati e cloruri alcalini in soda caustica.

È consigliabile il trattamento ossidante-degrafittizzante, specie se si vuole garantire una buona aderenza del riporto metallico da bagni di metallo fuso o, nel caso delle elettrodeposizioni galvaniche, da bagni come quelli di zincatura o cromatura, se si vuole evitare che, invece di deposizione del metallo, si abbia solamente svolgimento di idrogeno a causa della bassa sovratensione di idrogeno sulla grafite.

Normalmente al trattamento in sali fusi si fa seguire un lavaggio ed un'immersione in  $H_2SO_4$  al 10% per eliminare il film di ossido di ferro superficiale e neutralizzare l'alcalinità eventualmente ancora presente.

### Immersione in soluzioni di acidi forti (pickling)

Quando per ravvivare la superficie non sia necessario asportare la grafite, è comunque sempre necessario disossidare (decapare) la superficie prima di qualsiasi trattamento galvanico.

Gli acidi, normalmente usati a questo scopo, sono:

- Acido solforico ( $H_2SO_4$ ).
- Acido cloridrico (HCl).
- Acido fluoridrico (HF), specialmente indicato qualora vi siano residui di silice o la stessa silice proveniente da ossidazione del silicio che entra nella composizione della ghisa.

- Acido nitrico ( $\text{HNO}_3$ ).
- Loro miscele, esempio:  $\text{H}_2\text{SO}_4 = 5\%$ ,  $\text{HF} = 5\%$ ,  $\text{H}_2\text{O} = 90\%$ .

Se vi sono particolari esigenze quali la difficile asportazione di ossidi di trattamenti termici e non si vuole corrodere eccessivamente il ferro, sono aggiunte in piccola dose sostanze che, assorbite superficialmente dagli atomi di ferro, ne impediscono o riducono l'attacco da parte dello ione idrogeno ( $\text{H}^+$ ); tali sostanze, di natura assai variabile, sono chiamate *inibitori di corrosione*.

Il pickling acido è effettuato a temperature comprese tra 293 e 363 K ( $20 \div 90^\circ\text{C}$ ).

Se non seguono altri trattamenti ed il pickling è effettuato al solo scopo di disossidare la superficie, occorre fare seguire a questo trattamento una neutralizzazione in soluzione alcalina per evitare una rapida formazione di ruggine.

### Sgrassatura

Le sgrassature hanno lo scopo di asportare gli oli ed in genere le sostanze grasse che ricoprono la superficie da trattare specie dopo la lavorazione meccanica. Possono essere:

- Alcaline ad immersione od a spruzzo, a base di soluzioni di soda caustica, metasilicato di sodio, fosfato

trisodico, carbonato sodico, addizionati di tensioattivi, a temperature comprese tra 293 e 333 K ( $20 \div 60^\circ\text{C}$ ).

- Alcaline elettrolitiche, nelle quali il getto da sgrassare funziona da catodo o da anodo di una cella elettrolitica, aventi la composizione come al punto precedente e funzionanti normalmente a temperatura ambiente.
- In vapori di solvente, come il percloroetilene, trielina, clorotene effettuate in cabine chiuse dove il solvente è portato all'ebollizione e fatto condensare con un refrigerante a serpentino a circolazione d'acqua ad una certa distanza dal pelo del liquido bollente; nella zona compresa tra il pelo del liquido ed il punto dove esso si condensa i getti da sgrassare sono sospesi in appositi cestelli.

In questi ultimi anni si sono ampiamente diffuse le sgrassature ad ultrasuoni, particolarmente efficaci per l'asportazione di morchie, croste di ruggine, terra e vernice impastate tra loro, sporczia fortemente aderente e situata in cavità profonde.

L'apparecchiatura consta di una vasca di acciaio inossidabile in cui è contenuto un liquido generalmente alcalino od a base di solventi organici clorurati, ma che può avere la composizione più adatta per ogni scopo particolare. Una sorgente di ultrasuoni trasmette attraverso il liquido le vibrazioni ad alta frequenza al getto immerso in esso, facilitando il distacco della sporczia.

## RIVESTIMENTI ELETTROLITICI

Sono quelli ottenuti facendo depositare il materiale desiderato per elettrolisi da una opportuna soluzione sul getto immerso in essa mediante passaggio di una corrente elettrica continua.

In generale, tutti i rivestimenti metallici superficiali a base di metalli non ferrosi sull'acciaio possono essere estesi, sia pure con certe limitazioni, alle ghise grigie.

La scelta del particolare rivestimento da applicare è vincolata ovviamente alle proprietà finali richieste ed ai relativi vantaggi e limiti del metallo impiegato.

Per la protezione dalla corrosione vale normalmente la serie dei potenziali elettrochimici dei metalli, nel senso che il metallo *meno nobile* della ghisa lo protegge, mentre quello *più nobile* può addirittura accelerare la corrosione se esistono discontinuità nel rivestimento.

Si possono avere protezioni anti-corrosive anche con elementi più nobili del ferro, ma in tale caso la protezione è di tipo puramente fisico-meccanico, come una vernice od uno smalto.

Nel caso dei metalli meno nobili si ha, invece, una protezione di tipo elettrochimico (formazione di una pila) o, come si dice, di tipo sacrificale.

La cromatura è indubbiamente il procedimento più diffuso per aumentare la resistenza all'usura della ghisa, in quanto è condizione fondamentale, in tal caso, che il rivestimento abbia compattezza e durezza superiore a quella del materiale base, cioè della ghisa.

Dal momento che le condizioni operative richiedono in molti casi un accoppiamento della resistenza all'usura

con l'aggressività delle condizioni chimiche, il cromo soddisfa egregiamente tali requisiti e, quindi, la cromatura è ampiamente utilizzata in molti particolari di ghisa soggetti ad usura come: stampi, piastre di stampaggio, collettori, cilindri, parti di macchine per carta, plastica e stampa.

Per gli altri impieghi valgono le caratteristiche chimico-fisiche del metallo riportato.

Normalmente un ciclo galvanico per materiali ferrosi (acciaio e ghisa) è composto dalle seguenti fasi:

- Sgrassatura in vapori di solventi organici clorurati.
- Sgrassatura alcalina catodica od altri equivalenti. Lavaggi in acqua corrente.
- Pickling acido. Lavaggio in acqua corrente.
- Trattamento galvanico. Lavaggio in acqua corrente.
- Asciugatura con aria compressa.

### Fattori importanti nella pratica dei rivestimenti elettrolitici della ghisa

#### Composizione della ghisa

Pur essendo i procedimenti di rivestimento metallico utilizzabili pressoché su ogni tipo di ghisa, tuttavia, specie per quanto riguarda la nichelatura e più ancora la cromatura di parti destinate ad usi impegnativi, la qualità, cioè l'aderenza, la compattezza ed il valore protettivo richiedono l'impiego di una ghisa perlitica con

grafite fine e distribuzione omogenea, in quanto la struttura della ghisa può influenzare le reazioni del processo di preparazione e la stessa struttura del rivestimento. Vi è, inoltre, una difficoltà di carattere generale, per quanto concerne le elettrodeposizioni, che è dovuta alla bassissima sovratensione di idrogeno sulla grafite, per cui per alcuni trattamenti, quali la zincatura e la cromatura, se non si ricorre a particolari accorgimenti, si ha soltanto sviluppo di idrogeno.

La presenza nelle ghise di elementi — quali il cromo, il molibdeno ed altri elementi stabilizzatori dei carburi — è negativa, poiché i carburi ostacolano l'aderenza del riporto.

La ricottura di stabilizzazione è particolarmente raccomandata, in quanto l'esistenza di tensioni residue può determinare cricche nel rivestimento.

#### Elettrolitico

Le principali variabili, che influenzano il processo di rivestimento, sono:

- Composizione del bagno elettrolitico.
- pH del bagno.
- Temperatura del bagno.
- Densità di corrente.
- Agitazione del bagno per facilitare il passaggio di corrente ed eliminare l'idrogeno che si forma al catodo sotto forma di bollicine.
- Filtrazione del bagno (continua od intermittente) per eliminare le impurezze.
- Natura degli anodi che devono assicurare il mantenimento della concentrazione del metallo nel bagno ed il pH. Dove si impiegano, come per esempio nella cromatura, elettrodi insolubili, la concentrazione deve essere mantenuta mediante aggiunte opportune.

#### Apparecchiatura impiegata

Generalmente sono impiegati generatori a corrente continua con potenziali da  $6 \div 12$  V e potenze dipendenti dalla densità di corrente richiesta e dalla estensione della superficie da rivestire.

È diffuso l'impiego di raddrizzatori ad ossido e solfuro di rame ed al selenio.

Le vasche di trattamento sono di lamiera d'acciaio rivestita di gomma o plastica (specialmente PVC) a forma di parallelepipedo.

Una barra centrale di rame o lega di rame attraversa longitudinalmente la vasca ed è collegata alla fase catodica. Ad essa è attaccato un telaio conduttore rivestito di materiale plastico (per non essere metallizzato) con i getti da trattare. Lungo i due bordi più lunghi della vasca sono installati gli anodi che possono essere del metallo da riportare (esempio zinco, rame, nichel, cadmio), massicci a forma di barre, lunghe un po' meno della profondità della vasca, oppure in pezzi (cubetti, discoidi, sfere) contenuti in cestelli alti e sottili, di ferro per i bagni alcalini e di titanio per i bagni acidi.

A volte, ed in particolare nella nichelatura, gli anodi di qualsiasi tipo sono avviluppati da una guaina a forma di sacco avente lo scopo di filtrare le melme provenienti dalla dissoluzione dell'anodo e che potrebbero provocare difetti superficiali sul getto trattato.

Per la minuteria il trattamento avviene in barili rotanti forati in cui un cavo, appesantito in modo da trovarsi sempre sul fondo ed immerso in mezzo ai particolari da trattare, assicura il contatto con la barra catodica.

Nella tab. LXXIX sono indicati le proprietà e gli impieghi dei più comuni rivestimenti metallici.

Tabella LXXIX - Proprietà ed impieghi dei più comuni rivestimenti metallici.

Rivestimento	Durezza (HV)	Resistenza all'usura	Aspetto	Spessore medio ( $\mu\text{m}$ )	Caratteristiche ed impieghi
Alluminio	$30 \div 90$	Scarsa	Bianco opaco	$3 \div 6$	Buona resistenza al calore, alla corrosione ad alta temperatura, agli acidi ossidanti ( $\text{HNO}_3$ ).
Cadmio	$30 \div 50$	Mediocre	Bianco brillante	$2 \div 15$	Ottima resistenza alla corrosione atmosferica, buona saldabilità, basso coefficiente di attrito.
Cromo	$600 \div 1.000$	Eccellente	Bianco azzurrognolo	$0,25 \div 1,5$ $\geq 500$	Impieghi anti-corrosione di tipo decorativo (con substrato di nichel o rame + nichel). Impieghi antiusura.
Nichel	$140 \div 600$	Buona	Grigio chiaro-giallognolo	$3 \div 30$ $\geq 500$	Impieghi anti-corrosione di tipo decorativo (con successivo strato di cromo). Impieghi anti-corrosione ed antiusura.
Piombo	—	Scarsa	Grigio scuro	$10 \div 200$	Proprietà autolubrificanti. Buona resistenza alla corrosione da $\text{SO}_2$ - $\text{SO}_3$ e relativi acidi.
Rame	$40 \div 150$	Scarsa	Rosa brillante	$5 \div 50$	Supporto per altri metalli. Apparecchiature elettriche. Proprietà autolubrificanti.
Stagno	—	Scarsa	Bianco brillante	$1 \div 10$	Resistenza alla corrosione. Impieghi alimentari e sanitari.
Zinco	—	Scarsa	Grigio chiaro	$5 \div 40$	Ottima resistenza alla corrosione atmosferica.

## Cromatura

La cromatura si suddivide in 2 tipi nettamente distinti per le caratteristiche finali conferite al getto trattato e per le metodologie di applicazione.

La *cromatura decorativa* è l'elemento finale di un complesso trattamento di protezione contro la corrosione atmosferica del metallo base ferroso. Esso consta normalmente di:

- Ramatura alcalina al cianuro (5  $\mu$ m).
- Ramatura acida brillante (4 ÷ 10  $\mu$ m).
- Nichelatura opaca (5 ÷ 20  $\mu$ m).
- Nichelatura lucida (5  $\mu$ m).
- Cromatura (0,3 ÷ 1  $\mu$ m).

Lo spessore dello strato di nichel è in funzione della severità delle condizioni di esercizio; la brillantezza del secondo strato di nichel assicura le caratteristiche estetiche del trattamento; la cromatura può anche non essere richiesta e non è comunque strettamente necessaria, anche se consigliabile. La buona durata del trattamento è assicurata da microdiscontinuità dello strato di cromo ed è tanto maggiore quanto più le discontinuità sono piccole e diffuse. Questo apparente controsenso ha una sua precisa giustificazione di tipo elettrochimico, e sta a dimostrare il fatto che i tentativi operati in senso opposto, e cioè la cromatura esente da porosità, hanno dato risultati estremamente sconcertanti.

La microdiscontinuità è ottenuta o con bagni di cromatura contenenti additivi atti ad infittire le normali cricche del deposito di cromo (cromo microfessurato) o con bagni di nichelatura brillante contenenti in dispersione microscopiche sfere di silice di diametro superiore allo spessore del riporto di cromo, che rimangono incastonate nel deposito di nichel e con il tempo si distaccano lasciando un *buco* nel deposito di cromo (cromo microporoso).

La *cromatura dura* è un trattamento atto a conferire particolari caratteristiche meccaniche alla superficie trattata, grazie alla elevata durezza del cromo elettrolitico (fino a 1.000 HV). È normalmente impiegata su stampi o su superfici che devono resistere ad usura, come pareti interne di cilindri, fasce elastiche di pistoni, eccentrici di camme o su superfici che devono scorrere entro elementi di tenuta ed in zone a contatto con polveri ed abrasivi.

Lo strato di cromo può raggiungere in tali casi spessori variabili dal centesimo a qualche decimo di millimetro ed è direttamente applicato sul materiale di base senza strati intermedi.

Per quanto concerne la composizione dei bagni, non vi sono differenze rilevanti tra i 2 tipi di cromatura. Solo la durata nel trattamento è notevolmente diversa.

La composizione dei bagni di cromatura è la seguente:

- $\text{CrO}_3$  250 ÷ 300 g/l
- $\text{H}_2\text{SO}_4$  2,5 ÷ 3 g/l
- Rapporto in peso =  $\frac{\text{CrO}_3}{\text{H}_2\text{SO}_4} = 80 \div 125$
- Temperatura: 318 ÷ 328 K (45 ÷ 55 °C)
- Densità di corrente: 30 ÷ 55 A/dm<sup>2</sup>.

In certi bagni possono essere presenti anche additivi atti a migliorare il rendimento catodico ed il potere penetrante del bagno, come sali di stronzio o calcio o fluosilicati alcalini in piccola concentrazione.

Per la cromatura diretta della ghisa sono necessari trattamenti preliminari molto energici, quali l'attacco anodico in soluzioni di composizione simile alla cromatura normale, ma con più elevato tenore di solfati. Passando poi alla cromatura vera e propria, per i primi istanti si deve dare un colpo di corrente a densità maggiore di quella di esercizio, allo scopo di depositare immediatamente un film di cromo e di limitare al massimo lo svolgimento di idrogeno. Dopo qualche secondo la densità di corrente è portata ai valori normali.

Qualora lo spessore di cromo sia elevato e si voglia controllare come si sta svolgendo la deposizione, si deve estrarre dal bagno il particolare. Per riprendere il trattamento, occorre ripetere le operazioni preliminari di lavaggio e di sgrassatura. Quindi si immerge il particolare nel bagno, si inverte per qualche secondo la polarità della corrente e si ritorna poi alla polarità normale.

L'inversione assicura l'aderenza del nuovo cromo sul cromo precedente, altrimenti non ottenibile.

Sempre per spessori molto elevati, data la tendenza del metallo elettrodepositato a crescere sulle punte, si procede normalmente con un'inversione periodica della corrente per tempi accuratamente predeterminati.

L'accorgimento porta ad un migliore livellamento dello spessore del riporto.

## Ramatura

Assai raramente la ramatura rappresenta un trattamento a parte su materiali ferrosi e sulle ghise in particolare. Essa è però molto usata come intermedio per la deposizione di altri metalli.

Come trattamento a parte è impiegata per migliorare la saldabilità di componenti di ghisa con componenti di altri materiali oppure in getti ornamentali, in cui pochi micron di rame opportunamente trattato (a ramatura ultimata) con soluzioni di solfuri alcalini o solfuro giallo di ammonio per ottenere una patina scura trasformano l'aspetto della ghisa in quello del bronzo.

Come trattamento intermedio per la deposizione di altri metalli si è già parlato a proposito della cromatura decorativa. Molti galvanotecnici usano il *flash di rame*, cioè un riporto di pochi micron di rame metallo, per migliorare l'aderenza del riporto successivo, grazie alla facilità di deposizione sia del rame sulle ghise che di qualunque altro metallo sul rame così ottenuto.

Esistono diversi tipi di bagni ramatura; tuttavia, come trattamento galvanico delle ghise, i più interessanti sono la ramatura alcalina al cianuro e la ramatura acida al solfato.

Va ricordato che, pur avendo la ramatura acida un rendimento di corrente notevolmente più vantaggioso, non è possibile usare direttamente sulla ghisa questo tipo di bagno, in quanto il rame così ottenuto avrebbe pessima aderenza. Pertanto il bagno usato sia per il flash cui si è accennato, che come base per una successiva ramatura con bagni acidi, è il bagno al cianuro.

Questioni di natura ecologica hanno messo in crisi la ramatura al cianuro. Sono stati messi a punto bagni di altra composizione, i quali, però, non forniscono gli stessi risultati sia per aderenza che per facilità di impiego.

## Nichelatura

Vi sono 2 tipi di nichelatura che interessano i getti di ghisa e sono la nichelatura decorativa-anticorrosione e la nichelatura antiusura.

Si è già visto che la nichelatura è un intermedio della cromatura decorativa e che essa consta di un primo strato di nichelatura opaca e di un secondo strato di nichelatura brillante. Quest'ultimo ha lo scopo di fornire un substrato speculare al film finale di cromo. Prima dell'introduzione nei bagni di nichelatura di sostanze complesse atte a rendere lucido il deposito (i cosiddetti brillantanti), la lucidatura del nichel era effettuata meccanicamente.

La nichelatura di questo tipo è ottenuta generalmente da bagni del tipo *Watts* e non supera lo spessore 20  $\mu\text{m}$ .

La nichelatura antiusura, invece, è normalmente effettuata da soluzioni di sulfammato o di fluoborato di nichel, in quanto questi bagni forniscono riporti più duri e soprattutto consentono di ottenere maggiori spessori in tempo minore. Inoltre questi bagni offrono la possibilità di operare a densità corrente catodica notevolmente maggiore.

Recentemente sono stati messi a punto sistemi di co-deposizione di particelle di carburo di silicio, carburo di tungsteno, allumina e simili, allo scopo di rendere particolarmente resistenti all'abrasione i depositi di nichel, per applicazioni particolari.

Si impiegano a questo scopo bagni di sulfammato o di fluoborati, in cui con varie tecniche sono mantenute in sospensione le particelle di abrasivo.

Per qualunque tipo di nichelatura effettuata direttamente su ghisa, il trattamento preliminare consiste in una sgrassatura alcalina catodica seguita da un attacco anodico in  $\text{H}_2\text{SO}_4$  al 25 ÷ 30% con 10 ÷ 20  $\text{A}/\text{dm}^2$  della durata di 30 ÷ 60 s allo scopo di ottenere una buona aderenza al metallo base.

## Cadmiatura elettrolitica

La cadmiatura è uno dei trattamenti superficiali della ghisa di più largo impiego per la protezione nei confronti della corrosione atmosferica. Nella serie elettrochimica, infatti, il cadmio è meno nobile del ferro e perciò, se riportato su materiali ferrosi, fornisce una protezione anticorrosione del tipo cosiddetto sacrificale nel senso che, ossidandosi, si sacrifica in favore del metallo base che permane allo stato elementare; in altre parole il cadmio funziona da anodo nella micropila di corrosione Fe/ambiente umido/Cd.

È proprio questa particolarità che caratterizza la cadmiatura rispetto alla ramatura, alla nichelatura ed alla cromatura e fa sì che essa, a differenza di queste ultime, espliciti le sue qualità protettive anche qualora il riporto risulti asportato in piccola misura in qualche punto.

L'impiego della cadmiatura è particolarmente raccomandato per la protezione dalla corrosione in atmosfere marine, o da ambienti debolmente alcalini.

Inoltre, prima della messa a punto di trattamenti di zincatura brillante da elettroliti acidi di qualità accettabile, la cadmiatura era impiegata come trattamento preliminare della zincatura da bagni al cianuro; si riportava cioè un leggero strato di cadmio, dello spessore massimo

di 1  $\mu\text{m}$ , su cui si procedeva poi con la zincatura fino allo spessore voluto.

Il tipo più comune di cadmiatura è quello da bagni al cianuro; si vanno però diffondendo specie per ragioni di ordine ecologico i bagni acidi al solfato; questi ultimi sono caratterizzati da un potere penetrante inferiore e richiedono maggiori attenzioni dal punto di vista operativo.

Infine, la cadmiatura da bagni al fluoborato, a causa del costo più elevato, trova impiego solo in casi particolari, come ad esempio qualora siano richiesti spessori di cadmio considerevoli, dato che questo tipo di elettrolito consente di operare a densità di corrente catodica molto più elevata e con rese di corrente molto maggiori del normale.

Si riporta la composizione base di alcuni bagni di cadmiatura.

- $\text{CdO}$ : 25 g/l;  $\text{NaCN}$ : 80 g/l.  
+ brillantanti specifici <sup>(1)</sup> a base di gelatina animale e sali di nichel.
- $\text{CdSO}_4$ : 50 g/l;  $\text{H}_2\text{SO}_4$ : 50 g/l.  
+ brillantanti specifici a base di gelatina animale.
- $\text{Cd}(\text{BF}_4)_2$ : 250 g/l ( $\text{Cd}$  100 g/l);  $\text{NH}_4\text{BF}_4$ : 60 g/l;  $\text{H}_3\text{BO}_3$ : 30 g/l; liquirizia: 1 g/l.
- pH 3 ÷ 3,5.

## Zincatura elettrolitica

È un trattamento del tutto simile alla cadmiatura per quanto concerne tanto le metodologie di esecuzione, quanto l'impiego e le proprietà protettive.

Come si è accennato, la zincatura diretta delle ghise da comuni bagni al cianuro, non è possibile in quanto, a causa della sovratensione di idrogeno, su tale materiale si determina al passaggio della corrente unicamente svolgimento di idrogeno; occorre pertanto o passare attraverso strati intermedi di cadmio o di stagno, od elettrodeporre lo zinco da bagni acidi che, determinando una diversa sovratensione di idrogeno sulla ghisa, non danno questo inconveniente.

L'impiego della zincatura rappresenta rispetto a quello della cadmiatura un notevole vantaggio economico, con risultati pratici del tutto identici.

Si descrivono le composizioni base dei tipi più comuni di zincatura.

- $\text{ZnO}$ : 40 g/l;  $\text{NaCN}$ : 90 g/l;  $\text{NaOH}$ : 75 g/l.  
+ brillantanti specifici a base di gelatina animale.
- $\text{ZnCl}_2$ : 100 g/l;  $\text{KCl}$ : 250 g/l.  
+ brillantanti specifici a base di chetoni aromatici.
- $\text{ZnO}$ : 25 g/l;  $\text{NaOH}$ : 200 g/l.  
+ brillantanti specifici a base di aldeidi aromatiche.
- $\text{Zn}(\text{BF}_4)_2$ : 200 g/l;  $\text{NH}_4\text{Cl}$ : 30 ÷ 40 g/l;  $\text{NH}_4\text{BF}_4$ : 30 ÷ 50 g/l; liquirizia: 1 g/l.
- pH 3,5 ÷ 4.

## Stagnatura elettrolitica

Lo stagno è, tra i metalli più comuni, uno dei più resistenti alla corrosione; esso, pur non provvedendo una protezione di tipo sacrificale, costituisce — grazie al-

<sup>(1)</sup> I brillantanti sono sostanze organiche di varia natura aggiunte in piccola quantità aventi lo scopo di determinare la deposizione del metallo riportato in maniera tale che la sua superficie risulti lucida.

l'inerzia chimica, all'elevato potere coprente ed all'aderenza al metallo base — una valida barriera contro molti agenti corrosivi.

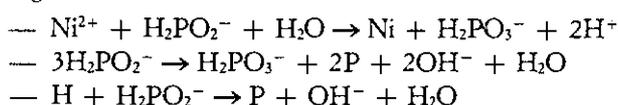
La stagnatura elettrolitica è applicata alle ghise soprattutto per proteggerle dalla corrosione atmosferica, nelle apparecchiature per uso alimentare o sanitario qualora sia richiesta una buona saldabilità e, infine, per ottenere superfici a basso coefficiente di attrito.

Gli elettroliti di stagnatura più comuni sono a base di stannato sodico, di solfato stannoso e di fluoborato stannoso. Normalmente i particolari stagnati elettroliticamente sono sottoposti successivamente ad un trattamento in stufa a 523 K (250 °C) al fine di portare a fusione il film di stagno, ottenendo per conseguenza un miglioramento delle proprietà specifiche del riporto.

## NICHELATURA CHIMICA

La nichelatura chimica o non elettrolitica è un trattamento di notevole interesse per i getti di ghisa. Sono infatti da un lato le eccezionali caratteristiche di resistenza alla corrosione e di durezza e dall'altro l'assoluta uniformità dello spessore del riporto, anche nel caso di oggetti a geometria molto complessa, a rendere questo trattamento uno dei più interessanti e suscettibili di maggiore sviluppo. Si tratta di un processo ad immersione in cui la deposizione del nichel metallico avviene per azione di una sostanza riducente (in genere sodio ipofosfito) su un sale di nichel. Entrambi i reagenti si trovano nella medesima soluzione in condizioni di metastabilità: la reazione è catalizzata dalla presenza di una sottile pellicola di nichel metallico prodottosi per spostamento sulla superficie dell'oggetto da trattare; il nichel, man mano che si deposita, prosegue l'azione catalitica ed il deposito cresce nel tempo in modo lineare ed uniforme finché dura il trattamento e finché le concentrazioni dei reagenti sono sufficientemente elevate.

I meccanismi di reazione, nel caso della riduzione con ipofosfito, sono piuttosto complessi e non del tutto chiariti, comunque possono essere schematizzati nel modo seguente:



Il riporto è costituito perciò da una lega Ni-P con tenore variabile di fosforo, a seconda dei parametri operativi dal 3 al 14%. Esso può essere sottoposto ulteriormente a trattamenti termici per aumentarne la durezza o di passivazione per aumentarne la resistenza alla corrosione.

Mediante riscaldamento in forno (in atmosfera inerte) a 623 ÷ 723 K (350 ÷ 450 °C) per 1 ÷ 3 h, si possono ottenere con depositi a tenore di P dell'8 ÷ 12%, fino a 1.000 HV.

Si riportano le composizioni base di 2 tipi di nichelatura chimica fra i più comuni.

—  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  : 30 g/l;  $\text{NaH}_2\text{PO}_2$  : 30 g/l;  
Na citrato: 50 g/l; pH = 4 ÷ 5;  
T = 368 K (95 °C); velocità di accrescimento = 2 ÷ 13  $\mu\text{m/h}$ .

—  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  : 30 g/l;  $\text{NaH}_2\text{PO}_2$  : 10 g/l;  
 $\text{NH}_4\text{Cl}$  : 50 g/l;  $\text{NH}_4\text{OH}$  fino a pH = 9 ÷ 10 circa;  
velocità di accrescimento = 6 ÷ 7  $\mu\text{m/h}$ .

L'elettrolito acido è preferibile per la maggiore stabilità e per la maggiore velocità di deposizione e nel caso delle ghise è senz'altro il più usato, il secondo si rende necessario qualora alcune parti dell'oggetto da trattare siano di alluminio, o comunque si devono nichelare contemporaneamente materiali ferrosi ed alluminio.

## TRATTAMENTI A FUOCO

Si intende normalmente con questa denominazione quel particolare tipo di rivestimento superficiale ottenuto per immersione in un bagno costituito dal metallo da riportare allo stato fuso.

I trattamenti a fuoco richiedono una particolare cura nelle fasi preliminari di pulitura e di decapaggio superficiale, in quanto l'ancoraggio al metallo base è generalmente assicurato dalla formazione di uno strato intermedio costituito da composti intermetallici o da soluzioni solide; è perciò evidente che materiali inerti, o tali da provocare reazioni secondarie non volute, minacciano il buon esito del processo. Va aggiunto che questi trattamenti sono particolarmente vantaggiosi quando la geometria dell'oggetto da trattare è particolarmente complessa.

### Zincatura

Il processo di zincatura a fuoco dei materiali ferrosi e delle ghise in particolare è usato soprattutto per la protezione dalla corrosione atmosferica o da aggressivi blandi. Il meccanismo protettivo è di tipo sacrificale (vedi zincatura e cadmiatura elettrolitica).

A differenza del riporto galvanico di zinco, gli spessori sono in questo caso notevolmente maggiori (~ 40  $\mu\text{m}$ ).

Come trattamenti preliminari sono particolarmente consigliati la sabbiatura ed il decapaggio in acido fluoridrico al 5%, indispensabile soprattutto quando ci siano residui silicei fortemente aderenti.

L'immersione in zinco fuso è effettuata ad una temperatura di  $723 \div 733$  K ( $450 \div 460$  °C), dentro grossi cestelli forati; quindi segue una forte centrifugazione allo scopo di allontanare lo zinco in eccesso.

Un successivo trattamento di passivazione in soluzione di cromati alcalini evita la formazione di prodotti di corrosione superficiale di colore bianco (ruggine bianca). Se, invece, si desidera applicare sulla zincatura uno strato di vernice, si rende necessario trattare la superficie preventivamente con soluzioni di fosfati alcalini; lo strato fosforico ottenuto in questo modo assicura l'ancoraggio della vernice allo zinco. Tanto la passivazione che la verniciatura prolungano notevolmente la vita dello strato protettivo.

### Stagnatura

La stagnatura è impiegata nelle ghise ai seguenti scopi:

- Protezione e finitura superficiale per apparecchiature di uso alimentare.
- Intermedio per l'applicazione di leghe antifrizione.
- Coadiuvante per saldature.

La presenza di grafite dispersa nella matrice metallica rende la superficie non bagnabile da parte dello stagno fuso. Sono pertanto necessari dei trattamenti preliminari: il più comune è l'elettrodeposizione di un sottile strato di un metallo che sia compatibile con lo stagno (il rame, il ferro od il nichel sono i più adatti); più complessa l'ossidazione della grafite in opportuni bagni di sali ossidanti; infine molto usata è la preparazione meccanica mediante granigliatura, seguita da una immersione in un bagno di fluxante.

Di seguito è descritto uno tra i più comuni processi, denominato *Direct Chloride Process*, messo a punto dal Tin Research Institute.

I getti sono granigliati, quindi immersi in un bagno costituito da  $ZnCl_2$ : 10 kg; NaCl: 2,5 kg;  $NH_4Cl$ : 1,25 kg; HCl: 250 ÷ 500 ml;  $H_2O$  fino a 5 l; di qui i getti passano al bagno di stagno fuso; il bagno di stagno ha uno strato surnatante costituito da una miscela di  $ZnCl_2$ , NaCl,  $NH_4Cl$  in rapporto in peso 8 : 2 : 1 dello spessore, all'atto della preparazione di circa 4 cm; prima dell'impiego esso è irrorato con  $H_2O$  fino a portarlo ad uno spessore di circa 5 cm; i getti vanno immersi molto lentamente, affinché l'acqua presente possa essere trattenuta dallo strato fuso surnatante; in caso contrario potrebbero verificarsi pericolosi scoppi; il tempo di permanenza in bagno dipende dalle dimensioni e dallo spessore dei getti da trattare.

- Altri processi eliminano la grafite superficiale con:
- Sali ossidanti fusi ( $NaNO_3 + KNO_3$ ): processo al nitrato.
  - Sali fusi e catalizzatori a  $713 \div 783$  K ( $440 \div 510$  °C): processo Kolene.
  - Sali caustici fusi + corrente anodica 20 A/dm<sup>2</sup> circa: processo Clenny.

### Piombo - stagnatura

Il piombo fuso forma legami di natura puramente meccanica con il ferro; l'aggiunta di elementi in lega con il piombo, quali lo stagno in quantità di circa il 20% ed in misura minore l'antimonio, aumenta le possibilità di legame e perciò l'aderenza.

La deposizione di leghe Pb-Sn trova impiego soprattutto in apparecchiature che devono resistere alla corrosione da  $H_2SO_4$ ,  $SO_3$  e  $SO_2$  umide.

Per quanto concerne i trattamenti preliminari dei getti da sottoporre a piombo-stagnatura, vale quanto già descritto a proposito della stagnatura a fuoco.

Il bagno di piombo-stagno fuso è mantenuto ad una temperatura di  $627 \div 673$  K ( $350 \div 400$  °C) con uno strato surnatante a base di  $ZnCl_2$  e  $NH_4Cl$  fusi, allo scopo di ridurre al minimo l'ossidazione, e migliorare la bagnabilità dei getti da trattare.

### Alluminiatura

L'alluminiatura delle ghise è effettuata solitamente per proteggerle dalla corrosione atmosferica, da fumi solforosi, da acidi organici e da agenti ossidanti quali soprattutto i nitrati, e per migliorare la resistenza all'ossidazione ad alte temperature; l'alluminio infatti si copre di uno strato di ossido compatto e refrattario e, inoltre, grazie alla sua elevata conducibilità termica allo stato metallico, disperde il calore verso la massa di ghisa cui aderisce: questo spiega perché l'alluminiatura resiste a temperature anche superiori al punto di fusione dell'alluminio.

Al fine di ottenere una buona aderenza dell'alluminio alla ghisa sono necessari accurati trattamenti preliminari, allo scopo di decarburare gli strati più superficiali.

A tale scopo i getti vanno immersi in sali fusi: normalmente si usa una miscela di criolite ( $Na_3AlF_6$ ) e cloruri di zinco, sodio, bario e calcio a 703 K (430 °C); dopo l'immersione in sali fusi si procede all'immersione nel bagno di alluminio fuso a circa 973 K (700 °C), sulla superficie del bagno di alluminiatura è normalmente fatto stratificare dal cloruro di bario fuso.

## TRATTAMENTI DI CONVERSIONE

I trattamenti di conversione sono solitamente ottenuti per reazione chimica del metallo base (in questo caso le ghise), con particolari soluzioni e sono costituiti da composti superficiali cristallini od amorfi che contengono allo stato combinato il metallo base.

I 3 più importanti trattamenti di conversione sono: la fosfatazione che si esegue come intermedio per l'ap-

plicazione di vernici od altri protettivi organici ovvero come trattamento antiusura ed antigrippante; la cromatazione che si esegue allo scopo di aumentare la resistenza alla corrosione atmosferica delle superfici trattate; l'ossidazione o brunitura, in genere seguita da impregnazione, con oli opportuni, dello strato ossidato, che è effettuata sia a scopi protettivi che semplicemente decorativi.

## Fosfatazione

Esistono 3 tipi fondamentali di fosfatazione: al ferro, allo zinco ed al manganese.

La fosfatazione al ferro si ottiene per reazione del materiale ferroso con soluzioni acquose di fosfati alcalini, e consta di un sottile strato superficiale ( $1 \div 3 \mu\text{m}$ ) di fosfato ferroso amorfo. Questo strato fosfatico ha deboli caratteristiche protettive di per sé, ma costituisce una discreta base di ancoraggio per l'applicazione di vernici o di altri rivestimenti organici. Può essere effettuata tanto per immersione quanto spruzzando una dispersione, ottenuta aggiungendo un fine abrasivo alla soluzione fosfatica.

Analoga, ma di gran lunga più efficace, è la fosfatazione allo zinco. Si ottiene generalmente per immersione dell'oggetto da trattare in una soluzione acquosa bollente di fosfato biacido di zinco —  $\text{Zn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  — e acido fosforico libero, ad opportune concentrazioni. Lo strato fosfatico è costituito da fosfati neutri e fosfati monoacidi di ferro e zinco, ha una struttura cristallina aghiforme ed uno spessore che può giungere fino a  $10 \mu\text{m}$ ; esso può essere impregnato con lacche, vernici, oli essiccativi o, a fini reologici, saponi e lubrificanti solidi. Certamente, però, l'uso più comune della fosfatazione allo zinco delle ghise è come intermedio per l'applicazione di vernici.

La fosfatazione al manganese, per quanto concerne le metodologie di esecuzione ed i meccanismi di reazione, è del tutto simile a quella allo zinco; anche essa si effettua per immersione in soluzioni bollenti di fosfato biacido di manganese, acide per acido fosforico.

Lo strato fosfatico dello spessore di  $5 \div 8 \mu\text{m}$  è costituito da fosfati neutri e fosfati monoacidi di ferro e manganese; ha struttura cristallina, ma, a differenza dello zinco, i cristalli hanno forma poliedrica piuttosto tondeggiante.

Le ghise sono fosfatate al manganese, qualora si voglia conferire ad esse eccellenti proprietà reologiche, grazie al basso coefficiente di attrito dello strato fosfatico, ed all'azione sinergica che esso esplica con i lubrificanti

con cui è normalmente impregnato. Questo tipo di fosfatazione da sola od impregnata con lacche a base di lubrificanti solidi quali grafite, teflon, bisolfuro di molibdeno, ecc. elimina quasi completamente i problemi di rodaggio di superfici in mutuo scorrimento.

## Ossidazione e brunitura

Si tratta di uno strato superficiale, spesso qualche micron e di colore dal bruno al nero-bluastrò, costituito da  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Di per sé un tale strato offre scarsa protezione alla corrosione e debole resistenza all'usura, tuttavia mediante l'impregnazione con oli o vernici trasparenti si migliora l'estetica e la resistenza alla corrosione e con l'aggiunta di oli lubrificanti si riducono i rischi di grippaggio per carichi e per velocità di scorrimento non troppo elevati.

L'ossido  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  può essere ottenuto sotto forma aderente e compatta o trattando con vapore d'acqua le superfici da trattare, portate a temperature comprese tra  $773$  e  $873 \text{ K}$  ( $500 \div 600^\circ\text{C}$ ), od immergendole in soluzioni, concentratissime ed a temperature superiori a  $393 \text{ K}$  ( $120^\circ\text{C}$ ), di soda, nitrato e nitrito sodico.

Un tipico esempio di ciclo di brunitura è il seguente:

- Immersione per 45 min a  $413 \text{ K}$  ( $140^\circ\text{C}$ ) in un bagno avente la seguente composizione:  $\text{NaOH} = 500 \text{ g/l}$ ;  $\text{NaNO}_3 = 30 \text{ g/l}$ ;  $\text{NaNO}_2 = 250 \text{ g/l}$ .
- Lavaggio in acqua corrente.
- Asciugatura con aria compressa.
- Impregnazione con olio di vaselina.

## Cromatazione

L'immersione di ghise direttamente in soluzioni di acido cromatico o di bicromati-cromati alcalini conferisce una debole passività alle superfici trattate; mentre su ghise già precedentemente cadmate, zincate, o fosfatate allo zinco, l'azione passivante del cromo esavalente è tale da raddoppiare o triplicare l'effetto di questi trattamenti nella protezione dalla corrosione atmosferica.

## TRATTAMENTI DI DIFFUSIONE

Questo tipo di trattamenti porta alla formazione di uno strato superficiale costituito da una lega tra il metallo base (in questo caso le ghise), ed uno o più elementi opportuni, i quali durante il processo stesso diffondono all'interno della matrice ferrosa. Tutti i trattamenti di diffusione necessitano di temperature elevate, mentre i materiali di impiego possono essere di differenti tipi: metalli in polvere finissima, sali fusi oppure atmosfere gassose. Si possono, pertanto, considerare come veri e propri trattamenti termici.

Si prenderanno in considerazione solo quelli in cui l'elemento che diffonde è un metallo e cioè l'alluminizzazione o calorizzazione, la cromizzazione e la sheradizzazione.

### Alluminizzazione

La diffusione di alluminio nella ghisa è effettuata al fine di ottenere delle superfici caratterizzate da una elevata resistenza al calore (temperature intorno a  $1.023 \text{ K}$  ( $750^\circ\text{C}$ )) ed ai composti solforosi allo stato gassoso. Essa è normalmente ottenuta mediante riscaldamento a  $1.073 \div 1.148 \text{ K}$  ( $800 \div 875^\circ\text{C}$ ) fuori del contatto dell'atmosfera dei getti immersi in una miscela di allumina, cloruro di alluminio e cloruro di ammonio; in questo modo si possono ottenere strati superficiali con percentuali di alluminio fino al 25%; normalmente, il tenore raggiunto è del 10%.

Esistono, però, alcune variazioni del processo, le più comuni sono l'ottenimento di uno strato superficiale di

alluminio mediante alluminatura (vedi trattamenti a fuoco) o l'applicazione di polvere di alluminio sotto forma di vernice; questi strati superficiali sono poi sottoposti a riscaldamento a  $1.073 \div 1.173$  K ( $800 \div 900$  °C) in atmosfera controllata.

### Cromizzazione

Nel trattamento di cromizzazione della ghisa l'introduzione del cromo avviene a temperature molto elevate ( $1.123 \div 1.273$  K) ( $850 \div 1.000$  °C) per contatto dei getti con sali fusi o con polveri contenenti cromo. Il risultato di questi trattamenti è un forte incremento della durezza superficiale, in seguito alla formazione di carburi complessi di cromo; pertanto, la cromizzazione è applicata qualora si richiedano resistenze all'usura molto elevate.

A causa dell'inerzia chimica del cromo si constata, inoltre, un netto aumento della resistenza dei getti alla corrosione.

La diffusione del cromo nello strato superficiale avviene attraverso un meccanismo di scambio con il ferro, da ciò consegue una perfetta aderenza dello strato arri-

chito di cromo e la conservazione dei profili dimensionali tra prima e dopo il processo.

### Sheradizzazione

Si definisce con questo termine il trattamento di diffusione dello zinco in una matrice ferrosa, effettuato al fine di fornire al materiale base una buona resistenza alla corrosione atmosferica.

Il processo è eseguito in tamburi rotanti perfettamente sigillati in cui i getti sono mescolati con zinco in polvere; la massa è, quindi, riscaldata a  $623 \div 673$  K ( $350 \div 400$  °C) per alcune ore (da 2 a 12 a seconda delle caratteristiche richieste).

Lo strato superficiale che si ottiene è molto ricco di zinco, tuttavia il ferro è normalmente superiore al 10%.

Questo trattamento garantisce, rispetto alla zincatura a fuoco, una maggiore uniformità di spessore dello strato protettivo ed un minore consumo di zinco.

Va però detto che le qualità protettive, sia rispetto alla zincatura elettrolitica che rispetto a quella a fuoco, sono alquanto inferiori.

## SMALTATURA

### Generalità

L'applicazione di smalti ceramici ai getti di ghisa rappresenta la più antica forma di rivestimento superficiale, ed anche se notevolmente migliorata, la sua tecnologia resta sostanzialmente la medesima di un secolo fa.

Questo tipo di rivestimento è tuttora il più diffuso e popolare. L'aspetto eccellente, la stabilità, la buona conducibilità del calore, la notevole rigidità, la resistenza a certe corrosioni, ne fanno un materiale composto quanto mai gradito.

Esso sostanzialmente, accoppiando ghisa e porcellana, permette di compensare i difetti dell'una con i vantaggi dell'altra.

I prodotti che ne risultano sono belli, resistenti, pratici all'impiego e duraturi. Fra i più comuni si citano: vasche da bagno, articoli sanitari, recipienti per cucina, ecc.

### Materiali di rivestimento

Gli smalti ceramici impiegati normalmente sono assimilabili a silicati complessi e sono ottenuti per fusione da miscele costituite da 3 gruppi di materiali inorganici: refrattario (quarzo, feldspato), fondenti (borace, soda, criolite, fluorite, nitrato di sodio, ecc.), e opacizzanti (ossidi di antimonio, zirconio, stagno, titanio, ecc.).

Dopo granulazione in acqua sono macinati molto finemente, a secco o ad umido e con l'eventuale aggiunta di ossidi metallici coloranti. Nel caso di impiego ad umido si aggiungono anche argilla ed elettroliti per mantenere il materiale in sospensione.

Un tipo particolare di smalto ad umido sono le cosiddette *masse* o *fritte* o *controssidi* che sono usate per la preparazione delle superfici per permettere l'adesione alla superficie metallica degli smalti di copertura.

