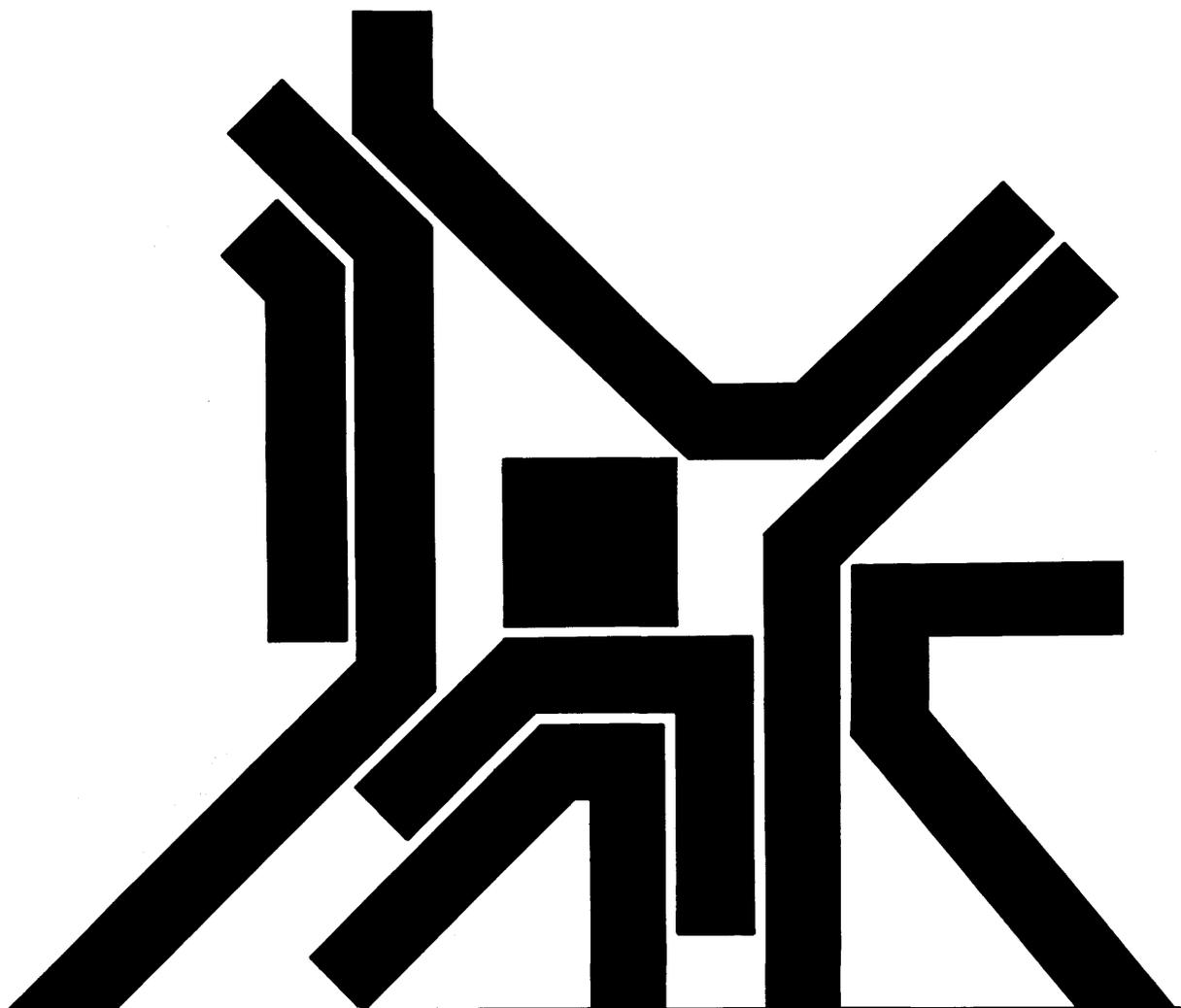


**Elio Gianotti**

# **LA GHISA**

**classificazioni  
e trattamenti termici**

**Edi - Albra/Torino**





---

*La letteratura tecnica sulle ghise — ed in particolare su relativi trattamenti termici — è tuttora, almeno in Italia, molto scarsa. Solo in questi ultimi anni, di fronte all'imponente sviluppo quantitativo e — sopra tutto — qualitativo di tutte le leghe ferrose, sulle riviste tecniche specializzate sono apparsi articoli, informazioni, studi teorici e specialmente sperimentali concernenti taluni aspetti di questo specifico settore metallurgico.*

*È dunque con vivo interesse che accogliamo la pubblicazione di questo volume, che illustra il campo delle ghise ed i relativi problemi tecnici da un punto di vista generale. L'Autore è un tecnico ancora giovane, che possiede una esperienza ventennale nella fabbricazione e — sopra tutto — nel trattamento termico di ghise ed acciai: tale preziosa esperienza Egli profonde a piene mani nelle pagine di questo libro, scritto appositamente per i tecnici d'officina. Quindi poca teoria, ma molte nozioni, osservazioni generali, suggerimenti originali, consigli pratici. Ampia la trattazione sugli elementi leganti, interessante l'illustrazione dei trattamenti termici (campo questo nel quale l'Autore è particolarmente competente), utile la descrizione dei principali tipi di ghise "speciali" (sferoidali, meehaniti, malleabili, aciculari, resistenti al calore ed alla corrosione, al nichel-cromo / cromo-molibdeno / cromo ad alto tenore, ecc. ecc.). Tabelle tecniche e figure (tra cui talune micrografie originali) arricchiscono opportunamente il testo.*

*Auguriamo successo e diffusione (specialmente tra i tecnici d'officina) a questa pubblicazione veramente interessante ed utile.*

ing. Sergio Bellone

Torino, novembre 1974.