Loro requisito particolare è il coefficiente di dilatazione termica che deve essere il più possibile eguale a quello della superficie metallica cui sono destinate, nonché una certa elasticità per compensare eventuali differenze.

### Metodi di applicazione

I metodi di applicazione sono sostanzialmente 2: ad umido od a secco oppure misto; un primo strato ad umido ed i successivi a secco.

L'applicazione ad umido avviene per spruzzatura o per immersione a temperatura ambiente, seguita da una cottura a temperatura sino a  $1.173$  K ( $900$  °C), mentre quella a secco per spolvero con speciali setacci vibranti o per rotolamento (nel caso di piccoli getti) nella polvere con i getti a temperature dell'ordine di  $1.073 \div 1.173$  K ( $800 \div 900$  °C).

Nel processo misto lo strato ad umido deve essere fatto essiccare perfettamente prima di iniziare il riscaldamento per il successivo strato a secco.

### Composizione delle ghise

Il rivestimento con smalto ceramico può essere applicato con successo su ghise con una vasta gamma di analisi.

La buona pratica di fonderia e superfici esenti da soffiature ed imperfezioni hanno altrettanta importanza dell'analisi.

In generale, è consigliabile mantenere abbastanza bassa la percentuale di carbonio combinato (circa lo 0,4%) ed evitare elementi stabilizzatori dei carburi. Ciò particolarmente allo scopo di evitare coefficienti di dilatazione termica troppo elevati che provocherebbero inevitabilmente distacchi dello smalto o criccate nella ghisa in conseguenza dello shock termico cui sono sottoposti i getti durante la smaltatura.

Anche un tenore di carbonio grafitico troppo elevato è egualmente da temere, potendo dare origine a riduzioni degli ossidi metallici contenuti negli smalti stessi.

Un'analisi consigliabile nel caso di getti di piccolo spessore ( $4 \div 6$  mm) è, a titolo di esempio, la seguente:

- C =  $3,2 \div 3,4\%$
- Si =  $2,2 \div 2,4\%$
- Mn =  $0,45 \div 0,7\%$
- S =  $\leq 0,12\%$
- P =  $0,4 \div 0,8\%$

## METALLIZZAZIONE SUPERFICIALE

La deposizione mediante fusione di materiale di apporto sulla superficie di getti di ghisa grigia è spesso eseguita allo scopo di ottenere delle superfici dure resistenti all'usura per abrasione o per scorrimento di fluidi, o delle superfici resistenti alle alte temperature od alla corrosione, ed infine anche per ricostruire eventuali zone mancanti sui getti e ripristinarne le dimensioni a disegno. A questo scopo può essere impiegata una vasta gamma di materiali d'apporto e procedimenti che in gran parte sono gli stessi adottati e già descritti fra i procedimenti di saldatura.

Per l'apporto di strati sottili di metallo quali rame e sue leghe, Pb, Zn, Sn, ecc. si impiega il sistema di metallizzazione a spruzzo o ad immersione, mentre quando si tratti di depositare strati di un certo spessore, si adottano procedimenti di fusione analoghi a quelli di saldatura.

Per quanto riguarda l'ottenimento di superfici dure sulla ghisa grigia, è opportuno ricordare che queste possono essere ottenute controllando la solidificazione, o temprandola, oppure anche con adatti trattamenti termici, pertanto superfici dure ottenute mediante riporto di materiali saranno adottate solamente quando: non sia possibile la tempra in fase di solidificazione, o l'esecuzione di trattamenti termici; si debba indurire solo una limitata zona; si richieda la resistenza a particolari tipi di usura, di corrosione, o di temperature elevate, che non sia possibile ottenere in altro modo.

### Metalli d'apporto

Nella tab. LXXX sono sommariamente riportati i diversi tipi di materiali impiegabili allo scopo, che si trovano in commercio sotto forma di fili o di elettrodi, suddivisi nelle 5 classi: materiali ferrosi; a base di cobalto; a base di carburi; leghe di rame; leghe di nichel.

Nella prima colonna della tabella sono indicate le sigle della classificazione americana AWS: fili ed elettrodi per riporti superficiali mediante saldatura (Surfacing Welding Rods and Electrodes), che li classifica in base alla composizione chimica, distinguendo con i prefissi RodE i fili degli elettrodi.

Il gruppo dei materiali ferrosi è costituito da un numeroso gruppo di acciai e cioè di acciai temprabili e di acciai inossidabili; i primi vanno dagli acciai dolci

agli acciai rapidi; i secondi, generalmente di tipo austenitico, comprendono gli alto-legati al nichel-cromo resistenti alla corrosione, e gli acciai austenitici al manganese resistenti all'usura.

Le leghe a base di cobalto sono caratterizzate da elevata resistenza alle temperature più elevate. Quelle al cromo-cobalto sono particolarmente adatte a formare le superfici di contatto delle valvole di sfogo dei gas combusti dei grossi motori a combustione interna.

I carburi di tungsteno sinterizzati sono disponibili sotto forma di bacchette fuse o di granelli contenuti in tubicini con i quali sono interfusi sulle superfici dei getti. I granelli di carburo, che sostanzialmente non subiscono trasformazioni durante il riporto, restano in rilievo sulla superficie. Depositi di materiali di questo tipo sono estremamente resistenti all'usura per attrito.

Le leghe di rame sono usate per conferire ai getti di ghisa le loro caratteristiche particolari, così superfici che devono assumere caratteristiche di resistenza all'usura provocata da leggera frizione e rotolamento, come nel caso tipico dei cuscinetti, sono ricoperte con bronzi d'alluminio, sufficientemente duri. Leghe rame-stagno e rame-silicio sono usate per resistere alla corrosione.

Le leghe di nichel sono particolarmente adatte per resistere ad alte temperature ed alla corrosione, ad eccezione di un solo caso, e cioè in presenza di zolfo ed idrogeno solforato.

Numerose sono le leghe di nichel con altri elementi che sono particolarmente adatte per casi particolari, ed in modo speciale per resistere alla corrosione anche alle più elevate temperature.

Le leghe di nichel, disponibili anche sotto forma di fili sottili, sono impiegabili di preferenza con il procedimento a spruzzo piuttosto che per fusione.

### Procedimenti di applicazione

Sono i medesimi già descritti per la saldatura ossiacetilenica e ad arco, e la loro scelta dipende soprattutto dalla disponibilità delle apparecchiature e dall'accessibilità delle superfici da ricoprire. La tecnologia dell'operazione è del tutto analoga a quella indicata per la saldatura degli acciai ad elevato tenore di carbonio, e pertanto è sempre consigliabile, anche se non indispensabile, un adeguato preriscaldamento del getto da rivestire.

Tabella LXXX - Materiali per riporti superficiali. Caratteristiche ed impieghi.

Tipo di materiale	Sigla AWS	Sistemi di applicazione	Caratteristiche generali	Impieghi specifici
Leghe ferrose	E Fe - RF5 E Cr - RC1 E FeCr - RFeCr E Fe Mn	Saldature autogene a gas e ad arco	Incremento della temprabilità per aumento del tenore di carbonio. I tipi austenitici induriscono per deformazione a freddo in esercizio.	Superfici di lavoro successivamente temperate di apparecchi frantumatori e per applicazioni abrasive. Usura per superfici metalliche.
Leghe di cobalto	E COCr - RCOCr	Brasatura a gas e ad arco	Resistenza all'erosione ed alla abrasione. Durezza inferiore a quella delle leghe che non diminuisce a temperature elevate.	Per valvole e sedi di motori a combustione interna. Per esecuzione e riparazione di stampi lavoranti a temperature elevate.
Carburi	WC - W <sub>2</sub> C	Saldatura a gas e ad arco	Massima durezza e resistenza all'abrasione. La fragilità è connessa alle caratteristiche della matrice e del materiale base.	Taglio e sminzamento di minerale o metalli. Per impieghi a fronte di condizioni di abrasione particolarmente severe.
Leghe di rame	ECuZn - RCuZn ECuSn - RCuSn ECuAl - RCuAl	Brasatura a gas e ad arco	Resistenza alla corrosione. Ottime caratteristiche antifrizione. Eccellente conduttività elettrica.	Superfici di cuscinetti antifrizione. Limitata durezza per contatto sui denti di ingranaggi.
Leghe di nichel	ENiCr - RNiCr	Saldatura a gas e ad arco. Metallizzazione a spruzzo	Resistenza al calore ed alla corrosione. Resistenza agli urti ed elevata durezza anche a temperature elevate.	Resistenti ai gas caldi e corrosivi. Consigliabili per superfici che lavorano a temperature elevate che devono essere lavorate meccanicamente.

Il riporto con la fiamma, a confronto del riporto mediante l'arco elettrico, presenta alcuni vantaggi: un gradiente termico più graduale ed uno shock termico meno accentuato; la possibilità di un più facile e migliore controllo del materiale depositato sulla superficie da ricoprire, mentre il riporto ad arco costa di meno ed ha una maggiore rapidità d'esecuzione; inoltre offre il vantaggio di poter essere eseguito in qualsiasi posizione e della più varia disponibilità dei procedimenti, in quanto si possono impiegare anche i sistemi ad arco sommerso MIC, T.I.G., con elettrodi di carbone, ad idrogeno atomico, ecc.

Particolare attenzione si dovrà porre alla penetrazione dei cordoni di riporto entro il materiale base della superficie ricoperta e della conseguente mescolanza dei 2 materiali, di riporto e di base, che genera composizioni ibride e di transizione quando si operi con materiali d'apporto ferrosi, ciò che non accade con le leghe di rame.

In qualche caso, per evitare la formazione di strutture dure e fragili, è consigliabile inserire ad immediato contatto della superficie base uno strato di lega non ferrosa. Si tenga presente che il primo strato di lega ferrosa depositato a mano si mescola e si diluisce nel metallo base per un 50%, il secondo strato per un 25% o meno, ed il terzo strato per un 12%; la diluizione va man mano diminuendo, aumentando il numero degli strati fino a divenire insignificante, tuttavia è chiaro come le caratteristiche degli strati più vicini al materiale base non siano le medesime di quelle degli strati superiori, in quanto sono nettamente influenzati dalla diffusione del carbonio della ghisa entro gli strati di saldatura.

Altro procedimento impiegato per la metallizzazione delle superfici è quello a spruzzo di metallo od altri materiali allo stato fuso, o ad elevata temperatura facendo passare dei fili metallici, o delle polveri metalliche o non, attraverso la fiamma di un cannello a gas, che li fonde o li surriscalda ad adatta temperatura, mentre allo stesso tempo sono spruzzati con forza sulla superficie da metallizzare o comunque da ricoprire.

Questo procedimento è adatto solo per depositare strati molto sottili, ma tuttavia validi per la funzione protettiva che si intende ottenere. Per il modesto apporto di calore di questo procedimento non si hanno praticamente trasformazioni strutturali e variazione delle caratteristiche nel materiale base.

### Applicazioni

Le applicazioni sono quelle già accennate: ottenere superfici resistenti all'usura per sfregamento o per rotolamento, e cioè ad esempio: ricoprire o ricostruire denti di ingranaggio anche usati; ricoprire slitte o guide di banchine di piccole macchine utensili, ove scorrono le tavole di lavoro, per ridurre l'usura e mantenerne la precisione: in questo caso si preferisce la metallizzazione a spruzzo; ricoprire sedi di valvole di sfuggita di gas combustibili di motori a combustione interna operanti ad elevata temperatura; coprire superfici per renderle adatte a resistere alla corrosione dei più diversi agenti chimici o naturali; ricoprire le superfici di getti destinati ad operare come cuscinetti; ecc.

香  
集  
卷  
一

**Volume II: Ghise grigie**  
**Capitolo XI**

## **Applicazioni**

- PREMESSA
- ESEMPI DI APPLICAZIONI DELLE GHISE GRIGIE
- CONCLUSIONI

A cura di: Alfredo Donnini  
Luciano Oltrasi  
Giovanni Riccio  
Valentino Riva



## PREMESSA

Nella tab. LXXXI sono riportati i dati di diversi Paesi, relativi alla produzione dei getti nei vari tipi di leghe ferrose; la ripartizione fra i tipi di metalli può essere così riassunta:

— Getti di ghisa grigia	53.114,4 t	71,1%
— Getti di ghisa sferoidale	5.939,9 t	8,0%
— Getti di ghisa malleabile	2.841,7 t	3,8%
— Getti di acciaio	12.749,0 t	17,1%
Totale di getti ferrosi	74.645,0 t	100,0%

Tabella LXXXI - Produzione di getti nel mondo (anno 1976, migliaia di tonnellate).

Paesi	Getti				
	Ghisa grigia	Ghisa sferoidale	Ghisa malleabile	Acciaio	Totale
Australia	450,0	40,0	18,0	60,0	568,0
Austria	167,1	24,6	13,1	33,3	238,1
Belgio	230,2	6,3	0,4	83,7	320,6
Brasile	930,1	238,0	49,0	137,2	1.354,3
Canada	722,9	196,8	41,1	156,9	1.117,7
Cecoslovacchia (1975)	1.060,0	18,8	30,5	349,2	1.458,5
Cile	39,8 <sup>(1)</sup>	<sup>(2)</sup>	<sup>(2)</sup>	12,7	52,5
Cina	203,6	4,7	13,3	23,2	244,8
Corea	240,8	30,6	—	27,8	299,2
Danimarca	69,0	4,1	—	8,6	81,7
Egitto (1975)	52,5	—	—	9,5	62,0
Filippine (1975)	57,7 <sup>(2)</sup>	<sup>(2)</sup>	3,1	27,7	88,5
Finlandia	53,4	16,5	1,9	16,5	88,3
Francia	1.638,2	682,0	82,8	232,0	2.635,0
Germania Occidentale	3.021,1	566,1	213,0	306,2	4.106,4
Germania Orientale (1973)	930,1 <sup>(3)</sup>	<sup>(2)</sup>	23,4	204,3	1.157,8
Giappone	3.342,2	1.097,7	331,4	621,3	5.392,6
India (1975)	467,0	3,0	20,0	68,0	558,0
Indonesia (1975)	30,5	—	—	0,3	30,8
Israele (1975)	21,6	1,1	2,5	4,4	29,6
Italia	1.387,0	167,6	72,5	128,2	1.755,3
Jugoslavia	402,2	21,2	29,3	64,8	517,5
Lussemburgo	71,8	12,0	—	4,4	88,2
Messico (1975)	471,0	20,0	16,3	58,5	565,8
Norvegia	77,8	12,2	11,3	14,2	115,5
Nuova Zelanda (1972)	20,4	2,5	0,4	3,7	27,0
Olanda	235,8	15,8	13,6	10,1	275,3
Polonia	2.022,0 <sup>(1)</sup>	<sup>(2)</sup>	<sup>(2)</sup>	352,0	2.374,0
Portogallo	36,9	4,9	9,9	9,6	61,3
Regno Unito	2.431,6	337,6	194,0	254,7	3.217,9
Romania	967,0	22,0	18,4	281,9	1.289,3
Russia	18.591,0	252,0	787,0	7.136,0	26.766,0
Spagna	626,0	22,1	31,1	98,2	777,4
Stati Uniti	10.656,6	2.002,7	755,6	1.610,2	15.025,1
Sud Africa	296,0	13,4	30,0	158,0	497,4
Svezia	337,0	43,6	12,4	26,5	419,5
Svizzera	145,0	35,9	3,4	10,5	194,8
Turchia	285,0	11,2	3,6	56,5	356,3
Ungheria	265,6	0,6	8,8	57,2	332,2
Venezuela	56,5	12,3	0,6	2,4	71,8
Zambia	4,4	—	—	28,6	33,0
	53.114,4	5.939,9	2.841,7	12.749,0	74.645,0

Da « Census of World Casting production 1976 - Metric tons - Modern Castings (US) Jan. 1978 », rettificato con i dati della Commissione No. 7 del Comitato delle Associazioni Europee di Fonderia (C.A.E.F.).

<sup>(1)</sup> Compreso ghisa sferoidale e ghisa malleabile.

<sup>(2)</sup> Compreso nella ghisa grigia.

<sup>(3)</sup> Compreso ghisa sferoidale.

In considerazione del fatto che nella tabella non sono compresi i dati di produzione di altri Paesi — alcuni dei quali industrialmente importanti — si può stimare che la produzione mondiale di getti superi attualmente gli 85 milioni di tonnellate/anno, con una capacità produttiva valutata attorno ai 100 milioni di tonnellate/anno. Come si vede, la ghisa grigia mantiene in ogni caso il predominio con una produzione che si può stimare in circa 50 ÷ 60 milioni di tonnellate all'anno di getti, pari a circa il 60 ÷ 70% del totale dei getti.

Per quanto concerne i singoli dati dei Paesi riportati in tabella, va rilevato che la produzione dei getti di ghisa si riferisce a tutti i settori industriali utilizzatori, compresi i getti per la siderurgia, i tubi centrifugati e l'industria pesante; quindi si hanno pesi medi differenti, in relazione alle incidenze dei getti di maggiore peso; possono sussistere, cioè, fra i vari Paesi differenze sostanziali fra il totale di getti prodotti ed i relativi pesi medi.

La vasta applicazione dei getti di ghisa grigia è dovuta essenzialmente alla molteplicità delle loro caratteristiche meccaniche e delle proprietà fisiche e tecnologiche che sono state ampiamente illustrate nei capitoli precedenti. Esse possono, infatti, soddisfare la maggior parte delle

esigenze dei vari settori industriali utilizzatori. D'altra parte, si ricorda che le cognizioni tecniche e metallurgiche delle Fonderie si sono grandemente sviluppate in questi anni e che anche fra le ghise grigie si possono oggi annoverare i tipi di *alta qualità*, che hanno contribuito all'ulteriore loro incremento applicativo.

Per comprendere perché la ghisa grigia ha assunto una importanza così grande nella civiltà e nella tecnica moderna, bisogna pensare ai numerosi vantaggi che essa offre: nella gran parte dei casi la ghisa grigia diviene insostituibile da un lato per il suo processo metallurgico abbastanza semplice, dall'altro per la facile sua messa in opera, con una estesa gamma di proprietà e di caratteristiche.

Per questo le Fonderie debbono conoscere e fare conoscere tutte le possibilità di impiego che offrono le ghise grigie e contrapporsi alla tendenza di qualche utilizzatore che considera la ghisa solo un metallo di qualità inferiore.

I campi di applicazione delle ghise sono oggi così vasti e variati che facilmente ciascun costruttore o progettista può, per un dato pezzo, trovare nelle ghise la soluzione più adatta dal lato tecnico e dal lato economico.

Tabella LXXXII - Produzione di getti di ghisa (tonnellate). Fonte ISTAT e valutazioni.

Getti di ghisa	Ghisa grigia	Ghisa sferoidale	Ghisa malleabile	Totale
<b>1974</b>				
— Getti per l'industria meccanica . . . . .	552.980	45.999	31.784	630.763
— Getti per l'industria motoristica . . . . .	222.899	42.033	25.992	290.924
— Getti per l'edilizia . . . . .	362.335	32.000	20.000	414.335
— Getti per la siderurgia . . . . .	375.032	22.874	—	397.906
— Altri getti . . . . .	139.265	2.225	11.886	153.376
<b>Totale generale . . . . .</b>	<b>1.652.511</b>	<b>145.131</b>	<b>89.662</b>	<b>1.887.304</b>
<b>1975</b>				
— Getti per l'industria meccanica . . . . .	426.256	38.350	30.918	495.524
— Getti per l'industria motoristica . . . . .	207.549	52.112	11.631	271.292
— Getti per l'edilizia . . . . .	216.869	37.000	16.600	270.469
— Getti per la siderurgia . . . . .	343.348	21.805	—	365.153
— Altri getti . . . . .	121.832	1.558	9.052	132.442
<b>Totale generale . . . . .</b>	<b>1.315.854</b>	<b>150.825</b>	<b>68.201</b>	<b>1.534.880</b>
<b>1976</b>				
— Getti per l'industria meccanica . . . . .	424.381	37.573	25.918	487.872
— Getti per l'industria motoristica . . . . .	244.252	69.431	17.612	331.295
— Getti per l'edilizia . . . . .	329.137	39.000	18.300	386.437
— Getti per la siderurgia . . . . .	311.669	21.076	—	332.745
— Altri getti . . . . .	77.546	529	10.700	88.775
<b>Totale generale . . . . .</b>	<b>1.386.985</b>	<b>167.609</b>	<b>72.530</b>	<b>1.627.124</b>
<b>1977</b>				
— Getti per l'industria meccanica . . . . .	475.620	41.187	25.483	542.290
— Getti per l'industria motoristica . . . . .	266.861	64.015	19.567	350.443
— Getti per l'edilizia . . . . .	329.668	42.000	20.600	392.268
— Getti per la siderurgia . . . . .	292.176	14.086	—	306.262
— Altri getti . . . . .	109.097	756	7.417	117.270
<b>Totale generale . . . . .</b>	<b>1.473.422</b>	<b>162.044</b>	<b>73.067</b>	<b>1.708.533</b>

Tabella LXXXIII - Composizione percentuale della produzione di getti di ghisa grigia (da tab. LXXXII).

Getti di ghisa	Ghisa grigia, %			
	1974	1975	1976	1977
1 - Getti per l'industria meccanica	33,5	32,4	30,6	32,3
2 - Getti per l'industria motoristica	13,5	15,8	17,6	18,1
3.1 - Radiatori	13,1	9,9	12,7	11,2
3.2 - Caldaie per riscaldamento	3,7	2,7	5,0	4,2
3.3 - Vasche da bagno, piatti per doccia	2,5	1,5	2,6	2,5
3.4 - Tubi per condotte d'acqua	0,5	0,3	0,1	0,1
3.5 - Tubi pluviali	0,3	0,1	0,6	0,5
3.6 - Raccordi	0,5	0,4	0,5	0,5
3.7 - Prodotti stradali (chiusini, ecc.)	—	—	1,3	2,2
3.8 - Altri getti per l'idro-termo-sanitaria	1,3	1,6	0,9	1,2
3 - Getti per l'edilizia	21,9	16,5	23,7	22,4
4.1 - Lingottiere	9,4	10,3	8,9	7,8
4.2 - Lingottiere prodotte con ghisa liquida direttamente proveniente dall'altoforno	12,4	14,8	12,6	11,2
4.3 - Cilindri per laminatoio	0,9	1,0	1,0	0,8
4 - Getti per la siderurgia	22,7	26,1	22,5	19,8
5 - Altri getti	8,4	9,2	5,6	7,4
TOTALE GENERALE (1+2+3+4+5)	100,0	100,0	100,0	100,0

Tabella LXXXIV - Composizione percentuale della produzione totale di getti di ghisa (da tab. LXXXII).

Getti di ghisa	Ghisa grigia %	Ghisa sferoidale %	Ghisa malleabile %	Totale %
<b>1974</b>				
— Getti per l'industria meccanica	29,3	2,4	1,7	33,4
— Getti per l'industria motoristica	11,8	2,2	1,4	15,4
— Getti per l'edilizia	19,2	1,7	1,1	22,0
— Getti per la siderurgia	19,9	1,2	—	21,1
— Altri getti	7,4	0,1	0,6	8,1
Totale generale	87,6	7,6	4,8	100,0
<b>1975</b>				
— Getti per l'industria meccanica	27,8	2,5	2,0	32,3
— Getti per l'industria motoristica	13,5	3,4	0,8	17,7
— Getti per l'edilizia	14,1	2,4	1,1	17,6
— Getti per la siderurgia	22,4	1,4	—	23,8
— Altri getti	7,9	0,1	0,6	8,6
Totale generale	85,7	9,8	4,5	100,0
<b>1976</b>				
— Getti per l'industria meccanica	26,1	2,3	1,6	30,0
— Getti per l'industria motoristica	15,0	4,3	1,1	20,4
— Getti per l'edilizia	20,2	2,4	1,1	23,7
— Getti per la siderurgia	19,1	1,3	—	20,4
— Altri getti	4,8	—	0,7	5,5
Totale generale	85,2	10,3	4,5	100,0
<b>1977</b>				
— Getti per l'industria meccanica	27,8	2,4	1,5	31,7
— Getti per l'industria motoristica	15,6	3,7	1,2	20,5
— Getti per l'edilizia	19,3	2,5	1,2	23,0
— Getti per la siderurgia	17,1	0,8	—	17,9
— Altri getti	6,4	0,1	0,4	6,9
Totale generale	86,2	9,5	4,3	100,0

Si è, infatti, visto come le ghise grigie, opportunamente scelte, possano essere utilizzate nei campi di applicazione ove interessa da un lato la resistenza al calore, al freddo, alla corrosione, all'usura ed all'abrasione, dall'altro la tenuta idraulica o lo smorzamento delle vibrazioni. Altre applicazioni sfruttano della ghisa: la facilità di colata dei getti con quote molto vicine a quelle finali, la buona lavorabilità, la compattezza e l'integrità, la rigidità e la durata, la stabilità strutturale e dimensionale, il bell'aspetto.

Si deve anche considerare che la Fonderia ha acquisito in questi anni una nuova fisionomia, con l'introduzione e l'applicazione di nuove tecnologie di produzione, che hanno consentito di realizzare i getti nelle migliori condizioni di accettabilità da parte del Committente, sia per quanto concerne la qualità delle ghise elaborate, sia per le conformazioni, le tolleranze dimensionali ed i sovrammetalli conferiti ai getti prodotti.

Oltre a migliorare il lato tecnico, la moderna Fonderia è riuscita, attraverso il costante aggiornamento tecnologico, a mantenere il carattere di economicità dei suoi prodotti, con evidenti benefici per i propri Committenti. A questo proposito va ricordato che oggi, con le moderne tecniche di formatura, si possono realizzare getti di ghisa con spessori inferiori rispetto al passato; ciò si traduce in una possibile riduzione del peso dei getti. In concomitanza a questo fatto, l'impiego di ghise, dotate di elevate caratteristiche meccaniche, ha compensato le riduzioni degli spessori, mantenendo integre le resistenze dei getti alle sollecitazioni cui sono sottoposti.

Tracciato così un breve quadro generale sull'importanza delle ghise grigie nel campo industriale, si possono esaminare alcune loro applicazioni tipiche, ma prima conviene esaminare alcuni dati. Si tenga presente che la capacità produttiva delle Fonderie italiane (ghise grigie, malleabili, sferoidali) è oggi valutata attorno ai 2 milioni di tonnellate di getti all'anno, di cui circa il 90% è rappresentato dalla ghisa grigia.

Un quadro sintetico della produzione di getti di ghisa è dato dalla tab. LXXXII, nella quale — per gli anni dal 1974 al 1977 — è riportata la produzione di getti articolata nei vari settori di produzione, suddivisa per ghisa grigia, ghisa sferoidale, ghisa malleabile.

Nella tab. LXXXIII, sulla base della tab. LXXXII, è riportata la composizione percentuale della produzione di getti di ghisa grigia. Si può rilevare da detta tabella che i getti di ghisa grigia per l'industria motoristica continuano ad assumere una importanza sempre più crescente, passando dal 13,5% nella composizione percentuale del 1974 al 18,1% del 1977.

Nella tab. LXXXIV, sempre sulla base della tab. LXXXII, è riportata la composizione percentuale della produzione totale di getti di ghisa. Si rileva da questa tabella che, nei 4 anni presi in esame, il totale della ghisa grigia ha delle lievi flessioni, ma non scende mai sotto l'85% del totale dei getti prodotti, il che non è poco.

La fig. 355 è il trasporto in sede grafica di quanto esposto nelle precedenti 3 tabelle.

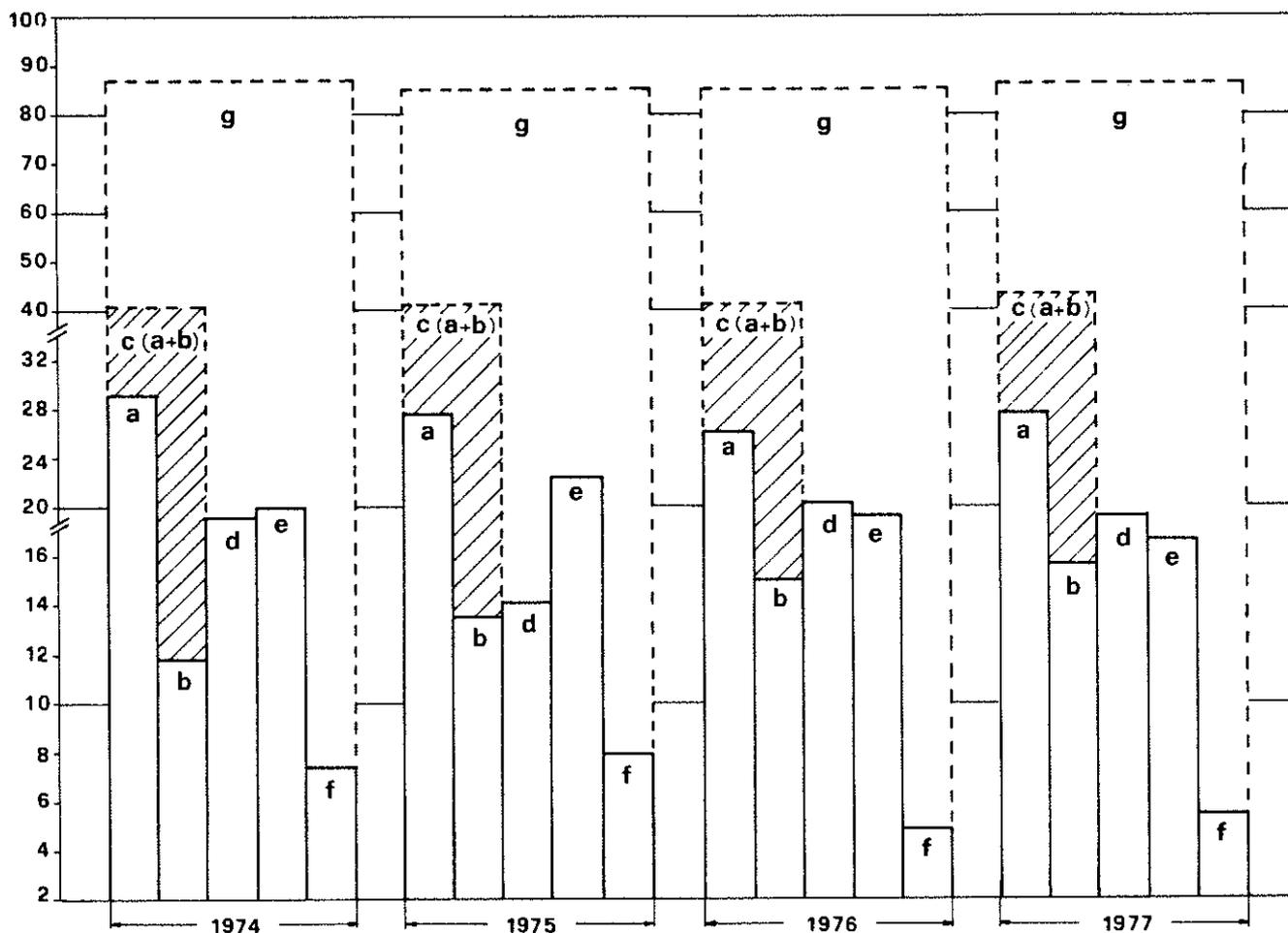


Fig. 355 - Composizione percentuale della produzione di getti di ghisa grigia per: a - industria meccanica; b - industria motoristica; d - edilizia; e - siderurgia; f - altri getti; g - totale.

## ESEMPI DI APPLICAZIONI DELLE GHISE GRIGIE

Per ciascuno dei 4 settori principali di utilizzazione si considerano brevemente le caratteristiche e le proprietà peculiari delle ghise grigie più adatte agli impieghi specifici e si citano alcuni esempi *tipici*.

### Getti per l'industria meccanica

Come risulta dai dati della tab. LXXXII l'industria meccanica è il settore che presenta la più alta percentuale di tonnellaggio di getti prodotti in Italia.

Questi getti sono destinati a diverse utilizzazioni, tra le quali le più importanti sono:

#### *Costruzione di macchine per la lavorazione dei metalli mediante asportazione di truciolo*

Appartengono a questo gruppo i torni, le fresatrici, le alesatrici, le piallatrici, le trapanatrici, le limatrici, le rettificatrici, le dentatrici, le stozzatrici, le molatrici, ecc.

In queste costruzioni i getti di ghisa grigia costituiscono mediamente oltre l'80% del peso complessivo della macchina e vi si presentano con una grande varietà di forme: basamenti, carri, bancali, tavole, montanti, colonne, traverse, scatole di comando, contropunte, volantini, ecc. La scelta del tipo di ghisa da impiegare per ognuno di questi elementi componenti di una data macchina, che va generalmente dalla G 15 alla G 35 UNI 5007, deve essere fatta anzitutto in base al criterio della sua rispondenza ottimale alle condizioni di impiego, pur considerando anche altri fattori tra i quali la lavorabilità ed il costo del getto.

Taluni di questi getti (per esempio i bancali ed i carrelli dei torni, i basamenti e le tavole delle piallatrici, i montanti ed i carri delle alesatrici, ecc.) sono assoggettati in esercizio, oltre che alle sollecitazioni meccaniche (essenzialmente di compressione e vibrazioni), anche ad attrito di scorrimento, il quale non sempre avviene nelle condizioni ideali di lubrificazione. È richiesta, pertanto, una ghisa di durezza compresa fra 200 e 240 Brinell, con grana compatta, con grafite fine e ben distribuita, esente da cementite. In considerazione delle sensibili differenze di spessore che in genere presentano questi getti (talvolta il rapporto fra lo spessore delle guide e quello delle pareti supera anche il valore 5 : 1), è indispensabile operare mediante una tecnologia avanzata, con impiego, nelle cariche al forno, di ghise ematite affinate a basso carbonio e di più elevate percentuali di rottami scelti di acciaio, con l'adozione di adatti inoculanti e di particolari tecniche di inoculazione; è anche abbastanza frequente l'aggiunta di elementi alliganti, da

soli od in opportuna combinazione fra loro, quali il nichel, il rame, il cromo, lo stagno, particolarmente quando per le guide è prevista la tempra ad induzione od al cannello (Ni 1 ÷ 1,5%, oppure Cu 1 ÷ 2%; oppure Ni + Cr o Cu + Cr in rapporto 3 : 1 o 4 : 1, per esempio 1,5% Ni + 0,5% Cr; Sn 0,05 ÷ 0,1%).

Al fine di evitare che nell'esercizio (o nel trattamento di tempra) si verifichino in questi getti deformazioni geometriche causate dalle tensioni interne conseguenti alle differenti velocità di raffreddamento nei loro diversi spessori, è buona norma sottoporli, dopo la sgrassatura, alla ricottura di distensione o di rilassamento (vedi UNI 3354-70 punto 2.2.2.3). Questo trattamento termico ha ormai soppiantato la pratica dell'invecchiamento naturale, per valide quanto ovvie ragioni tecniche ed economiche.

Come regola generale occorre tenere presente che, con l'aumentare della durezza e della resistenza a trazione, diminuisce la colabilità (e, conseguentemente, si deve aumentare la temperatura di colata), diminuisce la possibilità di ottenere una bella superficie del getto, diminuisce la facilità di lavorazione meccanica, aumenta il costo di produzione.

Nelle figg. 356 ÷ 367 sono citati alcuni esempi di getti destinati a queste macchine.

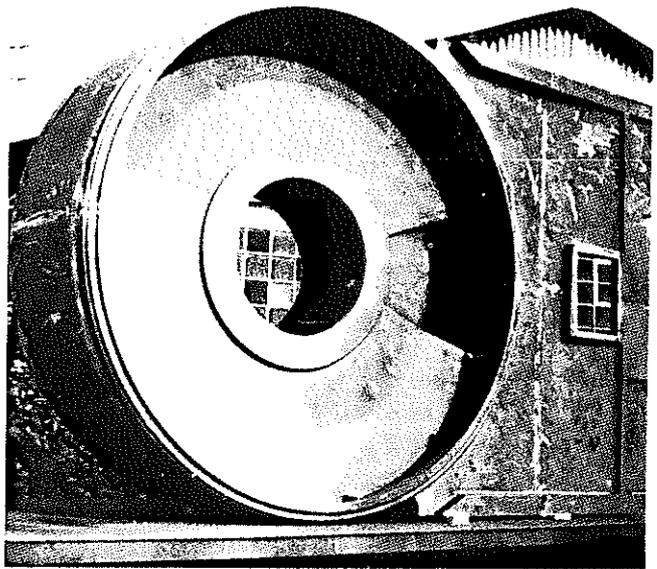


Fig. 356 - Basamento per tornio verticale. Ghisa G 30 UNI 5007. Peso 10.000 kg.



Fig. 357 - Basamento per tornio parallelo. Ghisa G 30 UNI 5007. Peso 7.000 kg.

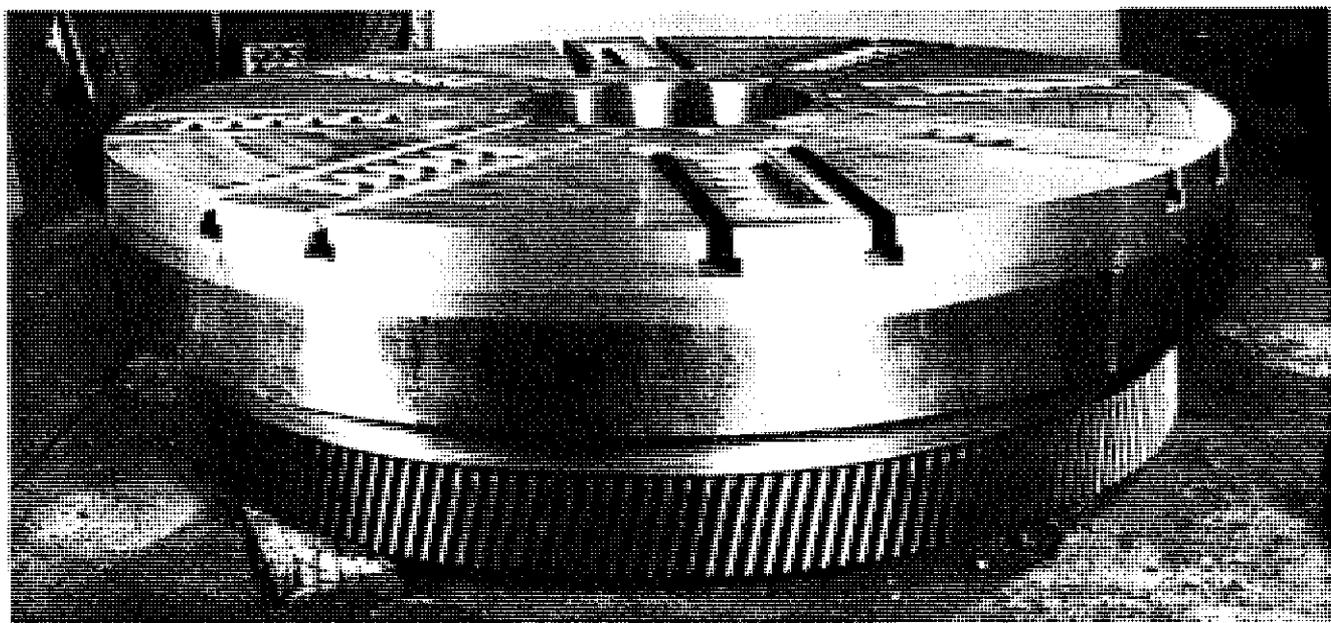


Fig. 358 - Tavola girevole per tornio. Ghisa G 30 UNI 5007. Peso 6.500 kg.

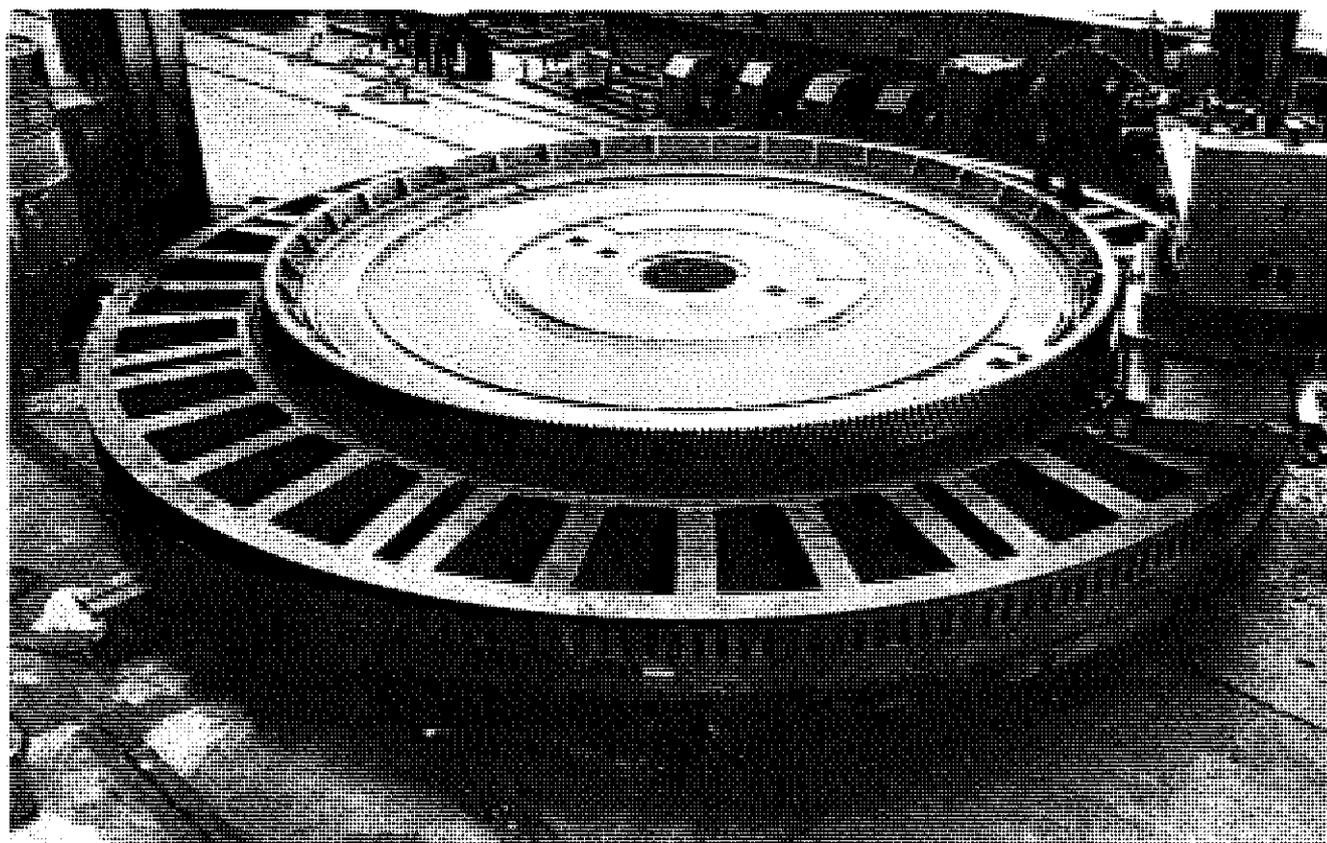


Fig. 359 - Piano girevole per tornio. Ghisa G 30 UNI 5007. Peso 12.000 kg.

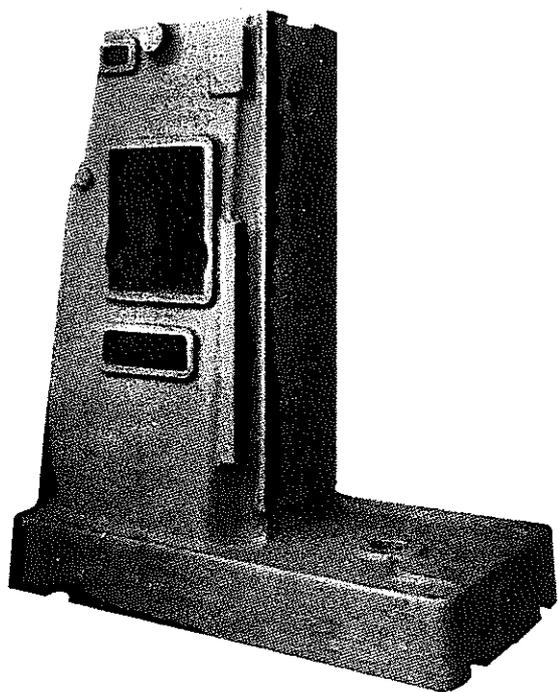


Fig. 360 - Montante per fresatrice. Ghisa G 25 UNI 5007. Peso 1.250 kg.