---



## PREFAZIONE

La moderna tecnologia ha portato con il suo sviluppo ad una richiesta quantitativamente maggiore e qualitativamente migliore di leghe ferrose. La ghisa, fra queste, che fino a pochi anni fa era considerata la « Cenerentola » è andata via via assumendo un ruolo di sempre maggior importanza, grazie soprattutto ai miglioramenti che nel giro di vent'anni i metallurgisti hanno saputo creare con nuove tecniche di fabbricazione, fino a fare della ghisa un prodotto che molte volte può sostituire vantaggiosamente l'acciaio anche in pezzi fortemente sollecitati.

Il relativamente recente sviluppo di queste possibilità della ghisa, il considerarla da parte della maggioranza dei tecnici un

prodotto di secondo ordine rispetto all'acciaio, ha creato una situazione particolare anche nel campo della pubblicistica. Se è infatti facile trovare pubblicazioni che trattano esaurientemente, a tutti i livelli di preparazione, della metallurgia e specificatamente dei trattamenti termici degli acciai, non è possibile trovare invece, almeno in lingua italiana, analoghe pubblicazioni per la ghisa.

Questo volume si propone di colmare la tradizionale lacuna, per cui non vuol essere un libro sui trattamenti termici delle leghe ferrose in genere, ma anzi presuppone già una specifica conoscenza delle nozioni fondamentali dei trattamenti termici degli acciai, quale preparazione per approfondire il campo specifico della ghisa. La ripresa di concetti, già noti in funzione dei trattamenti termici degli acciai, serve solo a inquadrare meglio determinati postulati sulle ghise.

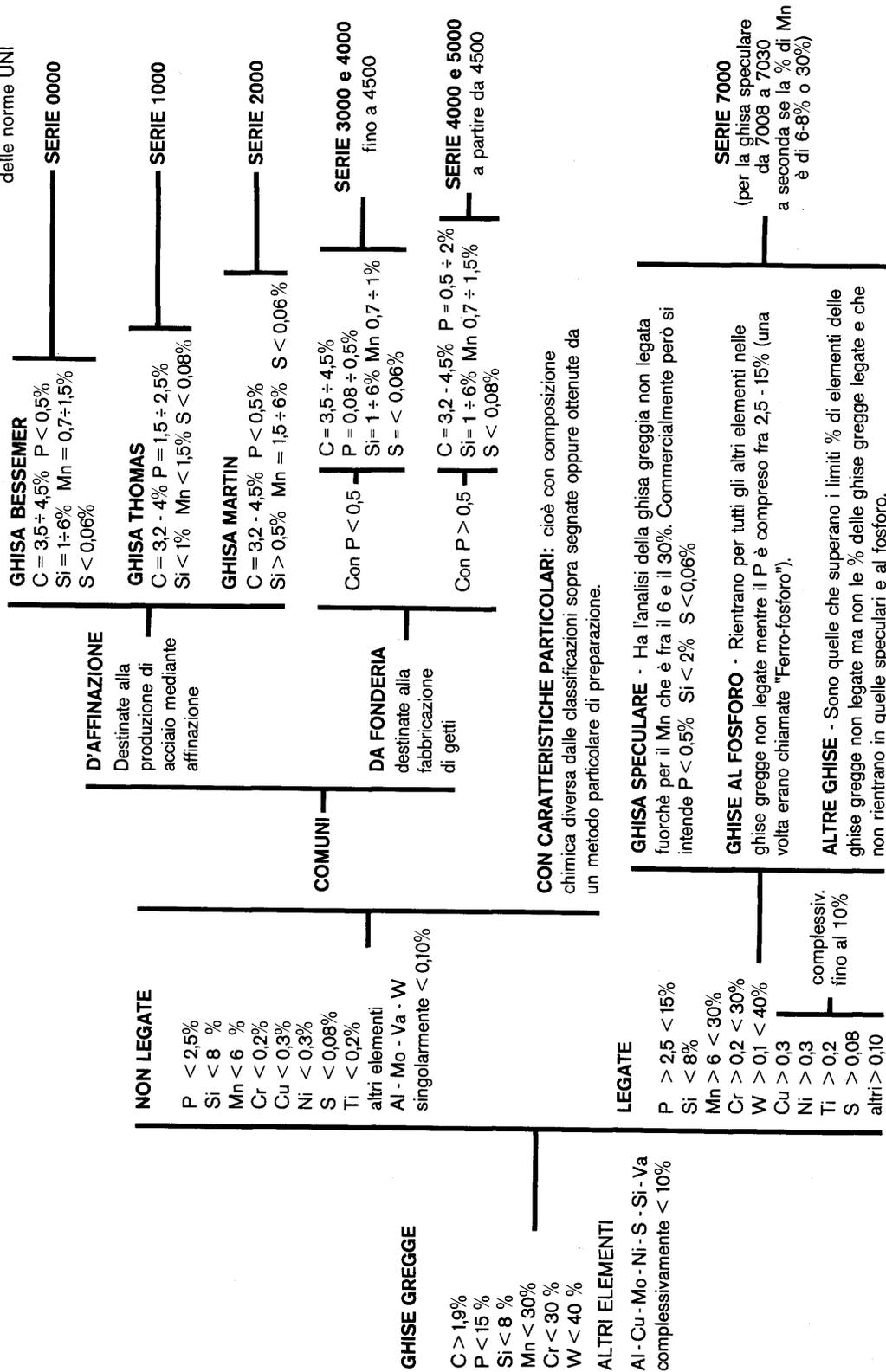
Non ho la pretesa di dire nulla di nuovo nel campo dei trattamenti termici delle ghise, ma solo cercare di mettere un po' d'ordine in questo campo, che per molti versi è praticamente ancora agli inizi. È solo con l'introduzione delle ghise nodulari infatti che il trattamento termico, inteso in tutta l'estensione che può assumere questo processo nella metallurgia, ha ragione di essere applicato come per l'acciaio e può sviluppare appieno le possibilità nuove che questa lega offre. Esistono ancora per le ghise e particolarmente per le sferoidali, in relazione alle possibilità che offrono con i trattamenti termici, serie difficoltà causate da una classificazione che non tiene conto della analisi chimica, ma esclusivamente della resistenza alla trazione. Segno evidente, anche questo, del ritardo con cui le norme seguono l'evolversi rapido della tecnologia.