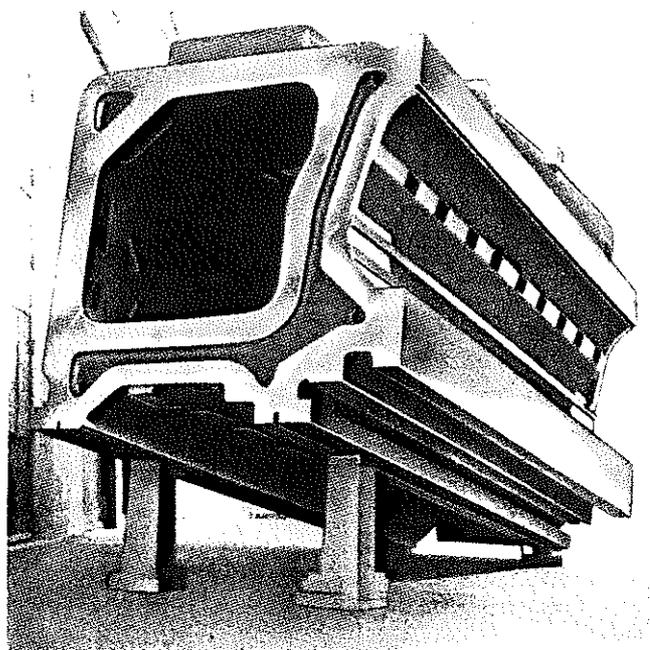


Fig. 362 - Montante per alesatrice. Ghisa G 30 UNI 5007. Peso 38.000 kg. Le superfici di scorrimento subiscono la tempra ad induzione.

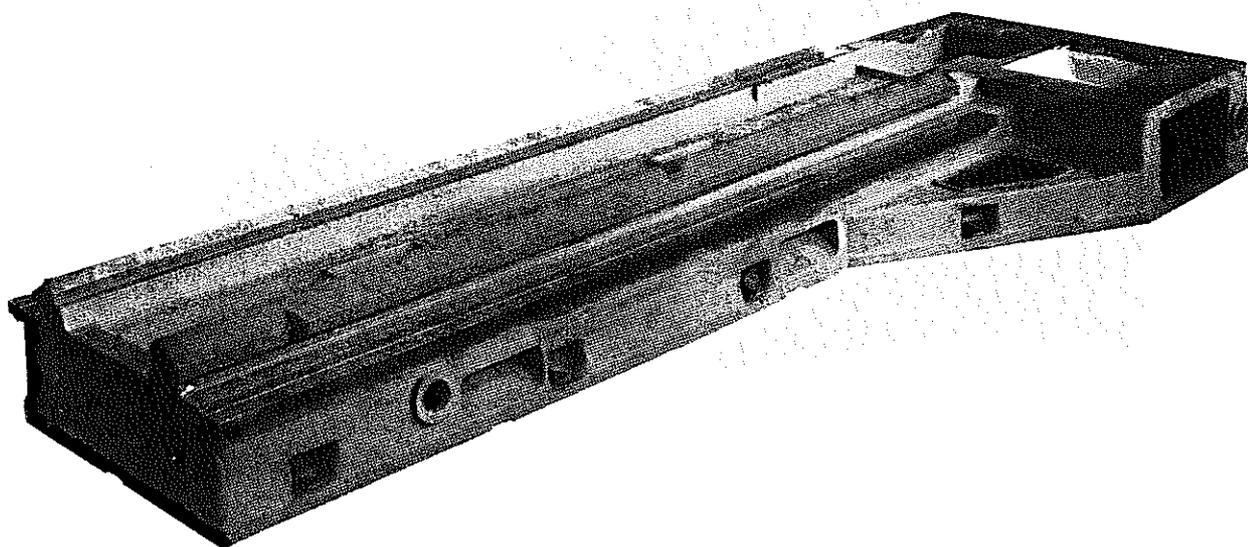


Fig. 361 - Bancale per alesatrice. Ghisa G 30 UNI 5007 tenuemente legata al Ni, Cr, Cu. Peso 3.650 kg. Le superfici di scorrimento subiscono la tempra ad induzione.

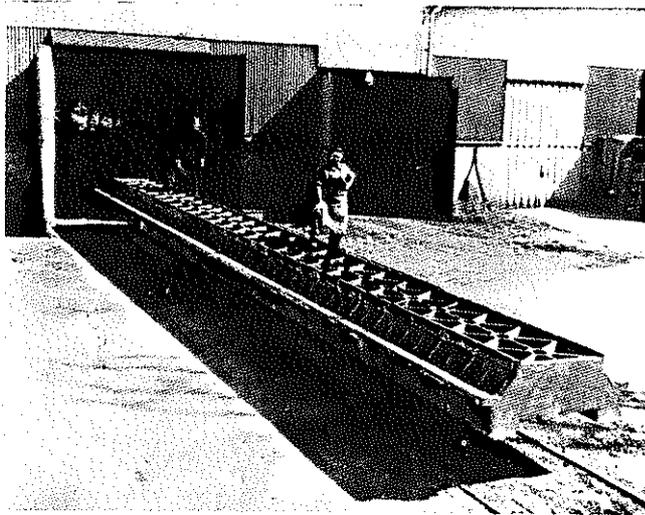


Fig. 363 - Bancale porta lunette e contro punta per rettificatrice. Ghisa G 35 UNI 5007 tenacemente legata al Cu, Cr. Peso 30.000 kg.

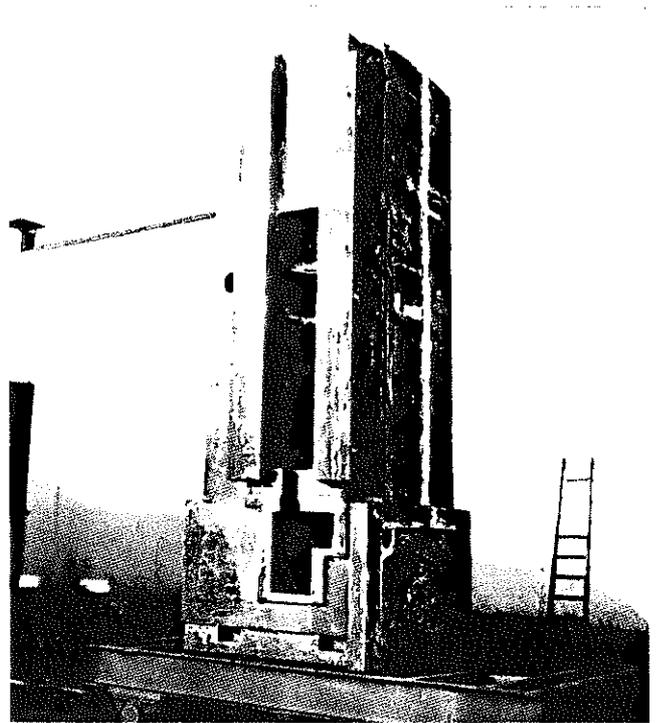


Fig. 364 - Montante per rettificatrice. Ghisa G 35 UNI 5007 tenacemente legata al Cu, Cr. Peso 7.900 kg. Le superfici di scorrimento subiscono la tempra ad induzione.

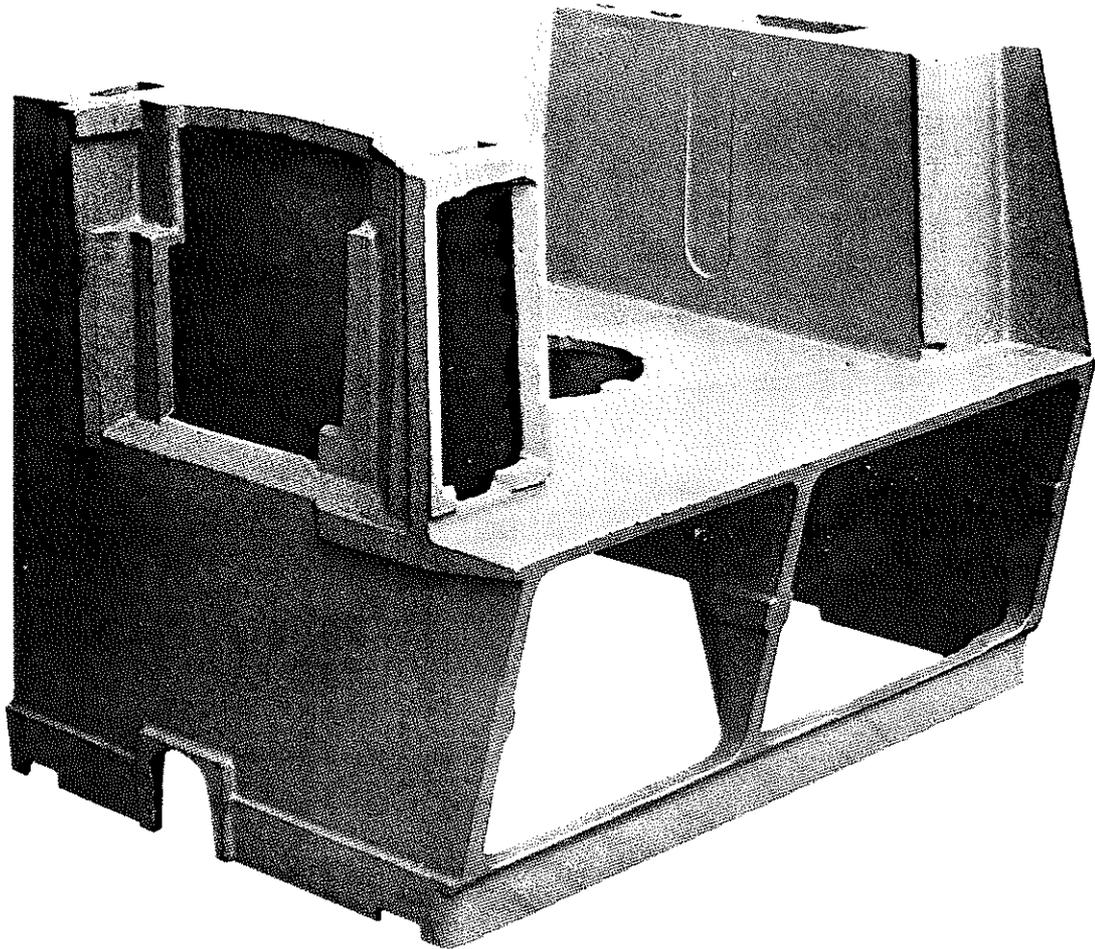


Fig. 368 - Basamento per pialla spessore. Ghisa G 25 UNI 5007. Peso 277 kg.

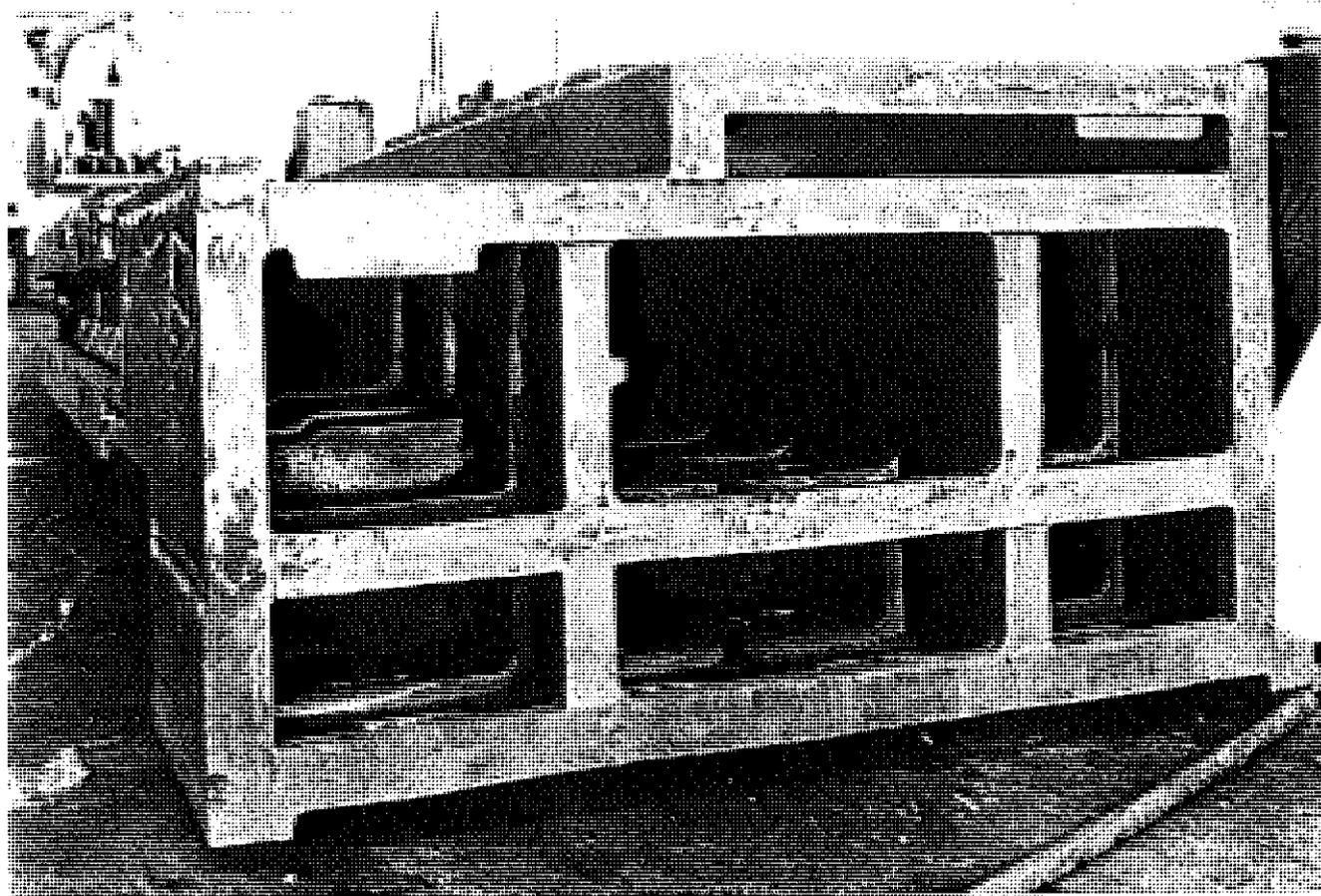


Fig. 366 - Montante destro di tornio verticale a due montanti TTE 2.500. Peso del getto grezzo 10.700 kg. Ghisa G 30 UNI 5007.

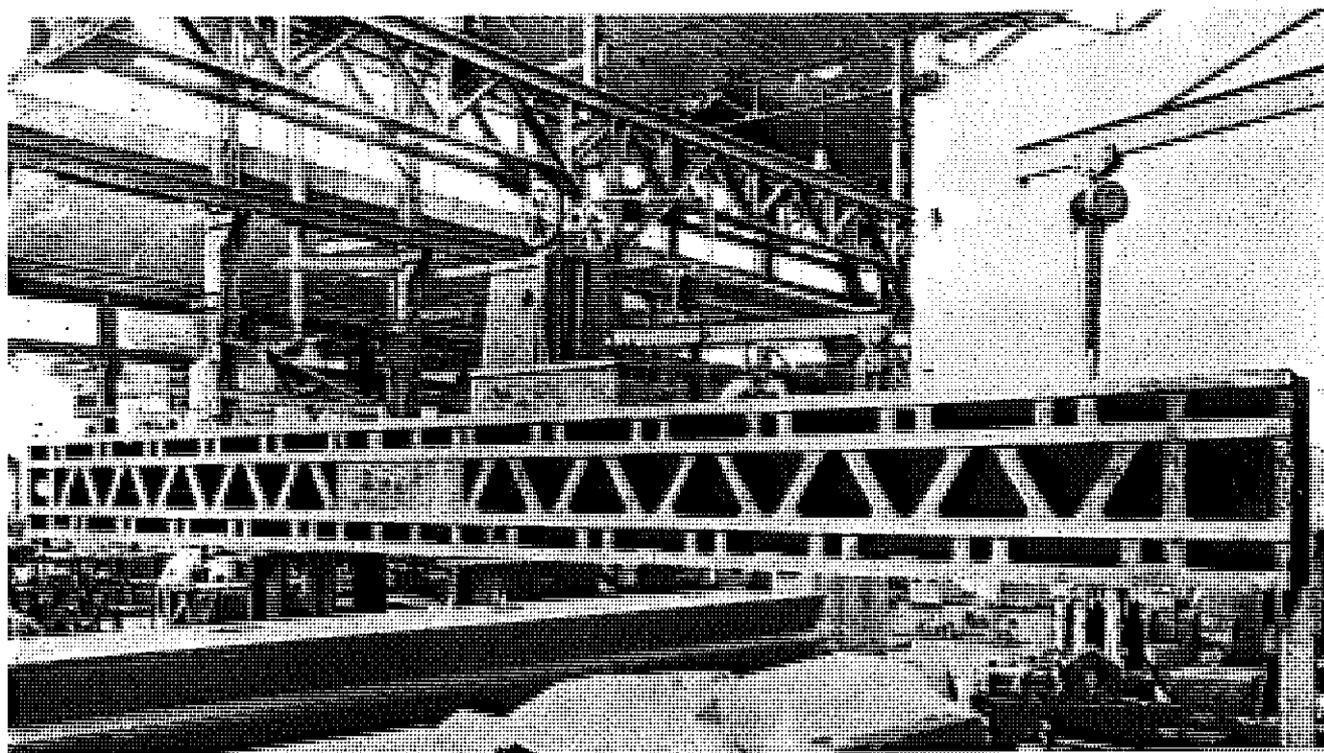


Fig. 367 - Bancale piattatrice ad un montante KR 150. Lunghezza del bancale 13,6 m. Peso del getto grezzo 15.390 kg. Ghisa G 30 UNI 5007. Freccia data 45 mm.

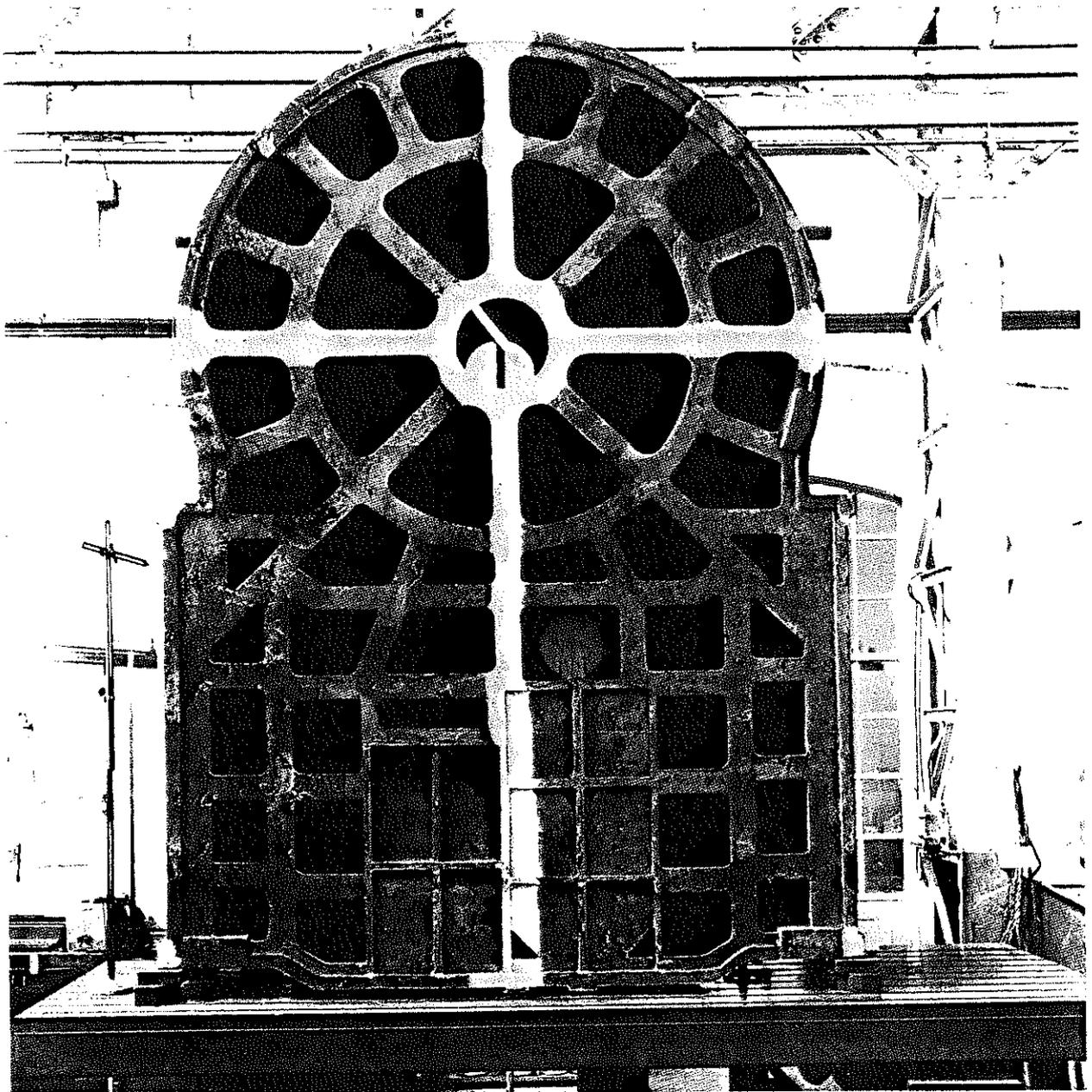


Fig. 365 - Basamento di tornio verticale a due montanti TTE 2.500. Peso del getto grezzo 10.300 kg. Ghisa G 30 UNI 5007.

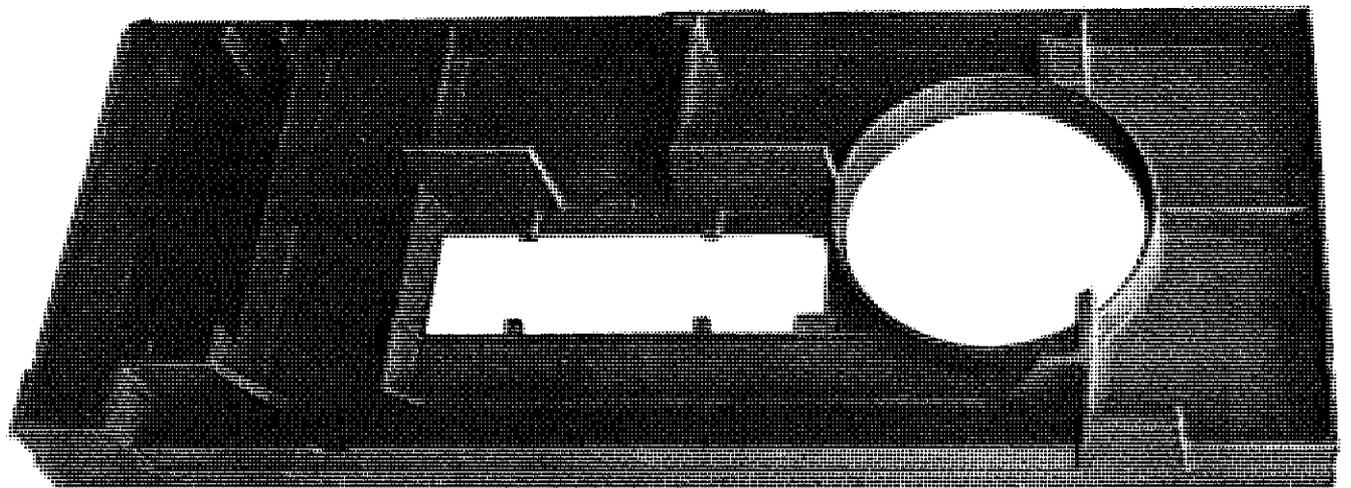


Fig. 369 - Piano fisso sega Toupic. Ghisa Gh 190 UNI 5330. Peso 130 kg.

### *Costruzione di macchine per la lavorazione dei metalli mediante deformazione plastica*

Fanno parte di questo gruppo i magli e le presse; i getti di ghisa grigia, che compongono queste macchine, superano talvolta anche il 90% del peso complessivo, come è nel caso dei magli.

In queste applicazioni, per alcuni componenti è richiesta ghisa grigia con elevata resistenza alla trazione, alla flessione ed all'urto; per altri con adeguata resistenza all'attrito di scorrimento, per altri ancora con buone caratteristiche di tenuta alla pressione idraulica o pneumatica.

È da considerare che ogni componente di queste macchine presenta, nelle sue diverse sezioni, spessori abbastanza uniformi.

### *Costruzione di macchine per la lavorazione del legno*

In questo gruppo rientrano le segatrici a nastro, le segatrici a disco, le piallatrici a filo ed a spessore, le macchine per lavorazioni multiple; inoltre, le sfogliatrici e le presse per la fabbricazione dei compensati. Nelle classiche macchine per la lavorazione del legno (segatrici, ecc.), i getti di ghisa grigia dominano tuttora incontrastati e ne costituiscono mediamente oltre l'85% del peso complessivo di ciascuna di esse. Le qualità di ghise più correntemente impiegate sono la G 15, la G 20 e la G 25 UNI 5007.

Invece, per le sfogliatrici e le presse per la fabbricazione dei compensati si è verificata in questo ultimo decennio, da parte dei costruttori, la spiccata tendenza a sostituire gran parte dei getti di ghisa grigia (basamenti, spalle, traverse, portalama, ecc.) con elementi elettrosaldati.

Nelle figg. 368 ÷ 371 sono riportati alcuni getti per queste macchine.

### *Costruzioni elettromeccaniche ed idroelettriche*

Sono di questo gruppo le resistenze elettriche, i motori elettrici, le dinamo, gli alternatori, le turbine idrauliche.

Per quanto attiene in modo specifico alle resistenze elettriche, sono generalmente richieste particolari caratteristiche di resistività elettrica, per cui si deve ricorrere all'impiego di ghise legate all'alluminio, con tenori sino al 4%.

Per i motori elettrici, particolarmente per quelli di minore dimensione e prodotti in grande serie, sia per le carcasse che per i coperchi si richiedono getti di ghisa che presentino essenzialmente una elevata lavorabilità, senza particolari precisazioni riguardo alle caratteristiche di resistenza meccanica.

Per i motori, le dinamo e gli alternatori di dimensioni maggiori sono impiegate ghise grigie del tipo G 20 e G 25 UNI 5007, secondo lo spessore di parete dei getti.

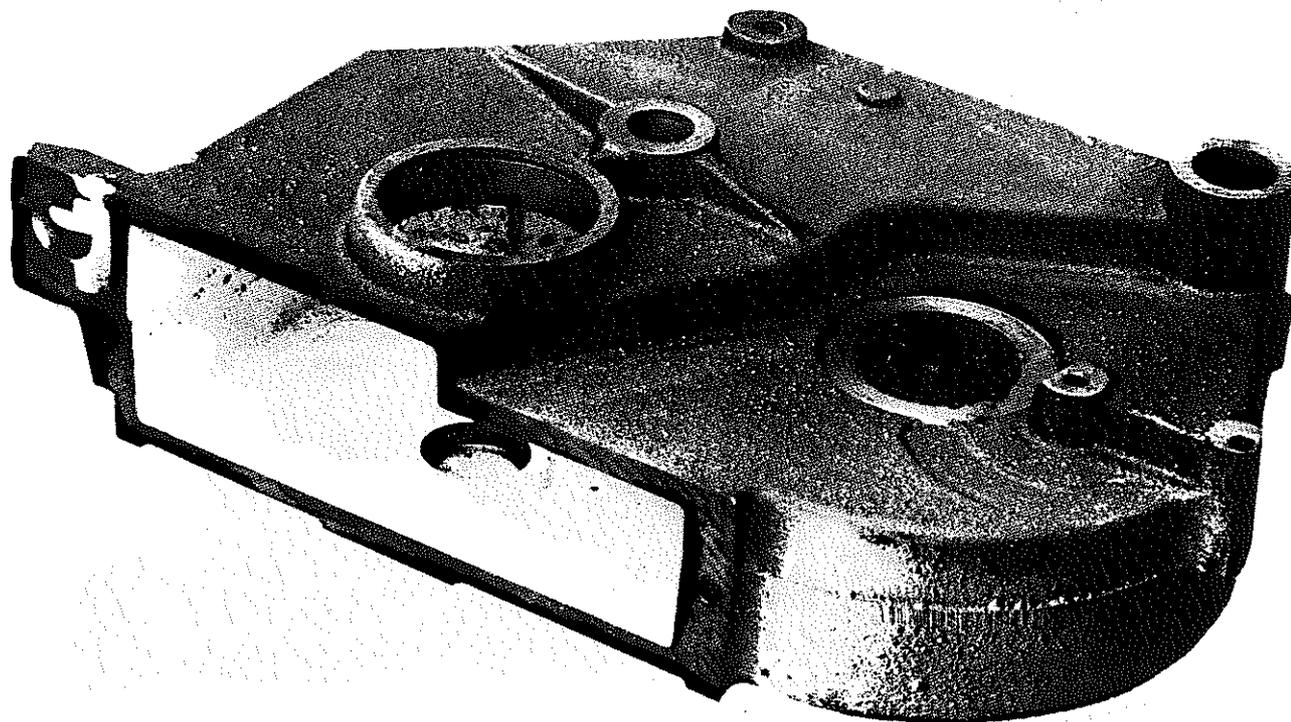


Fig. 371 - Scatola riduttore. Ghisa G 20 UNI 5007. Peso 7,3 kg.

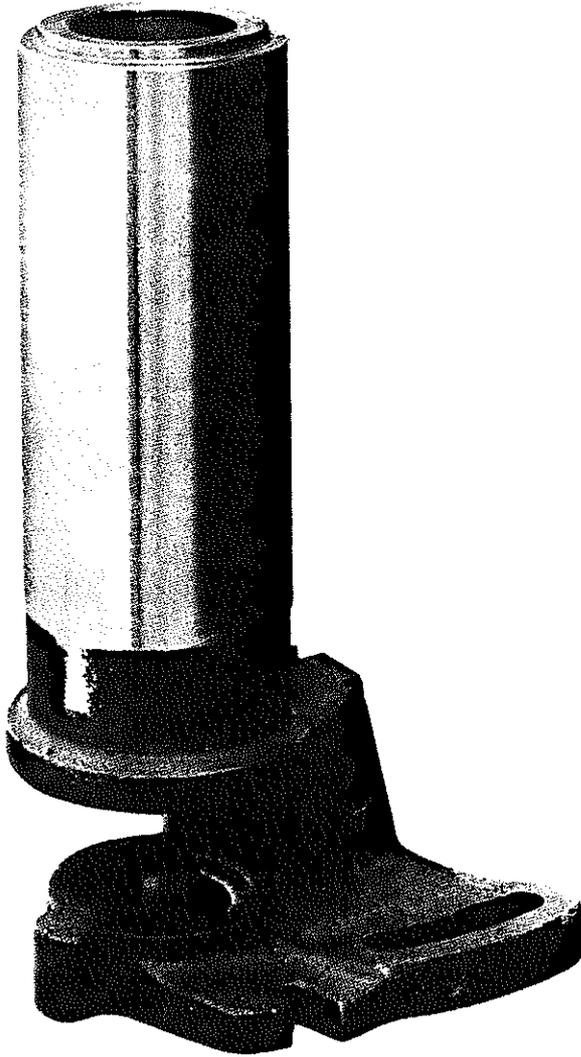


Fig. 370 - Colonna sega Toupie. Ghisa G 25 UNI 5007. Peso 11,8 kg.

Per le turbine idrauliche, ove oltre alla resistenza alla trazione interessa anche la buona tenuta idraulica, si impiegano generalmente getti di ghisa G 25 e G 30 UNI 5007.

Nelle figg. 372 e 373 sono citati alcuni esempi di getti destinati a queste macchine.

#### *Costruzioni per la fluidodinamica*

Fanno parte di questo gruppo le pompe per acqua ed altri liquidi, i motori ed i distributori idro ed oleodinamici, i compressori d'aria e di altri gas, le pompe per vuoto pneumatico, i cilindri ed altri getti a tenuta per macchine e turbine a vapore, valvolame, tubi per ricuperatori di calore.

È evidente che, in misura più o meno grande, in funzione della pressione di esercizio, le caratteristiche, che essenzialmente interessano per i getti di ghisa grigia da impiegare in queste costruzioni, sono la resistenza a trazione e la tenuta alla pressione del fluido impiegato.

Poiché generalmente gli spessori di parete di questi getti sono relativamente contenuti ed abbastanza uniformi, di norma è sufficiente impiegare ghise del tipo G 20 e G 25 UNI 5007 con un tenore di fosforo inferiore a 0,20%, al fine di evitare la presenza di eutettico fosforoso nella struttura (steadite) che apporta porosità. Nelle produzioni di grande serie, come in certi casi di pompe, ed in quello dei compressori per frigoriferi, si deve tenere presente anche la necessità di una ottima lavorabilità. Si ricorre invece a ghise G 30 e G 35 UNI 5007, opportunamente legate al nichel, rame, cromo. stagno ( $1 \div 3\% \text{ Ni}$ ;  $1 \div 2\% \text{ Cu}$ ;  $\text{Cr } 1/3 \div 1/4 \text{ del Ni}$  o del  $\text{Cu}$ ;  $\text{Sn } 0,05 \div 0,1\%$ ), quando le condizioni di esercizio comportano sollecitazioni meccaniche elevate ed alte pressioni del fluido.

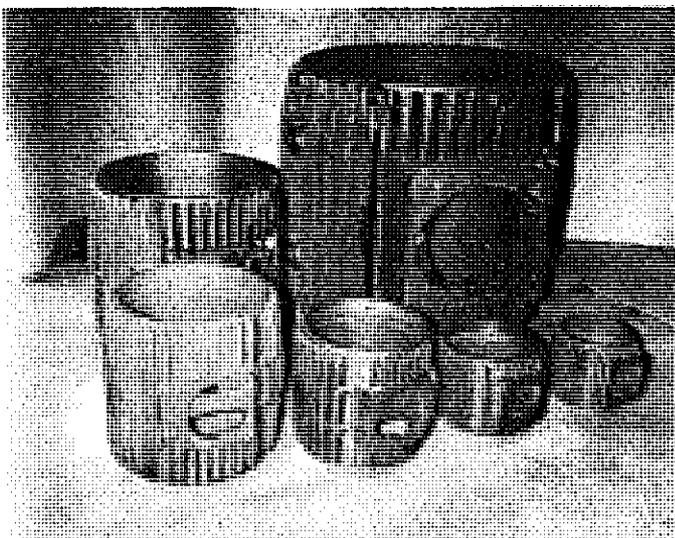


Fig. 372 - Carcasse per motori elettrici. Ghisa G 15 - G 20 UNI 5007.

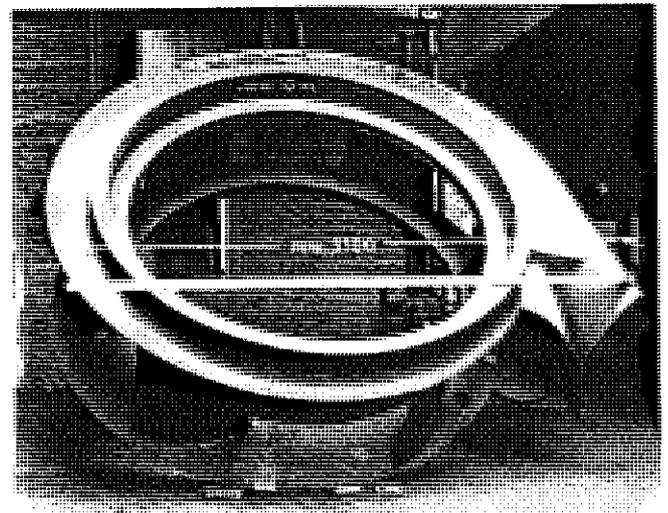


Fig. 373 - Corpo diffusore per turbina idraulica. Ghisa G 25 UNI 5007. Peso 5.225 kg.

Per i distributori oleodinamici, generalmente impiegati a pressioni di esercizio dell'ordine di  $20 \div 25$  MPa (circa  $200 \div 250$  atm), il problema della tenuta si presenta, invece, di più difficile soluzione; infatti, si tratta normalmente di getti di una certa massività (spessori di 100 mm e più) nei quali sono praticate, mediante lavorazione meccanica, canalizzazioni per il passaggio del fluido che si incrociano, senza attraversarsi, a distanza di pochi millimetri. Inoltre è necessario che le superfici dei fori di scorrimento dei pistoni di distribuzione assumano, dopo la lappatura, un aspetto speculare e presentino una elevata resistenza all'usura affinché ne sia assicurata una lunga durata in esercizio.

È opportuno, perciò, ricorrere all'impiego di ghise grigie con tenore di carbonio relativamente basso (circa 3%) e con basso CE (3,7 massimo per spessore 100 mm), legate con tenori bilanciati di nichel (o rame) + cromo ed eventualmente molibdeno (Ni 1,5  $\div$  2,5% oppure Cu 2  $\div$  2,5% + Cr 0,5  $\div$  0,8% + Mo 0,2  $\div$  0,3%).

Con tale composizione, accompagnata da una inoculazione adeguata, è assicurata una matrice perlitico-sorbitica molto fine nella quale si trova dispersa uniformemente la grafite in lamelle di dimensioni piccolissime.

Per i getti destinati alla costruzione di turbine a vapore ed a gas, la scelta delle ghise deve essere fatta tenendo conto anche delle sollecitazioni termiche cui sono sottoposti in esercizio, nonché della natura più o meno corrosiva del gas. Ove non si riscontrino condizioni di corrosione importante, sono da considerarsi adatte le ghise grigie normali (G 25 o G 30) e quelle tenuemente legate con Ni o Cu + Cr.

Le stesse considerazioni si possono estendere ai getti destinati alla costruzione del valvolame, purché l'impiego della ghisa grigia sia consentito dagli Enti preposti al controllo dei getti sottoposti a pressione di gas e di vapore.

Per i tubi alettati destinati alle batterie di recupero del calore sensibile dei fumi negli impianti termici, si impiegano di norma ghise del tipo G 20 UNI 5007. Difatti, per il continuo scambio termico che si determina tra i fumi in uscita, che ne lambiscono la superficie cilindrica esterna munita di alette, e l'acqua che vi circola internamente, in esercizio non raggiungono temperature tali da costituire una preoccupazione.

Nelle figg. 374  $\div$  385 sono citati alcuni esempi di getti destinati a queste macchine.

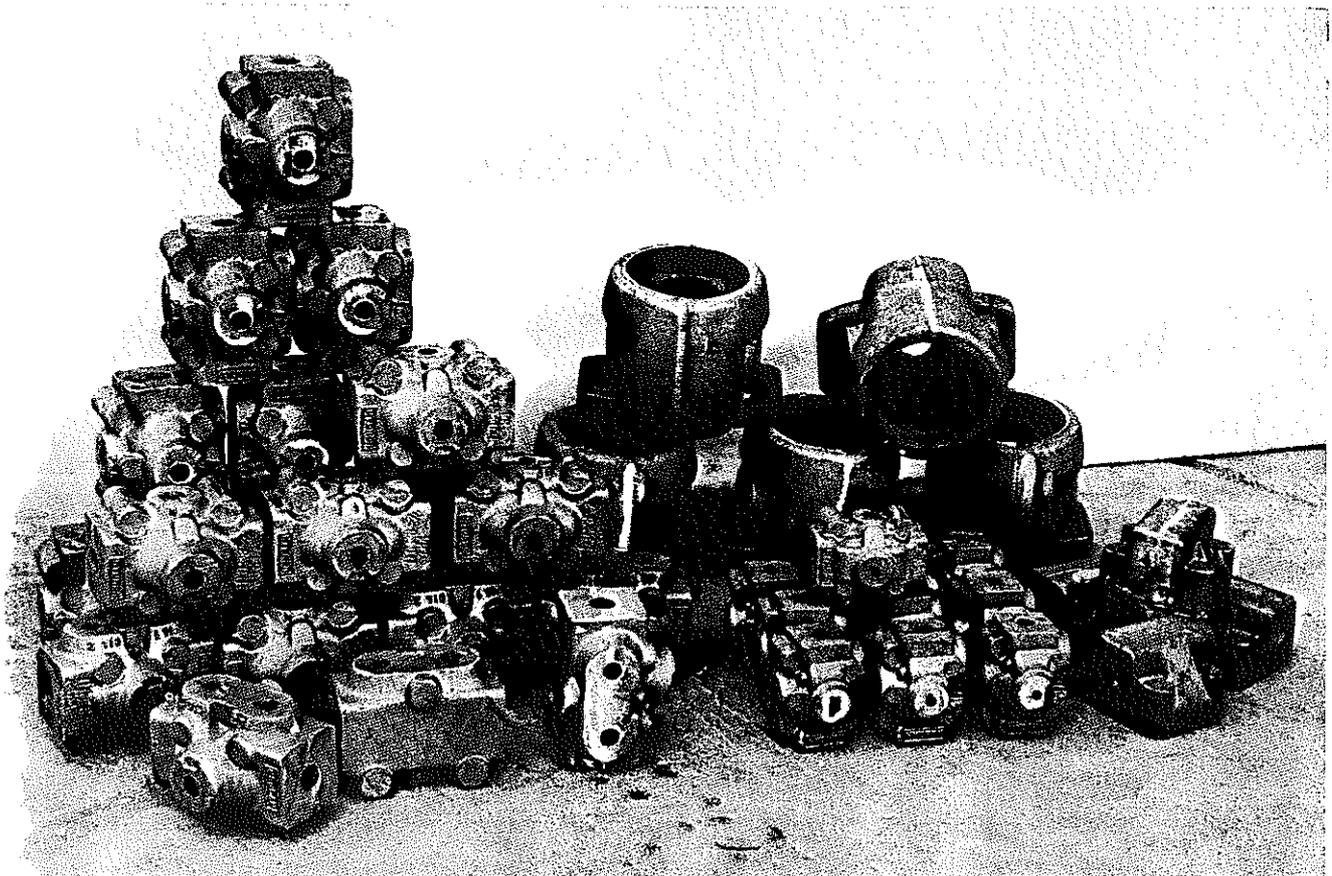


Fig. 374 - Corpi distributori e corpi di pompa per comandi oleodinamici. Ghisa G 35 UNI 5007 tenuemente legata al Ni, Cr, Mo.

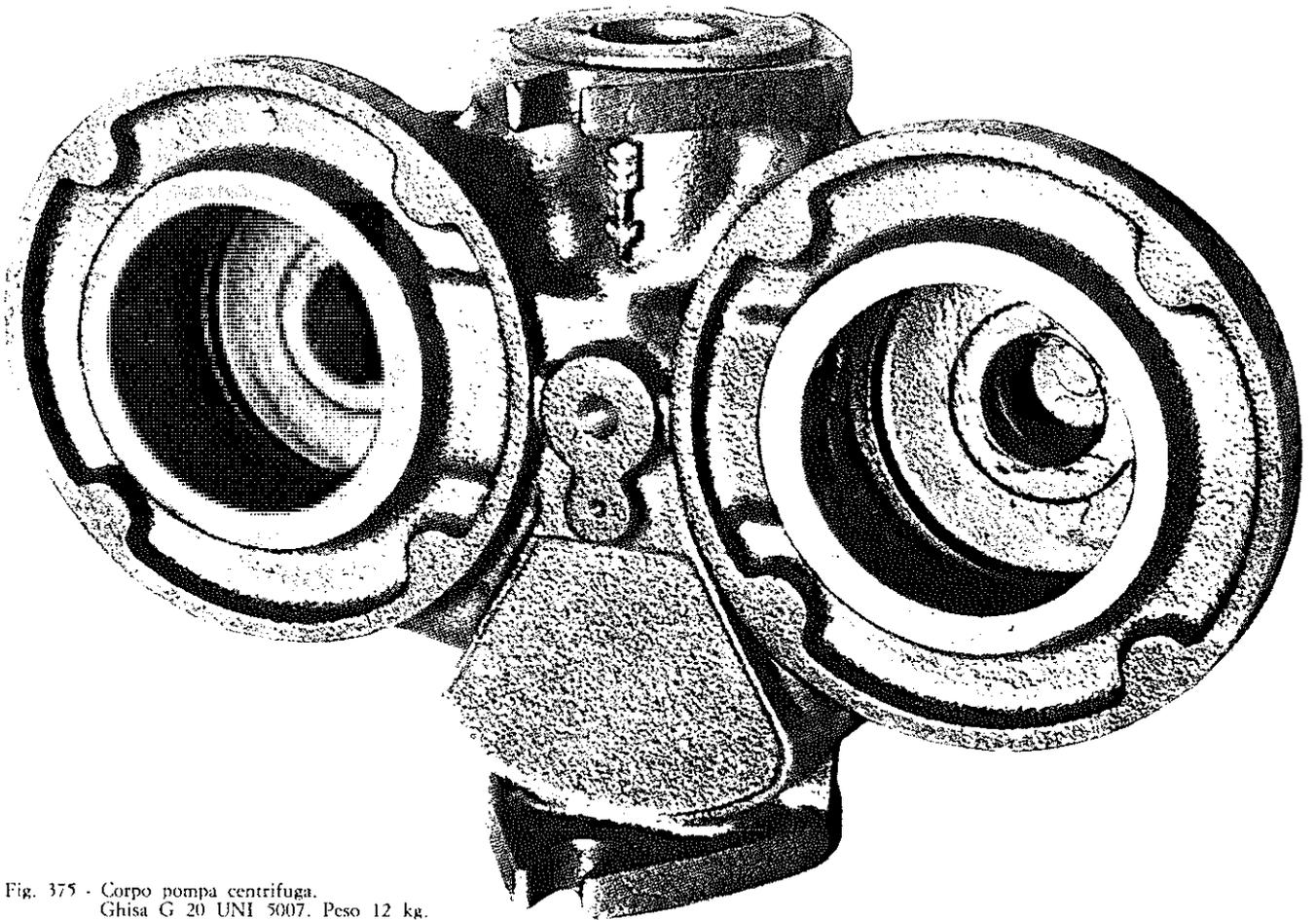


Fig. 375 - Corpo pompa centrifuga.  
Ghisa G 20 UNI 5007. Peso 12 kg.