Ma come ormai nessun tecnico penserebbe più di utilizzare un pezzo di acciaio senza averlo sottoposto a trattamento termico al fine di sfruttarne a fondo le possibilità, è augurabile che nel giro di pochi anni tale maturazione riesca a coinvolgere anche il campo delle ghise e contribuisca a creare le basi per una più razionale classificazione.

# CLASSIFICAZIONE CHIMICA DELLE GHISE

TABELLA 1

Numero di serie  
secondo la classificazione  
delle norme UNI



---

# **DEFINIZIONE DI GHISA**

## **CLASSIFICAZIONE CHIMICA**

### **DELLE GHISE**

---

La ghisa è una lega contenente il 2% o più di carbonio e nella quale il ferro è l'elemento predominante in peso. I tenori limite degli altri elementi che compongono le ghise sono:

FOSFORO	< 15%
SILICIO	< 8%
MANGANESE	< 30%
CROMO	< 30%
WOLFRAMIO	< 40%
Altri elementi (es. Al-Cu-Mo-Ni-S-Ti-Va) complessivamente	< 10%.

Caratteristica fondamentale della ghisa, che la differenzia dagli altri prodotti ferrosi commerciali (ferro-acciaio), è che non può essere fucinata o saldata a caldo. Per contro ha un punto di fusione notevolmente basso rispetto all'acciaio ed una scorrevolezza allo stato fuso, che ne fanno un materiale particolarmente adatto alla fusione di getti anche complessi.

La diversità di analisi chimica delle ghise esaminate nella tabella 1 è da attribuirsi in primo luogo alla diversa composizione chimica dei minerali di ferro usati per la loro fabbricazione, in secondo luogo alle diverse norme di marcia dell'altoforno, ed ancora alle eventuali correzioni con aggiunte di elementi effettuate quando la ghisa, già spillata dall'altoforno, viene rifiusa e rielaborata in forni fusori.

I minerali di ferro della Francia, della Germania, del Belgio e Lussemburgo, ricchi di

fosforo, daranno origine a ghise ad alto tenore di fosforo, adatte cioè all'affinazione in forni a rivestimento refrattario basico (Ca O - Mg O) classico fra i quali è il convertitore Thomas donde il nome di ghisa d'affinazione Thomas.

Viceversa minerali più puri in fosforo daranno origine a ghise con bassi tenori in tale elemento, ma dovranno essere ricche in Si, nel caso delle ghise destinate all'affinazione al convertitore acido Bessemer, perché tale elemento dovrà servire come elemento termogeno per provocare l'aumento della temperatura della carica durante l'insufflazione di aria.

Invece al forno Martin è possibile utilizzare ghise con basso tenore di silicio e basso tenore di P, non utilizzabili ai convertitori perché prive dei due elementi termogeni necessari al loro funzionamento.

Le ghise da fonderia per la produzione di getti, nella loro vasta gamma di analisi offrono la possibilità di ottenere tutte le possibili microstrutture.

Anche se classificate a parte per necessità di chiarezza è evidente che le ghise con caratteristiche particolari (es. ghise al Mg) e le ghise legate possono pure essere colate in getti.

Alcune ghise legate rientrano nel campo delle ferroleghie, che sono largamente usate nei processi di fabbricazione dell'acciaio come correttivi, ed inoltre nei processi di elaborazione di ghise per la produzione di getti in fonderia.

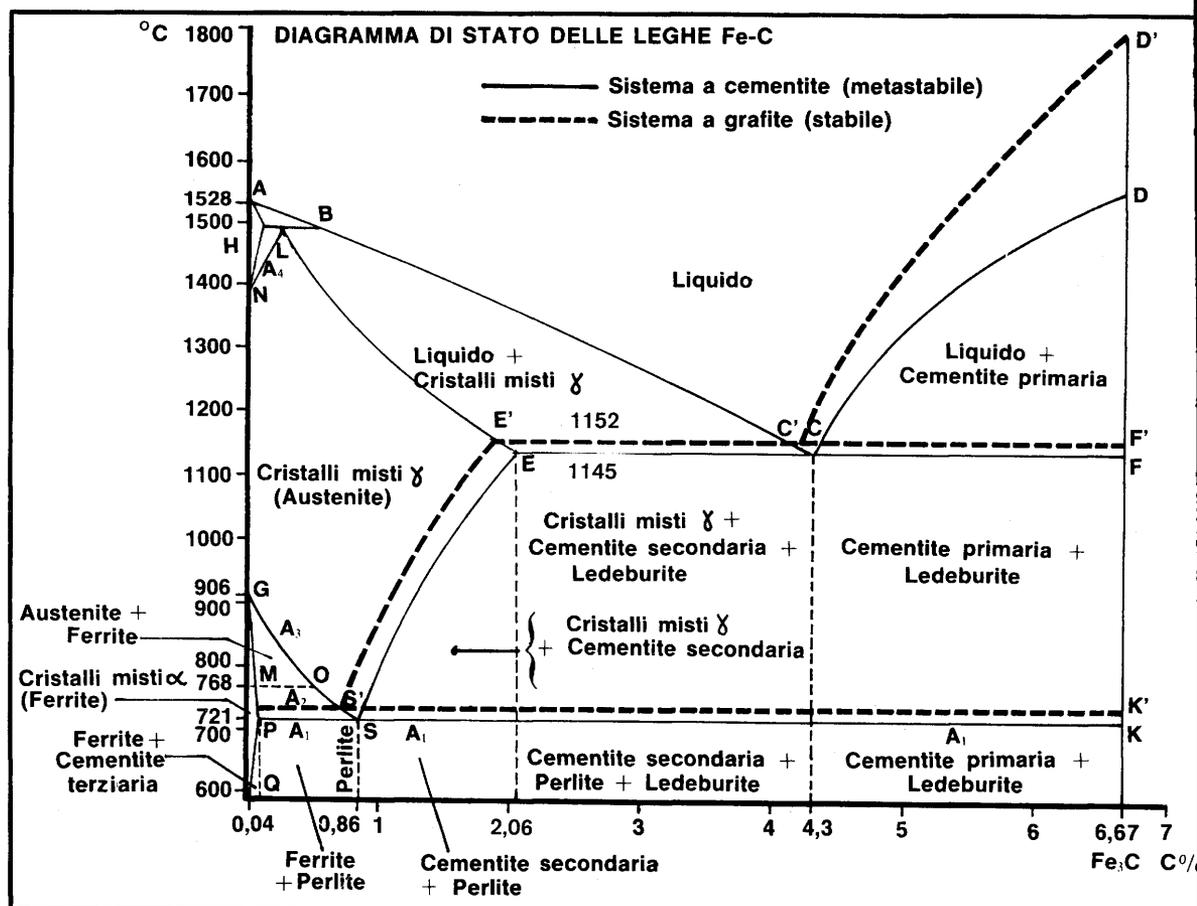
# CLASSIFICAZIONE STRUTTURALE DELLE GHISE

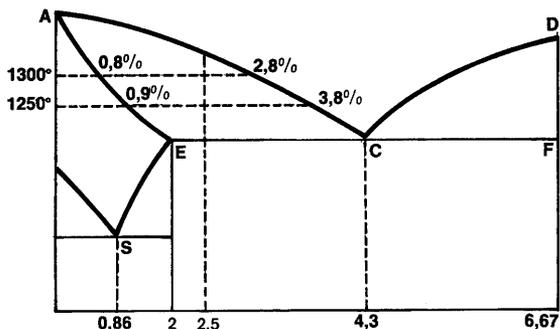
## Diagramma ferro carbonio

Agli effetti di una chiara visione delle diverse forme strutturali nelle quali può presentarsi una ghisa, è pur sempre indispen-

sabile rifarsi al diagramma di stato delle leghe ferro carbonio.

Dal diagramma risulta innanzitutto come in linea teorica una ghisa non può contenere meno del 2% di C (nel caso di equilibrio stabile) e non può presentare più alcun interesse qualora il C superi il 6,67%.





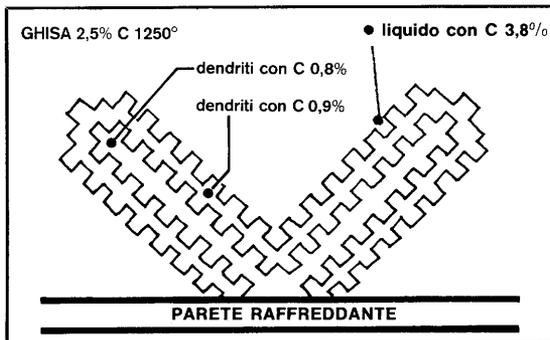
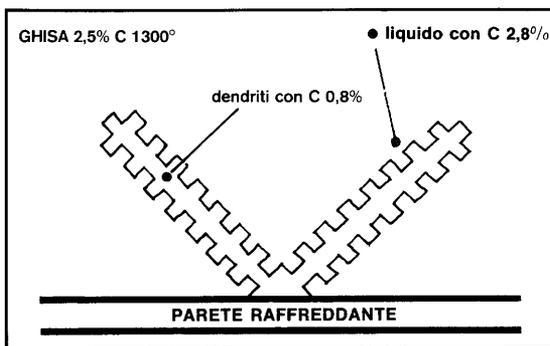
Analizziamo ora il comportamento al raffreddamento di una ghisa fusa con analisi ipoeutettica in condizioni metastabili (condizione del tutto teorica).

Prendiamo in considerazione una ghisa con circa il 2,5% di C. Quando la temperatura coincide con l'inizio della fase solida cominceranno a separarsi dei cristalli di ferro  $\gamma$  saturi di carbonio (detti cristalli misti  $\gamma$ ), con concentrazione in carbonio data dall'incontro della orizzontale che passa

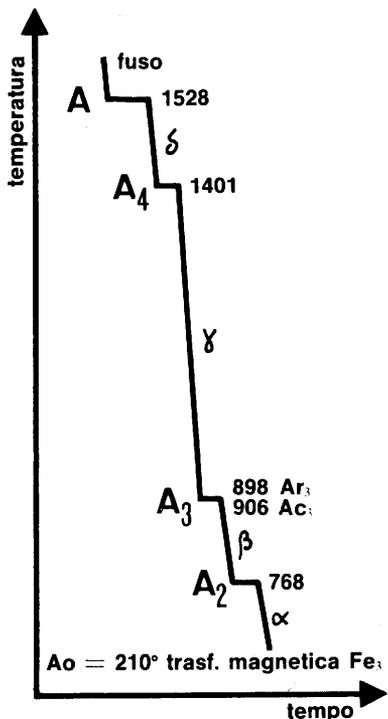
dalla temperatura raggiunta con la linea AE. La concentrazione del carbonio nel liquido sarà data dall'incontro dell'orizzontale con la linea opposta AC.