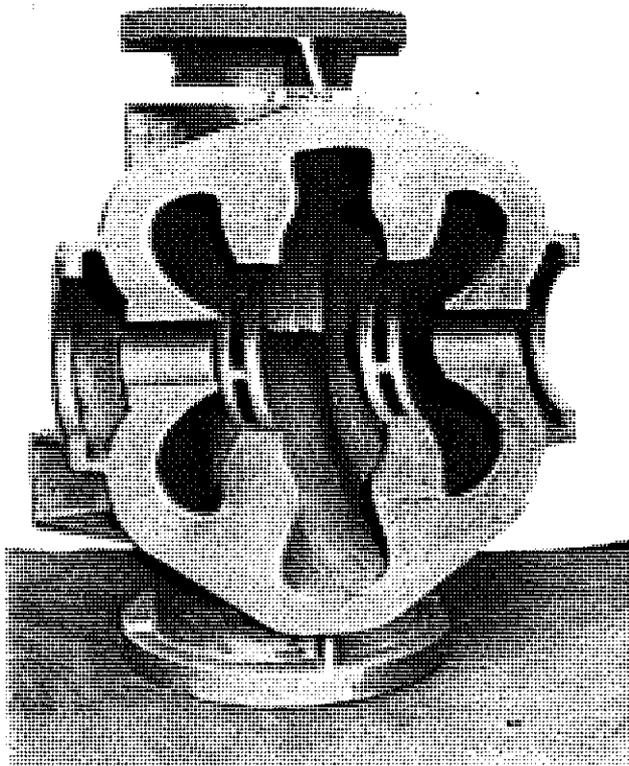


Fig. 376 - Mezza cassa per pompa idraulica. Ghisa G 25 UNI 5007.  
Peso 1.704 kg.

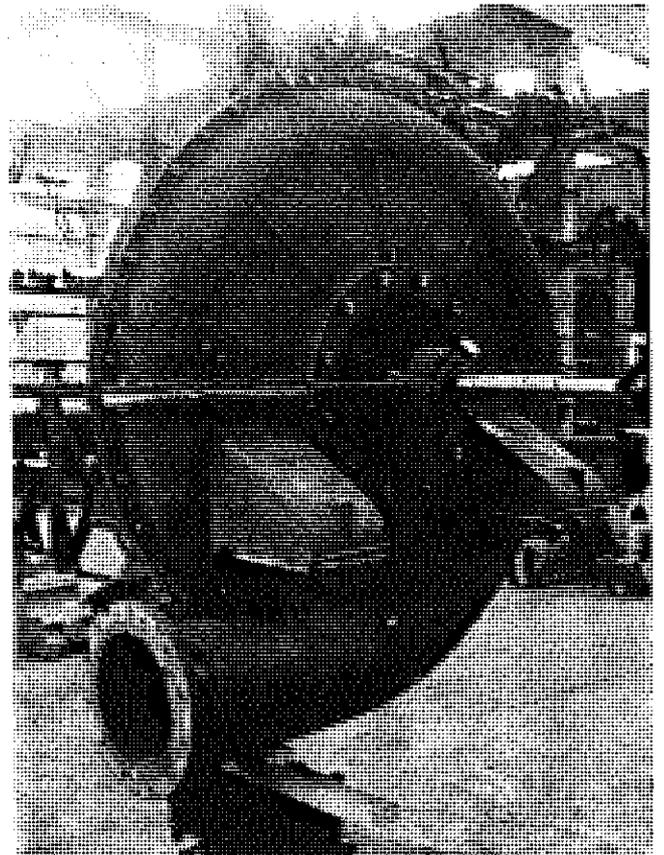


Fig. 377 - Corpo per pompa idraulica in due parti accoppiate. Ghisa G 25 UNI 5007. Peso 3.500 kg. cad. parte.

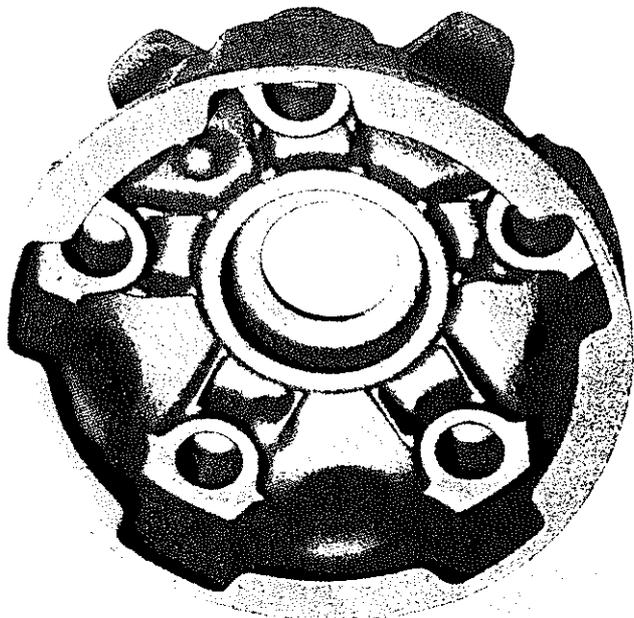


Fig. 378 - Corpo per motore idraulico. Ghisa G 25 UNI 5007. Peso 7 kg.

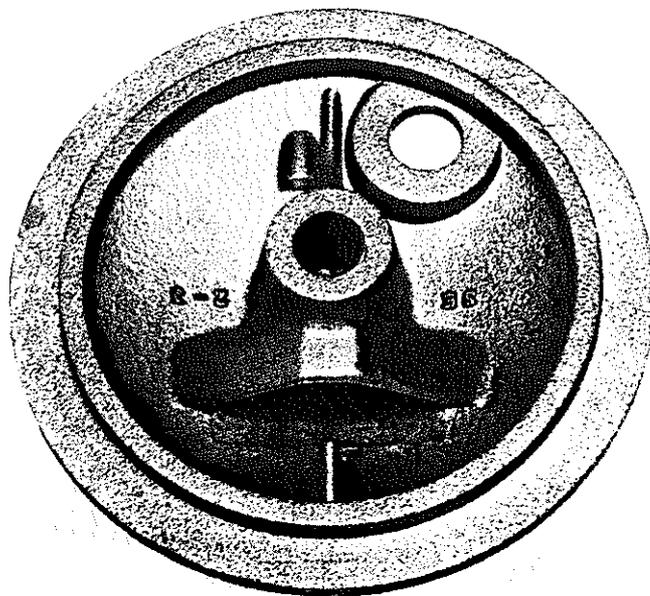


Fig. 381 - Coperchio per compressore frigorifero. Ghisa G 25 UNI 5007. Peso 3,5 kg.

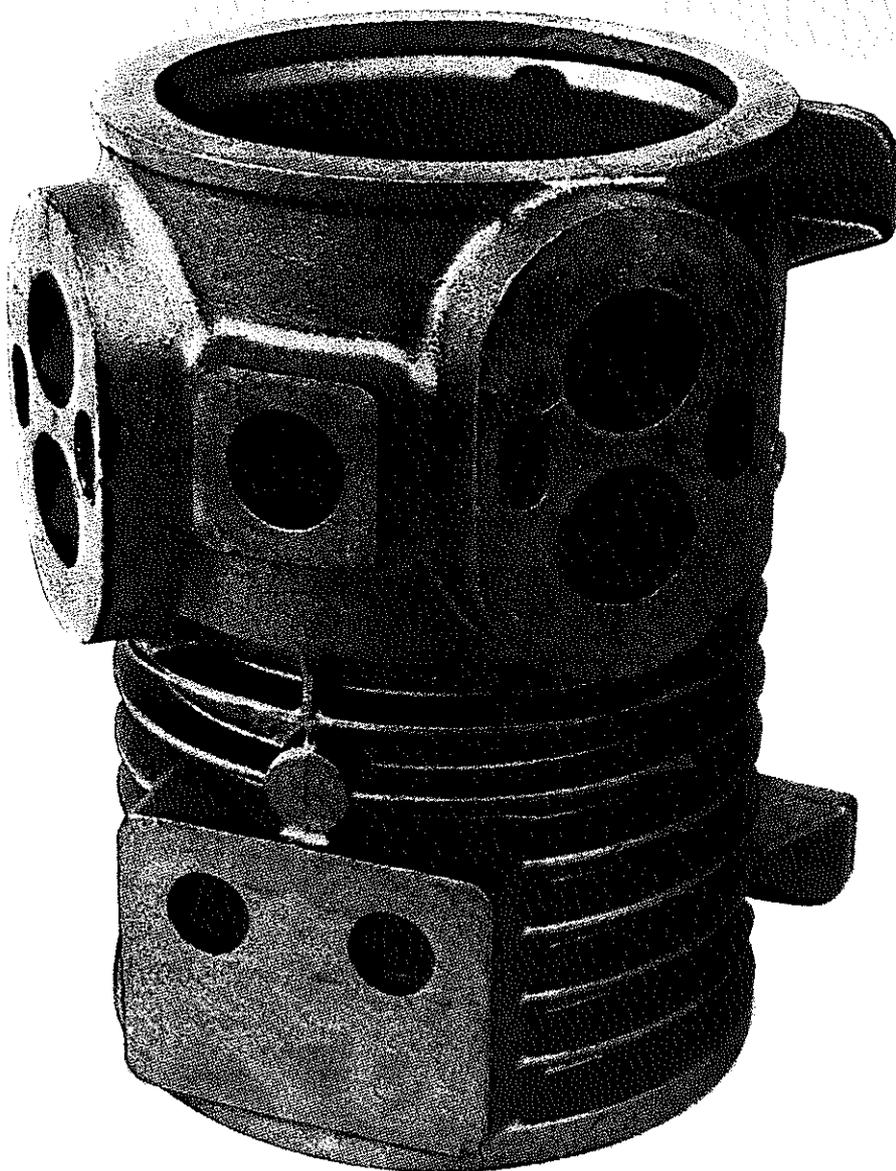


Fig. 380 - Carter per compressore frigorifero. Ghisa G 25 UNI 5007. Peso 45 kg.



Fig. 379 - Supporto motore per compressore frigorifero ermetico. Ghisa G 20 UNI 5007. Peso 5 kg.

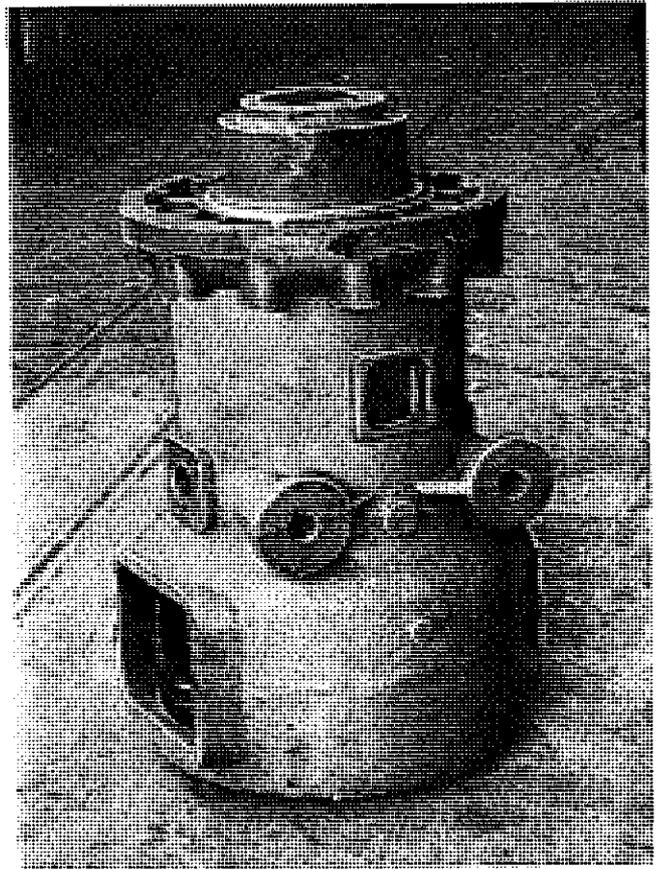


Fig. 383 - Cilindro per compressore di gas. Ghisa G 30 UNI 5007 tenacemente legata al Ni, Cr. Peso 723 kg.

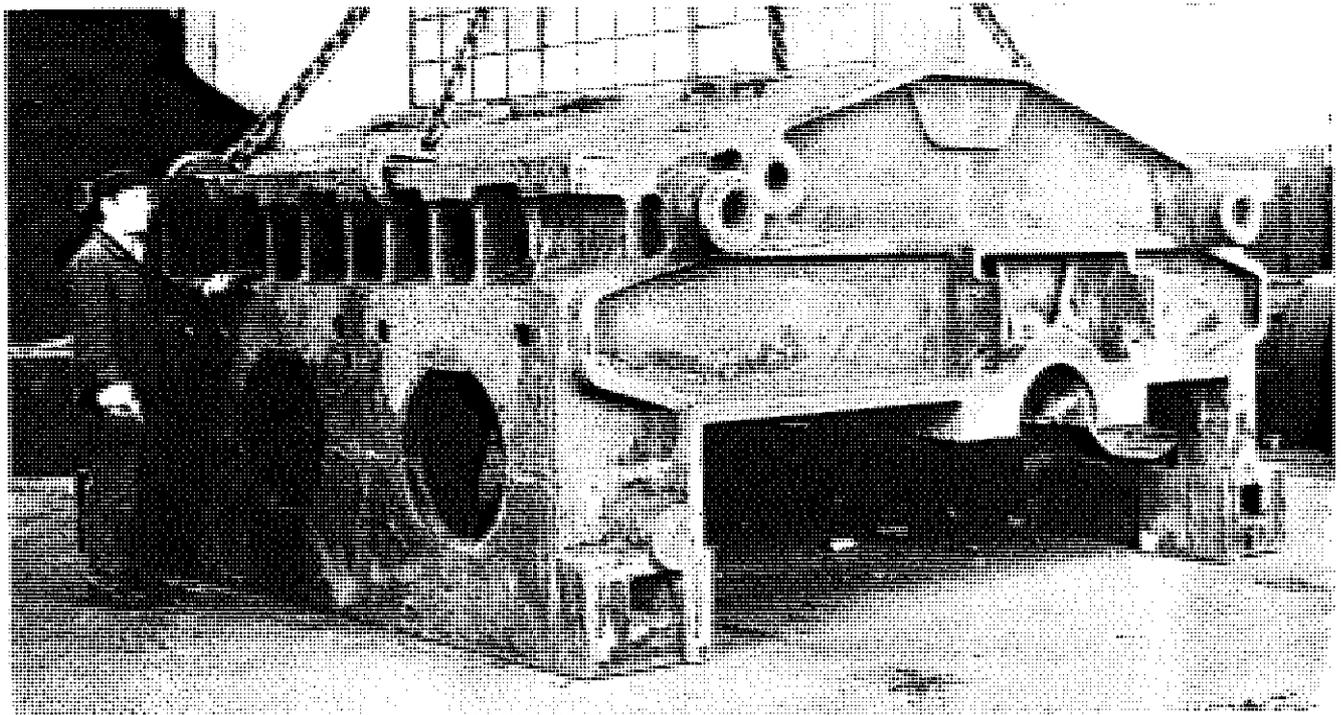


Fig. 385 - Incastellatura per compressore per la produzione di polietilene. Ghisa G 30 UNI 5007. Peso 35.000 kg.

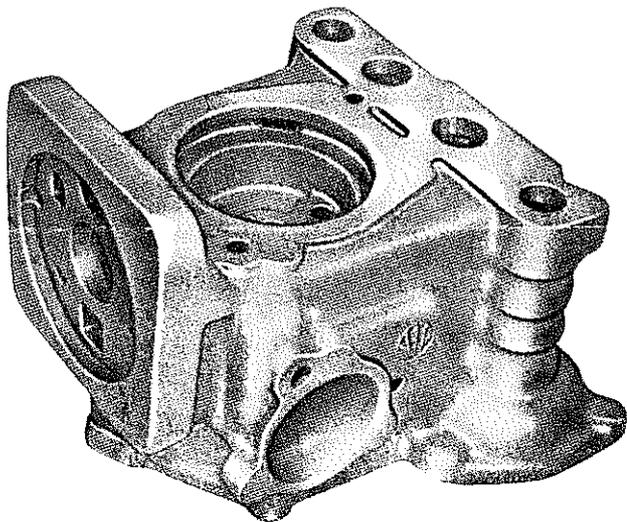


Fig. 382 - Distributore aria per FF.SS. Ghisa G 25 UNI 5007. Peso 18 kg.

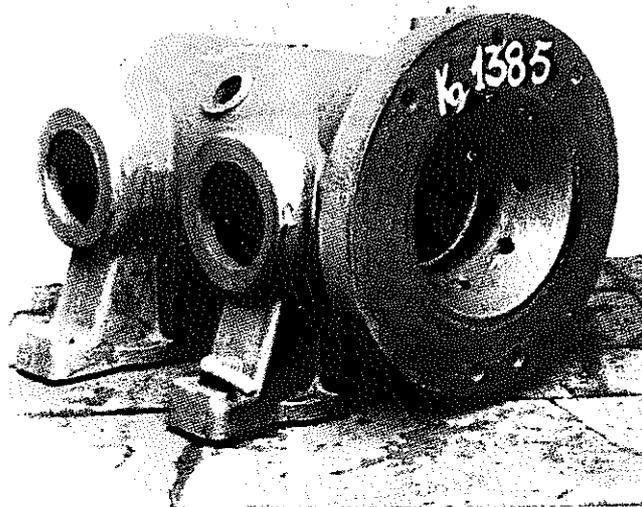


Fig. 384 - Corpo compressore d'aria. Ghisa G 25 UNI 5007. Peso 1.385 kg.

#### *Costruzioni per la meccanica varia*

Si possono considerare appartenenti a questo gruppo le macchine agricole, le macchine per filatura e tessitura, le macchine per l'industria della carta e per quella tipografica, le macchine per l'industria del cuoio, i macchinari di fonderia, il macchinario per l'industria molitoria del cemento, le macchine e gli elementi per la trasmissione del moto, ecc.

Anche in queste costruzioni i getti di ghisa grigia trovano larghissimo impiego con la loro varietà di proprietà

tecnologiche, le quali vanno dalla facile colabilità, per i getti sottili e complicati, quali quelli per le macchine agricole, alle elevate caratteristiche meccaniche, alla capacità di tenuta d'olio, alla buona lavorabilità ed ottima lucidabilità, alla versatilità per i trattamenti di tempra superficiale, alla stabilità geometrica dopo un appropriato trattamento termico distensionale.

Le figg. 386 ÷ 396 mostrano alcuni tipi di getti per la meccanica varia.

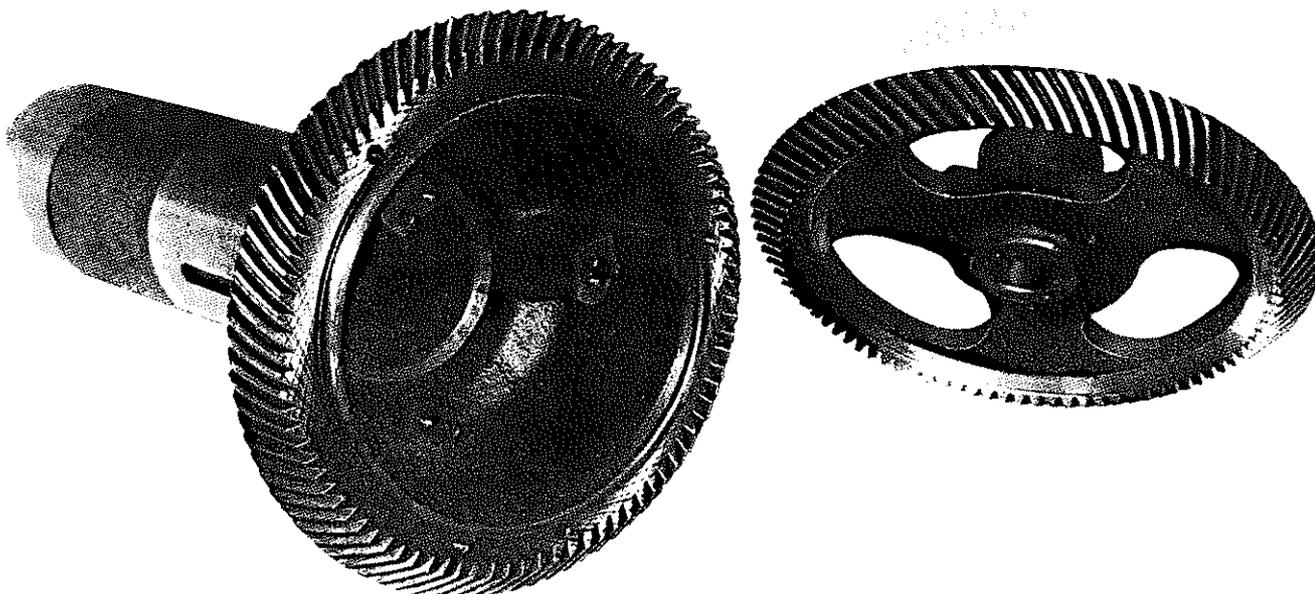


Fig. 386 - Coppia conica di trasmissione. Macchina per maglieria. Ghisa G 25 UNI 5007. Peso 18 e 5 kg.

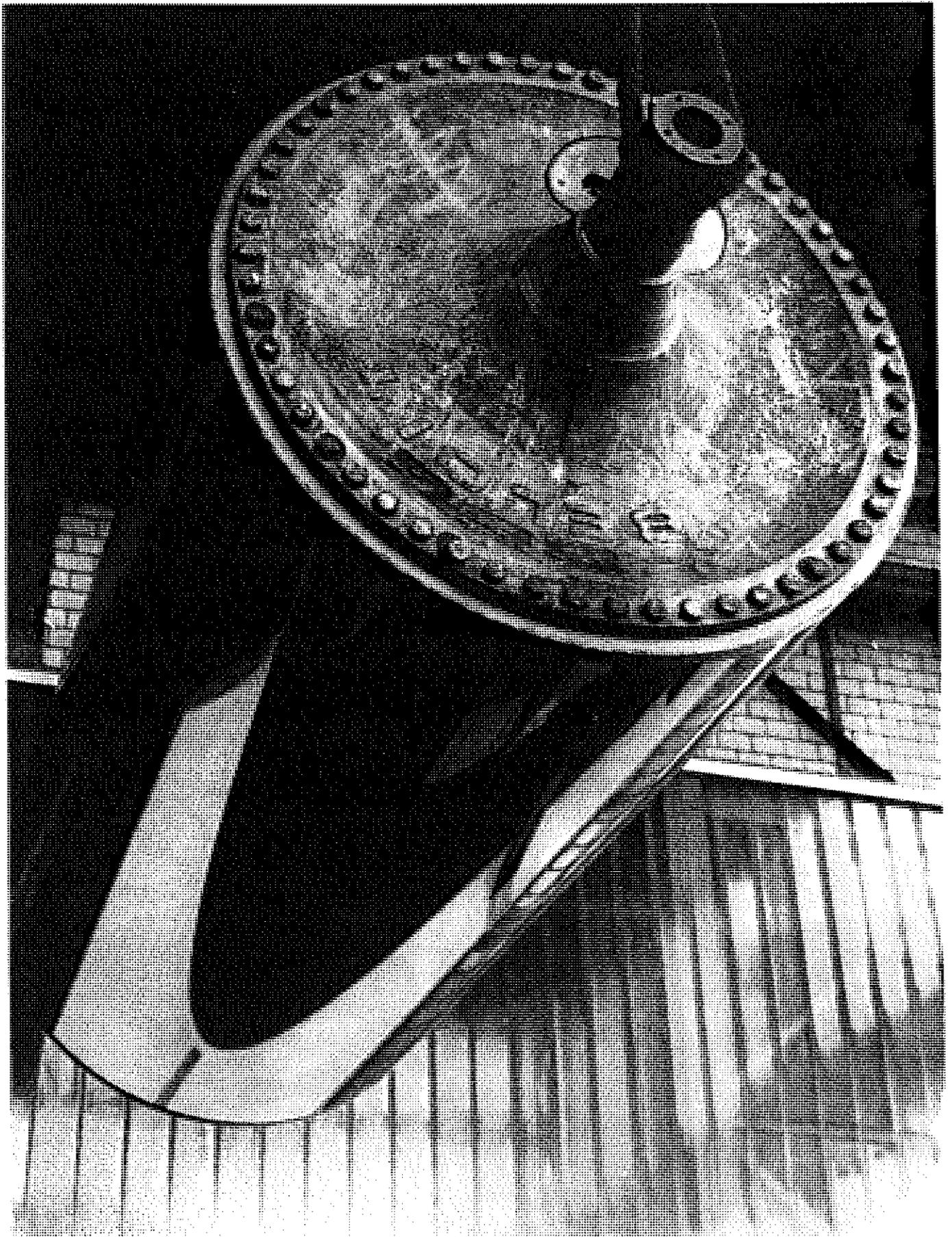


Fig. 387 - Cilindro essiccatore per l'industria cartaria. Ghisa G 30 UNI 5007 tenuemente legata al Ni, Cu, Mo. Peso 13.000 kg.

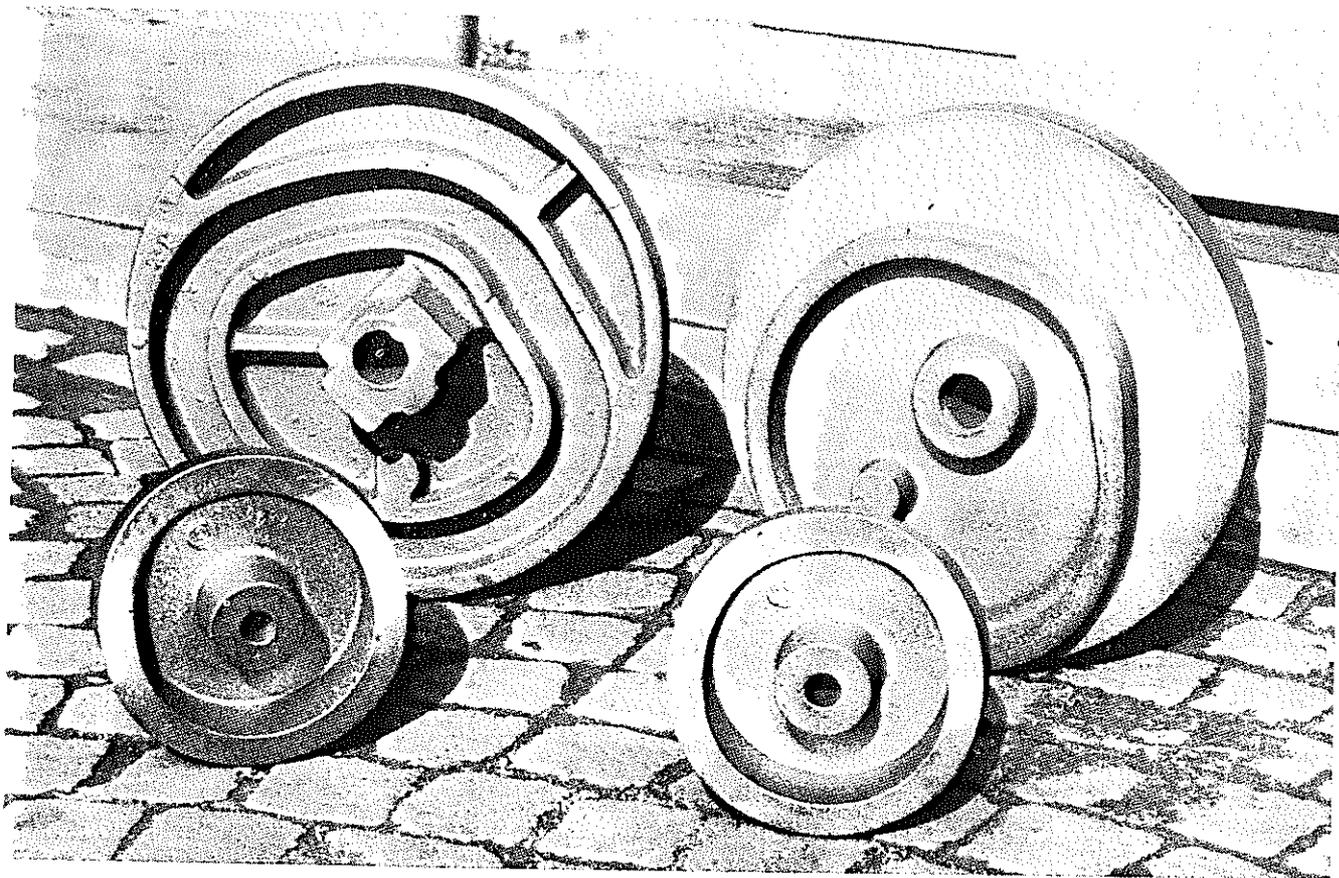


Fig. 388 - Camme doppia e semplice per macchine impacchettatrici. Ghisa G 30 UNI 5007 tenuemente legata al Ni. Mo. Peso 10-40 kg.

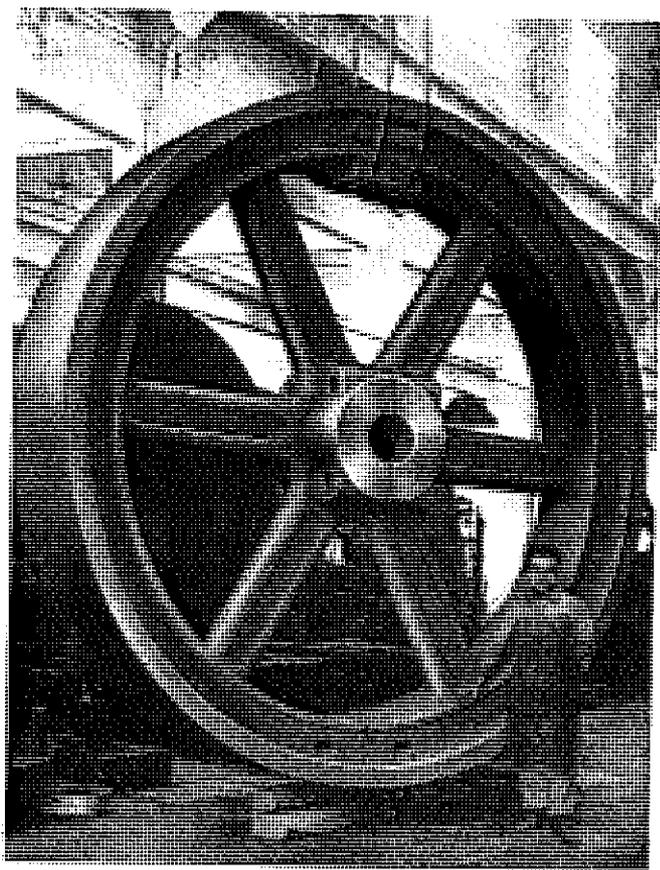


Fig. 391 - Volano per compressore d'aria. Ghisa G 30 UNI 5007. Peso 15.000 kg.

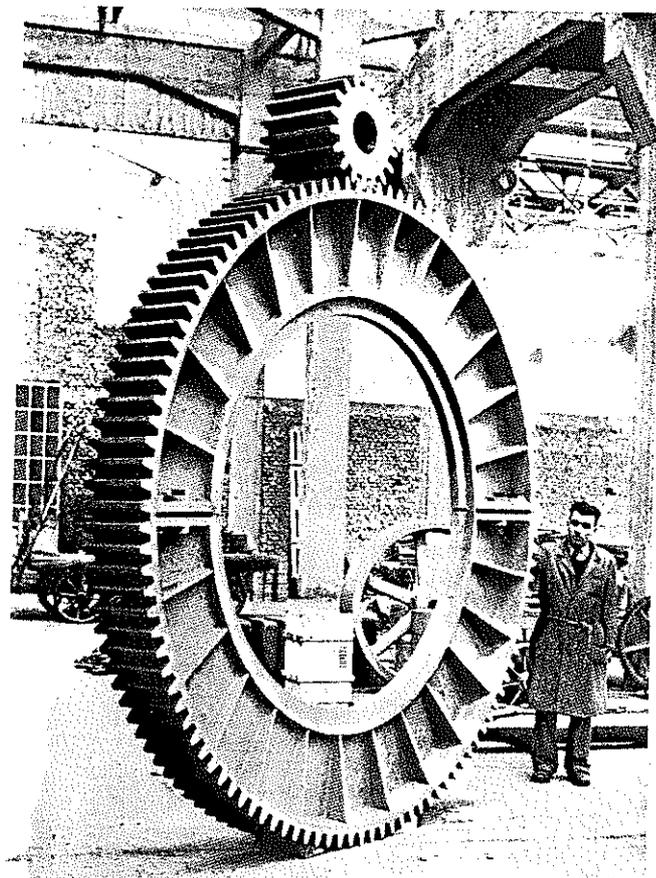


Fig. 392 - Ruota dentatrice cilindrica in due metà con pignone per l'industria del cemento. I denti, grezzi di fusione, sono tenuti mediante speciale procedimento di formatura con modulo e divisore. Ghisa G 30 UNI 5007. Peso 7.500 kg.

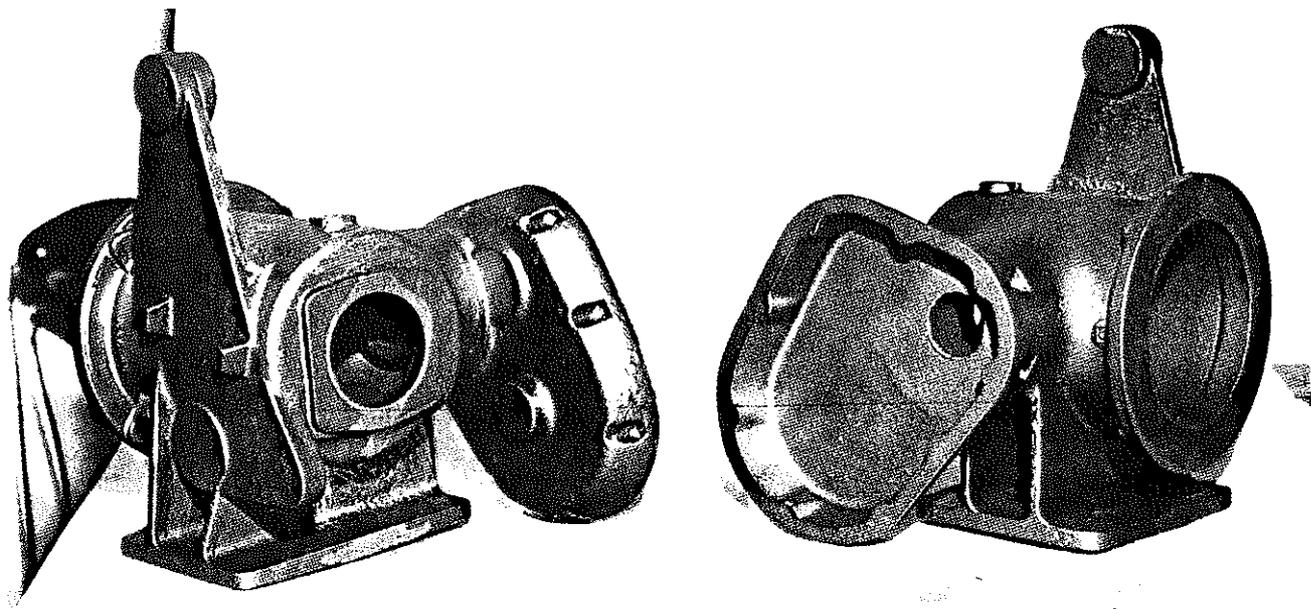


Fig. 389 - Scatole presa movimento per carri ferroviari refrigeranti. Ghisa G 25 UNI 5007. Peso 15 kg.

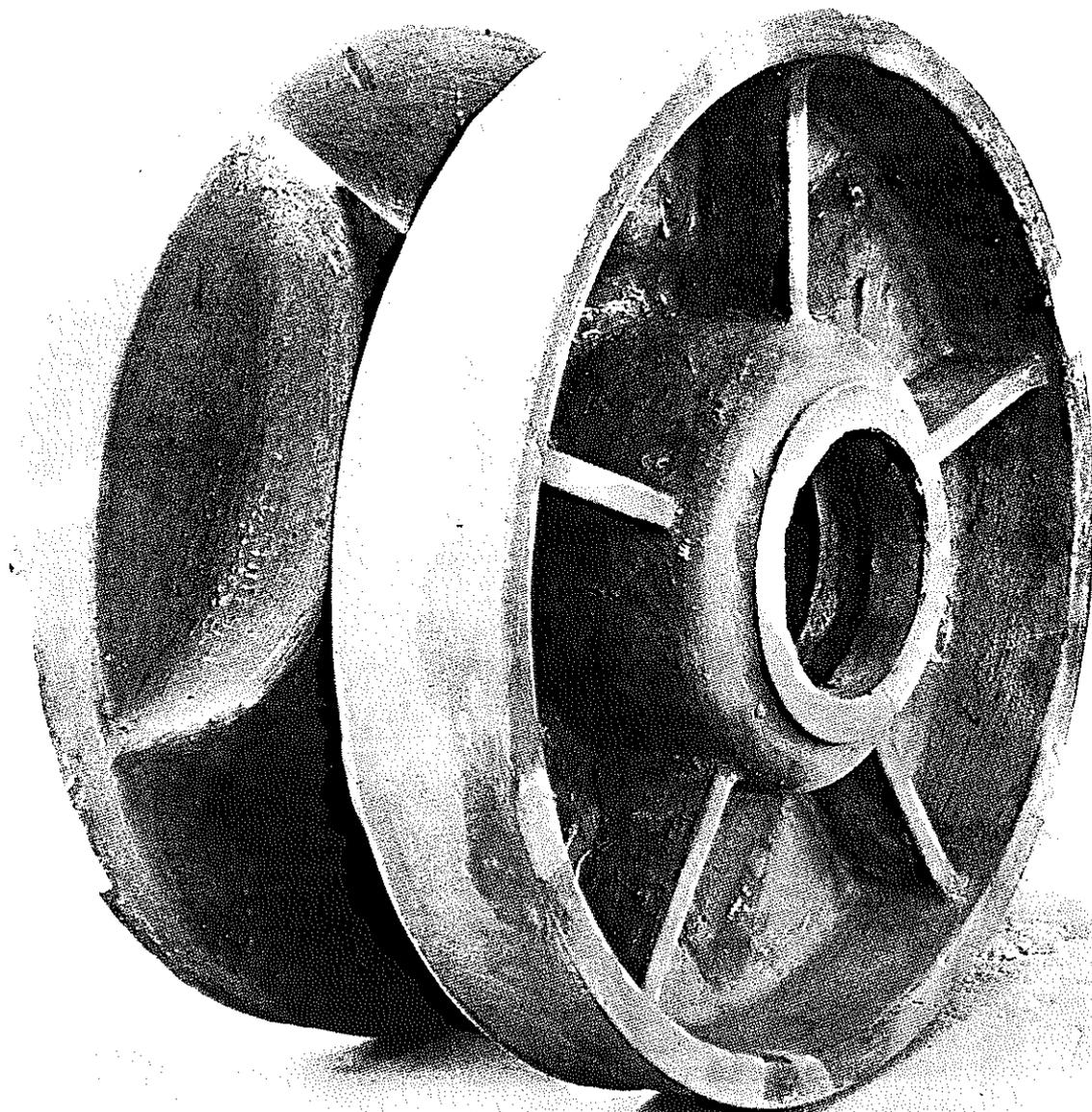


Fig. 390 - Ruota ad impronte per catena « Barbotin ». Ghisa G 35 UNI 5007 tenacemente legata al Ni, Cr, Mo. Peso 1.050 kg.

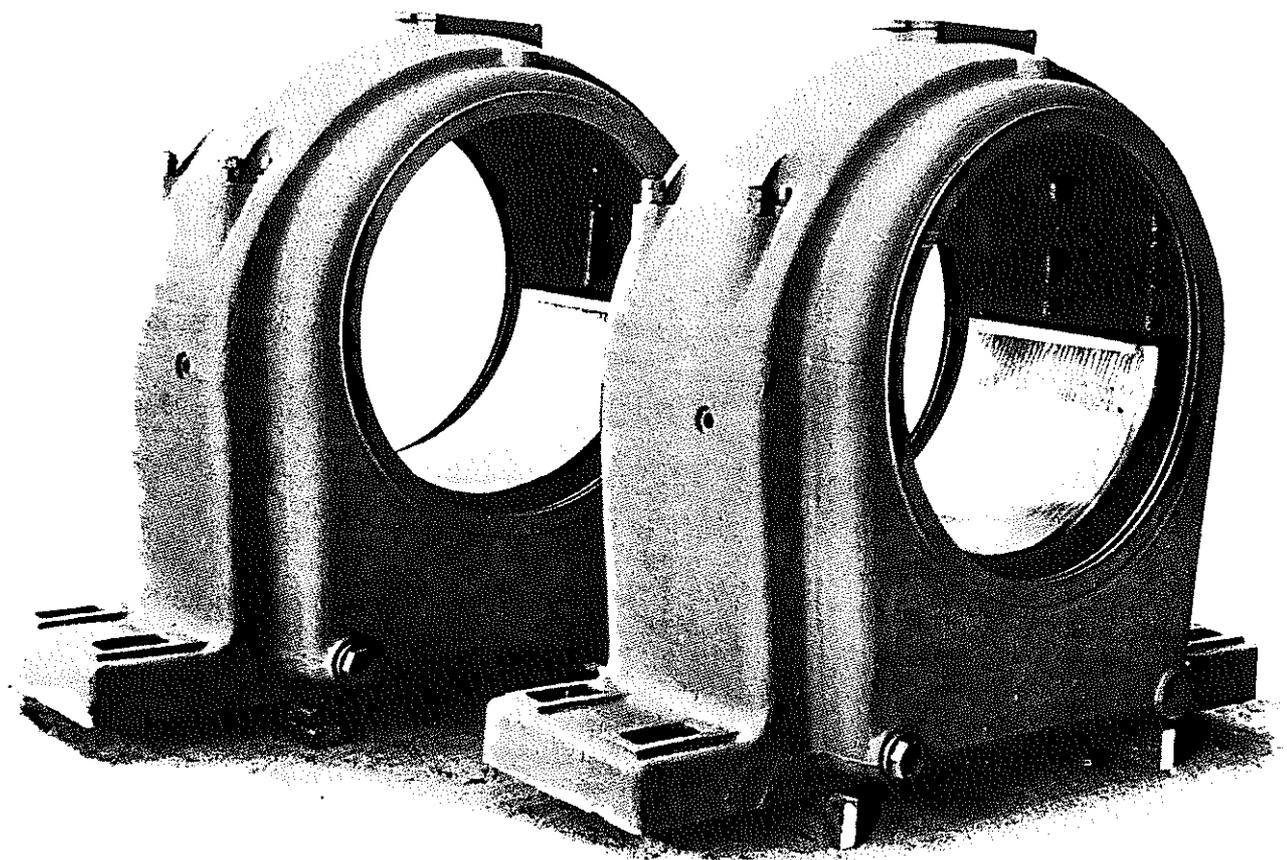


Fig. 393 - Supporti in ghisa per trasmissione. Ghisa G 25 UNI 5007. Peso complessivo 4.500 kg.