Al raggiungimento della linea EC il liquido ancora da solidificare avrà raggiunto la concentrazione in carbonio del 4,3% e darà origine nel successivo raffreddamento all'eutettico ledeburite, ad una fase cioè costituita da cristalli di cementite e cristalli di ferro  $\gamma$  saturi di C (2,06%).

Alla temperatura di 1145° avremo quindi



### CURVA RAFFREDDAMENTO Fe PURO



una ghisa che sarà costituita da dendriti di ferro  $\gamma$ , che a mano a mano si sono ingrossate saranno sempre più ricche di C fino ad una concentrazione max del 2,06%, per terminare con le zone interdendritiche, ultime a solidificare, che avranno una composizione uguale all'eutettica. Per schematizzare il concetto possiamo raffigurare la ghisa all'inizio di solidificazione quando si formano le prime dendriti.

È evidente che la struttura tenderà a omogeneizzarsi per diffusione del carbonio, in modo tanto migliore quanto più lento sarà il raffreddamento, cioè tanto più lunga sarà la permanenza ad alte temperature della ghisa (vedi fig. 1).



Dendriti di austenite in via di accrescimento. Struttura ottenuta temprando la ghisa da temperatura leggermente superiore alla linea EF (X 200).

Ci troviamo dunque a  $1145^{\circ}$  con una ghisa costituita da:

- 1°) cristalli  $\gamma$  saturi di C.
- 2°) da cristalli molto più piccoli e vicinissimi fra di loro di cementite e ferro  $\gamma$  saturo sempre di C, che costituiscono la ledeburite (vedi fig. 2).

È evidente che ad un ulteriore raffreddamento i cristalli  $\gamma$  saturi di C separeranno quest'ultimo secondo la linea ES dando origine (siamo nel sistema metastabile) a cementite secondaria fino ad arrivare alla temperatura di  $721^{\circ}$  dove la restante austenite satura si trasformerà in perlite (vedi fig. 3).

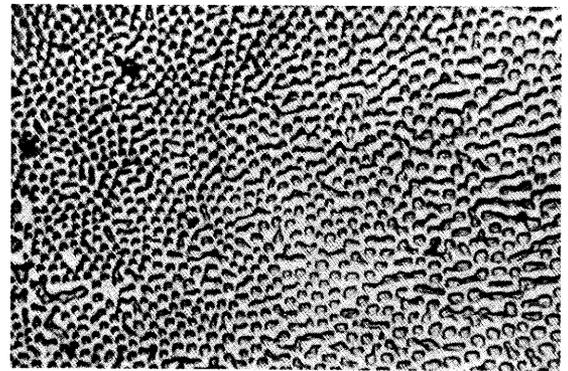
A  $721^{\circ}$  avremo dunque le dendriti costituite da ferro  $\gamma$  saturo, che avranno espulso ai bordi la cementite secondaria e loro stesse si saranno trasformate in dendriti costituite da perlite. Le zone ledeburitiche conserveranno ancora, apparentemente, la stessa configurazione. Tenendo conto che la perlite è costituita da ferrite e cementite a  $721^{\circ}$  avremo:

- 1°) - ledeburite (cementite + austenite, quest'ultima trasformata in cementite secondaria + perlite) nelle zone interdendritiche.
- 2°) - cementite secondaria + perlite (cioè ferrite + cementite) nelle zone di prima solidificazione.

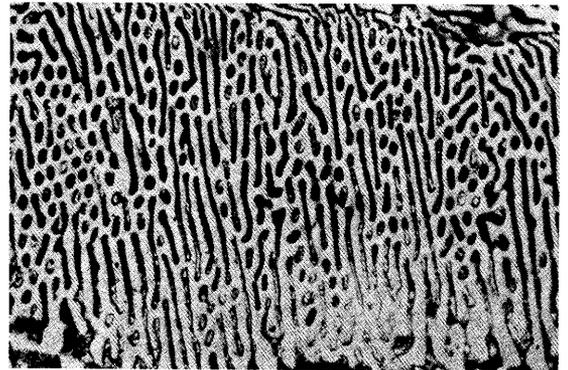
Tale struttura la ritroveremo a temperatura ambiente (salve piccolissime modificazioni dovute ad una ulteriore espulsione di

cementite terziaria dalla ferrite che segue la legge della linea PQ) e la ghisa ottenuta avrà un aspetto alla rottura bianco con aspetti brillanti dovuti alla rottura dei cristalli di cementite.

Consideriamo ora la stessa ghisa presa in esame nel caso precedente ma con raffreddamento che avvenga in condizioni di equilibrio stabile (condizione sempre del tutto teorica). Quando la temperatura arriverà all'inizio della fase solida si separeranno dal liquido dei cristalli misti  $\gamma$  con caratte-



Ledeburite - Attacco Nital - X 750.

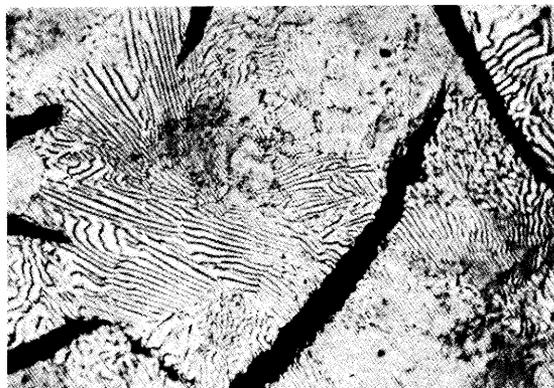


Ledeburite - Attacco Nital - X 750.

ristiche analoghe al caso precedente, mentre il liquido si arricchirà come prima di C. Arrivati alla temperatura di  $1152^{\circ}$  si avrà la solidificazione a temperatura costante del liquido rimanente dando origine a grafite e cristalli misti  $\gamma$  con concentrazione in C di circa 2%.

A  $1152^{\circ}$  avremo dunque una struttura formata di dendriti di ferro che hanno una %

Struttura di ghisa grigia perlitica (lamelle di grafite in matrice di perlite) - Attacco Nital X 500.



di C crescente mano a mano che vengono considerate negli strati più esterni fino ad arrivare alle zone ultime solidificate composte da cristalli misti  $\gamma$  con concentrazione di C 1,3% e noduli di grafite.

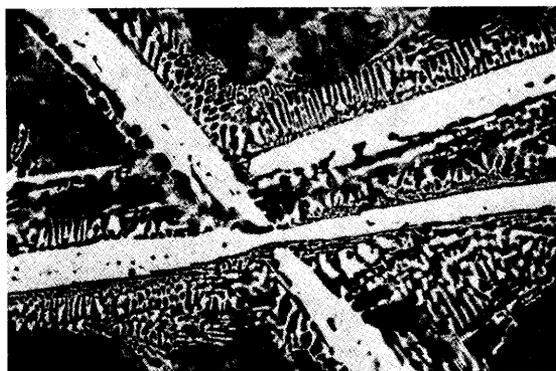
Ad un ulteriore raffreddamento, mentre la grafite non potrà più subire alcun mutamento, i cristalli misti di ferro  $\gamma$  seguiranno la trasformazione secondo la legge della linea E'S', e cioè libereranno grafite fino a raggiungere la concentrazione di 0,7% circa in C alla temperatura di 733°. A questa temperatura il ferro  $\gamma$  si trasforma in ferro  $\alpha$ , che può tenere in soluzione al massimo 0,04% di C e quindi tutto il carbonio eccedente si trasforma ancora in grafite. All'abbassarsi successivo della temperatura la solubilità del C nel ferro  $\alpha$  diminuisce ancora seguendo la linea P'Q fino ad arrivare alla concentrazione max di 0,01% mentre il C in eccedenza si trasforma in grafite.

Il risultato finale di questo tipo di raffreddamento dà quindi origine ad una ghisa composta da ferro  $\alpha$  (ferrite) fra i grani cristallini del quale si trova allo stato più o meno disperso a seconda della temperatura di formazione, la grafite. La ghisa così ottenuta avrà una frattura di colore grigio dovuto alla presenza della grafite.

La ferrite in questo caso prende il nome di ferrite diretta perché ottenuta direttamente durante la solidificazione della ghisa, per distinguerla dalla ferrite indiretta che è ottenuta invece con opportuni trattamenti termici da strutture perlitiche (metastabili).

Analizziamo ora il comportamento al raffreddamento di una ghisa fusa ipereutettica in condizioni metastabili (condizione teorica).

All'incontro con la linea di inizio solidificazione cominceranno a separarsi cristalli di cementite (primaria) che impoveriranno, via via che la temperatura scende, il liquido restante fino ad ottenere una percentuale di C corrispondente all'eutettico alla temperatura di 1145°. A questa temperatura solidificherà tutta la ghisa restante sotto forma di ledeburite (cementite + austenite satura) e la struttura che ne deri-



Cementite primaria (lunghi aghi bianchi) in una ghisa ipereutettica - Attacco Nital - X 300.

verà sarà di grossi cristalli di cementite attornati da una fase ledeburitica in proporzioni variabili a seconda dell'analisi della ghisa di partenza (Vedi fig. 4).

Al successivo raffreddamento l'austenite che compone la ledeburite si trasformerà seguendo la legge già esaminata per il caso della ghisa ipoeutettica, anche se lo aspetto al microscopio ad ingrandimenti normali non potrà rilevare sostanziali cambiamenti alla forma di presentazione della ledeburite stessa. A temperatura ambiente avremo quindi una ghisa composta da:

- 1° cementite in grossi cristalli
- 2° ledeburite (composta da cementite e austenite satura, quest'ultima trasformata in cementite secondaria + perlite), anche in questo caso però il ferro  $\alpha$  della perlite si sarà decomposto lungo la linea PQ dando luogo ad una lievissima modificazione di struttura.

La ghisa avrà una frattura di aspetto bianco brillante dovuta ai cristalli di cementite. Resta infine da esaminare una ghisa iper-eutettica che raffreddi in condizioni di equilibrio stabile (condizione teorica).

Durante il raffreddamento, all'incontro con la linea C'D', comincerà a separarsi grafite primaria o « grafite di schiuma » (perché sale alla superficie del liquido), che impoverirà di C il liquido restante fino ad arrivare a 1152° ad una concentrazione in C del liquido di circa 4,2%. Ad un ulteriore raffreddamento, il liquido darà origine a grafite (ledeburitica) e austenite satura con C circa 2%. Avremo a questo punto una ghisa solida formata da: grossi grani di grafite primaria, grafite più finemente suddivisa dell'eutettico, e cristalli di ferro  $\gamma$  saturo.