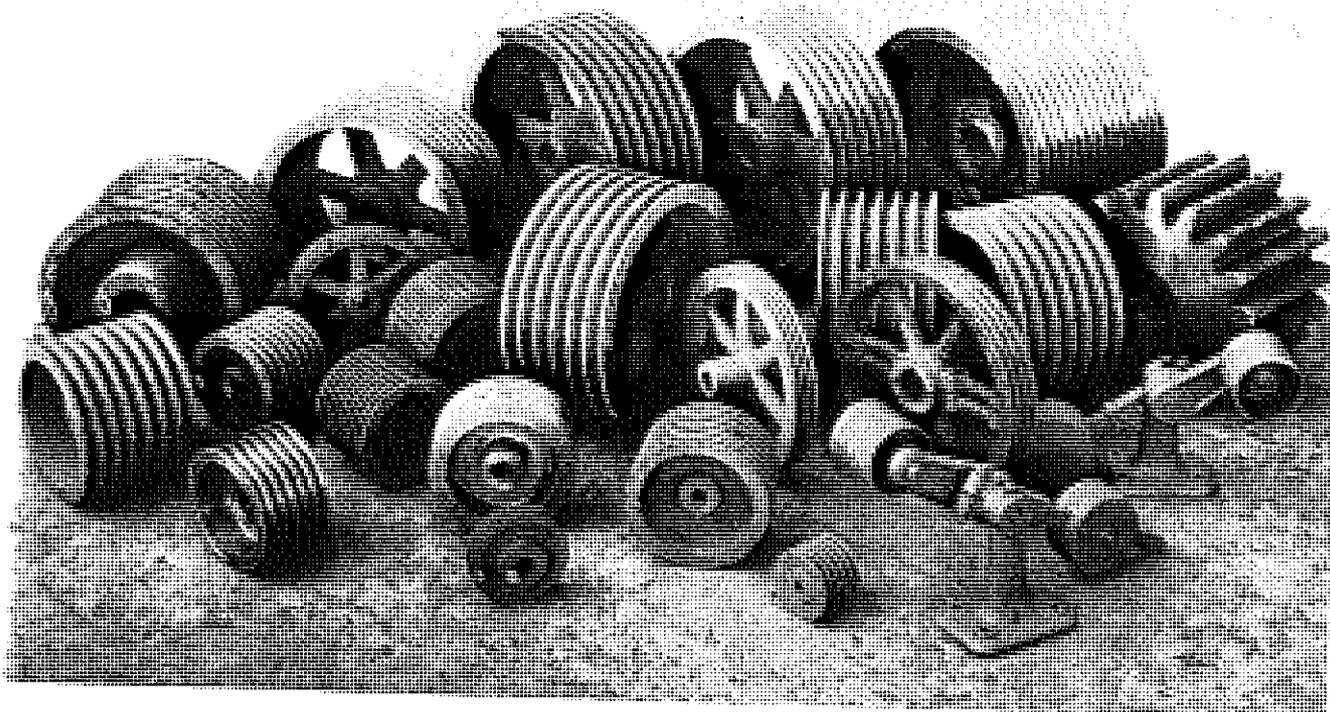


Fig. 394 - Pulegge a gole tendi cinghia, pignone di ghisa, rispettivamente G 20 e G 30 UNI 5007. Peso 10+75 kg.

*Particolari per impianti nell'industria chimica*

Sono svariatissime le applicazioni, nell'industria chimica, dei getti di ghisa grigia normale o tenuemente legata. Ne sono esempi tipici gli autoclavi e le torri di distillazione.

Le ghise grigie non legate possono anche resistere efficacemente a certi attacchi chimici di prodotti considerati molto corrosivi, come è il caso della soda e della potassa caustica a debole concentrazione ed a media temperatura, dell'acido solforico concentrato, degli oli, delle essenze e delle resine provenienti da raffinerie di petrolio ed anche dei gas di tutti i tipi.

Gli elementi di lega, che si possono eventualmente aggiungere alla ghisa in quantità moderate, svolgono i seguenti ruoli:

- Migliorano la compattezza e l'omogeneità della ghisa, riducono la possibilità di attacco chimico a partire dalla porosità e dalla segregazione.
- Si sciolgono nella matrice metallica e favoriscono la formazione di una pellicola aderente, resistente ed impermeabile che impedisce una corrosione in profondità.

Così il rame ( $\leq 1,5\%$ ) migliora la resistenza alla corrosione da parte dell'acido solforico; il cromo ( $\leq 1\%$ ) riduce la corrosione da parte dell'acqua di mare e degli acidi ossidanti; il nichel ( $\leq 2\%$ ) attenua la corrosione da parte delle soluzioni alcaline e degli acidi non ossidanti.

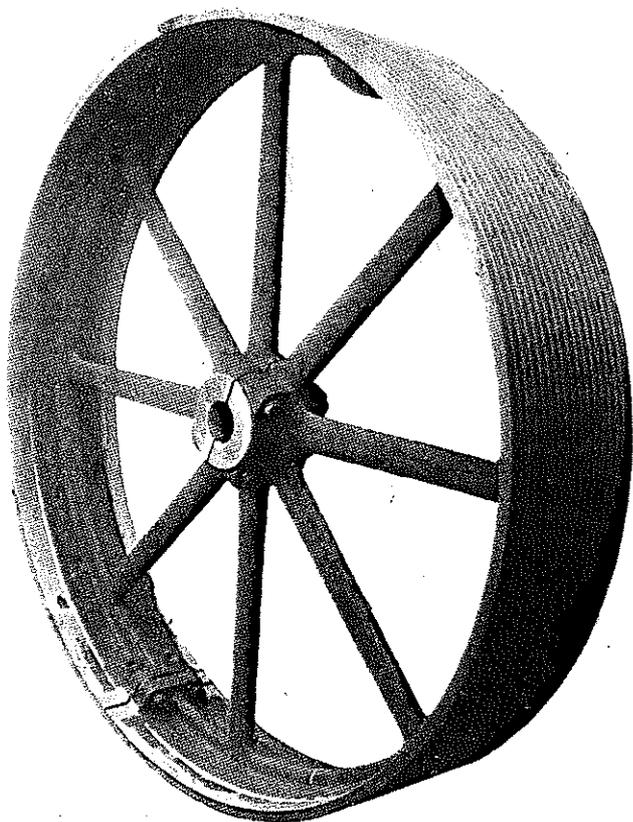


Fig. 395 - Puleggia a gole in due metà. Ghisa G 25 UNI 5007. Peso di ogni metà 2.500 kg.

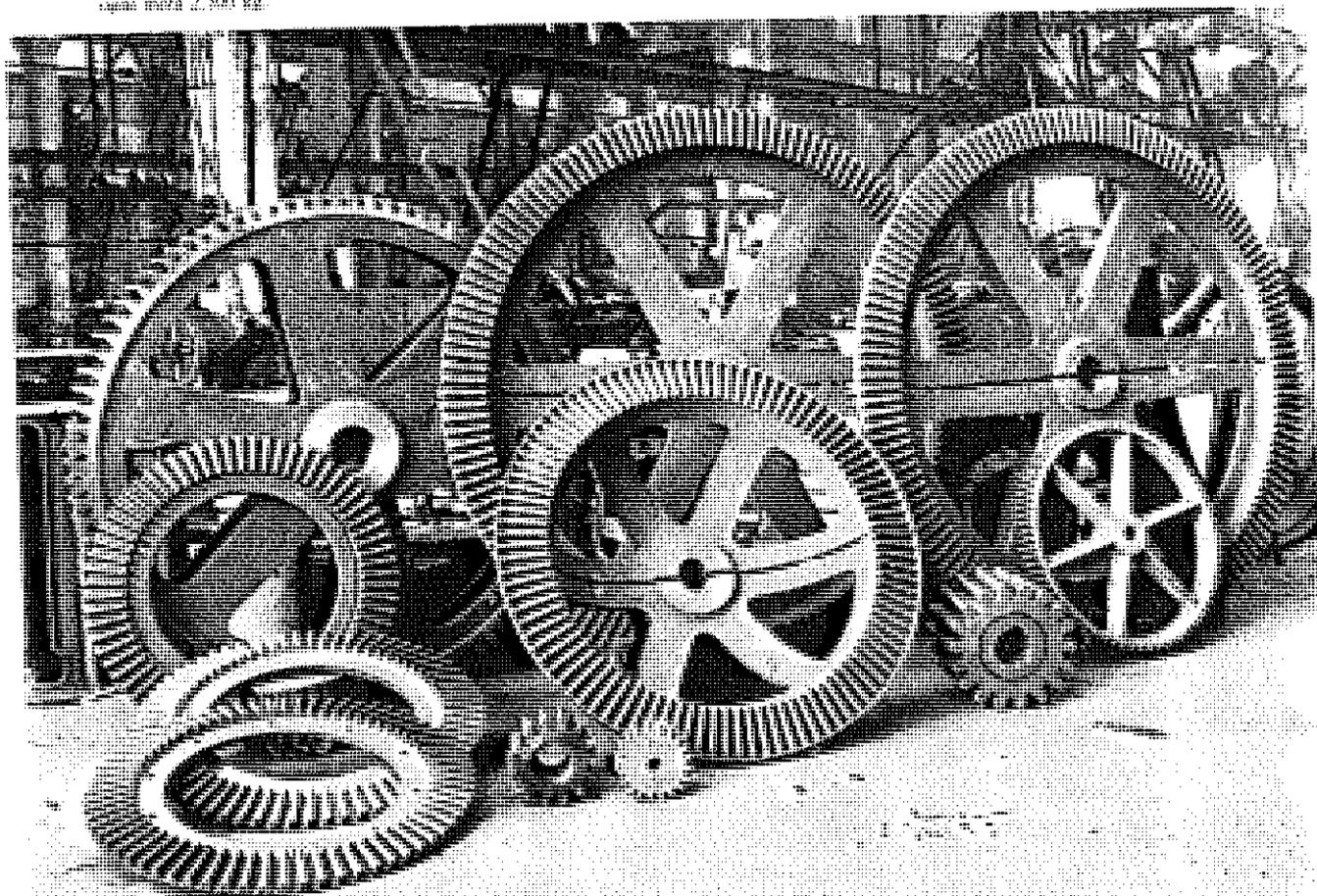


Fig. 396 - Gruppo di ruote dentate piano coniche. Pignoni e ruota a dentatura cilindrica. I denti, grezzi di fusione, sono tenuti mediante speciale procedimento di formatura con modulo e divisore. Ghisa G 25 UNI 5007. Pesi vari 15÷7.000 kg.

In ogni problema di corrosione non si deve scartare a priori la ghisa grigia perché, in molti casi, anche se la corrosione prevista può apparire eccessiva (alcuni millimetri all'anno), il costo di un getto di ghisa è più conveniente di quello di un getto realizzato in altra lega.

Occorre, cioè, considerare l'influenza dell'usura del getto sul funzionamento dell'impianto, l'incidenza della sua frequente sostituzione nella marcia del medesimo ed il grado di contaminazione possibile dei prodotti a contatto con il getto stesso.

Occorre, inoltre, ricordare che i getti di ghisa possono ricevere rivestimenti funzionali, come visto nei precedenti capitoli.

Per resistere alla corrosione da parte di ambienti molto aggressivi come acidi forti, cloruri, solfati, si deve fare ricorso alle ghise fortemente legate.

Prima di scegliere il tipo di ghisa, occorre che la Fonderia conosca la natura dell'ambiente aggressivo, la sua composizione, la sua purezza, temperatura, grado di agitazione, stato superficiale del materiale, grado di usura ammissibile ed influenza di questa usura sul funzionamento del materiale; per esempio, il fatto che il getto sia sottoposto ad importanti vibrazioni, rischia di accelerare notevolmente la corrosione per la distribuzione rapida dello strato protettivo che si è formato all'atto dell'entrata in servizio.

Anche lo stato della superficie ha un importante ruolo nel fenomeno della corrosione.

Una ghisa sana e compatta si dimostra a tenuta stagna per sua natura. Così la prima condizione da richiedere ad un getto destinato a contenere un fluido è comunque una perfetta sanità ed una grana serrata.

Da questo, l'importanza del disegno del getto (regolarità o variazione progressiva degli sforzi, assenza di angoli rientranti).

Nelle figg. 397 e 398 sono riportati alcuni getti destinati all'industria chimica.

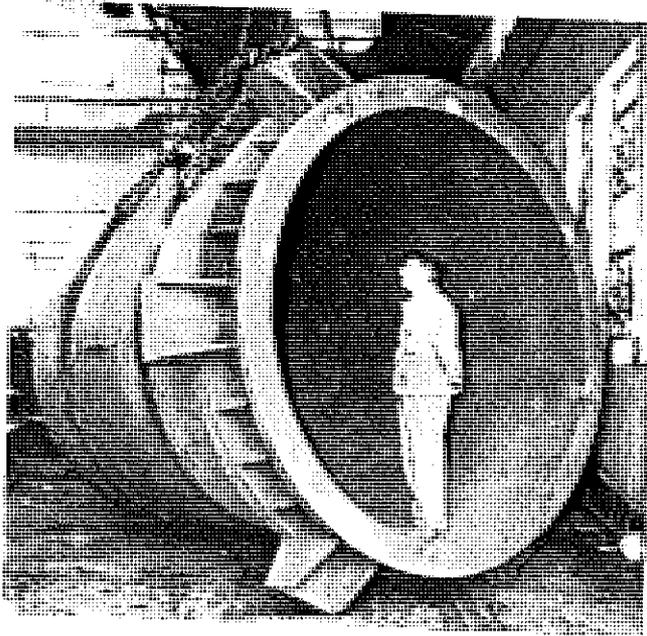


Fig. 397 - Vasca per impianto di solfonazione. Ghisa G 30 UNI 5007. Peso 13.000 kg.

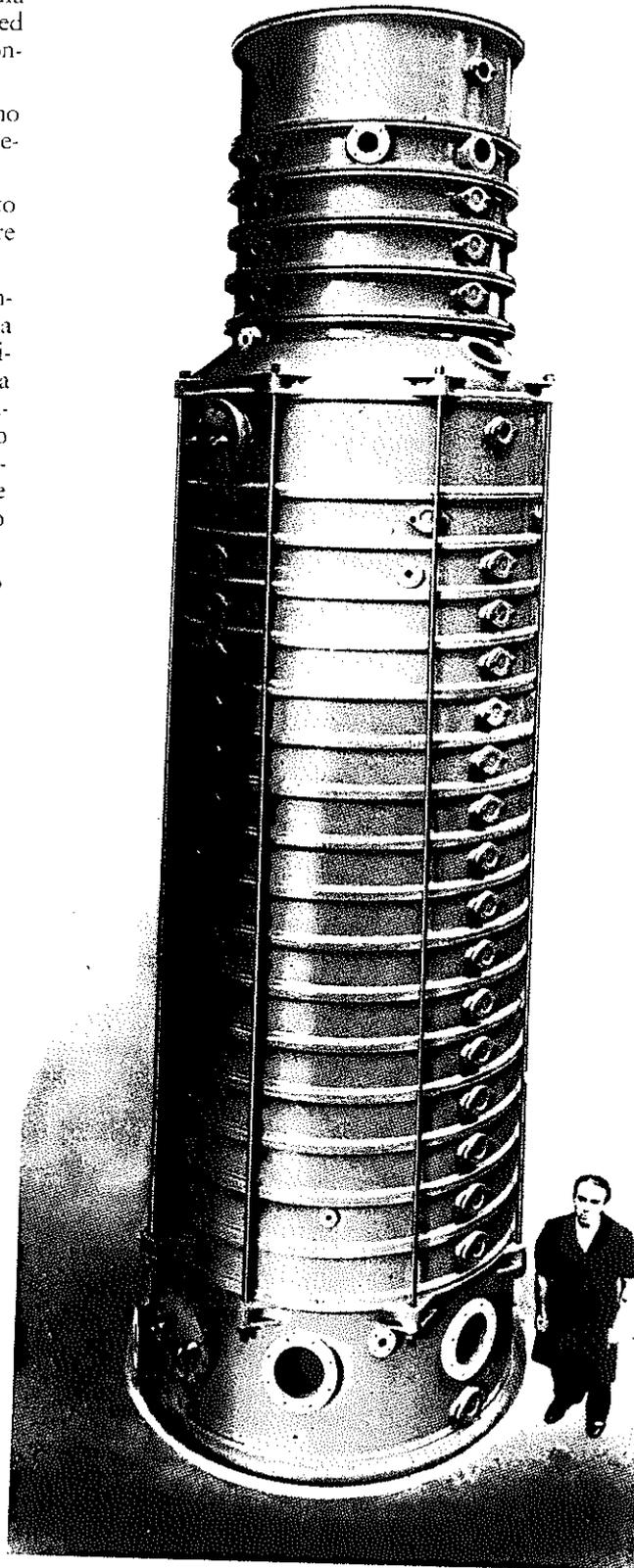


Fig. 398 - Colonna di distillazione in ghisa composta da vari elementi sovrapposti. Ghisa G 25 UNI 5007. Peso complessivo 36.000 kg.

## Getti per l'industria motoristica

Questi getti sono prodotti con ghise aventi una resistenza a trazione che può arrivare fino a  $390 \text{ N/mm}^2$  ( $40 \text{ kgf/mm}^2$ ).

Le ghise in questione presentano un'ottima lavorabilità necessaria per le macchine transfert con forti avanzamenti ed elevate velocità di taglio.

I getti posseggono buone caratteristiche di tenuta idraulica anche sotto pressioni elevate. La resistenza all'usura è eccellente anche in condizioni difficili di esercizio, delle quali le più importanti sono l'intensità di carico, le possibilità di abrasione e le temperature raggiunte. L'influenza della velocità e della pressione è ancora poco conosciuta, anche se le prove di usura a secco ghisa su ghisa hanno mostrato che l'usura è all'incirca proporzionale al carico unitario e che essa si mantiene quasi costante a partire da una certa velocità.

Il modulo di elasticità gioca un ruolo importante; è bene che questo modulo sia basso, specialmente quando è necessario che la ghisa si adatti agli sforzi per meglio ripartire le tensioni di pressione.

Si deve ricordare che la maggior parte delle ghise con grafite lamellare risulta conveniente per applicazioni di resistenza all'usura per attrito con lubrificazioni (su ghisa od acciaio).

L'attrito su film d'olio rischia di essere perturbato dalla rottura del film (stato della superficie non adattato, vibrazioni, ecc.). D'altra parte lacune momentanee di lubrificazione sono talvolta inevitabili, specialmente al momento dell'avviamento.

È noto il ruolo essenziale svolto dalla grafite come lubrificante e di ogni lamella di grafite come microserbatoio di lubrificazione; va rilevato che per l'attrito a secco il grado di finitura superficiale deve essere tenuto più spinto quanto più la ghisa è dura.

Allo scopo di impedire la fessurazione, che potrebbe essere prodotta da shocks termici combinati a sforzi meccanici, occorre mantenere un equilibrio conveniente tra carbonio combinato e carbonio grafítico.

Tenuto conto dei valori delle sollecitazioni meccaniche e della buona resistenza all'usura, si richiede una struttura con perlite fine accompagnata da lamelle di grafite abbondanti e di dimensioni medie.

Elementi di lega — come cromo, molibdeno e nichel in percentuale moderata — sono sovente raccomandati per ottenere una grana serrata nella ghisa e per stabilizzare la struttura alle temperature medie.

Dai numerosi esempi del buon comportamento delle ghise grigie all'usura, si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Quando il getto non deve subire un trattamento di tempra, l'eutettico fosforoso migliora la resistenza all'usura, soprattutto quando esso si presenti in reticolo continuo.
- La struttura interamente ferritica può essere conveniente se l'attrito ha luogo sotto carichi deboli contro una lega molto dura.

Nel caso di attrito sotto pressione molto elevato e quando il pezzo è sottoposto a sforzi meccanici importanti (e specialmente ciclici), si può ricorrere a ghise bainitiche.

In certi casi molto particolari, in cui le pressioni sono molto grandi e la lubrificazione è perfettamente assicurata, la tempra ledeburitica può essere una soluzione valida. È questo il caso degli alberi a camme.

Le ghise così temprate hanno una struttura di perlite e cementite (ghise non legate) e martensite o carburi (ghise legate al Cr-Ni), entrambe molto dure e resistenti perfettamente all'attrito radente e volvente anche se sono sottoposte a temperature elevate  $773 \div 973 \text{ K}$  ( $500 \div 700 \text{ }^\circ\text{C}$ ), come per esempio i rulli dei cestelli dei forni di trattamento termico.

Le zone di tempra ledeburitica (ottenuti per raffreddamento rapido alla colata) devono essere perfettamente definite, specialmente in profondità, mentre le zone interne conservano la loro struttura grigia facilmente lavorabile.

La scelta tra i due tipi di struttura sopra indicate dipende sia dalle condizioni di impiego che dalla profondità di tempra voluta.

Lo scorrimento è molto buono grazie alla distribuzione regolare della grafite finemente suddivisa (lubrificazione interna).

La resistenza alla temperatura elevata è buona fino a  $673 \div 773 \text{ K}$  ( $400 \div 500 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Per temperature superiori vi è rischio di deformazioni permanenti e variazioni di caratteristiche meccaniche.

Nelle figg. 399 ÷ 411 sono citati alcuni esempi di getti destinati all'industria motoristica.

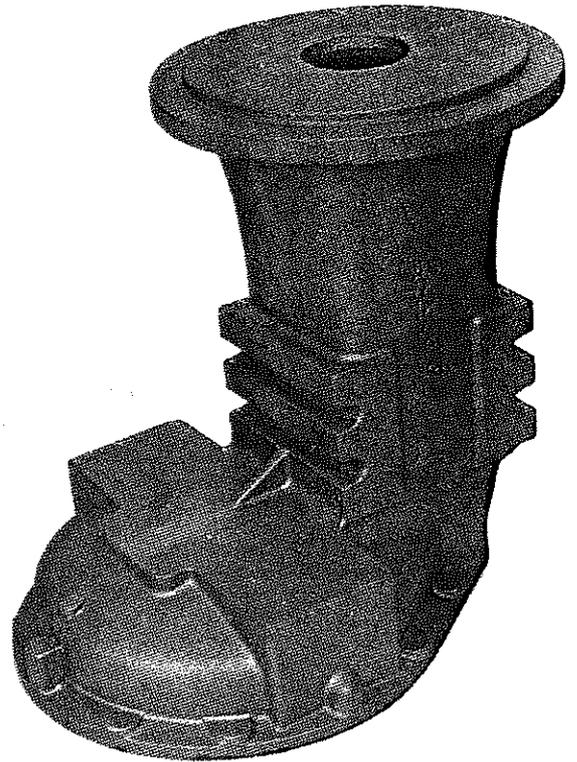


Fig. 400 - Supporto semiasse per trattore. Ghisa G 30 UNI 5007. Peso 67 kg.

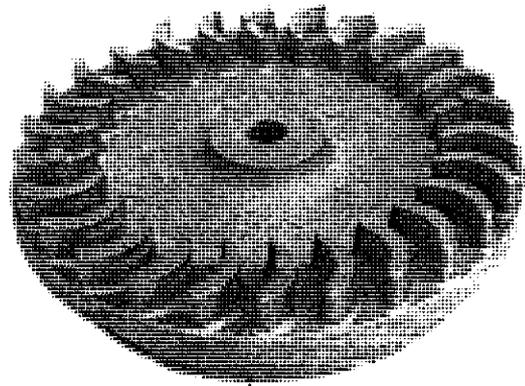
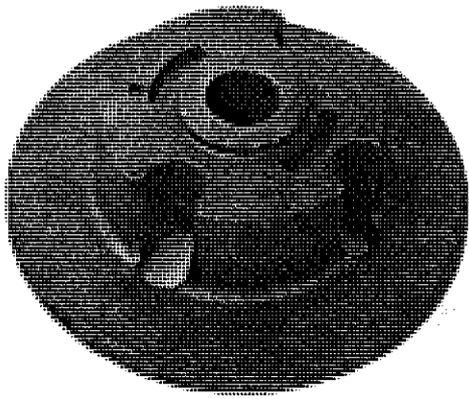


Fig. 399 - Mozzo ruota posteriore per autoveicoli. Ghisa G 25 UNI 5007. Peso 7.2 kg. Fig. 402 - Volano alettato per motore. Ghisa G 25 UNI 5007.

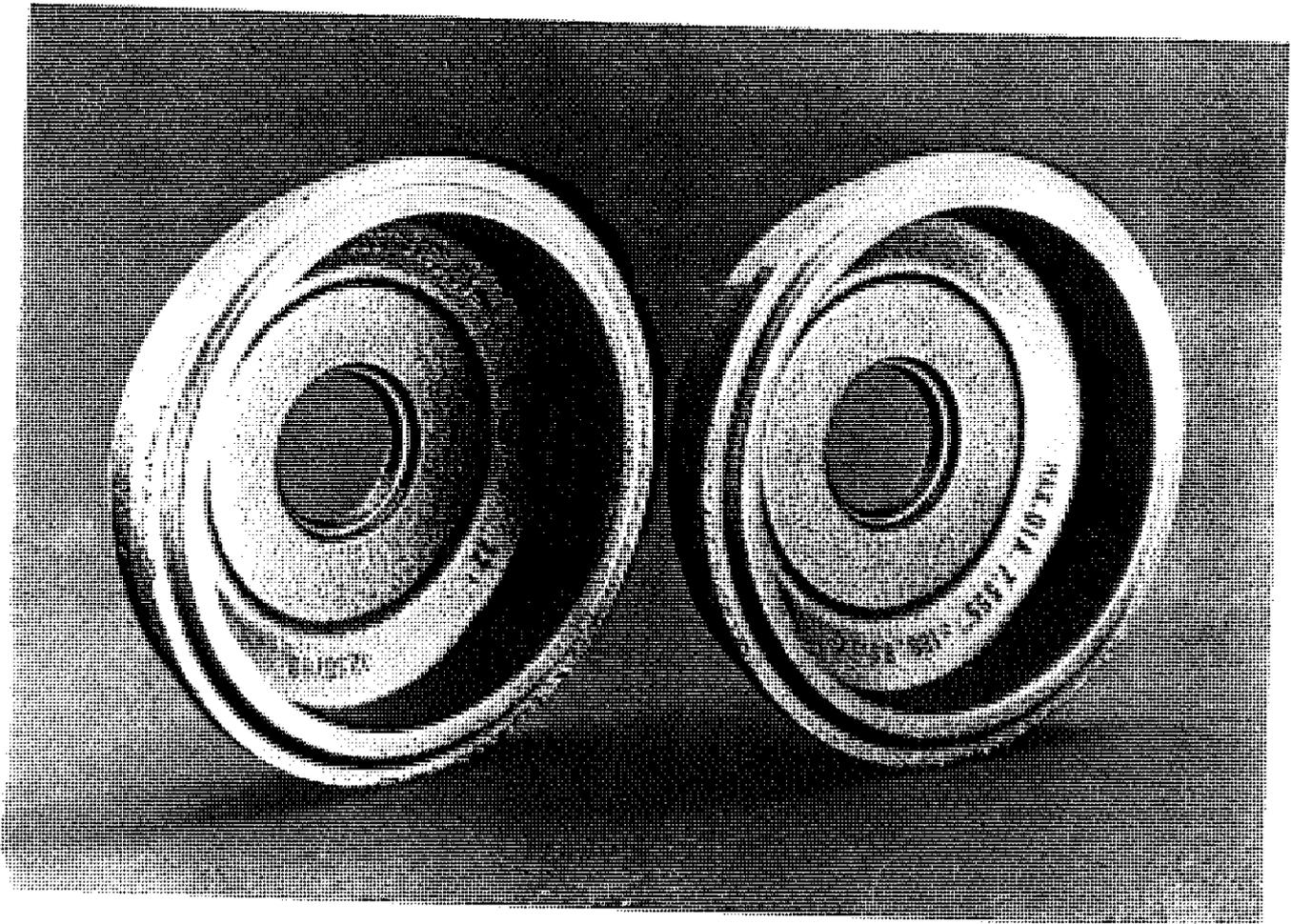


Fig. 401 - Dischi freno per vetture. Ghisa G 25 UNI 5007.

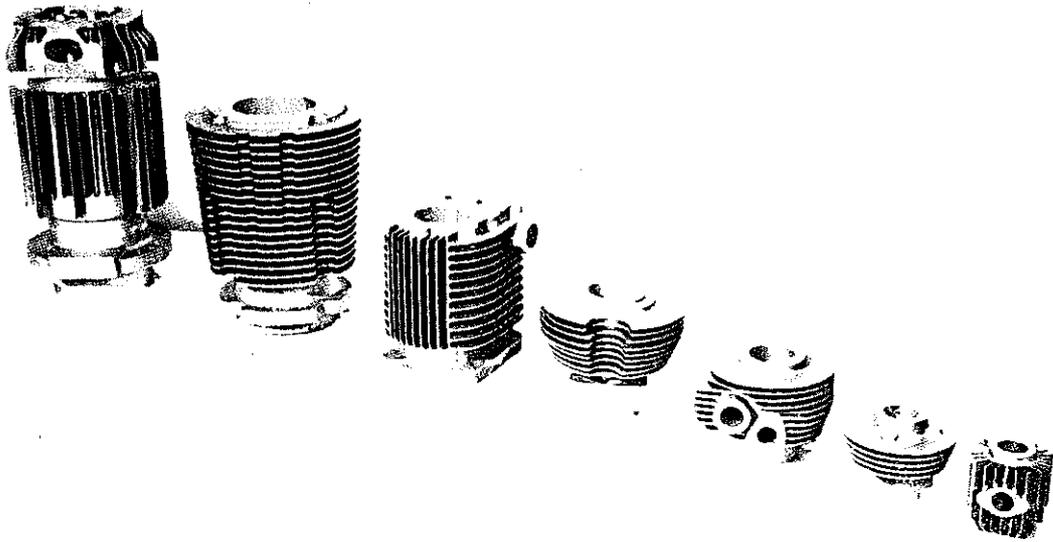


Fig. 403 - Gruppo di cilindri alettati per motore. Ghisa G 25 UNI 5007.

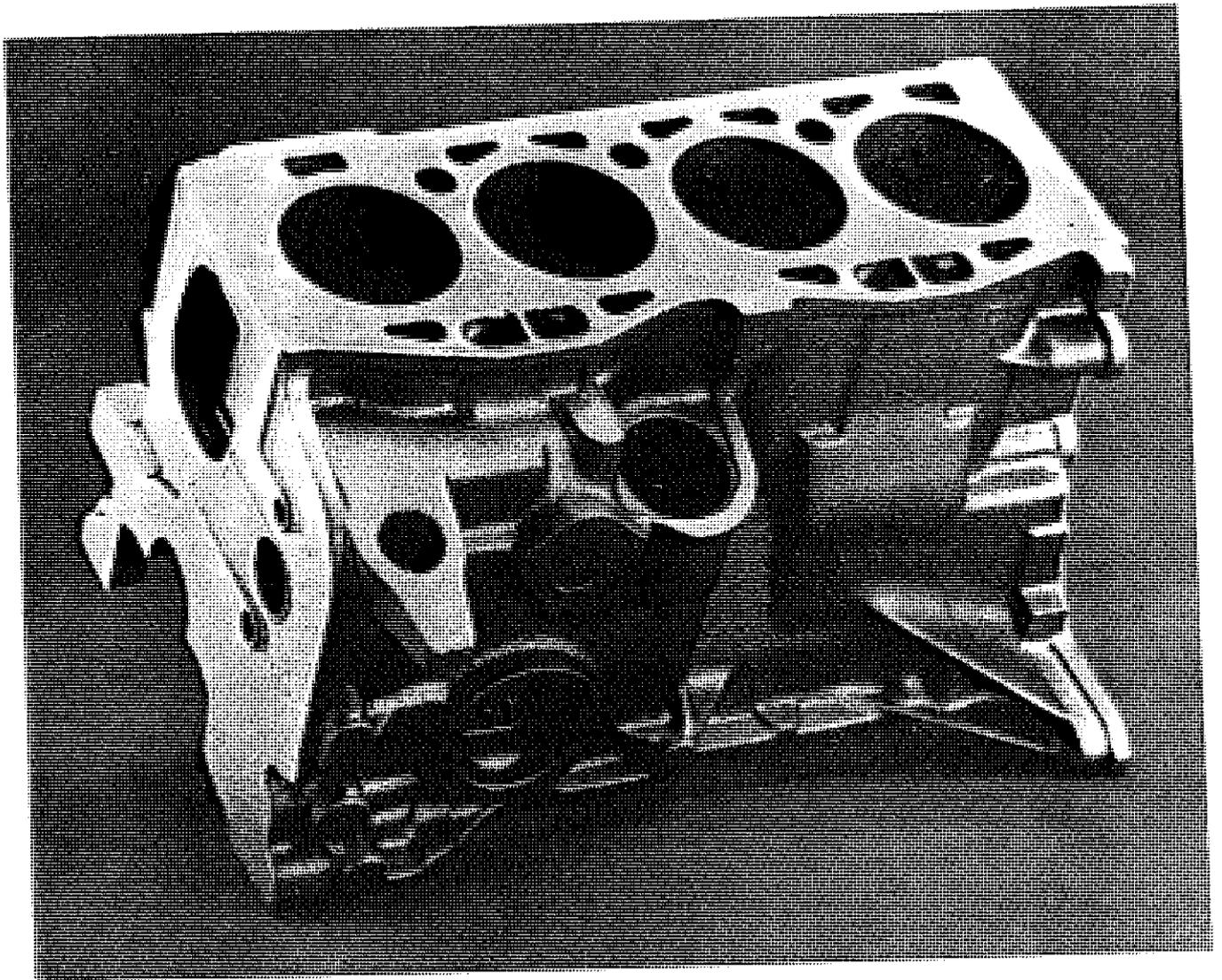


Fig. 404 - Basamento motore per autovettura. Ghisa G 25 UNI 5007.

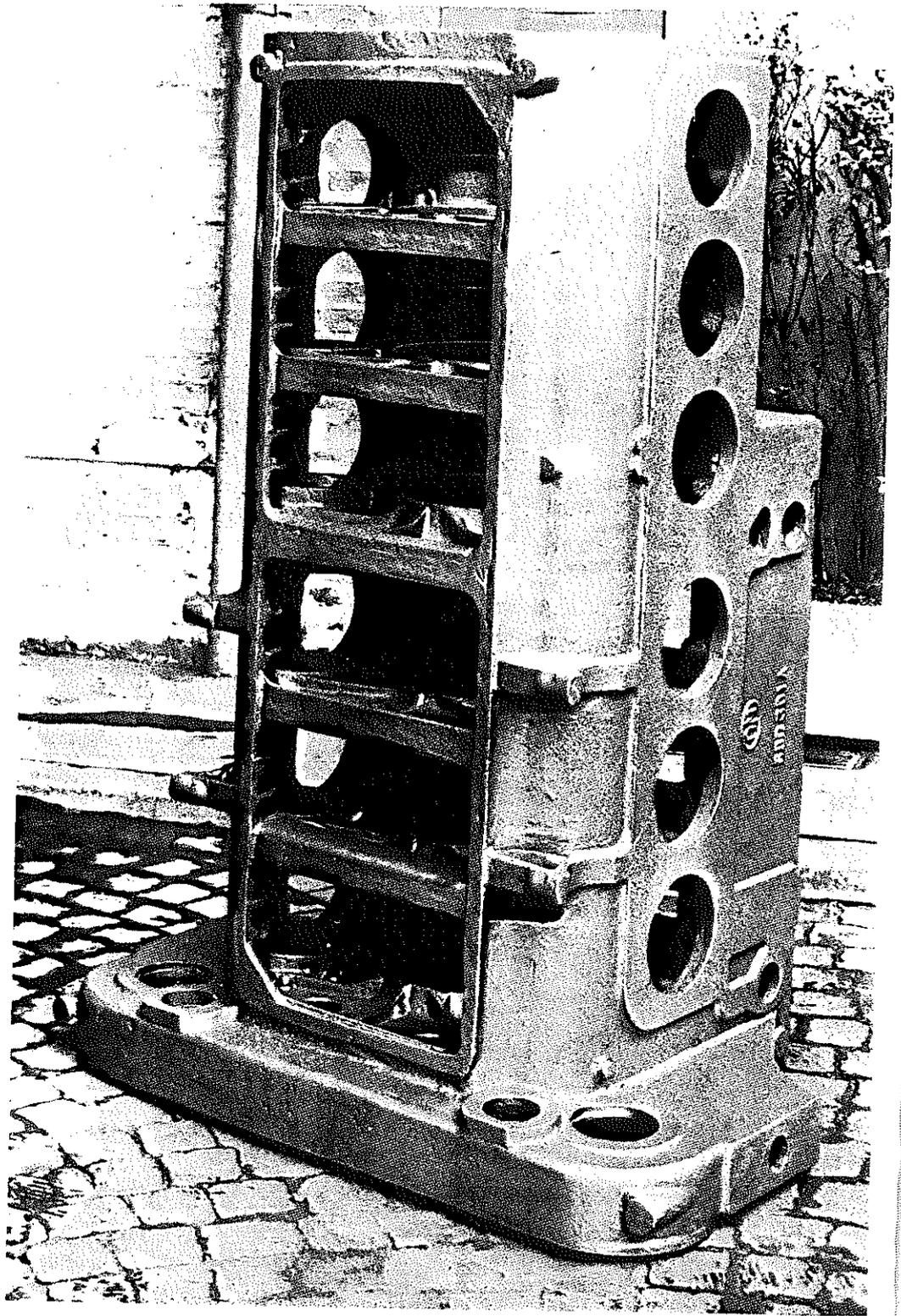


Fig. 405 - Basamento motore per automotrice ferroviaria. Ghisa G 25 UNI 5007. Peso 795 kg.

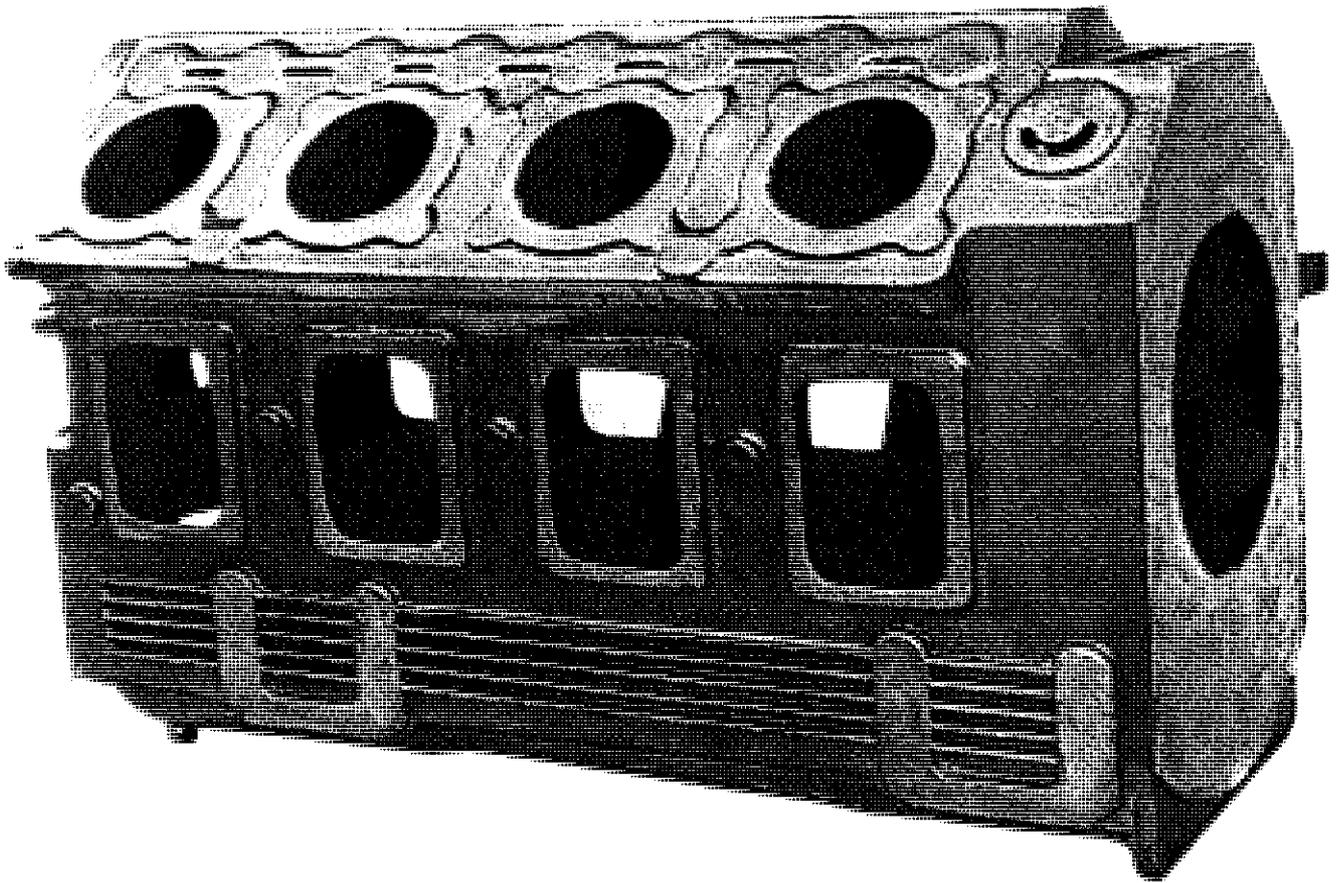


Fig. 406 - Carter per motore Diesel per compressore stradale. Ghisa G 30 UNI 5007. Peso 120 kg.

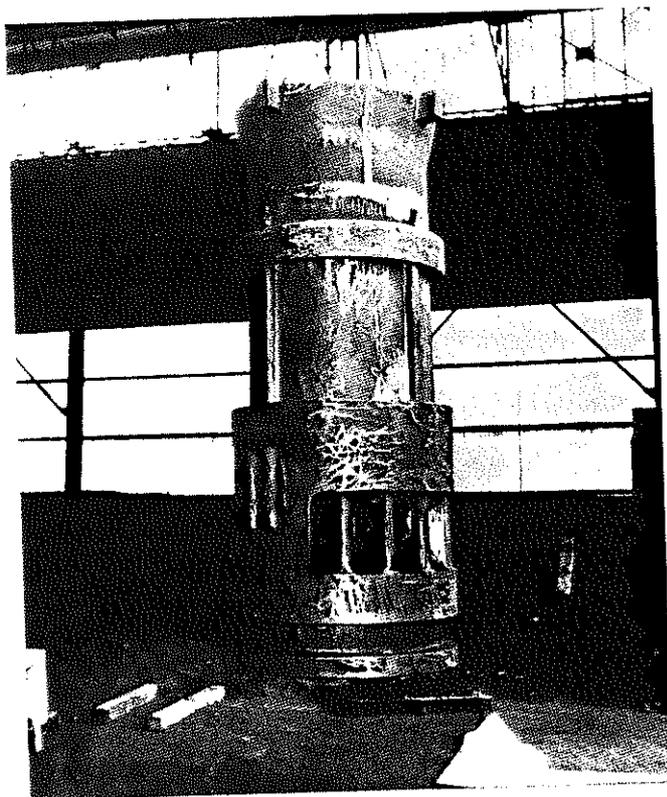


Fig. 407 - Camicia inferiore per motore Diesel 2 tempi GMT, serie 780. Ghisa G 35 UNI 5007 tenuemente legata al Cr. Peso 3.200 kg.

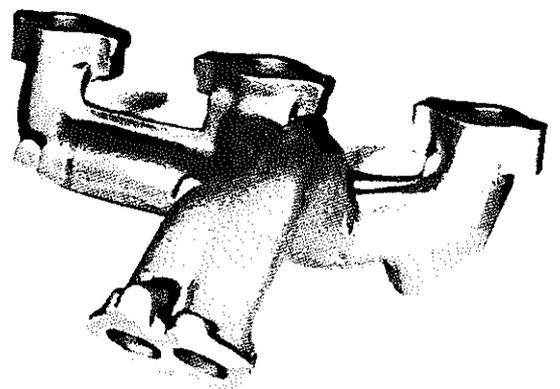


Fig. 409 - Collettore di scarico per motore vettura. Ghisa G 20 UNI 5007.