Al successivo raffreddamento i cristalli misti si comporteranno come nel caso precedentemente esaminato della ghisa ipoeutettica, sistema a grafite, e si otterrà una struttura di ferro  $\alpha$  fra i grani della quale si troverà più o meno finemente suddivisa la grafite.

La struttura di questa ghisa sarà ancora di colore grigio per la presenza di grafite.

È evidente che le condizioni di equilibrio, esaminate in questi quattro casi, in pratica non sono rispettate, ma si avranno sempre dei risultati che contemplano la presenza contemporanea di strutture miste, con prevalenza di quelle stabili o quelle metastabili a seconda delle velocità di raffreddamento e degli elementi di lega, aggiunti o congeniti, che, come vedremo, possono influenzare con la loro presenza la formazione di una struttura piuttosto dell'altra. Dall'esame di questi 4 casi si è evidenziata la prima grande classificazione strutturale delle ghise:

a) ghise bianche

b) ghise grigie

Esiste ancora la possibilità, quando il carbonio è in parte libero come grafite e in parte combinato come cementite, che si formino delle zone bianche e zone grigie adiacenti. Si parla allora di ghise trotate. Come accennato, oltre alle velocità di raffreddamento, influiscono in maniera determinante, alla formazione di una ghisa bianca o grigia, gli elementi leganti; sarà bene quindi esaminare dettagliatamente l'influenza dei vari elementi, normalmente presenti o aggiunti nelle ghise, sulle modifiche strutturali che comportano.

---

# **INFLUENZA DEGLI ELEMENTI LEGANTI SULLA STRUTTURA**

---

## **Silicio**

---

Agli effetti delle caratteristiche della ghisa è l'elemento più importante subito dopo il carbonio. È un elemento grafitizzante, cioè favorisce la formazione della grafite a scapito della cementite. La sua presenza quindi avvicina la ghisa nel raffreddamento alle condizioni di equilibrio stabile. La sua azione grafitizzante comincia a farsi sentire con l'1% per arrivare al massimo a circa il 2% di concentrazione. Col 3% di silicio, in ghise normali da fonderia, anche con velocità di raffreddamento assai elevate (gettate in conchiglia) la maggior parte del C precipita come grafite e la matrice risulta ferritica.

L'azione grafitizzante si esplica non solo nella formazione di grafite durante il raffreddamento della ghisa liquida ma anche nella tendenza alla decomposizione della eventuale cementite presente nella ghisa durante i riscaldi cui può di nuovo essere sottoposta. Questa azione è tanto più intensa quanto più alto è il contenuto di carbonio totale (cementitico + grafitico).

Un altro effetto del silicio è la diminuzione della solubilità del carbonio nel ferro. In conseguenza di ciò avremo uno spostamento a sinistra della linea C'D' del diagramma ferro-carbonio e la formazione di eutettico con % di carbonio minore (col 2% di Si l'eutettico ha il 3,8% di C, col 20% di Si si arriva quasi all'1% di C). In

compenso la temperatura di formazione dell'eutettico aumenta (col 2% di Si la temperatura di formazione della ledeburite è di circa 1160°).

Inoltre il contenuto di carbonio della perlite si abbasserà con l'aumento del tenore di silicio, mentre anche in questo caso la temperatura di formazione dell'eutettico si innalzerà (col 2% di Si il C dell'eutettoide sarà di circa 0,5%, mentre la temperatura si innalzerà a circa 770°). La linea E'S' si sposterà anch'essa a sinistra.

Queste fin qui elencate sono le azioni che il Si esercita verso il C della ghisa, ma tenuto conto che la ghisa è composta da una matrice che può essere costituita da ferrite, perlite, ledeburite, cementite o da una miscelanza in proporzioni svariatissime di queste fasi, nella quale si trova disperso il C sottoforma di lamelle o fiocchi di grafite, è necessario anche esaminare l'influenza del silicio su questa matrice, che può essere paragonata dal punto di vista chimico-strutturale ad un acciaio. Quando la sua presenza è in percentuali maggiori del 3% è difficile evitare, anche con velocità di raffreddamento molto alte, una struttura completamente ferritica con lamelle di grafite, come è già stato detto. Nella ferrite il silicio si trova in soluzione solida e come tale ne aumenta leggermente la durezza, ma, impedendo la formazione di cementite, non permette la rapida dissoluzione del C nella matrice austenitica di una ghisa portata oltre Ac<sub>1</sub> (la grafite è trop-

po grossolana per sciogliersi rapidamente) e quindi la precipitazione della martensite durante il raffreddamento di tempra della ghisa; impedisce così il fenomeno di indurimento dopo tempra di questo tipo di ghisa. Le ghise ferritiche sono quindi quelle che dal punto di vista dei trattamenti termici presentano interesse solo marginale.

Con tenori di Si dall'1 al 2% invece si hanno possibilità di ottenere strutture perlitiche che oltre ad avere maggiore resistenza della ferrite si prestano alle trasformazioni termiche proprie di questa fase. In questo caso il Si ha pure influenza come elemento di lega ed allora aumenta la capacità di tempra della ghisa in quanto durante il raffreddamento da oltre  $A_{c1}$  ostacola la formazione della cementite dalla austenite. Ci si avvicina cioè più facilmente al punto  $M_s$  senza che la austenite si sia decomposta e quindi la formazione di martensite sarà più completa. Nel successivo rinvenimento il Si si trova in soluzione nella martensite e ostacola col suo reticolo il fenomeno di globulizzazione della cementite aumentando così la resistenza all'addolcimento della martensite stessa.