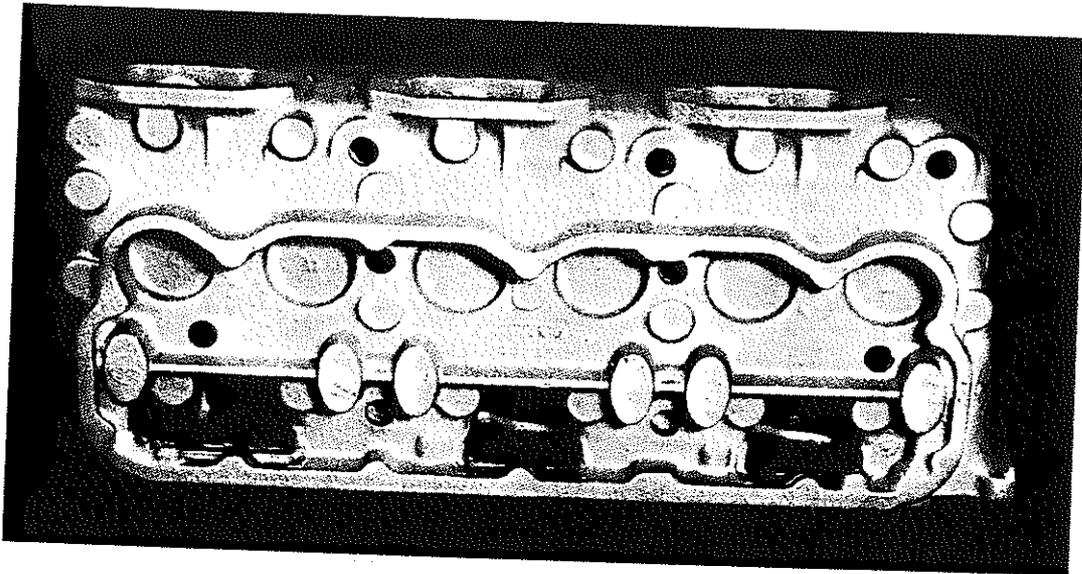


Fig. 408 - Testa cilindri per motore. Ghisa G 25 UNI 5007.

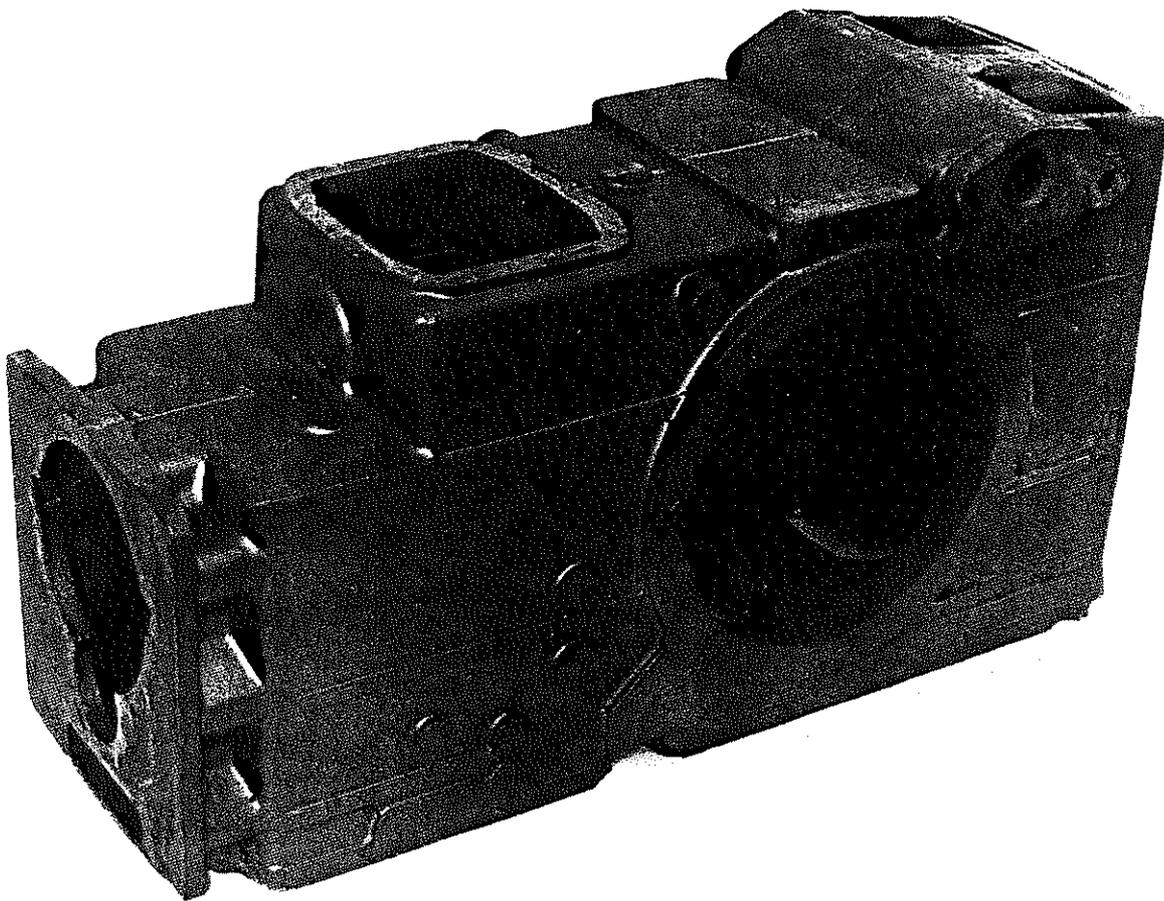


Fig. 410 - Scatola cambio posteriore per trattore. Ghisa G 25 UNI 5007. Peso 259 kg.

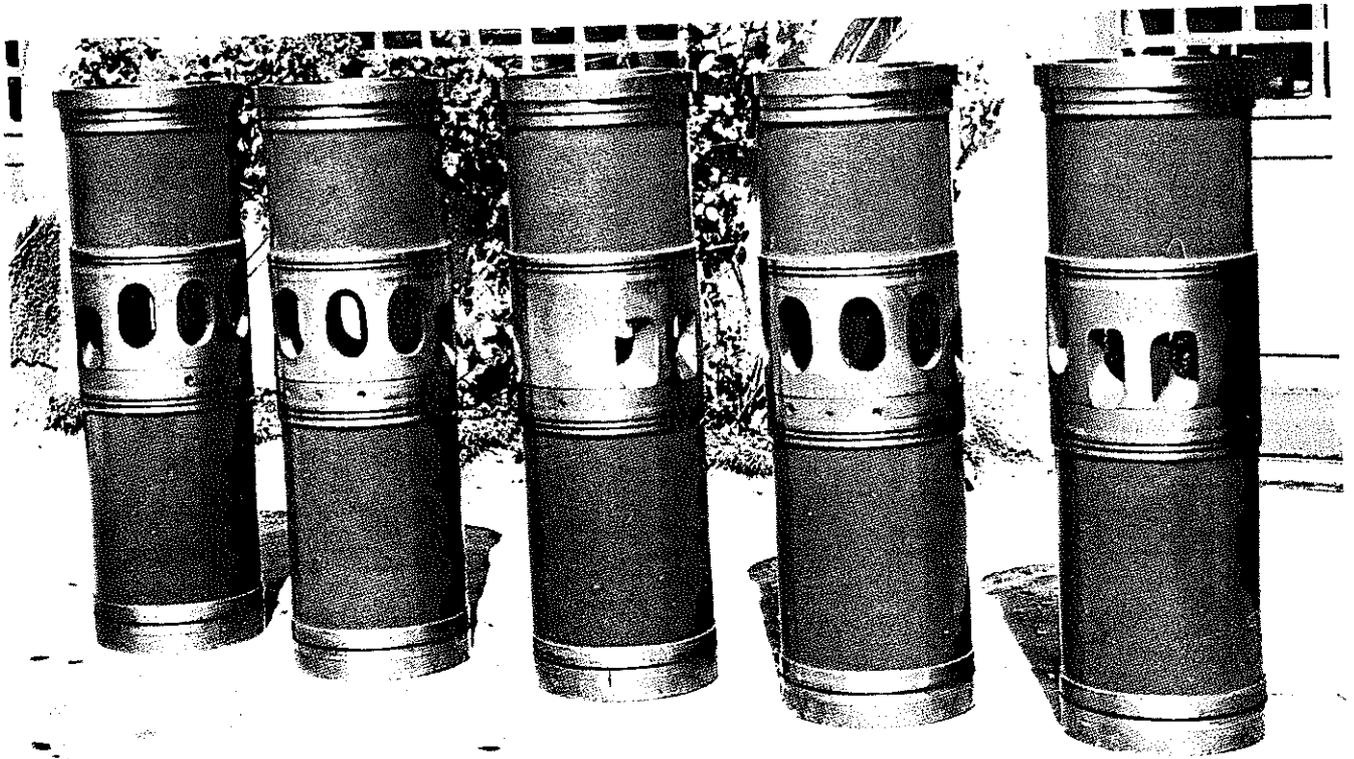


Fig. 411 - Camicie per motore Diesel marino a due tempi. Ghisa G 35 UNI 5007 tenuemente legata al Ni, Cr. Peso 450 kg per getto.

### Getti per l'edilizia

Come si vede dalla tab. LXXXIII i getti per l'edilizia comprendono una vasta gamma con una molteplicità di applicazioni.

Questi getti, ad eccezione dei chiusini, hanno generalmente pareti sottili e devono presentare un buon aspetto esterno. Essi non devono sopportare sollecitazioni meccaniche importanti, ma possono essere impiegati per contenere liquidi con debole pressione e per resistere a sollecitazioni termiche non indifferenti.

Le ghise impiegate per la produzione di questi getti presentano una eccellente colabilità, per cui è possibile realizzare spessori minimi di 2,5 mm.

Questa buona attitudine a riempire la forma permette di realizzare tutti i dettagli del disegno anche con configurazioni complesse, e di ottenere getti con grandi superfici e limitati spessori delle pareti. La lavorabilità dei getti è buona.

Le ghise grigie non legate resistono perfettamente all'attacco degli agenti moderatamente aggressivi, come gli agenti atmosferici, le atmosfere urbane e marine, il terreno, le acque potabili e le acque stagnanti. Per esempio i balconi, i chiusini, ecc. che si trovano in zone anche

in riva al mare, assicurano il loro servizio da parecchi decenni senza tracce sensibili di corrosione.

Secondo certi metallurgisti, questo fatto si spiega da un lato con la presenza della grafite che ha un potenziale negativo rispetto alla matrice metallica, e dall'altro per il silicio che forma una pellicola superficiale di ossido che arresta la progressione dell'attacco chimico.

Come è noto, la grana della ghisa grigia è tanto più serrata e fine, quanto maggiore è la velocità di raffreddamento e cioè gli spessori sono più sottili. Per esempio, gli elementi di termosifoni di ghisa, il cui spessore è di qualche millimetro, sono a tenuta stagna alla pressione di qualche atmosfera. Per resistere meccanicamente alla pressione è sovente necessario prevedere spessori più elevati od applicare nervature al getto.

Per questo è sempre necessario adattare opportunamente la composizione chimica della ghisa grigia agli spessori ed alla geometria del getto.

Si ricorrerà cioè a ghise la cui sensibilità allo spessore sia la più bassa possibile e cioè a ghise con buona resistenza alla trazione, con grafite fine e poco abbondante.

Nelle figg. 412 ÷ 416 sono citati alcuni esempi di getti destinati all'edilizia.

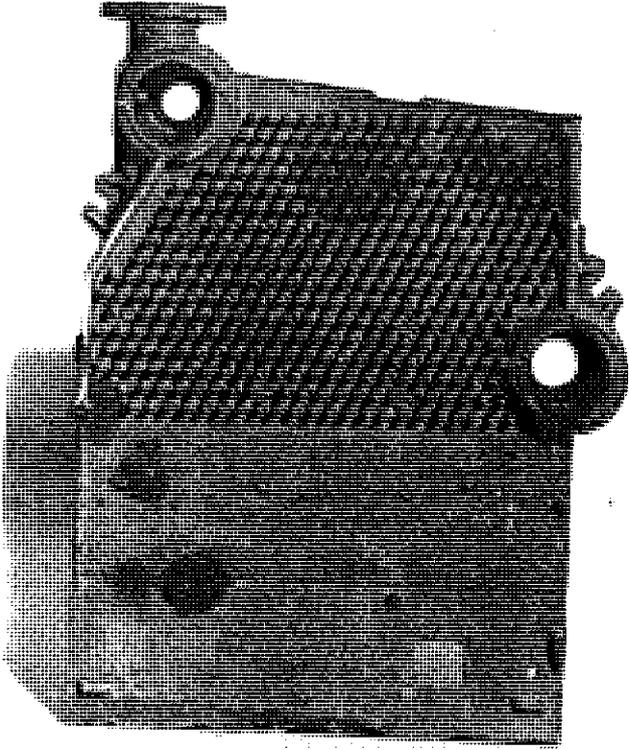


Fig. 413 - Elemento di caldaia a gas per impianto di riscaldamento. Ghisa G 20 UNI 5007. Peso 45 kg.

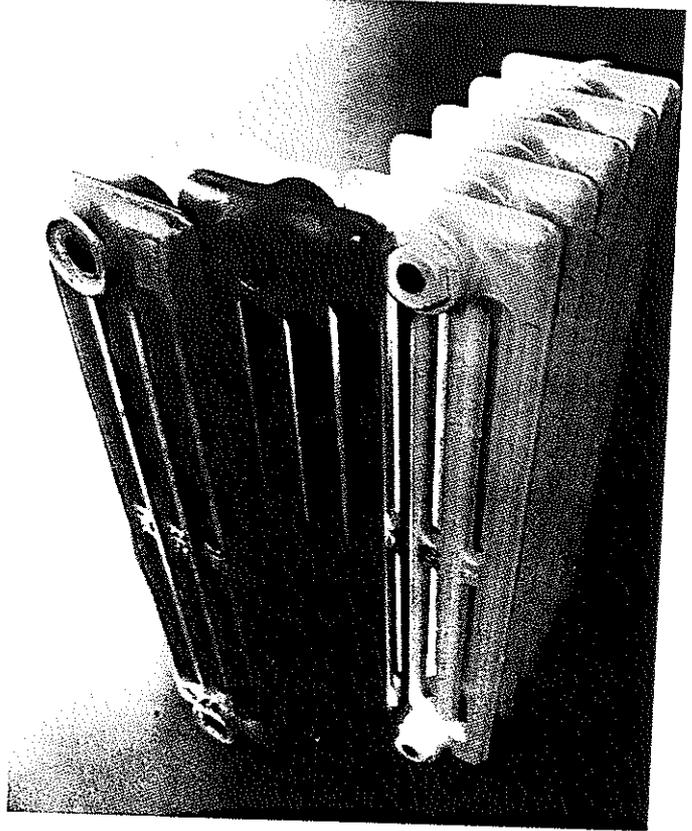


Fig. 414 - Gruppo di elementi di radiatori a colonnina. Ghisa G 15 UNI 5007.

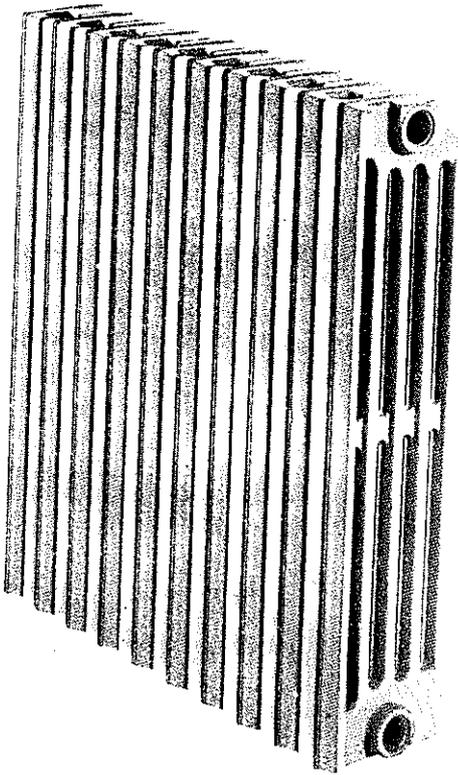


Fig. 415 - Gruppo elementi radiatori a piastra frontale ad irraggiamento maggiorato. Ghisa G 15 UNI 5007. Peso 10 kg cad.

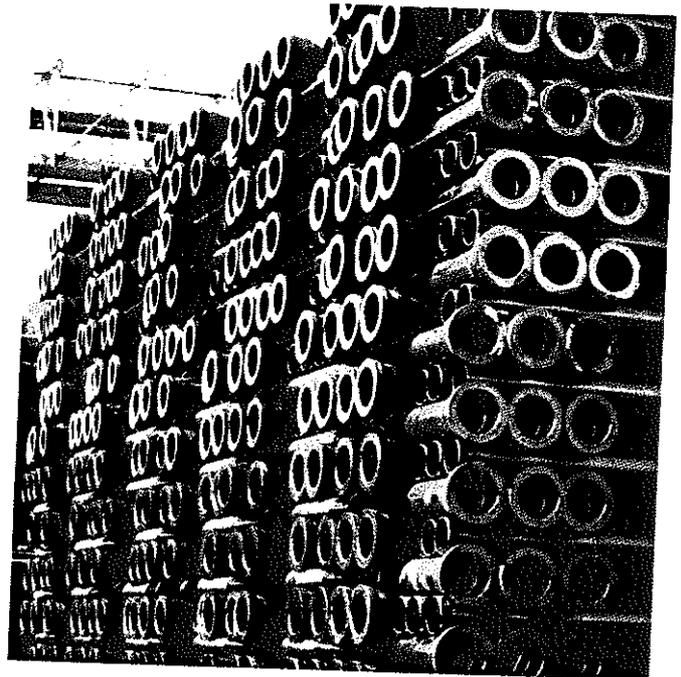


Fig. 416 - Tubi per condotte d'acqua in pressione. Ghisa G 20, G 25 UNI 5007. Peso 50-1.550 kg.

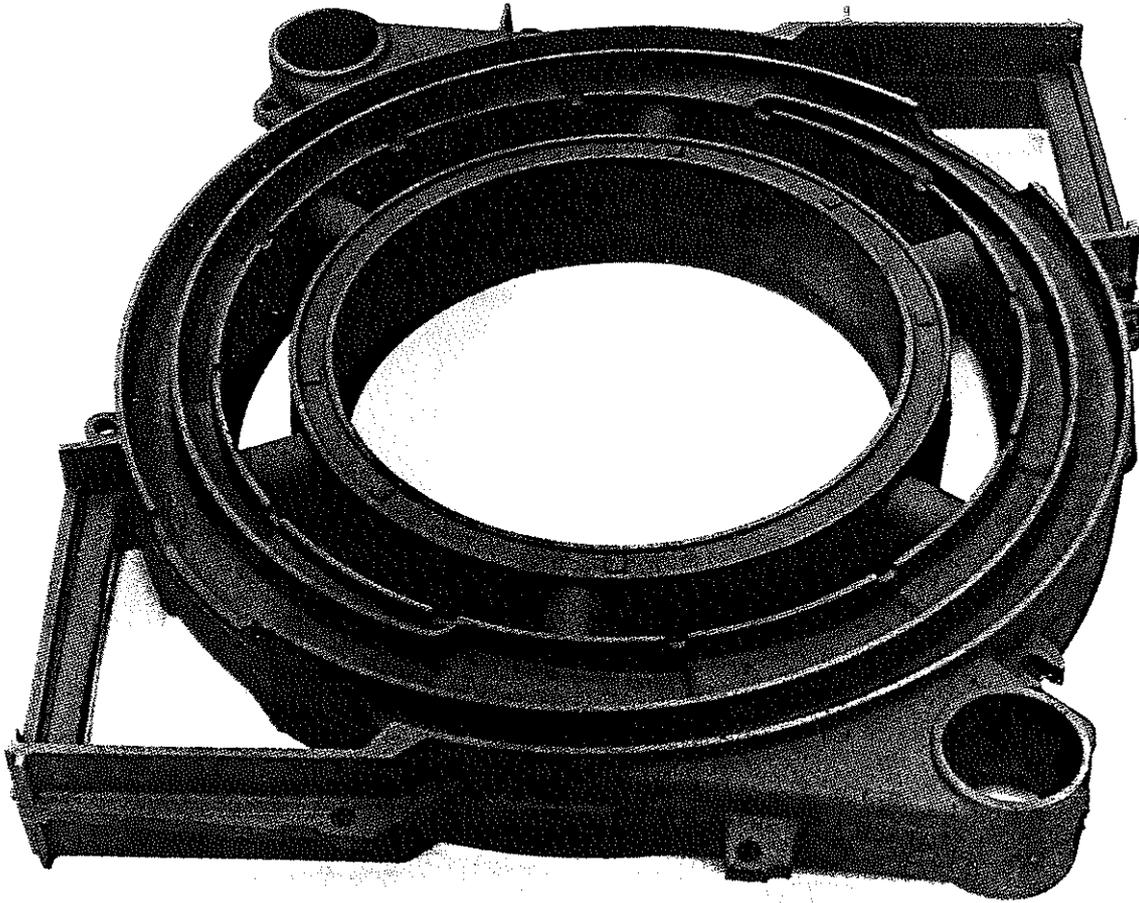


Fig. 412 - Elemento intermedio di caldaia a gas o ad olio combustibile per impianto di riscaldamento. Ghisa G 20 UNI 5007. Peso 123 kg.

### Getti per la siderurgia

Alcuni getti destinati all'industria siderurgica fanno parte della categoria dei getti *termici* e comprendono essenzialmente le lingottiere; altri getti, cui sono richieste caratteristiche completamente differenti, sono i cilindri per laminatoio.

In modo particolare per le lingottiere, le condizioni di servizio alle temperature elevate sono così varie e complesse che è assolutamente indispensabile definire con precisione tutti i fattori di utilizzazione: temperatura esatta e sforzi sopportati dal getto, cicli di temperatura, shocks termici possibili e natura dell'atmosfera.

Occorre sottolineare che le temperature sopportate dal getto non sono le stesse in tutti i punti e che esse sono sovente molto differenti dalla massima temperatura di contatto.

In effetti si sa che i getti di ghisa trasmettono il calore, per conducibilità termica, verso le superfici raffreddate sia dall'aria ambiente che dal fluido previsto per questo scopo.

Gli effetti di una temperatura elevata sui getti di ghisa sono diversi: il principale può essere una trasformazione strutturale che provoca un rigonfiamento, una corrosione (sovente una ossidazione, sorgente di una fessurazione o scagliature superficiali), fenomeni di scorrimento e, naturalmente, dilatazioni e conseguenti tensioni che sono causa di deformazioni ed anche di rotture.

Alle temperature inferiori a  $573 \div 673$  K ( $300 \div 400$  °C) le ghise conservano le loro caratteristiche meccaniche e non si osservano rigonfiamenti, ossidazione, scorrimento sensibile.

Occorrerà, però, occuparsi dell'influenza delle dilatazioni e può essere necessario procedere ad un trattamento termico di stabilizzazione dei getti, in modo che le tensioni interne non si sommino alla tensione di dilatazione.

Per questo campo di temperature vale il complesso di proprietà riconosciuto valido per la temperatura ambiente.

Nel campo delle temperature comprese tra  $673 \div 973$  K ( $400 \div 700$  °C), tutte le ghise subiscono il fenomeno di scorrimento.

A queste temperature, le ghise con matrice perlitica e grafite lamellare subiscono un rigonfiamento dovuto alla decomposizione della cementite della perlite in grafite e ferrite.

Può essere necessario, allora, stabilizzare la perlite con l'aggiunta di elementi come cromo, molibdeno, manganese o stagno e moderare il tenore di silicio che favorisce la grafitizzazione.

La scelta del tipo di ghisa dipende dalle sollecitazioni meccaniche sopportate dal getto, dall'importanza dell'atmosfera ossidante e dal livello di stabilità e della deformazione desiderata.

Alle temperature superiori a  $973 \div 1.123$  K ( $700 \div 850$  °C) per le ghise ordinarie con matrice perlitica e ferri-

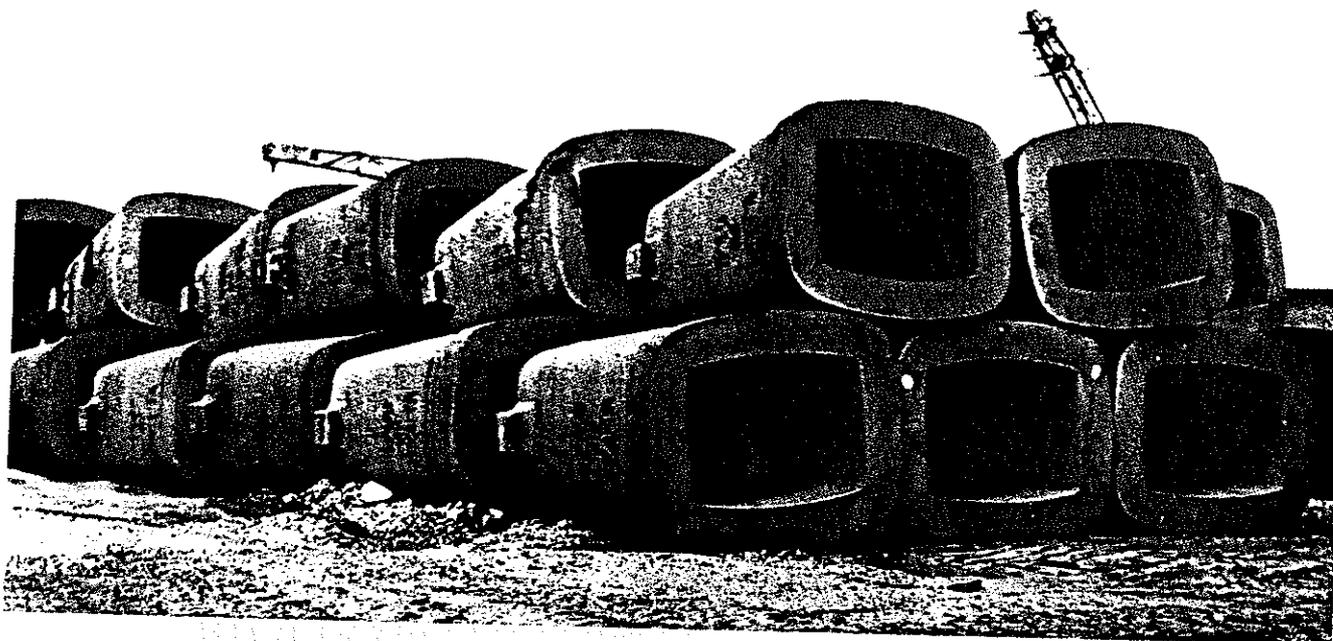


Fig. 417 - Gruppo di lingottiere piatte aperte. Ghisa ematite. Peso 4+42 t.



Fig. 418 - Gruppo di lingottiere a pareti interne ondulate. Ghisa ematite.

tica, si produce la trasformazione  $\alpha \rightarrow \gamma$  che è accompagnata da una contrazione al riscaldamento e da una espansione al raffreddamento.

Quindi, se i passaggi attraverso la temperatura di trasformazione sono frequenti, essi si accompagnano a dislocazioni che possono comportare un rigonfiamento importante ed a favorire l'ossidazione interna. E allora necessario fare appello alle ghise legate i cui punti di trasformazione sono situati a temperature superiori.

Il rigonfiamento e soprattutto la fessurazione si producono molto più facilmente in condizioni cicliche di riscaldamento che a temperatura costante, tanto più quanto importanti sono gli shocks termici.

In effetti, gli shocks termici creano dilatazioni differenti nei diversi punti di un getto, aggravati dalle possibili modificazioni strutturali. Ne risultano concentrazioni di tensioni che possono comportare incrinature o fessurazioni.

Le differenze di dilatazioni sono meno sensibili quanto più elevata è la conducibilità termica; d'altra parte le variazioni rapide di tensione sono tanto meglio sopportate quanto più la lega è *dolce* e non presenta tensioni interne.

Le ghise con carbonio grafiteo elevato (3 ÷ 3,5%) posseggono una conducibilità termica elevata e presentano nella maggior parte dei casi grosse lamelle di grafite che addolciscono l'insieme della struttura. Esse sono particolarmente impiegate per la fabbricazione delle lingottiere per acciaierie.

La resistenza meccanica relativamente modesta di queste ghise può dimostrarsi però insufficiente in certe applicazioni.

Nelle figg. 417 ÷ 419 sono citati alcuni esempi di getti destinati alla siderurgia e per applicazioni termiche.

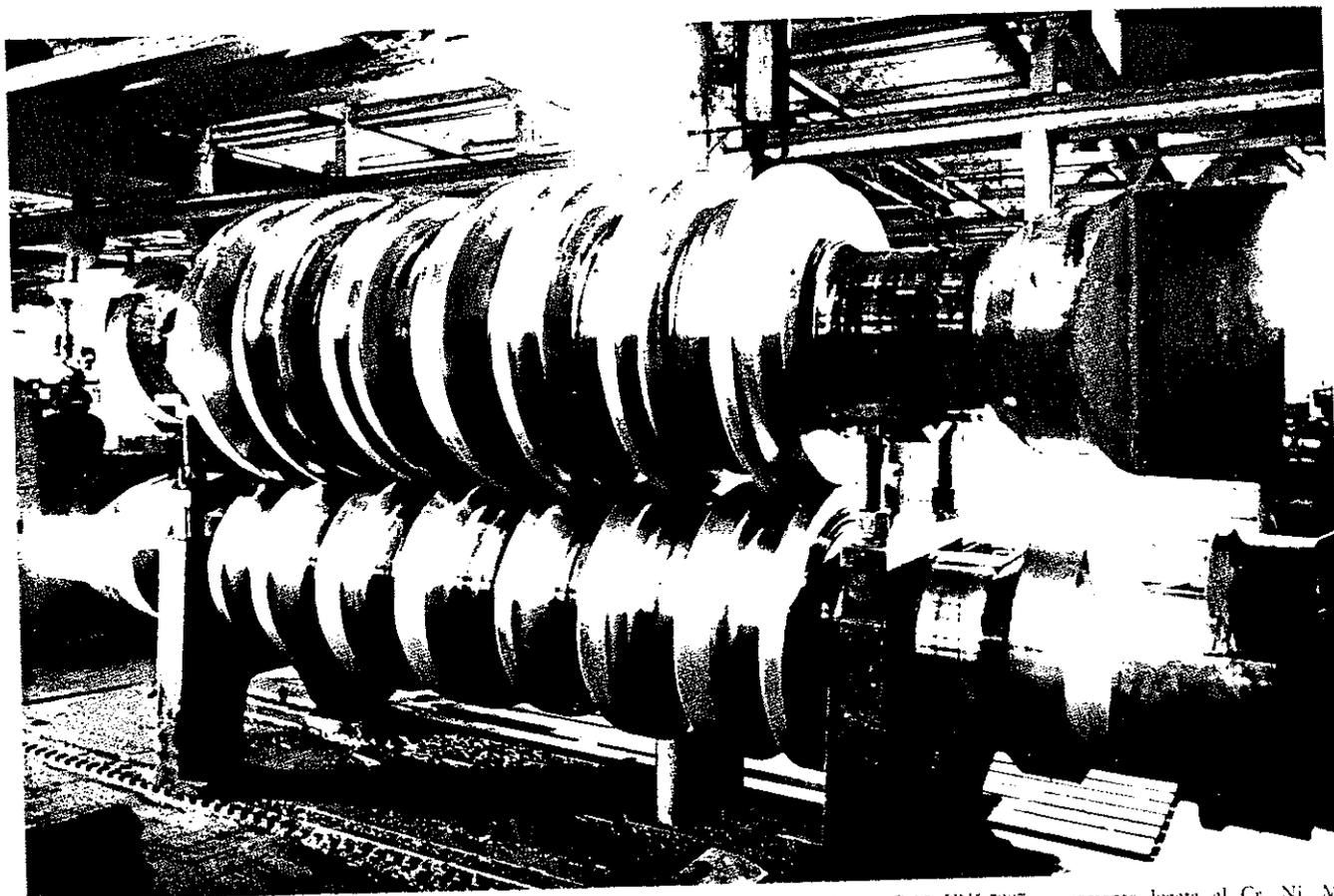


Fig. 419 - Cilindri preparatori con grossi profili in ghisa semidura a temprà indefinita. Ghisa G 35 UNI 5007 tenuemente legata al Cr. Ni. Mo.

## CONCLUSIONI

In questo capitolo è stata posta in evidenza l'importanza applicativa delle ghise grigie nei vari rami industriali e si sono considerate le loro proprietà e caratteristiche principali in funzione di determinati campi d'impiego.

Per ciascuno di essi sono state indicate le prerogative specifiche delle ghise da impiegare e si sono raffigurati alcuni esempi pratici di getti.

Dopo l'esposizione teorica dei vari argomenti connessi con la metallurgia e l'elaborazione delle ghise grigie, questo capitolo vuole rappresentare da un lato un riassunto schematico delle loro più importanti utilizzazioni e dall'altro una guida, per le Fonderie e per i loro clienti, alla conoscenza delle molteplici possibilità offerte dalle ghise, nell'intento anche di sviluppare ulteriormente il loro campo d'impiego.

Si deve, infatti, considerare che per un getto, che deve soddisfare determinate condizioni di esercizio, la scelta del tipo di ghisa da impiegare rappresenta di solito un compromesso fra le specifiche indicate dal Committente, le proposte della Fonderia ed il prezzo del getto; quest'ultimo dipende non soltanto dal tipo di ghisa prescelto, ma anche dal tipo di formatura adottato e dalla conformazione del getto stesso.

La scelta definitiva del tipo di ghisa ed il disegno finale del getto in vista della sua realizzazione, possono essere determinati in maniera soddisfacente soltanto attraverso una stretta collaborazione fra il progettista, la fonderia ed il costruttore.

L'accentuarsi della concorrenza impone ai costruttori di ricorrere a tutte le risorse del progresso tecnico, alla ricerca di soluzioni sempre più economiche e sicure.

Se alcune volte i progettisti ed i meccanici manifestano diffidenza o dubbi nell'accettare l'impiego delle ghise è anche perché non sempre le Fonderie hanno saputo esporre e consigliare le soluzioni più adatte sia dal lato dell'esecuzione dei getti, sia dal lato della scelta del tipo di ghisa.

Si deve fare capire che la ghisa per getti è un materiale moderno sotto tutti gli aspetti e che presenta vantaggi tecnici ed economici rispetto ad altre soluzioni. Chiarire e spiegare ai clienti questi fatti è uno dei più importanti obiettivi per tutte le Fonderie che potranno in questo modo salvaguardare anche il loro futuro.

Per concludere, si elencano sommariamente le seguenti linee di condotta per le Fonderie:

- Necessità di una coscienza professionale; esse debbono fornire ai Committenti sempre e costantemente il meglio delle loro possibilità.
- Collaborazione con il Committente ad ogni livello della sua attività produttiva: dalla progettazione alla costruzione.
- Diffusione delle possibilità offerte dai getti di ghisa per le specifiche applicazioni.
- Controllo sistematico delle qualità dei getti forniti.

## **Appendice**



## UNITA' DI MISURA DEL SISTEMA INTERNAZIONALE (SI)

La Gazzetta Ufficiale delle Comunità Europee No. L 262 del 27 settembre 1976 ha pubblicato la Direttiva del Consiglio del 27 luglio 1976 No. 76/770/CEE che modifica la Direttiva No. 71/354/CEE riguardante il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relative alle unità di misura.

Come è possibile rilevare dal testo della Direttiva — che si riporta integralmente — i termini di attuazione della disposizione sono scaglionati nel tempo in quattro scadenze successive e precisamente:

- 31 dicembre 1977: Data entro la quale gli Stati membri *vietano* l'impiego delle unità di misura definite al capitolo B dell'allegato.
- 21 aprile 1978: Data entro la quale *deve essere reso obbligatorio* il disposto del capitolo A dell'allegato.
- 31 dicembre 1979: Data entro la quale gli Stati membri *vietano* l'impiego delle unità di misura definite al capitolo C dell'allegato.
- 31 dicembre 1979: Data entro la quale sarà esaminata la situazione delle unità di misura, dei nomi e dei simboli riportati nel capitolo D dell'allegato.

Si ricordano brevemente alcuni dei concetti delle grandezze fisiche, di interesse per le Fonderie, che sono riportati nella Direttiva, in quanto le rispettive unità di misura, nomi e simboli sono stati modificati [vedere anche la norma CNR UNI 10003 « Sistema internazionale di unità (SI) »].

### Massa

È la grandezza fisica che esprime la quantità di materia costituente un corpo ed ha carattere additivo, cioè la massa di un corpo è la somma delle masse delle parti che lo costituiscono.

### Forza

Se un corpo ha massa  $m$  ed è dotato di una accelerazione  $\bar{a}$ , il prodotto  $\bar{F} = m\bar{a}$  dicesi forza agente sul corpo.

### Lavoro

Dicesi lavoro il prodotto della forza per lo spostamento in direzione della forza.

### Energia

L'energia di un corpo è la capacità di questo a produrre lavoro, cioè ad applicare una forza per un certo spostamento.

### Quantità di calore

È la quantità di energia che viene scambiata tra due sistemi o tra sistema ed ambiente a differenti temperature, con la tendenza a raggiungere la condizione di equilibrio termico.

### Tensione e Pressione

Data una forza qualsiasi  $dF$  agente su una superficie  $ds$ , si definisce come tensione normale o pressione, il rapporto tra la componente della forza normale alla superficie e la superficie stessa:

$$\sigma = \frac{dF_n}{ds}$$

e come tensione tangenziale il rapporto tra la componente tangente alla superficie e la superficie stessa:

$$\tau = \frac{dF_t}{ds}$$

Si richiama l'attenzione sul fatto che, alla prima delle scadenze stabilite dalla Direttiva — cioè il 31 dicembre 1977 — fra le grandezze, nomi di unità e simboli, il cui impiego è vietato, vi sono alcune grandezze di particolare interesse, quali:

### Forza

Il kilogrammo-forza (simbolo kgf), fino ad oggi impiegato, è sostituito dal newton (simbolo N). Fra le due unità esiste la seguente relazione:  $1 \text{ kgf} = 9,80665 \text{ N} (\approx 9,81 \text{ N})$  (vedere anche UNI 7202 « Prospetti di conversione-kilogrammi forza-newton e newton-kilogrammi forza »).

Nota - Le caratteristiche meccaniche di resistenza a trazione ed a compressione sono, conseguentemente, espresse in newton al millimetro quadrato ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ).

### Pressione

Le varie unità di misura attualmente utilizzate (torr; simbolo torr; atmosfera tecnica; simbolo at; metro d'acqua; simbolo  $\text{mH}_2\text{O}$ ; millimetro di mercurio; simbolo mmHg) devono essere sostituite dal pascal (simbolo Pa) che è la nuova unità di misura della pressione e tensione. Il pascal con le precitate unità di misura sta nei seguenti rapporti:

$$\begin{aligned} 1 \text{ torr} &= \frac{101325}{760} \text{ Pa} \\ 1 \text{ at} &= 98066,5 \text{ Pa} \\ 1 \text{ mH}_2\text{O} &= 9806,65 \text{ Pa} \\ 1 \text{ mmHg} &= 133,322 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Nota - Per indicare la pressione dei fluidi si impiega, di regola, l'unità bar ( $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ ).

### Massa

Altra unità di misura comunemente usata, della quale si dovrà fare a meno, è il quintale (equivalente a 100 kg) per la quale non esisterà più una unità corrispondente.

Allo scopo di agevolare le Fonderie, sono state predisposte alcune tabelle nelle quali sono riassunte le principali grandezze, nomi di unità e simboli fino ad oggi utilizzati e per ognuna è fornita la comparazione con le nuove unità internazionali. La tab. LXXXV riguarda le grandezze geometriche, mentre la tab. LXXXVI si riferisce alle grandezze fisiche.

Tabella LXXXV - Tabella di comparazione fra le principali unità di misura in uso e le nuove unità e simboli del sistema internazionale (SI).

Grandezze geometriche

Unità di misura e simboli in uso	Nuove unità e simboli del sistema internazionale
<b>LUNGHEZZA</b>	
metro (simbolo: m)	metro (simbolo: m)
<b>AREA</b>	
metro quadrato (simbolo: m <sup>2</sup> )	metro quadrato (simbolo: m <sup>2</sup> )
<b>VOLUME E CAPACITA'</b>	
metro cubo (simbolo: m <sup>3</sup> ) litro (simbolo: l = 1 dm <sup>3</sup> )	metro cubo (simbolo: m <sup>3</sup> ) litro (simbolo: l = 1 dm <sup>3</sup> ) *
<b>ANGOLI PIANI</b>	
grado (simbolo: °)	grado radiante (simbolo: rad) grado sessagesimale (simbolo: °) = $\frac{\pi}{180}$ rad

\* Unità non SI ammessa.

Tabella LXXXVI - Tabella di comparazione fra le principali unità di misura in uso e le nuove unità e simboli del sistema internazionale (SI).

Grandezze fisiche

Unità di misura e simboli in uso	Nuove unità e simboli del sistema internazionale
<b>TEMPO</b>	
secondo (simbolo: s) minuto (simbolo: min) * ora (simbolo: h) * giorno (simbolo: d) *	secondo (simbolo: s) minuto (simbolo: min) = 60 s * ora (simbolo: h) = 3.600 s * giorno (simbolo: d) = 86.400 s *
<b>TEMPERATURA CELSIUS</b>	
grado Celsius (simbolo: °C) (o grado centigrado)	grado Celsius (simbolo: °C)
N.B. - L'unità grado Celsius può essere utilizzata per definire un intervallo o una differenza di temperatura. La temperatura Celsius è definita dalla differenza $t = T - T_0$ tra due temperature termodinamiche T e $T_0$ dove $T_0 = 273,15$ kelvin. L'unità grado Celsius è comunque uguale all'unità Kelvin.	
<b>TEMPERATURA TERMODINAMICA</b>	
T espressa in gradi Celsius	$t + T_0$ (espressa in kelvin) $T_0 = 273,15$ kelvin (simbolo: K)
<b>MASSA</b>	
tonnellata (simbolo: t) * quintale (simbolo: q) * kilogrammo (simbolo: kg) grammo (simbolo: g) *	tonnellata (simbolo: t) * 100 kilogrammi (non esiste un simbolo per tale unità) kilogrammo (simbolo: kg) grammo (simbolo: g)

\* Grandezze derivate e relativi simboli.

(segue tab. LXXXVI)

Unità di misura e simboli in uso	Nuove unità e simboli del sistema internazionale
<b>FORZA</b>	
kilogrammo-forza (simbolo: kgf) N.B. - Tale unità era anche chiamata kilopond (simbolo: kp)	newton (simbolo: N) (1 kgf $\approx$ 9,81 N)
<b>ENERGIA, LAVORO, QUANTITÀ DI CALORE</b>	
kilogrammetro (simbolo: kgf.m) caloria (simbolo: cal) termia (simbolo: th) frigoria (simbolo: fg)	joule (simbolo: J) (1 kg · m $\approx$ 9,81 J) joule (1 cal = 4,185 J) joule (1 th = 4,185 · 10 <sup>6</sup> J) joule (1 fg = 4,185 · 10 <sup>3</sup> J)
<b>POTENZA</b>	
cavallo vapore (simbolo: CV)	Watt (simbolo: W) (1 CV = 735,498 W)
<b>PRESSIONE E TENSIONE</b>	
atmosfera tecnica (simbolo: at) atmosfera normale (simbolo: atm) millimetro di mercurio (simbolo: mmHg) metro d'acqua (simbolo: mH <sub>2</sub> O) torr (simbolo: torr) bar (simbolo: bar)	pascal (simbolo: Pa) (1 at = 98066,5 Pa) (1 atm = 101325 Pa) (1 mmHg = 133,322 Pa) (1 mH <sub>2</sub> O = 9806,65 Pa) (1 torr = $\frac{101325}{760}$ Pa) (1 bar = 10 <sup>5</sup> Pa)

## DIRETTIVA DEL CONSIGLIO

del 27 luglio 1976

che modifica la direttiva 71/354/CEE per il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relative alle unità di misura

(76/770/CEE)

IL CONSIGLIO DELLE COMUNITA EUROPEE,

HA ADOTTATO LA PRESENTE DIRETTIVA :

visto il trattato che istituisce la Comunità economica europea, in particolare l'articolo 100,

### Articolo 1

visto l'atto di adesione, in particolare l'articolo 29,

L'articolo 1 della direttiva 71/354/CEE è sostituito dal seguente testo :

vista la direttiva 71/354/CEE del Consiglio, del 18 ottobre 1971, per il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relative alle unità di misura <sup>(1)</sup>, modificata dall'atto di adesione, in particolare l'articolo 1, paragrafo 4,

### « Articolo 1

vista la proposta della Commissione,

1. Gli Stati membri rendono obbligatorio il disposto del capitolo A dell'allegato entro il 21 aprile 1978 al più tardi.

visto il parere del Parlamento europeo <sup>(2)</sup>,

2. Gli Stati membri vietano l'impiego dopo il 31 dicembre 1977 al più tardi delle unità di misura definite al capitolo B dell'allegato.

visto il parere del Comitato economico e sociale <sup>(3)</sup>,

3. Gli Stati membri vietano l'impiego dopo il 31 dicembre 1979 al più tardi delle unità di misura definite al capitolo C dell'allegato.

considerando che, in applicazione dell'atto di adesione, è stato previsto di decidere entro il 31 agosto 1976 di classificare nell'allegato I della direttiva 71/354/CEE le unità di misura di cui all'allegato II ;

4. La situazione delle unità di misura, dei nomi e dei simboli riportati nel capitolo D dell'allegato sarà esaminata entro il 31 dicembre 1979.

considerando che, in applicazione della direttiva 71/354/CEE, si prevede di esaminare prima del 31 dicembre 1977 la situazione delle unità e dei nomi di unità riportati nel capitolo II dell'allegato I della presente direttiva ;

5. L'obbligo d'impiego delle unità di misura mantenute temporaneamente alle condizioni stabilite ai capitoli B, C e D dell'allegato non può essere introdotto dagli Stati membri in cui tali unità non sono autorizzate a decorrere dal 21 aprile 1973. »

considerando che la quindicesima conferenza generale dei pesi e delle misure (CGPM), riunitasi il 27 maggio 1975 a Parigi su convocazione del comitato internazionale dei pesi e delle misure (CIPM), ha adottato nuove risoluzioni internazionali che riguardano il sistema internazionale di unità,

### Articolo 2

Nella direttiva 71/354/CEE è inserito il seguente articolo :

### « Articolo 2 bis

Gli Stati membri possono autorizzare l'uso di prodotti, attrezzature e strumenti per i quali si utilizzano unità di misura non autorizzate dalla presente direttiva, già immessi sul mercato prima delle date previste dalla medesima, nonché la fabbrica-

<sup>(1)</sup> GU n. L 243 del 29. 10. 1971, pag. 29.

<sup>(2)</sup> GU n. C 125 dell'8. 6. 1976, pag. 9.

<sup>(3)</sup> GU n. C 131 del 12. 6. 1976, pag. 55.

zione, l'immissione in commercio e l'utilizzazione di prodotti e di attrezzature necessari per completare o per sostituire pezzi o parti di detti prodotti, attrezzature e strumenti. »

#### *Articolo 3*

Gli allegati I e II della direttiva 71/354/CEE sono sostituiti dall'allegato della presente direttiva.

#### *Articolo 4*

1. Gli Stati membri mettono in vigore le disposizioni legislative, regolamentari e amministrative necessarie per conformarsi alla presente direttiva entro il 31 dicembre 1977 al più tardi e ne informano immediatamente la Commissione.

2. Gli Stati membri provvedono a comunicare alla Commissione il testo delle disposizioni essenziali di diritto interno che essi adottano nel settore disciplinato dalla presente direttiva.

#### *Articolo 5*

Gli Stati membri sono destinatari della presente direttiva.

Fatto a Bruxelles, addì 27 luglio 1976.

*Per il Consiglio*

*Il Presidente*

M. van der STOEL

## ALLEGATO

### INDICE

#### Capitolo A: Unità di misura il cui impiego deve essere reso obbligatorio entro il 21 aprile 1978 al più tardi

1. Unità SI, loro multipli e sottomultipli decimali
- 1.1. Unità SI di base
- 1.2. Altre unità SI
- 1.3. Prefissi e loro simboli che servono a designare taluni multipli e sottomultipli decimali
- 1.4. Nomi e simboli speciali autorizzati
2. Unità definite in base alle unità SI ma che non sono multipli e sottomultipli decimali di queste
3. Unità definite indipendentemente dalle sette unità SI di base
4. Unità e nomi di unità ammessi unicamente in settori di applicazione specializzati
5. Unità composte

#### Capitolo B: Unità di misura disciplinate dall'articolo 1, paragrafo 2

6. Unità speciali
7. Caso speciale della temperatura
8. Unità del sistema imperiale

#### Capitolo C: Unità di misura disciplinate dall'articolo 1, paragrafo 3

9. Unità del sistema imperiale
10. Unità CGS
11. Altre unità

#### Capitolo D: Unità, nomi e simboli contemplati dall'articolo 1, paragrafo 4

12. Unità del sistema imperiale
13. Altre unità
14. Unità composte (utilizzate temporaneamente)

## CAPITOLO A

UNITÀ DI MISURA IL CUI IMPIEGO DEVE ESSERE RESO OBBLIGATORIO ENTRO IL  
21 APRILE 1978 AL PIÙ TARDI

### 1. UNITÀ SI, LORO MULTIPLI E SOTTOMULTIPLI DECIMALI

#### 1.1. Unità SI di base

Grandezza	Unità	
	nome	simbolo
Lunghezza	metro	m
Massa	chilogrammo	kg
Tempo	secondo	s
Intensità di corrente elettrica	ampère	A
Temperatura termodinamica	kelvin	K
Quantità di materia	mole	mol
Intensità luminosa	candela	cd

Le definizioni delle unità SI di base sono le seguenti:

#### *Unità di lunghezza*

Il metro è la lunghezza pari a 1 650 763,73 lunghezze d'onda nel vuoto della radiazione corrispondente alla transizione fra i livelli  $2p_{10}$  e  $5d_5$  dell'atomo di cripto 86.

(11<sup>a</sup> CGMP, 1960, ris. 6).

#### *Unità di massa*

Il chilogrammo è l'unità di massa; esso è pari alla massa del prototipo internazionale del chilogrammo.

(3<sup>a</sup> CGMP, 1901, pag. 70 del resoconto).

#### *Unità di tempo*

Il secondo è la durata di 9 192 631 770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione fra i due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo del cesio 133.

(13<sup>a</sup> CGMP, 1967, ris. 1)

#### *Unità di intensità di corrente elettrica*

L'ampère è l'intensità di una corrente elettrica costante che, percorrendo due conduttori paralleli rettilinei, di lunghezza infinita, di sezione circolare trascurabile, posti alla distanza di un metro l'uno dall'altro nel vuoto, produrrebbe fra questi conduttori una forza eguale a  $2 \times 10^{-7}$  newton su ogni metro di lunghezza.

(CIPM, 1946, ris. 2, approvata dalla 9<sup>a</sup> CGPM, 1948)

### Unità di temperatura termodinamica

Il kelvin, unità di temperatura termodinamica, è la frazione  $1/273,16$  della temperatura termodinamica del punto triplo dell'acqua.

(13<sup>a</sup> CGMP, 1967, ris. 4).

### Unità di quantità di materia

La mole è la quantità di materia di un sistema che contiene tante entità elementari quanti sono gli atomi in 0,012 chilogrammi di carbonio 12.

Quando si usa la mole, le entità elementari devono essere specificate; esse possono essere atomi, molecole, ioni, elettroni, altre particelle, oppure raggruppamenti specificati di tali particelle.

(14<sup>a</sup> CGMP, 1971, ris. 3).

### Unità di intensità luminosa

La candela è l'intensità luminosa, nella direzione perpendicolare, di una superficie di  $1/600\,000$  di metro quadrato di un corpo nero alla temperatura di solidificazione del platino sotto la pressione di 101 325 newton al metro quadrato.

(13<sup>a</sup> CGMP, 1967, ris. 5).

#### 1.1.1. Nome e simbolo speciali dell'unità SI di temperatura nel caso della temperatura Celsius

Grandezza	Unità	
	nome	simbolo
Temperatura Celsius	grado Celsius	°C

La temperatura Celsius  $t$  è definita dalla differenza  $t = T - T_0$  tra due temperature termodinamiche  $T$  e  $T_0$  con  $T_0 = 273,15$  kelvin. Un intervallo o una differenza di temperatura possono essere espressi in kelvin o in gradi Celsius. L'unità « grado Celsius » è uguale all'unità « kelvin ».

## 1.2. Altre unità SI

### 1.2.1. Unità supplementari SI

Grandezza	Unità	
	nome	simbolo
Angolo piano	radiante	rad
Angolo solido	steradiano	sr

(11<sup>a</sup> CGMP, 1960, ris. 12).

Le definizioni delle unità supplementari SI sono le seguenti:

#### Unità di angolo piano

Il radiante è l'angolo piano compreso tra due raggi che, sulla circonferenza di un cerchio, intercettano un arco di lunghezza pari a quella del raggio

(racc. ISO R/31/1, 2<sup>a</sup> ed., dicembre 1965).

### Unità di angolo solido

Lo steradiano è l'angolo solido che, avendo il vertice al centro di una sfera, delimita sulla superficie di questa un'area pari a quella di un quadrato di lato uguale al raggio della sfera.

(racc. ISO R/31/1, 2ª ed., dicembre 1965).

### 1.2.2. Unità derivate SI

Le unità derivate in modo coerente dalle unità SI di base e dalle unità supplementari SI vengono indicate mediante espressioni algebriche sotto forma di prodotti di potenze delle unità SI di base e delle unità supplementari SI con un fattore numerico pari ad 1.

### 1.2.3. Unità derivate SI che hanno nomi e simboli speciali

Grandezza	Unità		Espressione	
	nome	simbolo	in altre unità SI	in unità SI di base o supplementari
Frequenza	hertz	Hz		$s^{-1}$
Forza	newton	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
Pressione e tensione	pascal	Pa	$N \cdot m^{-2}$	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
Energia, lavoro, quantità di calore	joule	J	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
Potenza <sup>(1)</sup>	watt	W	$J \cdot s^{-1}$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
Quantità di elettricità, carica elettrica	coulomb	C		$s \cdot A$
Tensione elettrica, potenziale elettrico, forza elettromotrice	volt	V	$W \cdot A^{-1}$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
Resistenza elettrica	ohm	$\Omega$	$V \cdot A^{-1}$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
Conduttanza elettrica	siemens	S	$A \cdot V^{-1}$	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
Capacità elettrica	farad	F	$C \cdot V^{-1}$	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
Flusso magnetico	weber	Wb	$V \cdot s$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Induzione magnetica	tesla	T	$Wb \cdot m^{-2}$	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Induttanza elettrica	henry	H	$Wb \cdot A^{-1}$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
Flusso luminoso	lumen	lm		cd · sr
Illuminamento	lux	lx	$lm \cdot m^{-2}$	$m^{-2} \cdot cd \cdot sr$
Attività	becquerel	Bq		$s^{-1}$
Dose assorbita <sup>(2)</sup>	gray	Gy	$J \cdot kg^{-1}$	$m^2 \cdot s^{-2}$

<sup>(1)</sup> Nomi speciali dell'unità di potenza: il nome « voltampère », simbolo « VA », per esprimere la potenza apparente della corrente elettrica alternata e il nome « var », simbolo « var », per esprimere la potenza elettrica reattiva. Il nome « var » non è incluso in risoluzioni della CGPM.

<sup>(2)</sup> Ed altre grandezze di identiche dimensioni per le radiazioni ionizzanti.

Alcune unità derivate dalle unità di base SI possono essere espresse impiegando le unità del capitolo A.

In particolare, alcune unità derivate SI possono essere espresse con i nomi e i simboli speciali riportati nella tabella di cui sopra, per esempio: l'unità SI della viscosità dinamica può essere espressa come  $m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$  oppure  $N \cdot s \cdot m^{-2}$  oppure Pa · s.

1.3. Prefissi e loro simboli che servono a designare taluni multipli e sottomultipli decimali

Fattore	Prefisso	Simbolo	Fattore	Prefisso	Simbolo
$10^{18}$	exa	E	$10^{-1}$	deci	d
$10^{15}$	peta	P	$10^{-2}$	centi	c
$10^{12}$	tera	T	$10^{-3}$	milli	m
$10^9$	giga	G	$10^{-6}$	micro	$\mu$
$10^6$	mega	M	$10^{-9}$	nano	n
$10^3$	chillo	k	$10^{-12}$	pico	p
$10^2$	etto	h	$10^{-15}$	femto	f
$10^1$	deca	da	$10^{-18}$	atto	a

I nomi ed i simboli dei multipli e sottomultipli decimali dell'unità di massa vengono formati mediante l'aggiunta dei prefissi alla parola « grammo » e dei loro simboli al simbolo « g ».

Per designare alcuni multipli e sottomultipli decimali di un'unità derivata la cui espressione si presenta sotto forma di una frazione, un prefisso può essere legato indifferentemente alle unità che figurano al numeratore, al denominatore o in entrambi.

Sono vietati i prefissi composti, cioè formati mediante giustapposizione di più prefissi di cui sopra.

1.4. Nomi e simboli speciali autorizzati

1.4.1. Nomi e simboli speciali di multipli e sottomultipli decimali di unità SI

Grandezza	Unità		
	nome	simbolo	relazione
Volume	litro	l	$1 \text{ l} = 1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$
Massa	tonnellata	t	$1 \text{ t} = 1 \text{ Mg} = 10^3 \text{ kg}$
Pressione e tensione	bar	bar	$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$

1.4.2. Nomi e simboli speciali di multipli e sottomultipli decimali di unità SI il cui impiego è riservato a settori di applicazione specializzati

Grandezza	Unità		
	nome	simbolo	relazione
Area delle superfici agrarie e dei fondi	ara	a	$1 \text{ a} = 10^2 \text{ m}^2$
Massa lineare delle fibre tessili e dei filati	tex* <sup>(1)</sup>	tex*	$1 \text{ rex} = 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$

<sup>(1)</sup> Il segno \* dopo un nome o un simbolo di unità ricorda che questi non figurano negli elenchi compilati dalla CGPM, dalla CIPM o dal BIPM. Questa osservazione si applica al presente allegato nel suo complesso.

**Avvertenza:** I prefissi ed i simboli di cui al punto 1.3 si applicano alle unità ed ai simboli elencati nelle tabelle dei punti 1.4.1 e 1.4.2.

Il multiplo  $10^2 \text{ a}$  è nondimeno denominato « ettaro ».

2. UNITÀ DEFINITE IN BASE ALLE UNITÀ SI MA CHE NON SONO MULTIPLI O SOTTO-MULTIPLI DECIMALI DI QUESTE

Grandezza	Unità		
	nome	simbolo	relazione
Angolo piano	angolo giro* (a)		1 angolo giro = $2\pi$ rad
	grado centesimale* oppure gon*	gon*	1 gon = $\frac{\pi}{200}$ rad
	grado sessagesimale	°	1° = $\frac{\pi}{180}$ rad
	minuro d'angolo	'	1' = $\frac{\pi}{10\,800}$ rad
	secondo d'angolo	"	1" = $\frac{\pi}{648\,000}$ rad
Tempo	minuto	min	1 min = 60 s
	ora	h	1 h = 3 600 s
	giorno	d	1 d = 86 400 s

(a) Non esiste un simbolo internazionale.

**Avvertenza:** I prefissi di cui al punto 1.3 si applicano soltanto ai nomi « grado » e « gon » ed i relativi simboli soltanto al simbolo « gon ».

3. UNITÀ DEFINITE INDIPENDENTEMENTE DALLE SETTE UNITÀ SI DI BASE

L'unità di massa atomica è pari a  $\frac{1}{12}$  della massa di un atomo del nuclide  $^{12}\text{C}$ .

L'elettronvolt è l'energia cinetica acquisita da un elettrone che passa nel vuoto da un punto ad un altro che abbia un potenziale superiore di 1 volt.

Grandezza	Unità		
	nome	simbolo	valore
Massa	Unità di massa atomica	$\mu$	1 u $\approx 1,6605655 \cdot 10^{-27}$ kg
Energia	Elettronvolt	eV	1 eV $\approx 1,6021892 \cdot 10^{-19}$ J

Il valore di queste unità, espresso in unità SI, non è conosciuto esattamente. I valori indicati sono estratti dal bollettino CODATA n. 11, del dicembre 1973, del Consiglio internazionale delle Unioni scientifiche.

**Avvertenza:** A queste due unità ed ai loro simboli si applicano i prefissi ed i simboli di cui al punto 1.3.

4. UNITÀ E NOMI DI UNITÀ AMMESSI UNICAMENTE IN SETTORI DI APPLICAZIONE SPECIALIZZATI

Grandezza	Unità	
	nome	va ore
Vergenza dei sistemi ottici	diottria*	1 diottria = $1\text{ m}^{-1}$
Massa delle pietre preziose	carato metrico	1 carato metrico = $2 \cdot 10^{-4}$ kg

**Avvertenza:** A queste unità si applicano i prefissi di cui al punto 1.3.

5. UNITÀ COMPOSTE

Combinando le unità citate al capitolo A si formano unità composte.

## CAPITOLO B

### UNITÀ DI MISURA DISCIPLINATE DALL'ARTICOLO 1, PARAGRAFO 2

#### 6. UNITÀ SPECIALI

Grandezze, nomi di unità, simboli e valori

##### 6.1. Volume (economia forestale e commercio del legno)

Festmeter*	1 Fm* = 1 m <sup>3</sup>
Raummeter*	1 Rm* = 1 m <sup>3</sup>

##### 6.2. Forza

Chilogrammo forza	} = 9,806 65 N
Chilopond*	

##### 6.3. Pressione

Torr	$1 \text{ torr} = \frac{101325}{760} \text{ Pa}$
Atmosfera tecnica*	1 at* = 98 066,5 Pa
Metro d'acqua*. (convenzionale: 1 mH <sub>2</sub> O)	1 mH <sub>2</sub> O* = 9 806,65 Pa
Millimetro di mercurio* (1) (convenzionale: 1 mmHg)	1 mmHg* = 133,322 Pa

##### 6.4. Potenza

Pferdestärke*	} = 735,498 75 W
Paardekracht*	
Cheval vapeur*	
Cavallo vapore*	

##### 6.5. Quantità di calore

Caloria 15 °C*	1 cal <sub>15</sub> * = 4,185 5 J
Termia*	1 th* = 4,185 5 · 10 <sup>6</sup> J
Frigoria*	1 fg* = 4,185 5 · 10 <sup>9</sup> J
Caloria I.T.	1 cal <sub>I.T.</sub> = 4,186 8 J
Caloria termochimica*	1 cal <sub>th</sub> * = 4,184 J

##### 6.6. Luminanza

Stilb	1 sb = 10 <sup>4</sup> cd · m <sup>-2</sup>
-------	---

*Avvertenza:* I prefissi ed i simboli di cui al punto 1.3 si applicano alle unità ed ai simboli di cui ai punti 6.5 e 6.6, al torr ed al metro d'acqua (punto 6.3).

#### 7. CASO SPECIALE DELLA TEMPERATURA

La denominazione « grado kelvin » ed il simbolo « °K » (in luogo di « kelvin », simbolo « K ») potranno venire utilizzati sino al 31 dicembre 1977.

(1) Eccettuato il caso della misurazione della « tensione arteriosa » (pressione sanguigna): vedi capitolo C, punto 11.

## 8. UNITÀ DEL SISTEMA IMPERIALE\*

### Grandezze, nomi di unità, simboli e valori approssimati

#### 8.1. Lunghezza

Chain	1 chain = 20,12 m
Furlong	1 fur = 201,2 m
Nautical Mile (UK)	1 nautical mile = 1853 m

#### 8.2. Area

Rood	1 rood = 1012 m <sup>2</sup>
------	------------------------------

#### 8.3. Volume

Cubic yard	1 cu yd = 0,7646 m <sup>3</sup>
Bushel	1 bu = 36,37 · 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>

#### 8.4. Massa

Dram	1 dr = 1,772 · 10 <sup>-3</sup> kg
Cental	1 ctl = 45,36 kg

#### 8.5. Pressione

Inch of Water	1 in H <sub>2</sub> O = 249,089 Pa
---------------	------------------------------------

#### 8.6. Forza

Ton-force	1 tonf = 9,964 · 10 <sup>3</sup> N
-----------	------------------------------------

#### 8.7. Illuminamento

Foot Candle	1 ft candle = 10,76 lx
-------------	------------------------

#### 8.8. Velocità

Knot (UK)	1 knot = 0,51477 m · s <sup>-1</sup>
-----------	--------------------------------------

CAPITOLO C

UNITÀ DI MISURA DISCIPLINATE DALL'ARTICOLO 1, PARAGRAFO 3

9. UNITÀ DEL SISTEMA IMPERIALE\*

Grandezze, nomi di unità, simboli e valori approssimati

9.1. Lunghezza

Hand	1 hand = 0,1016 m
Yard	1 yd = 0,9144 m

9.2. Area

Square inch	1 sq in = $6,452 \cdot 10^{-4}$ m <sup>2</sup>
Square yard	1 sq yd = 0,8361 m <sup>2</sup>
Square mile	1 sq mile = $2,59 \cdot 10^6$ m <sup>2</sup>

9.3. Volume

Cubic inch	1 cu in = $16,39 \cdot 10^{-6}$ m <sup>3</sup>
Cubic foot	1 cu ft = 0,0283 m <sup>3</sup>
Cran	1 cran = $170,5 \cdot 10^{-3}$ m <sup>3</sup>

9.4. Massa

Grain	1 gr = $0,0648 \cdot 10^{-3}$ kg
Stone	1 st = 6,35 kg
Quarter	1 qr = 12,70 kg
Hundredweight	1 cwt = 50,80 kg
Ton	1 ton = 1016 kg

9.5. Forza

Pound-force	1 lbf = 4,448 N
-------------	-----------------

9.6. Energia

British Thermal Unit	1 Btu = 1055,06 J
Foot Pound-force	1 ft lbf = 1,356 J
Therm	1 therm = $105,506 \cdot 10^6$ J

9.7. Potenza

Horsepower	1 hp = 745,7 W
------------	----------------

9.8. Temperatura

Degree Fahrenheit	$1^{\circ}\text{F} = \left(\frac{5}{9}\right) \text{K}$
-------------------	---

10. UNITÀ CGS

Grandezze, nomi di unità, simboli e valori

Grandezza	Unità		
	nome	simbolo	va ore
Forza	dina	dyn	1 dyn = $10^{-5}$ N
Energia	erg	erg	1 erg = $10^{-7}$ J
Viscosità dinamica	poise	P	1 P = $10^{-1}$ Pa · s
Viscosità cinematica	stoke	St	1 St = $10^{-4}$ m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup>
Accelerazione di gravità	gal	Gal	1 Gal = $10^{-2}$ m · s <sup>-2</sup>

## 11. ALTRE UNITÀ

Grandezze, nomi di unità, simboli e valori

Grandezza	Unità		
	nome	simbolo	valore
Lunghezza d'onda, distanze atomiche	ångström	Å	1 Å = 10 <sup>-10</sup> m
Sezione efficace	barn	b	1 b = 10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
Massa	quintale* (a)		1 quintale = 10 <sup>2</sup> kg
Pressione	atmosfera normale	atm	1 atm = 101 325 Pa
Tensione arteriosa (Pressione sanguigna)	millimetro di mercurio* (convenzionale: 1 mmHg)	mmHg*	1 mmHg = 133,322 Pa
Volume (economia forestale e commercio del legno)	stero	st	1 st = 1 m <sup>3</sup>

(a) Non esiste un simbolo internazionale.

**Avvertenza:** I prefissi ed i simboli di cui al punto 1.3 si applicano alle unità ed ai simboli che figurano ai punti 10 e 11, ad eccezione del quintale.

## CAPITOLO D

### UNITÀ, NOMI E SIMBOLI CONTEMPLATI DALL'ARTICOLO 1, PARAGRAFO 4

#### 12. UNITÀ DEL SISTEMA IMPERIALE\*

Grandezze, nomi di unità, simboli e valori approssimati

##### 12.1. Lunghezza

Inch	1 in = $2,54 \cdot 10^{-2}$ m
Foot	1 ft = 0,3048 m
Fathom <sup>(1)</sup>	1 fm = 1,829 m
Mile	1 mile = 1609 m

##### 12.2. Area

Square foot	1 sq ft = $0,929 \cdot 10^{-1}$ m <sup>2</sup>
Acre	1 ac = 4047 m <sup>2</sup>

##### 12.3. Volume

Fluid ounce	1 fl oz = $28,41 \cdot 10^{-6}$ m <sup>3</sup>
Gill	1 gill = $0,1421 \cdot 10^{-3}$ m <sup>3</sup>
Pint	1 pt = $0,5683 \cdot 10^{-3}$ m <sup>3</sup>
Quarr	1 qt = $1,137 \cdot 10^{-3}$ m <sup>3</sup>
Gallon	1 gal = $4,546 \cdot 10^{-3}$ m <sup>3</sup>

##### 12.4. Massa

Ounce (avoirdupois)	1 oz = $28,35 \cdot 10^{-3}$ kg
Troy ounce	1 oz tr = $31,10 \cdot 10^{-3}$ kg
Pound	1 lb = 0,4536 kg

<sup>(1)</sup> Utilizzato unicamente per la navigazione marittima.

#### 13. ALTRE UNITÀ

Grandezze, nomi di unità, simboli e valori

Grandezza	Unità		
	nome	simbolo	valore
Attività di una sorgente radioattiva	curie	Ci	1 Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq
Angolo piano		g <sup>°</sup> <sup>(1)</sup>	1 g = $\frac{\pi}{200}$ rad
Dose assorbita	rad	rd <sup>(2)</sup>	1 rd = $10^{-2}$ Gy
Dose assorbita equivalente	rem <sup>a</sup>	rem <sup>a</sup>	1 rem = 1 rd
Esposizione di ionizzazione	röntgen	R	1 R = $2,58 \cdot 10^{-4}$ C·kg <sup>-1</sup>

<sup>(1)</sup> Simbolo del « grado centesimale ».

<sup>(2)</sup> Il simbolo indicato dal BIPM è « rad ».

**Avvertenza:** I prefissi ed i simboli di cui al punto 1.3 si applicano alle unità ed ai simboli di cui al punto 13, ad eccezione del simbolo « g ».

#### 14. UNITÀ COMPOSTE (UTILIZZATE TEMPORANEAMENTE)

Sino alle rispettive date indicate dall'articolo 1, le unità di cui ai capitoli B, C e D possono essere combinate fra di loro o con quelle del capitolo A per costituire unità composte.



# INDICE ANALITICO

- ACCIAIO  
— ricarburazione dell', 33
- ACQUA  
— di idratazione, 39  
— igroscopica, 39
- ADATTAMENTO, 192, 193
- AGGLOMERATO, 37
- AGGLOMERAZIONE, 37
- ALBERI, 20
- ALESATURA, 323
- ALIMENTAZIONE, 236
- ALLUMINIO (Bauxite)  
— lega, 41  
— ossido idrato di, 47
- ALLUMINIO-MOLIBDENO-VANADIO, 34
- ALLUNGAMENTO, 212
- ALTOFORNO, 33, 34, 37, 39
- ANGOLO PIANO (vedi: grado)
- ANISOTROPIA, 18, 20, 177  
— primaria, 18  
— secondaria, 18
- ANTIMONIO, 34
- APPARECCHI  
— a gas, 36  
— di ghisa smaltata, 36  
— di riscaldamento, 36  
— per cucina, 36
- APPLICAZIONI DEI GETTI DI GHISA GRIGIA, 353, 354, 356, 357, 363, 364, 365, 369, 374, 376, 382, 384, 385, 386, 387  
— aspetto, 356, 357, 382  
— colabilità, 356, 357, 369, 382  
— compattezza, 356  
— conducibilità termica, 385  
— costo, 357, 375  
— durata, 356  
— durezza, 357  
— getti per la siderurgia, 384  
— getti per l'edilizia, 382  
— getti per l'industria meccanica, 357  
— getti per l'industria motoristica, 376  
— integrità, 356  
— lavorabilità, 356, 357, 363, 364, 376, 382  
— resistenza al calore, 356  
— resistenza al freddo, 356  
— resistenza alla abrasione, 356, 376  
— resistenza alla corrosione, 356, 365, 374, 375, 382, 384  
— resistenza alla flessione, 363  
— resistenza alla pressione, 382  
— resistenza alla trazione, 363, 364, 376, 382  
— resistenza all'urto, 363  
— resistenza all'usura, 356, 375, 376  
— resistenza meccanica, 363, 385  
— resistività elettrica, 363  
— rigidità, 356  
— scorrimento, 357, 363, 376, 384  
— smorzamento delle vibrazioni, 356  
— sollecitazioni meccaniche, 357, 364, 365, 382, 384  
— sovrarmetalli, 356  
— stabilità, 356  
— tenuta idraulica, 356, 363, 364, 365, 369, 375, 376  
— tolleranze dimensionali, 356
- AREA (vedi: metro quadrato)
- ARMATURE  
— bavette, 42  
— bulloni, 42  
— di materiale ferroviario, 42  
— piastre, 42  
— rotaie, 42  
— traversine, 42
- ARSENICO, 34
- ASPETTO, 356, 357, 382
- ATMOSFERA  
— normale, 394  
— tecnica, 394
- ATTRITO, 199, 200, 201, 202, 212  
— radente, 206, 213  
— secco, 211, 213  
— volvente, 206, 213
- AUSTENITE, 177, 178, 202
- BAINITE, 18, 178
- BAR, 394
- BARROTTI-GRIGLIE, 21
- BAUXITE (ossido idrato di alluminio), 47
- BAVE, 41
- BONIFICA, 214
- BRASATURA, 286, 300  
— a bassa temperatura, 307  
— ad alta temperatura, 307  
— dolce, 286, 300, 306, 307  
— forte (saldobrasatura) 286, 300, 307  
— materiali di apporto, 307
- BRICCHETTI, 33, 42, 43  
— pacchetti Wachenfeld, 48  
— termocariche, 48
- BRINELL, 18, 22, 23, 24
- BROCCIATURA, 326
- BUTTERATURA (vedi pitting)
- CADMIATURA, 341
- CALCARE, 37
- CALCARINO, 37
- CALCE IDRATA, 39
- CALDAIE, 21
- CALO  
— di fusione, 35
- CALORE (vedi:)  
— caloria  
— frigoria  
— joule  
— kilogrammetro  
— termia
- CALORE SPECIFICO, 23
- CALORIA, 394
- CAPACITA' (vedi: litro)
- CARBONATO DI SODIO, 45

- CARBONIO, 17, 18, 33, 34  
— materiali apportatori di, 44
- CARBORUNDUM (carburo di silicio), 46
- CARBURAZIONE, 37, 39
- CARBURO  
— di calcio, 45, 46  
— di silicio (carborundum), 47  
— bricchetti, 46  
— granelli, 46
- CARCASSE, 21
- CARICA  
— materiali, 61
- CARRO/SILURO, 39, 40
- CAVALLO VAPORE (vedi: Watt)
- CEDIMENTO MECCANICO, 257
- C.E.E. - Unità di misura, 398 e seguenti
- CELLA, 268, 271
- CEMENTITE, 18, 19, 202
- CEPPI-FRENO, 21
- CERIO, 47
- CIANFRINO, 291, 295, 298
- CILINDRI, 20, 21
- COBALTO, 35
- COKE, 33, 37, 39  
— con bassa reattività, 44  
— da carbone, 45  
— di petrolio, 45  
— H.C., 44  
— metallurgico, 43  
— miscele speciali, 45  
— per fonderia, 43, 44  
— pezzatura, 43  
— polverino da, 45  
— preformato (formed coke), 44  
— reattività, 44
- COKERIA, 37
- COLABILITA', 17, 230, 248, 249, 356, 357, 369, 382
- COLATA, 20, 41
- COLATICCI, 41
- COMPATTEZZA, 356
- COMPOSIZIONE CHIMICA, 179, 256
- COMPRESSIONE, 255
- CONCHIGLIE, 20, 35, 39, 40
- CONDUCIBILITA', 20, 212, 214  
— termica, 385
- CONDUTTIVITA'  
— termica, 23
- COPPIA GALVANICA (Macropila), 268, 269
- CORAZZE, 21
- CORRENTI  
— telluriche, 270  
— vaganti, 270, 271
- CORROSIONE, 17, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280
- COSTANTE DI FORMATURA, 179
- COSTO, 357, 375
- CREEP, 258, 259, 260
- CRICCABILITA', 244, 247
- CRISTALLI, 18
- CROGIOLO, 37
- CROLLO, 218, 219, 221
- CROMATURA  
— decorativa, 340  
— dura, 340
- CROMO, 19, 34, 35
- CUBILOTTO, 19, 61  
— ad olio, 90  
— a metano, 90  
— a propano, 90  
— aria di combustione, 65  
— aria di ossidazione, 65, 72, 75  
— aria totale, 65  
— a vento caldo, 61, 67, 71, 78, 81, 85, 86, 88  
— a vento freddo, 61, 71, 78, 79, 80, 81, 88  
— basicità, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 80  
— bruciatore ausiliario, olio combustibile, 88  
— bruciatore supplementare, metano, 88  
— carburazione, 71, 73, 74, 75, 78  
— carburo di calcio, aggiunta, 87, 88  
— caricamento del, 62  
— carica metallica, 77, 78, 79, 85  
— coke di carica, 67, 68, 69, 74, 76  
— combustione, 64  
— condotta (vedi marcia)  
— con raffreddamento ad acqua, 69, 81  
— costituzione del, 62  
— crogiolo, 63  
— defosforazione, 76  
— desolfurazione, 75, 76  
— dote, 77  
— fusione, 63, 66  
— continua, 85  
— gas di combustione, 64, 66  
— H.C. coke, 69, 74  
— legge, 66  
— mantello raffreddato ad acqua, 83  
— marcia, 66, 76  
— acida, 85  
— basica, 81, 85, 86  
— materiali solidi (carica), 63  
— pigiata, 85  
— portata del vento, 66, 67, 68, 69  
— preriscaldatore a conversione, 82  
— preriscaldatore ad irraggiamento, 82  
— produzione oraria, 67, 68  
— rapporto di combustione, 65, 67, 76, 87  
— rendimento termico, 66, 80, 84  
— recuperatore ad irraggiamento, 82  
— recuperatore a fasciotubi, 81  
— rivestimento, 63, 77  
— acido, 68, 80  
— basico, 68, 69, 80  
— senza rivestimento, 68, 69, 80  
— scambiatore, 81  
— scorie, 62, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 75, 76, 81, 85, 86  
— sifone autoscorificante, 84  
— spillatura del, 62  
— continua, 71, 78  
— intermittente, 71, 78  
— surriscaldamento, 63  
— temperatura di combustione, 65, 74, 78  
— ugelli del, 62, 63, 78, 85  
— doppio ordine, 86  
— raffreddati ad acqua, 81, 83, 86  
— velocità di combustione, 66  
— vento arricchito di ossigeno, 87  
— viscosità, 70
- CUCINA, 21

## CURVE

- a raffreddamento continuo, 24
- a raffreddamento non interrotto, 24
- CCC, 24
- S, 24
- TTT, 24

DENSITA', 23

DESOLFORANTI, 33, 45

DESOLFORAZIONE, 39

DIAGRAMMA, 17, 19

DILATAZIONE, 211, 212

- coefficiente di, 23

DISPROSIO, 47

DISSODIANTI, 33, 46

DISTANZA, 18

- interlamellare, 18

DISTILLAZIONE

- camere di, 43
- forni di, 43

DURATA, 356

DUREZZA, 27, 180, 181, 183, 185, 186, 202, 255, 357

DUTTILITA', 186, 188, 189, 194, 199

ELASTICITA'

- modulo di, 23, 24

ELETTROLITA, 267, 268, 270, 271

ELETRONE, 267, 268

ENERGIA, 391

(vedi:)

- caloria
- frigoria
- joule
- kilogrammetro
- termia

ENERGIA, LAVORO, QUANTITA' DI CALORE, 394

ERBIO, 47

EUROPIO, 47

EUTETTICO, 17, 18

EVANESCENZA, 212

FADING, 211

FATICA, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 204, 208, 212, 255

FERODO, 211

FERRINO, 41

FERRITE, 18, 19, 177, 178, 202

FERRITIZZAZIONE, 19

FERRO, 33

- da correzione, 42
- palabile, 42
- pantografo, 42
- spugna di, 43

FERROLEGHE, 33, 37, 48

- affinate, 49
- comuni, 49
- correttive (aggiunte alla carica), 49
- di apporto (aggiunte al bagno metallico), 49, 51
- inoculanti (per azioni sulla struttura), 49, 51
- modificanti (variano la forma della grafite), 49, 51

- produzione di:
  - altoforno, 49
  - forno elettrico, 49
  - metallotermia, 49
  - alluminotermia, 49
  - elettrosilicotermia, 49
- speciali, 49

FINITURA SUPERFICIALE, 317

FLESSIONE, 186, 187, 188, 189, 195, 196

FLUIDI DA TAGLIO, 320

FLUIDITA', 231

FONDENTI, 33, 37

- calcare (castina), 48
- calce, 48
- spatofluore (fluorina), 48

FORATURA, 323

FORNI AD ARCO

- affinazione, 144
- apparecchiatura di regolazione, 128, 131
- arco-resistenza, 128
- bacino (laboratorio), 131, 139
- carburazione, 141, 143
- carica solida, 141, 142, 144, 146
- cavi di alimentazione, 128, 129
- comando di manovra, 128, 130
- condotta della fusione, 136, 138
- cos  $\varphi$ , 137
- costruzione, 128
- deossidazione, 139, 140
- desolfurazione, 139, 140, 145
- diretto, 128
- duplex con altri forni, 147
- elettrodi, 128, 129, 137, 138, 139, 144, 146
- energia assorbita, 137
- energia utilizzata, 137
- fattore di potenza, 137
- funzionamento, 136
- indiretto, 128
- induttanza, 136
- installazione, 128, 130
- laboratorio (bacino), 131
- potenza attiva, 136
- potenza reattiva, 136
- rendimento, 137
- resistenza elettrica, 137
- rivestimento refrattario, 131, 137, 139
  - acido, 131, 134, 139, 140, 144
  - basico, 131, 134, 139, 140, 141, 144
- spira-forno, 129, 136, 137
- suola, 131, 133, 134, 139, 144
- tino, 128, 131, 134
- trasformatore elettrico, 128, 129
- U.H.P. (ultra high power), 128
- volta, 128, 129, 131, 134, 139

FORNI FUSORI D'ALTRO TIPO

- cubilotto, 147
- forno a crogiolo, 147
- forno ad arco, 147
- forno ad induzione, 147
- forno a riverbero, 147
- forno a suola, 147
- forno rotativo, 147, 148, 154
- forno rotativo a combustibile, 148, 149, 150, 151, 153, 154
  - a carbone polverizzato, 150, 152, 153
  - a gas, 150, 152, 153
  - a nafta (olio combustibile), 150, 153
  - a rotazione + basculazione, 150, 151, 152
  - a rotazione semplice, 150, 151
  - con recuperatore, 150, 151
  - misto (a gas + olio combustibile), 150
  - rivestimento refrattario, 153
  - senza recuperatore, 150
- forno rotativo elettrico, 148
  - ad arco indiretto, 148
  - a resistore di grafite, 148
  - caratteristiche costruttive, 149
  - consumi, 149

## FORNO AD INDUZIONE

- a crogiolo, 113
- alimentazione, 91
- alta frequenza, 94
- apparecchiatura elettrica, 93
- avanforno, 101, 112
- avviamento con metallo liquido, 100, 103
- avviamento da freddo, 100, 103
- bassa frequenza, 95, 102, 107
- bassa frequenza (B.F.) con canale, 91, 94
- bassa frequenza senza canale (a crogiolo), 91, 92
- canale ad inclinazione variabile, 92
- canale inclinato, 91
- canale orizzontale, 91
- canale verticale, 91
- capacità utile, 101
- con canale, 91, 92, 93, 94, 98, 105, 106, 113, 124, 125, 127
- condotta, 107
- considerazioni metallurgiche, 117, 118, 119, 127
- convertitore rotante di frequenza, 96, 98, 103
- convertitore statico a frequenza triplicata, 96, 97
- convertitore statico a tiristori, 96, 98, 103
- duomo, 102
- essiccatore di carica, 109
- fenomeno della restrizione (vedi: pinch effect), 98
- forni di attesa, 91, 92, 94, 101, 112, 122, 126
- forni di colata, 116, 127
- forni fusori, 92, 93, 100, 107, 117
- forno duplex, 101, 112, 113, 114, 116
- frequenza intermedia, 92, 94
- installazione, 107, 108
- media frequenza, 91, 92, 94, 96, 103
- moto convettivo (stirring effect), 102
- penetrazione (skin effect), 102
- pinch effect, 98, 100
- preriscaldamento della carica, 109, 110, 111
- refrattario, 101, 102, 103, 105, 106
- refrattario, dilatazione, 104
- refrattario, esecuzione, 105
- senza canale (coreless), 91, 92, 94, 95, 102, 106, 107, 122, 125
- senza nucleo, 91
- skin effect (penetrazione), 102
- speciale, 91
- stirring effect (moto convettivo), 102
- surriscaldamento, 91
- tri-frequenza, 103

## FORNO FUSORIO

- ad arco, 61, 155, 157, 158, 159
- ad induzione, 61, 91, 155, 156, 157, 158, 159
- altiforni, 61, 155
- considerazioni economiche, 156
- cubilotto, 61, 155, 157, 158, 159
- elettrico, 33, 61, 155, 156, 157, 158, 159
- in duplex, 61, 155
- rotativo, 61, 155

## FORZA, 391

- di avanzamento, 316
- di repulsione, 316
- di taglio, 316
- (vedi: newton)

## FOSFORO, 17, 18, 33, 34

## FRANTUMAZIONE, 43

## FRATTURA, 19, 208

## FRESATURA, 326

## FRIGORIA, 394

## FUMISTERIA, 21

## FUSIONE, 39

## GADOLINO, 47

## GETTI, 19, 21

- accettazione di, 22
- centrifugati, 23
- colati in conchiglia, 23
- con grandi spessori, 24
- di acciaio, 20

- di ghisa, 19, 20
- di ghisa grigia, 36, 42
- di ghisa malleabile, 36, 42
- di ghisa sferoidale, 36, 42
- di massa, 24
- leggeri, 24
- ornamentali, 21
- per la siderurgia, 384
- per l'edilizia, 382
- per l'industria automobilistica, 22, 34, 376
- per l'industria meccanica, 34, 357
- per macchine agricole, 34
- per macchine da cucire, 21
- per macchine da scrivere, 21
- per macchine utensili, 21, 34
- per riscaldamento, 34
- per turbine a vapore, 21
- pesanti, 24
- progettazione di, 22
- resistenti agli acidi, 21
- resistenti agli alcali, 21
- resistenti al fuoco, 21
- sanitari, 21, 34
- sottili, 24
- spessore dei, 24
- spessori medi, 24

## GHISA, 17, 18, 44

- a basso carbonio, 34, 36
- a basso fosforo, 34, 36
- a basso manganese, 34
- ad alto carbonio, 34, 36
- ad alto fosforo, 36
- ad alto manganese, 34, 36
- al carbone di legna, 36
- al forno elettrico, 37
- al fosforo, 33
- altra, 33
- austenitica, 19
- bianca, 34, 36
- Bessemer, 33
- Cleveland, 36
- con caratteristiche particolari, 33, 36
- da affinazione, 33, 34
- ematite, 34, 36
- ferritica, 19
- fosforosa ad alto fosforo, 34
- fosforosa a medio fosforo, 34
- greggia di prima fusione (in pani), 33, 35, 36, 41
- greggia legata, 33, 34
- greggia non legata, 33, 34
- grigia, 17, 18, 19, 22, 23, 24, 26, 34
- grigia a grana fine, 36
- liquida, 61
- Martin, 33
- pani di, 35
- per fonderia, 33, 34, 37
- perlitica, 19, 20
- per malleabile, 34, 36
- per sferoidale, 34, 36
- prodotta all'altoforno, 34
- semi-ematite, 36
- sintetica, 33, 37
- speciale, 36
- speculare, 33
- Thomas, 33
- trotata, 34, 36

## GIORNO, 393

## GRADIENTE TERMICO, 211, 212

## GRADO

- di saturazione, 183, 186
- radiante, 392
- sessagesimale, 392

## GRAFITE, 17, 18, 19, 23, 34, 35, 40

- granulare, 45
- in trucioli, 45
- lamellare, 23
- minerale, 45
- naturale, 45
- sferoidale, 23
- sintetica, 45

- GRAMMO, 393
- GRIPPAGGIO, 201, 204, 209, 211
- INCLUSIONI, 35
- INCRINATURA, 208
- INGRANAGGI, 21
- INOCULANTI, 19
- INTAGLIO, 194, 196
- INTEGRITA', 356
- IONE, 267, 268, 269
- ISTERESI, 187, 188, 190, 192, 193
- ITTEBIO, 47
- JOULE, 394
- KELVIN, 393
- KILOGRAMMETRO, 394
- KILOGRAMMO, 393
- LAMELLE, 18
- LAMIERE  
— in pacchi, 42
- LANTANIDI (terre rare), 47
- LANTANIO, 47
- LAVORABILITA', 217, 218, 219, 221, 226, 356, 357, 363, 364, 376, 382
- LAVORAZIONE MECCANICA, 315, 316, 317, 318
- LAVORO  
(vedi:)  
— caloria  
— frigoria  
— joule  
— kilogrammetro  
— termia
- LEDEBURITE, 202
- LINGOTTIERE, 20, 21
- LITRO, 392
- LOPPA (scoria), 34, 39
- L.S.F. (Load Stress Factor), 208, 209, 210
- LUNGHEZZA (vedi: metro)
- LUTEZIO, 47
- MACCHINE  
— per colare, 35, 39
- MACROPILA (coppia galvanica), 268, 269
- MAGNESIO  
— lingotto, 46  
— polvere, 46
- MANGANESE, 17, 19, 33, 34  
— ossido di, 47  
— solfuro di, 47
- MARMITTE, 36
- MARTENSITE, 18, 19, 202
- MASCHIATURA, 325
- MASSA, 391  
(vedi:)  
— tonnellata  
— kilogrammo  
— grammo
- MASSIVITA', 22, 23, 177, 178, 179, 180, 181, 185, 188, 189, 206, 212, 214
- MATERIALI  
— apportatori di carbonio, 33, 44  
— di carica, 33
- MATRICE, 18
- MEEHANITE, 19
- METALLI  
— alliganti, 33, 47  
— antifrizione, 41  
— desolforanti, 47  
— disossidanti, 47
- METALLIZZAZIONE SUPERFICIALE  
— metalli di apporto, 346  
— procedimenti di applicazione, 346
- METRO, 392  
— cubo, 392  
— d'acqua, 394  
— quadrato, 392
- MICROPILA (pila interna), 268, 269, 271
- MICROSEGREGAZIONE, 246
- MICROSTRUTTURA, 261
- MICUM, 44
- MILLIMETRO DI MERCURIO, 394
- MINERALI, 37  
— di ferro, 33, 34  
— preridotti, 33, 42
- MINUTO, 393
- MISCHMETAL, 56
- MODULO  
— di elasticità, 181, 182, 183, 186, 192, 212, 376  
— di raffreddamento, 179
- MOLIBDENO, 19
- MONTANTI, 41
- NEODIMIO, 47
- NEWTON, 394
- NICHEL, 19, 34, 35, 47  
— catodi, 48  
— cilindri, 48  
— croste, 48  
— cubetti, 48  
— granuli, 48  
— sferette, 48
- NICHELATURA, 341, 342
- NOMOGRAMMA, 247, 248 bis, 249
- NUCLEAZIONE, 179
- OLIGOELEMENTI, 34, 36, 41
- OLIVINA, 37

- OLMIO, 47
- ORA, 393
- OSSIDAZIONE, 35, 255, 257, 258
- OSSIGENO, 34
- PACCHI  
— lamiere in, 42
- PANI  
— di ghisa, 35, 37, 39, 40  
— separati, 35  
— singoli, 35
- PARETE  
— spessore di, 23
- PARTICOLARI, 21
- PASCAL, 394
- PELLETS, 37, 43
- PERLITE, 18, 19, 177, 178, 181
- PIASTRE, 21
- PILA, 267, 270  
— interna (micropila), 268, 269, 271
- PIOMBO, 34
- PIROMETRO  
— ad immersione, 78  
— ottico, 78
- PISTONE, 20, 21
- PITTING (butteratura), 208, 209
- POLVERINO  
— da coke, 45
- POTENZA (vedi: Watt)
- POTERE CALORIFICO, 43
- PRASEODIMIO, 47
- PRERIDOTTI, 37, 43  
— minerali, 42
- PRESSIONE, 391
- PRESSIONE E TENSIONE  
(vedi:)  
— atmosfera normale  
— atmosfera tecnica  
— bar  
— metro d'acqua  
— millimetro di mercurio  
— pascal  
— torr
- PROLER, 42
- PROMEZIO, 47
- PROPRIETA' FISICHE  
— calore latente di fusione, 167  
— calore specifico, 167  
— calore specifico totale, 167  
— conducibilità termica ed elettrica, 167  
— densità  
— austenite, 166  
— cementite, 166  
— eutettico fosforoso, 166  
— ferrite, 166  
— grafite, 166  
— martensite, 166  
— perlite, 166  
— effetto degli elementi di lega, 170  
— espansione termica, 166  
— proprietà magnetiche, 169  
— campo magnetico, 169  
— dimensione del grano, 169  
— forza magnetica, 169  
— induzione magnetica, 169  
— intensità magnetica, 169, 170  
— magnetismo residuo, 169, 170  
— perdita per isteresi, 169, 170  
— permeabilità magnetica, 169, 170  
— punto di curie, 170  
— smagnetizzazione, 170  
— tensione superficiale, 171
- PROPRIETA'  
— meccaniche, 177, 255  
— tecnologiche, 177
- PROVE IMMEDIATE, 227, 247  
— carbonio equivalente, 228  
— colabilità, 230, 248, 249  
— provetta risucchio, 228  
— risucchio, 236, 237, 240, 241, 243, 248  
— ritiro, 236, 237, 238, 241, 243, 248  
— spirale di colabilità, 228  
— tempratura, 227, 228, 248, 249
- PROVETTA, 20, 22, 23, 26  
— colata a parte, 22, 27  
— colata in appendice, 27
- PUNTO CALDO, 211
- QUANTITA' DI CALORE, 394
- QUARZITE, 37
- QUOTE, 23
- RACCORDI, 19, 20
- RADIATORI, 19, 21
- RAFFREDDAMENTO, 18, 19  
— velocità di, 18, 22, 23, 35, 177, 178, 179, 181, 188
- RAMATURA, 340
- RAME, 34, 35, 41, 47  
— gocce, 48  
— lingotti, 48
- RAPPORTO DI DURATA, 195, 196, 197, 198
- REAZIONE  
— anodica, 267, 270, 271  
— catodica, 267, 270, 271  
— endotermica, 44
- RECIPIENTI, 21
- RESILIENZA, 188, 199, 261
- RESISTENZA, 20  
— al calore, 20, 356  
— al freddo, 356  
— all'abrasione, 356, 376  
— alla compressione, 23  
— alla corrosione, 20, 356, 365, 374, 375, 382, 384  
— alla flessione, 23, 363  
— alla pressione, 382  
— alla trazione, 363, 364, 376, 382  
— all'urto, 363  
— all'usura, 20, 356, 375, 376  
— al taglio, 23  
— meccanica, 20, 363, 385
- RESISTIVITA' ELETTRICA, 23, 363
- RETICOLO, 18
- RETTIFICATURA, 329  
— cilindrica, 331  
— piana, 331

- RICOTTURA, 20
- RICRISTALLIZZAZIONE, 20
- RIDUCENTI  
 — gassosi, 42  
 — solidi, 42
- RIDUZIONE, 37  
 — diretta, 39, 42  
 — indiretta, 39
- RIGIDITA', 356
- RIGOLA, 40
- RIGONFIAMENTO, 256, 257
- RINVENIMENTO, 197, 214
- RISCALDAMENTO, 19
- RISUCCHIO, 19, 35, 236, 237, 240, 241, 243, 248
- RITIRO, 19, 236, 237, 238, 241, 242, 243, 248, 249
- RIVESTIMENTO, 337  
 — a caldo, 337  
 — a freddo, 337  
 — elettrolitico, 338
- ROTOLAMENTO, 201
- ROTTAME, 19  
 — arrugginito, 41  
 — di acciaio, 19, 33, 37, 42  
 — di acciaio dolce, 42  
 — di acciaio minuto, 42  
 — di acciaio speciale, 42  
 — di ghisa, 33, 41  
 — di ghisa bianca, 41  
 — di ghisa bruciata, 41  
 — di ghisa comune, 41  
 — di ghisa meccanica, 41  
 — di lingottiere, 41  
 — di provenienza esterna (di acquisto), 41  
 — di provenienza interna (di riciclo), 41  
 — minuto, 41
- ROTTURA, 212, 221  
 — carico unitario, 26
- RUGOSITA', 35, 317, 318
- RULLI, 21
- RUOTE, 20, 21
- SACCA, 37
- SALDATURA, 19, 285  
 — ad arco sotto scoria (ad arco sommerso), 303  
 — a caldo, 287, 290, 292, 293, 294, 295, 296, 298, 300, 310  
 — a freddo, 287, 295, 296, 298, 300, 301, 310  
 — a frizione, 306  
 — alla fiamma, 286, 293  
 — all'arco elettrico, 286, 293, 295, 300, 301  
 — alluminotermica, 286, 303, 304, 305, 310  
 — autogena (per fusione), 286, 294, 295  
 — con elettrodo metallico consumabile (Metallic Inert Gas = M.I.G.), 303  
 — con elettrodo non consumabile di tungsteno (Tungsten Inert Gas = T.I.G.), 303  
 — cordone, 287, 290, 293, 294, 295, 298, 300  
 — depositi, 286  
 — di teste a scintillio, 305, 306  
 — elettrica a resistenza, 286  
 — eterogenea, 286  
 — idrodinamica, 306  
 — in CO<sub>2</sub> (Metallic Active Gas = M.A.G.), 303, 310  
 — materiali di apporto, 288, 291, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 300, 301, 303, 305  
 — mediante ultrasuoni, 306  
 — omogenea, 286  
 — per compressione, 306  
 — per diffusione, 306  
 — per esplosione, 306  
 — per scorrimento di metallo fuso, 286, 304, 305, 310  
 — riporti, 286  
 — senza fusione (brasatura), 286
- SALDO BRASATURA, 286, 298, 307
- SAMARIO, 47
- SATURAZIONE, 212, 214, 221
- SCARTI, 41
- SCORIE (Loppa), 34, 39
- SCORIFICANTI, 48
- SCORRIMENTO, 193, 257, 258, 259, 357, 363, 376, 384
- SCOSTAMENTI, 23, 25
- SCREPOLATURA, 19
- SECCHIONI, 39
- SECONDO, 393
- SEGMENTI, 20, 21
- SEGREGAZIONE, 17, 202
- SEMICELLA, 267
- SFACCIATURA, 221
- SHREDDED METAL, 42
- SILICE, 35
- SILICIO, 17, 18, 19, 33, 34
- SILURO (Carro), 39
- SMALTATURA, 345  
 — generalità, 345  
 — materiali di rivestimento, 345  
 — metodi di applicazione, 345
- SMORZAMENTO, 20, 189, 190, 191  
 — alle vibrazioni, 356
- SNERVAMENTO, 194, 204
- SODA  
 — in bricchetti, 45  
 — in mattonelle, 45  
 — in polvere, 45  
 — Solvay, 45
- SOLFORAZIONE, 39
- SOLIDIFICAZIONE, 17, 18, 19  
 — intervallo di, 17  
 — velocità di, 177
- SOLLECITAZIONI MECCANICHE, 357, 364, 365, 382, 384
- SOPRAFFUSIONE, 18
- SORBITE, 18, 177, 178
- SOVRAMMETALLI, 356
- SPACCATURA, 41
- SPETTROMETRO, 78
- SPILLATA, 22
- SPUGNA  
 — di ferro, 43
- STABILITA', 356
- STABILIZZATORI DI CARBONIO, 34
- STAGNATURA, 341
- STAGNO, 34, 47, 48

STAMPI, 20, 21

STRUTTURA, 18, 19, 20, 256  
— bianca, 35  
— perlitica, 35  
— trotata, 35

SUOLE, 21

TAGLIO TERMICO, 308  
— alla fiamma, 308  
— alla polvere di ferro (ossitaglio), 308, 309  
— all'arco, 308, 309  
— all'ossigeno, 308  
— al plasma, 309  
— arc-air, 309  
— con aggiunta di filo di ferro, 308  
— con lancia di ossigeno, 309  
— per fusione, 308, 309

TAMBURI, 20

TELAJ, 21

TEMPERATURA, 19  
— bassa, 261  
— Celsius (vedi: Kelvin)  
— coefficiente di, 23  
— elevata, 255, 256

TEMPO (vedi: secondo, minuto, ora, giorno)

TEMPRA, 19, 197, 227, 228, 248, 249

TENACITA', 186, 188, 189

TENORE  
— inferiore, 34  
— limite delle ghise gregge, 34  
— superiore, 34

TENSIONE, 19, 391

TENSIONE E PRESSIONE  
(vedi:)  
— atmosfera normale  
— atmosfera tecnica  
— bar  
— metro d'acqua  
— millimetro di mercurio  
— Pascal  
— torr

TENUTA IDRAULICA, 356, 363, 364, 365, 369, 375, 376

TERBIO, 47

TERMIA, 394

TERRE RARE (LANTANIDI), 47

TINO, 37

TITANIO, 34

TOLLERANZE, 23, 25  
— dimensionali, 356

TONNELLATA, 393

TORNITURA, 41, 42, 321  
— ovuli, 42  
— pastiglie, 42

TORR, 394

TORSIONE, 196

TRASFORMAZIONE, 18, 19  
— eutettoide, 18  
— isotermica, 24  
— non isotermica, 24

TRATTAMENTI A FUOCO  
— alluminatura, 343

— piombo stagnatura, 343  
— stagnatura, 343  
— zincatura, 342

TRATTAMENTI DI CONVERSIONE

— brunitura, 343, 344  
— cromatazione, 343, 344  
— fosfatazione, 343, 344  
— ossidazione, 343, 344

TRATTAMENTI DI DIFFUSIONE

— alluminazione, 344  
— calorizzazione, 344  
— cromizzazione, 344, 345  
— sheradizzazione, 344, 345

TRATTAMENTO, 19

— immersione in soluzioni (pickling), 388  
— in sali fusi, 337  
— sgrassatura, 338  
— termico, 23, 24

TRAZIONE, 19, 20, 255, 261

— resistenza alla, 19, 20, 21, 23, 24, 27  
— rottura a, 22, 24

TRUCIOLO, 217, 219

TUBI, 19, 20, 36

TULIO, 47

UNITA' DI MISURA - C.E.E., 398 e seguenti

URTO, 20  
— termico, 20

USURA, 199, 200, 201, 202, 204, 206, 208, 214, 226, 255  
— abrasiva, 205  
— adesiva, 205, 206

UTENSILI, 318  
— durata, 318  
— materiali, 318, 319, 320

VAGLIATURA, 43

VAIOLATURA, 35

VANADIO, 35

VALVOLAME, 20

VASCHE, 19  
— da bagno, 19, 21, 36

VELOCITA', 18  
— di raffreddamento, 35, 177, 178, 179, 181, 188  
— solidificazione, 177

VENTO  
— caldo, 36  
— freddo, 36

VENTRE, 37

VOLANI, 21

VOLUME (vedi: metro cubo)

WATT, 394

ZINCATURA, 341

ZINCO, 34

ZOLFO, 17, 19, 34

# INDICE DEI NOMI

- Amonton, 200  
 August, T., 209  
 Arrhenius, 259  
 Austin, M., 236
- Bach, C. V., 180  
 Belaiew, 181  
 Bellot, J., 226  
 Boudouard, 66  
 Brandsma, 219, 221, 223, 224, 225  
 Brinckmann, 245  
 Brotzen, R., 195
- Canella, 183  
 Cartier, M., 209  
 Caubert, J. J., 209, 210  
 Charbonnier, 246  
 Coates, R. B., 75, 76  
 Cola, G., 181, 190, 244, 247, 248 bis  
 Collaud, A., 24, 27, 180, 181, 183, 184, 185, 186, 189, 214, 216, 243, 247, 248  
 Coyle, F. B., 180  
 Coulomb, 200  
 Cram, W. C., 208  
 Cuvillier, 245, 246  
 Curie, 170
- Danis, F., 67  
 Davy, H., 128  
 Decrop, M., 67  
 De Sy, A., 86, 225, 245  
 Detrez, 245, 246  
 De Vaux, 236  
 Dietert, H. W., 230, 248  
 Doat, 86  
 Duebi, E., 180
- Eichelberg, 212  
 Erichsen, 219  
 Evans, P., 230, 245, 248, 293  
 Eyre, T. S., 201
- Fortino, D., 240, 241, 243, 245  
 Friedrich, 233
- Gabel, 245  
 Gerstner, 183  
 Gittus, 238  
 Gorton, A., 236  
 Grant, 197
- Heine, 237  
 Heller, 180, 181  
 Heroult, 128  
 Hertz, 208  
 Hodgson, M. J., 201  
 Hofmann, E., 70  
 Holm-Burwell, 202, 204  
 Hooke, 189  
 Huehlberger, H., 236  
 Hughes, 238  
 Humphreys, 230, 232
- Ikawa, 194, 197
- Jeancolas, M., 236  
 Julien, A., 239  
 Jungbluth, H., 66, 67, 68, 72, 180, 181
- Kasch, E., 229  
 Kattus, 212  
 Kawamoto, M., 202, 203  
 Keep, W. J., 180  
 Kiellberg, 295  
 Kim, 236  
 Klingenstein, 206  
 Kommers, J. B., 199
- Korschan, H., 68  
 Kozakevitch, P., 70  
 Kreszewski, R., 73  
 Krueger, 261, 262  
 Kuntze, 194  
 Kusakawa, 236
- Lane, P. S., 202  
 Laplanche, H., 233, 234, 248, 261  
 Leonard, 205  
 Levelink, 239  
 Leyshon, H. J., 75, 76  
 Locati, 199  
 Logothetis, D., 76  
 Loria, 233  
 Lownie, 80
- Mailender, 195  
 Majors, H., 197  
 Margerie, 246  
 Mathon, P., 224, 225, 226  
 Matting, 261, 262  
 Maurer, 288  
 Mehl, R. F., 178  
 Modell, 204  
 Monti, 183  
 Moore, A., 233, 247  
 Morin, 200  
 Morrogh, 197
- Nermitz, A., 245  
 Neumann, F., 67, 68, 69, 73
- Oberhofer, A. F., 74, 75  
 Oberle, T. L., 204  
 Ohira, 194, 197  
 Okayaschi, K., 202, 203  
 Orths, K., 186
- Pacyna, H., 68  
 Palmer, K. B., 259, 260  
 Patterson, W., 67, 68, 69, 73, 189  
 Pavlov, Y. N., 202  
 Piwowsky, E., 27, 202  
 Poisson, 208  
 Porter, L., 230, 247, 248  
 Pulsifer, V., 233, 235
- Rabinowics, 202  
 Rauterkus, W., 206  
 Reye, 200  
 Reynolds, C., 237  
 Rickards, P. J., 261  
 Roll, 275  
 Rondo, 236  
 Rosenthal, P., 230, 247, 248
- Schenck, R., 71, 73  
 Schmidt, 236  
 Schulken, 206  
 Schwartz, 179  
 Scortecchi, A., 245  
 Siepmann, H., 68  
 Slavianoff, 295  
 Smith, 197  
 Stassano, E., 128  
 Stockkamp, K., 72, 76  
 Szajda, J., 240, 241
- Tafel, 269  
 Takeuchi, E., 202  
 Talbourdet, 209  
 Talenov, 204  
 Taylor, 217, 318  
 Timmins, 238, 239
- Vaclavinek, J., 229  
 Van Eeghem, J., 233, 248

# INDICE GENERALE

	Pag.		Pag.
<b>PRESENTAZIONE</b>	7	<b>Minerali preridotti</b>	42
<b>INTRODUZIONE</b>	9	<b>Coke</b>	43
<b>CAPITOLO I - CLASSIFICAZIONE E NORME</b>		Produzione di coke attraverso la distillazione del carbonio fossile	43
<b>Definizione</b>	17	Coke per cubilotto	43
<b>Un passo indietro</b>	18	— <i>Aspetto</i>	43
<b>La struttura</b>	18	— <i>Umidità</i>	43
<b>Le proprietà specifiche</b>	19	— <i>Pezzatura</i>	44
<b>Classificazione della ghisa grigia</b>	19	— <i>Composizione chimica</i>	44
<b>La normazione della ghisa grigia</b>	20	— <i>Resistenza meccanica</i>	44
Le norme italiane	22	— <i>Reattività</i>	44
Le norme straniere	24	Coke speciali	44
<b>Bibliografia</b>	27	<b>Materiali apportatori di carbonio</b>	44
<b>CAPITOLO II - MATERIALI DI CARICA E CORRETTIVI</b>		Polverino da coke da carbone	45
<b>Premessa</b>	33	Coke di petrolio	45
<b>Ghise gregge di prima fusione</b>	33	Grafite	45
Caratteristiche generali	33	Miscele speciali	45
Componenti minori	34	<b>Desolforanti</b>	45
Stato superficiale	35	Carbonato di sodio (più comunemente nominato soda)	45
Caratteristiche strutturali	35	Carburo di calcio	46
Peso e forma del pane	35	Magnesio	46
Produzioni correnti di ghise in pani	36	<b>Disossidanti</b>	46
Descrizione delle ghise gregge	36	Siliciuro di calcio	46
— <i>Ghisa ematite</i>	36	Carburo di silicio	47
— <i>Ghisa semi-ematite ed a basso ed alto fosforo</i>	36	Terre rare	47
— <i>Ghise speciali ad alto carbonio</i>	36	Manganese	47
— <i>Ghise speciali a basso carbonio</i>	36	Alluminio	47
— <i>Ghise ad alto manganese</i>	36	Metalli alliganti	48
— <i>Ghise speciali</i>	36	Bricchetti	48
— <i>Ghise al carbone di legna</i>	36	Fondenti	48
— <i>Ghise speciali per la produzione di ghisa sferoidale</i>	36	Scorificanti	48
— <i>Ghise al forno elettrico e ghise sintetiche</i>	37	<b>Ferroleghie</b>	48
Cenni di fabbricazione della ghisa di prima fusione	37	Caratteristiche generali	48
— <i>Premessa</i>	37	Cenni di fabbricazione	49
— <i>Materie prime in arrivo</i>	37	— <i>Ferroleghie correttive</i>	51
— <i>Cokeria</i>	37	— <i>Ferroleghie di apporto</i>	51
— <i>Agglomerazioni</i>	37	— <i>Ferro-silicio</i>	52
— <i>Alto forno</i>	37	— <i>Ferro-silicio-zirconio</i>	52
— <i>Macchine per colare</i>	39	— <i>Ferro-manganese</i>	53
— <i>Ciclo di lavorazione e controllo di qualità</i>	40	— <i>Ferro-cromo</i>	53
<b>Rottame di ghisa</b>	41	— <i>Ferro-fosforo</i>	53
Rottame di provenienza interna	41	— <i>Ferro-titanio</i>	54
Rottame di provenienza esterna	41	— <i>Ferro-molibdeno</i>	54
Torniture da lavorazione meccanica	42	— <i>Ferro-tungsteno</i>	54
<b>Rottame di acciaio</b>	42	— <i>Ferro-vanadio</i>	54
		— <i>Ferroleghie inoculanti</i>	55
		— <i>Siliciuro di calcio</i>	55
		— <i>Ferroleghie modificanti della grafite</i>	55
		<b>CAPITOLO III - LA FUSIONE DELLA GHISA</b>	
		<b>Introduzione</b>	61
		<b>Premessa generale al capitolo</b>	62

	Pag.		Pag.
<b>CUBILOTTI</b>		<b>Caratteristiche costruttive</b>	92
Introduzione	62	Forni con canale	92
Cubilotto convenzionale	62	— <i>Apparecchiatura elettrica</i>	93
La combustione	64	— <i>Forno propriamente detto</i>	93
La legge del cubilotto	66	— <i>Forni fusori</i>	93
<b>La scoria</b>		— <i>Forni di attesa</i>	94
Aggiunte scorificanti	68	Forni senza canale (crogiolo)	94
Viscosità	69	— <i>Forni a bassa frequenza</i>	94
Basicità	70	— <i>Apparecchiature elettriche</i>	95
Elaborazione e comportamento della scoria	70	— <i>Rifasamento</i>	95
<b>I processi metallurgici</b>		— <i>Equilibratore di carico</i>	95
Ferro e manganese	71	— <i>Forno propriamente detto</i>	96
Silicio	71	— <i>Impianto di raffreddamento</i>	96
Carbonio	72	— <i>Forni a media frequenza</i>	96
Zolfo	73	— <i>Forni a tri-frequenza</i>	97
Fosforo	75	— <i>Forni con convertitore rotante</i>	98
<b>La condotta del cubilotto</b>		— <i>Forni con convertitore statico a tiristori</i>	98
Qualità del coke	76	<b>Funzionamento ed applicazioni</b>	98
La dote	76	Forni con canale	98
Coke di carica	77	— <i>Avviamento con metallo liquido</i>	100
Carica metallica	77	— <i>Avviamento da freddo</i>	100
Calcolo della composizione delle cariche metalliche	77	— <i>Forni fusori</i>	100
Tipo di spillata	77	— <i>Forni di attesa</i>	101
Temperatura all'interno del cubilotto	78	Forni senza canale	102
Sistemi di controllo	78	— <i>Forni a bassa frequenza</i>	102
<b>Caratteristiche della ghisa prodotta al cubilotto acido a vento freddo</b>	80	— <i>Avviamento con carica solida</i>	103
<b>Bilancio termico e rendimento del cubilotto a vento freddo</b>	80	— <i>Avviamento con carica liquida</i>	103
<b>Varianti al cubilotto tradizionale</b>		— <i>Forni a media frequenza</i>	103
Cubilotto a vento freddo a marcia basica	80	— <i>Forni a tri-frequenza</i>	103
Cubilotto a vento caldo	80	— <i>Forni con convertitore rotante</i>	103
— <i>Preriscaldamento del vento con recuperatore</i>	81	— <i>Forni con convertitore statico a tiristori</i>	103
— <i>Preriscaldamento del vento con riscaldatore indipendente</i>	81	<b>Rivestimenti refrattari</b>	104
— <i>Ugelli di rame</i>	82	Esecuzione dei rivestimenti refrattari	105
— <i>Raffreddamento del mantello e rivestimento refrattario</i>	83	— <i>Forni con canale</i>	105
— <i>Sifone autoscorificante a pressione</i>	83	— <i>Forni senza canale</i>	106
— <i>Bilancio termico</i>	84	<b>Installazione condotta</b>	107
— <i>Misurazione e regolazione</i>	84	Forni fusori	107
— <i>Scoria</i>	84	— <i>Forni con essiccazione della carica</i>	109
— <i>Carica metallica</i>	85	— <i>Esempio</i>	109
— <i>Marcia basica</i>	85	— <i>Forni con preriscaldamento della carica</i>	109
Cubilotto con doppio ordine degli ugelli	85	— <i>Esempio</i>	110
Cubilotto con vento arricchito di ossigeno	86	Forni di attesa	112
Cubilotto con aggiunta di carburo di calcio	87	— <i>Marcia duplex</i>	112
Cubilotto con bruciatore ausiliario ad olio combustibile	88	— <i>Possibilità di effettuare la spillata e la scorificazione continua senza che la ghisa subisca perdite di temperatura</i>	113
Cubilotto con bruciatori supplementari a metano	88	— <i>Possibilità di eseguire un rifornimento regolare ed elastico della ghisa alle linee di colata</i>	113
Cubilotto a metano	90	— <i>Possibilità di surriscaldare la ghisa e distribuirla a temperatura costante</i>	114
<b>FORNI AD INDUZIONE</b>	91	— <i>Possibilità di mantenere analisi e caratteristiche meccaniche costanti</i>	115
Origini e sviluppi	91	— <i>Possibilità di carburare e decarburare la ghisa</i>	115
Classificazione	92	— <i>Possibilità di ottenere ghise con minimo contenuto di gas</i>	115
		— <i>Possibilità di effettuare la disossidazione e la desolforazione della ghisa</i>	115
		— <i>Possibilità di produrre simultaneamente allo stesso impianto fusorio più tipi di ghisa</i>	115
		— <i>Forni di colata</i>	116

	Pag.		Pag.
<b>Considerazioni metallurgiche</b>	117	<b>Forni fusori</b>	117
Forni fusori	119	— Forno ad induzione a bassa frequenza	119
— Materiali di carica	120	— Carbonio	121
— Silicio	121	— Manganese	121
— Zolfo e fosforo	121	— Variazioni di analisi nel bagno fuso	122
— Caratteristiche meccaniche delle ghise sintetiche	122	— Suscettibilità alla tempra	122
— Comportamento alla colata	122	— Struttura metallografica	122
Forni d'attesa	122	— Forni senza canale	123
— Tendenza alla sovralfusione e numero di germi di grafitizzazione	123	— Tempra ledeburitica nella provetta a cuneo	123
— Percentuale di gas ed elementi in traccia	124	— Resistenza a trazione e durezza Brinell	124
— Forni con canale	127	Forni di colata	127
Operazioni metallurgiche	127	Conclusioni	127
<b>Forni ad arco</b>	128	<b>Forni rotativi per la fusione della ghisa</b>	148
<b>Origini e sviluppi</b>	128	Forni rotativi elettrici	148
<b>Costruzione ed installazione</b>	128	Caratteristiche costruttive	149
<b>Rivestimenti refrattari</b>	131	Consumi	149
Rivestimento refrattario del bacino	131	<b>Forni rotativi a fiamma</b>	149
Rivestimento refrattario della volta	134	Caratteristiche funzionali e costruttive	150
— La geometria della volta	134	Combustibile	152
— Le modalità di montaggio	135	Rivestimento refrattario	153
— La qualità dei materiali	135	Consumi	153
<b>Funzionamento e condotta</b>	136	Condotta del forno	154
<b>Condotta della fusione</b>	138	<b>SCELTA DEL FORNO FUSORIO</b>	155
Reazioni di deossidazione e desolfurazione nel forno ad arco con rivestimento basico	139	Introduzione	155
— Deossidazione	139	Premessa	155
— Desolfurazione	140	<b>Considerazioni economiche</b>	156
Reazioni di deossidazione in forno elettrico ad arco con rivestimento acido	140	Flessibilità di esercizio	157
— Deossidazione	140	Produzione di tipi diversi di ghisa	157
Reazione di carburazione nel forno ad arco	141	Considerazioni sul costo della manodopera	158
Condotta del forno ad arco partendo da cariche solide	141	Flessibilità nella scelta del materiale di carica	158
— Considerazioni generali	142	Affidabilità dei rivestimenti refrattari	158
— Preparazione della carica	142	Affidabilità meccanica ed elettrica	159
— Materiali di carica	142	Affidabilità di composizione chimica	159
— Boccame	142	Tendenza alla tempra	159
— Ferrino	142	Condizioni di lavoro	159
— Fondi di fossa	143	— Gravosità del lavoro degli addetti alla condotta	159
— Ghisa in pani	143	— Rischio di infortuni	159
— Rottami di ghisa	143	— Rumorosità dell'ambiente	159
— Tornitura di ghisa	143	— Inquinamento esterno ed interno da polveri	159
— Rottame di acciaio	143	<b>Bibliografia</b>	160
— Correttivi - Ferroleghie - Metalli puri	143	<b>CAPITOLO IV - PROPRIETA' FISICHE</b>	
— Fusione	144	<b>Premessa</b>	165
— Affinazione	144	<b>Densità</b>	166
— Diminuzione del tenore di carbonio	145	<b>Espansione termica</b>	166
— Aumento del tenore di carbonio	145	<b>Calore specifico</b>	167
— Variazione degli altri elementi di lega	145	<b>Calore specifico totale</b>	167
— Desolfurazione	145	<b>Calore latente di fusione</b>	167
— Attesa precedente il travaso	146	<b>Conducibilità termica ed elettrica</b>	167
Forno ad arco per fusione di cariche solide	146	<b>Proprietà magnetiche</b>	169
— Elementi del costo di esercizio	146	<b>Effetto degli elementi di lega</b>	170
Forno ad arco in duplex con forni ad induzione	147	<b>Tensione superficiale</b>	171
		<b>Bibliografia</b>	171

	Pag.		Pag.
<b>CAPITOLO V - PROPRIETA' MECCANICHE E TECNOLOGICHE</b>		<b>Influenza della composizione chimica e della struttura</b>	
Che cosa si intende per massività . . . . .	177	Carbonio . . . . .	256
Studi sulla massività . . . . .	180	Silicio . . . . .	256
Il diagramma di Collaud . . . . .	183	Cromo . . . . .	256
Duttilità e tenacità delle ghise . . . . .	186	Fosforo . . . . .	256
Capacità di smorzamento . . . . .	189	Molibdeno . . . . .	256
Capacità di adattamento . . . . .	192	Altri elementi . . . . .	256
Resistenza a fatica . . . . .	194	Conclusioni . . . . .	256
<b>Resistenza all'usura - L'attrito e l'usura</b>	199	<b>Produzione di ghise stabili di volume</b> . . . . .	257
Considerazioni generali sull'usura adesiva . . . . .	200	<b>Resistenza al calore ed al fuoco</b> . . . . .	257
Durezza Brinell ed usura . . . . .	202	<b>Meccanismo di ossidazione della ghisa ed aderenza dello strato di ossido</b> . . . . .	258
Usura per carichi ripetuti . . . . .	206	<b>Scorrimento viscoso</b> . . . . .	258
Usura per attrito secco . . . . .	211	<b>Proprietà delle ghise alle basse temperature</b> . . . . .	261
Elaborazione metallurgica . . . . .	212	<b>Bibliografia</b> . . . . .	262
<b>Generalità sulla lavorabilità</b> . . . . .	217	<b>CAPITOLO VII - RESISTENZA ALLA CORROSIONE</b>	
Pratica operativa della prova $V_{50}$ . . . . .	218	<b>Breve cenno sulla teoria della corrosione</b> . . . . .	267
Metodo di calcolo della durata del tagliente . . . . .	219	Corrosione galvanica . . . . .	270
Metodi rapidi per la misura della lavorabilità . . . . .	219	Squilibri di concentrazione . . . . .	271
Pratica operativa della prova Brandsma . . . . .	222	Corrosione per celle a gas . . . . .	271
Il metodo Mathon-Renault . . . . .	224	Corrosione per aerazione differenziale . . . . .	271
Correlazioni fra metodi a breve durata, metodi a lunga durata e durezza Brinell . . . . .	225	Corrosione per differenza di sollecitazione . . . . .	271
<b>Introduzione sulle prove immediate</b> . . . . .	227	Correnti vaganti . . . . .	271
<b>Correlazione tra temperatura di inizio solidificazione ed il carbonio equivalente (CE)</b> . . . . .	228	Corrosione microgalvanica . . . . .	271
<b>Correlazione fra CEL e colabilità - Tempi di colata - Sezione degli attacchi</b> . . . . .	230	Corrosione per differente velocità dell'elettrolita . . . . .	271
<b>Valutazione del C e Si mediante analisi termica e la provetta di tempra</b> . . . . .	232	Corrosione per cavitazione . . . . .	271
<b>Il risucchio e la sua valutazione - L'alimentazione dei getti - Cenno sui difetti imputabili al risucchio ed al ritiro</b> . . . . .	236	Corrosione intercrystallina . . . . .	271
<b>Sintesi grafica delle proprietà tecnologiche delle ghise - Nomogramma multiplo</b> . . . . .	247	Attacco da microrganismi . . . . .	271
<b>Esempio</b> . . . . .	249	<b>I fenomeni di corrosione</b> . . . . .	271
<b>Bibliografia</b> . . . . .	250	Influenza della struttura e della composizione chimica . . . . .	272
<b>CAPITOLO VI - COMPORTAMENTO ALLE ALTE E ALLE BASSE TEMPERATURE</b>		Influenza di altri fattori sulla corrosione . . . . .	273
<b>Effetto delle temperature elevate sulle proprietà meccaniche</b> . . . . .	255	Corrosione atmosferica . . . . .	273
<b>Rigonfiamento della ghisa grigia</b> . . . . .	256	Corrosione nelle acque naturali ed industriali . . . . .	274
		Corrosione nel terreno . . . . .	275
		<b>Le applicazioni della ghisa grigia nell'industria</b> . . . . .	275
		Corrosione della ghisa grigia negli acidi . . . . .	276
		Corrosione della ghisa grigia negli alcali . . . . .	277
		Corrosione delle ghise grigie nelle soluzioni saline . . . . .	277
		Corrosione delle ghise grigie nei composti organici e solforati . . . . .	277
		Corrosione delle ghise grigie nei metalli fusi . . . . .	278
		La ghisa grigia nelle applicazioni dell'industria chimica . . . . .	278
		Parti di macchinario interessanti l'industria chimica suscettibili di essere costruite in ghisa grigia perlitica . . . . .	279
		<b>Bibliografia</b> . . . . .	280
<b>CAPITOLO VIII - SALDATURA, BRASATURA E TAGLIO TERMICO</b>		<b>Premessa</b> . . . . .	285

	Pag.		Pag.
Opportunità e necessità di saldatura della ghisa . . . . .	285	Taglio termico della ghisa grigia . . . . .	308
Scopi dei depositi di saldatura . . . . .	286	Taglio all'ossigeno . . . . .	308
Classificazione e definizione dei differenti procedimenti di giunzione a caldo applicabili alla ghisa . . . . .	286	— Taglio alla fiamma . . . . .	308
Cicli termici imposti dall'operazione di saldatura . . . . .	287	— Taglio con aggiunta di filo di ferro . . . . .	308
Fattori condizionanti l'operazione di saldatura della ghisa . . . . .	287	— Ossitaglio alla polvere . . . . .	309
Fattore metallurgico . . . . .	287	— Foratura e taglio mediante lancia ad ossigeno . . . . .	309
Fattore meccanico . . . . .	288	Taglio per fusione localizzata senza combustione . . . . .	309
Porosità . . . . .	290	— Taglio all'arco di carbone . . . . .	309
Saldatura in regime caldo . . . . .	290	— Il taglio al plasma . . . . .	309
Preriscaldamento dei getti da saldare . . . . .	290	— Taglio all'arco elettrico . . . . .	309
Mezzi e procedimenti per il preriscaldamento . . . . .	291	— Procedimento Arc-air . . . . .	309
Preparazione della zona da congiungere . . . . .	292	Conclusione . . . . .	310
Tecnica di deposizione del materiale d'apporto . . . . .	293	Bibliografia . . . . .	310
— Procedimenti di saldatura con gas . . . . .	293		
— Materiali d'apporto per la saldatura autogena a gas . . . . .	294		
— Flusso o fondente per la saldatura autogena a gas . . . . .	294		
— Saldatura elettrica ad arco . . . . .	295		
— Preparazione della zona da congiungere . . . . .	295		
— Materiali d'apporto per la saldatura elettrica ad arco a caldo della ghisa . . . . .	295		
Saldatura a freddo della ghisa . . . . .	298		
Principi . . . . .	298		
Preparazione della zona da saldare . . . . .	298		
Procedimenti di saldatura - Saldatura alla fiamma con gas . . . . .	298		
Saldatura a gas con getto di polvere . . . . .	298		
Saldatura elettrica ad arco . . . . .	300		
Tecnica di deposizione del materiale d'apporto . . . . .	300		
Materiali d'apporto per la saldatura elettrica ad arco a freddo della ghisa . . . . .	301		
Saldatura della ghisa grigia con i procedimenti di saldatura all'arco di recente sviluppo . . . . .	303		
Saldatura ad arco con protezione di gas . . . . .	303		
— Saldatura con elettrodo non consumabile di tungsteno (Tungsten Inert Gas - T.I.G.) . . . . .	303		
— Saldatura con elettrodo metallico consumabile (Metallic Inert Gas - M.I.G.) . . . . .	303		
Saldatura ad arco sotto scoria (ad arco sommerso) . . . . .	303		
Procedimenti di saldatura che impiegano come principale sorgente di calore un metallo d'apporto portato a fusione a temperatura elevata . . . . .	303		
Saldatura per scorrimento e saldatura alla siviera . . . . .	303		
Saldatura alluminotermica . . . . .	304		
Altri procedimenti di saldatura . . . . .	305		
Saldatura elettrica a resistenza . . . . .	305		
— Saldatura di testa a scintillio - Procedimento . . . . .	305		
Procedimenti di giunzione in fase solida . . . . .	306		
Brasatura della ghisa grigia . . . . .	306		
Brasatura dolce . . . . .	306		
Brasatura forte . . . . .	307		
— Brasatura a bassa temperatura . . . . .	307		
— Brasatura ad alta temperatura . . . . .	307		
— Saldobrasatura . . . . .	307		
I mezzi di riscaldamento . . . . .	307		
		Taglio termico della ghisa grigia . . . . .	308
		Taglio all'ossigeno . . . . .	308
		— Taglio alla fiamma . . . . .	308
		— Taglio con aggiunta di filo di ferro . . . . .	308
		— Ossitaglio alla polvere . . . . .	309
		— Foratura e taglio mediante lancia ad ossigeno . . . . .	309
		Taglio per fusione localizzata senza combustione . . . . .	309
		— Taglio all'arco di carbone . . . . .	309
		— Il taglio al plasma . . . . .	309
		— Taglio all'arco elettrico . . . . .	309
		— Procedimento Arc-air . . . . .	309
		Conclusione . . . . .	310
		Bibliografia . . . . .	310
		<b>CAPITOLO IX - LAVORAZIONE ALLE MACCHINE UTENSILI</b>	
		Introduzione . . . . .	315
		Considerazioni sulla lavorazione . . . . .	316
		Sforzi di taglio . . . . .	316
		Finitura superficiale . . . . .	317
		Durata degli utensili . . . . .	318
		Materiali per utensili . . . . .	319
		— Acciai rapidi . . . . .	319
		— Carburi sinterizzati . . . . .	320
		— Ceramiche . . . . .	320
		Fluidi da taglio . . . . .	320
		Utensili e parametri di lavorazione . . . . .	321
		Tornitura . . . . .	321
		— Angolo di attacco ( $\psi$ ) . . . . .	322
		— Angolo di spoglia secondario ( $\alpha$ ) . . . . .	322
		— Angolo di spoglia principale ( $\gamma$ ) . . . . .	322
		— Angolo di spoglia inferiore ( $\alpha$ ) . . . . .	322
		— Raggio . . . . .	322
		— Smusso sui taglienti . . . . .	323
		Foratura . . . . .	323
		Alesatura . . . . .	325
		Maschiatura . . . . .	326
		Brocciatura . . . . .	326
		Fresatura . . . . .	329
		Rettificazione . . . . .	329
		Parametri di lavorazione . . . . .	331
		Rettificazione piana . . . . .	331
		Rettificazione cilindrica . . . . .	332
		Bibliografia . . . . .	332
		<b>CAPITOLO X - RIVESTIMENTI METALLICI</b>	
		Generalità . . . . .	337
		Trattamenti preliminari . . . . .	337
		Trattamenti in sali fusi . . . . .	337
		Immersione in soluzioni di acidi forti (pickling) . . . . .	337
		Sgrassatura . . . . .	338

	Pag.		Pag.
<b>Rivestimenti elettrolitici</b>	338	<b>Metallizzazione superficiale</b>	346
Fattori importanti nella pratica dei rivestimenti elettrolitici della ghisa	338	Metalli d'apporto	346
— <i>Composizione della ghisa</i>	338	Procedimenti di applicazione	346
— <i>Elettrolitico</i>	339	Applicazioni	347
— <i>Apparecchiatura impiegata</i>	339		
— <i>Cromatura</i>	340		
— <i>Ramatura</i>	340		
— <i>Nichelatura</i>	341		
— <i>Cadmatura elettrolitica</i>	341		
— <i>Zincatura elettrolitica</i>	341		
— <i>Stagnatura elettrolitica</i>	341		
<b>Nichelatura chimica</b>	342		
<b>Trattamenti a fuoco</b>	342		
Zincatura	342		
Stagnatura	343		
Piombo-stagnatura	343		
Alluminiatura	343		
<b>Trattamenti di conversione</b>	343		
Fosfatazione	344		
Ossidazione e brunitura	344		
Cromatazione	344		
<b>Trattamenti di diffusione</b>	344		
Aluminizzazione	344		
Cromizzazione	345		
Sheradizzazione	345		
<b>Smaltatura</b>	345		
Generalità	345		
Materiali di rivestimento	345		
Metodi di applicazione	345		
Composizione delle ghise	345		
		<b>CAPITOLO XI - APPLICAZIONI</b>	
		<b>Premessa</b>	353
		<b>Esempi di applicazione delle ghise grigie</b>	357
		Getti per l'industria meccanica	357
		— <i>Costruzione di macchine per la lavorazione dei metalli mediante asportazione di truciolo</i>	357
		— <i>Costruzione di macchine per la lavorazione dei metalli mediante deformazione plastica</i>	363
		— <i>Costruzione di macchine per la lavorazione del legno</i>	363
		— <i>Costruzioni elettromeccaniche ed idroelettriche</i>	363
		— <i>Costruzioni per la fluidodinamica</i>	364
		— <i>Costruzioni per la meccanica varia</i>	369
		— <i>Particolari per impianti nell'industria chimica</i>	374
		Getti per l'industria motoristica	376
		Getti per l'edilizia	382
		Getti per la siderurgia	384
		<b>Conclusioni</b>	386
		<b>APPENDICE</b>	
		Unità di misura del sistema internazionale (SI)	391
		<b>INDICE ANALITICO</b>	
		<b>INDICE DEI NOMI</b>	