Il silicio favorisce l'ingrossamento del grano durante il riscaldamento e provoca la fragilità di rinvenimento.

## **Manganese**

Il manganese ha un ruolo opposto a quello del silicio, quindi tanto più è alto il suo tenore tanto più la ghisa tende a solidificare bianca. Infatti se il tenore di Mn supera lo 0,8% occorre aumentare il Si presente al fine di evitare una eccessiva presenza di carburi.

Sempre comportamento opposto al silicio ha anche nei confronti della solubilità del C nel ferro che viene in questo caso innalzata quanto all'incirca viene abbassata dal Si. Un'azione molto importante del Mn, che ha una sua utilità essenziale anche nel campo degli acciai, è la diminuzione della fragilità a freddo (e anche a caldo per gli

acciai) dovuta alla presenza di zolfo. Si ritiene che la quantità di manganese necessaria per neutralizzare l'effetto dannoso dello S sia di due parti di Mn per una di S. L'azione neutralizzante si spiega con l'enorme affinità del Mn verso lo S: si origina un solfuro di Mn a scapito del solfuro di ferro altrimenti presente. Il solfuro di Mn avendo un punto di fusione molto più alto della ghisa solidifica prima che inizi la separazione della soluzione solida, in piccolissimi cristalli che vengono poi inglobati nella ghisa mano a mano che solidifica. Disperso nella matrice metallica il solfuro di Mn non è più dannoso. (Il solfuro di ferro è ancora dannoso per l'acciaio perché, formando un eutettico col ferro che fonde a circa 1000°, ne impedisce la fuco-natura che si svolge appunto intorno a tale temperatura, mentre il solfuro di Mn che fonde a temperatura molto più alta non dà inconvenienti).

Nelle ghise ferritiche il Mn aumenta la durezza della ferrite nella quale entra in soluzione.

Nelle ghise perlitiche aumenta l'intervallo di isteresi fra  $A_{c3}$  e  $A_{r3}$  della perlite e quindi aumenta la temprabilità. Non solo ma il Mn aumenta notevolmente il campo dell'austenite abbassando il punto di trasformazione  $A_3$  avvicinandolo ad  $M_s$ . Il salto di temperatura da fare per arrivare da  $A_3$  a  $M_s$  è quindi più basso e la velocità critica di tempra si abbassa.

Una elevata % di Mn determina una elevata sensibilità al surriscaldamento o ingrossamento del grano, ed inoltre un notevole aumento della fragilità di rinvenimento. Il Mn determina ancora un elevato aumento del limite elastico.

## **Fosforo**

Il fosforo abbassa la temperatura di fusione della ghisa e quindi la ghisa rimane più a lungo liquida. Aumenta perciò la scorrevolezza e la colabilità della ghisa stessa.



Eutettico fosforoso. Attacco Nital X 1000.



Eutettico fosforoso (steadite) - Attacco Nital - X 400.

L'abbassamento del punto di fusione avviene per la formazione di un eutettico ferrosofosforo di ferro che si ritrova all'esame microscopico nelle ghise grige sotto forma di reticolo. L'eutettico è chiamato « steadite » (vedi fig. 5).

Il fosforo abbassa, come il Si, il contenuto di C. dell'eutettico e, se in quantità notevole, influisce sulla forma e ripartizione della grafite arrivando alla formazione di « nidi di grafite ».

Il fosforo aumenta la resistenza della ghisa quando è presente fino a un tenore massimo dello 0,3%, oltre questa % la resistenza diminuisce rapidamente ed aumenta la fragilità. Infatti oltre questa % la steadite tende a chiudersi in un reticolo, che interrompe la continuità della matrice della ghisa infragilendola. Il fosforo aumenta ancora la resistenza all'usura, perché conferisce notevoli proprietà antigrippanti.

## Zolfo

Lo zolfo è un elemento carburante; già con una presenza dello 0,1% ostacola la separazione della grafite. La sua azione va quindi bilanciata con aggiunta di Si.

Con il Fe e il Mn forma dei solfuri con gli effetti già illustrati a proposito del Mn. A titolo orientativo si può dire che con 0,8% di Mn si possono tollerare tenori di S sino a 0,15%, senza che le proprietà della ghisa peggiorino notevolmente.

Sino a questo punto sono state esaminate le influenze sulla ghisa, dal punto di vista strettamente strutturale, dei vari elementi che entrano a far parte della stessa, perché già presenti nelle materie prime che concorrono alla sua fabbricazione. Per modificare ancora, migliorandole, le strutture ottenibili dalla ghisa di fusione, o, addirittura, dalla ghisa sottoposta a trattamento termico, si è ricorsi via via all'aggiunta di altri elementi leganti che possono a loro volta, in contrapposizione o a rinforzo degli effetti prodotti dagli elementi già esaminati, allargare ancora le varietà strutturali possibili.

## Nichel

Il Ni ha un'azione grafitizzante analoga al Si anche se più blanda.

In una ghisa contenente Ni, il Si sarà presente in % minori, tenendo conto però che il rapporto di diminuzione è soggetto fortemente alle condizioni sperimentali.

Il Ni aumenta la tenacità della ghisa e ne affina e uniforma la struttura, specie quando si tratta di getti a spessore diverso, in quanto rende meno sensibile la ghisa alle diverse velocità di raffreddamento (le zone più spesse riescono ugualmente ad affinarsi durante il raffreddamento).

Esso diminuisce la porosità dei getti e ne aumenta la densità.

La ghisa al Ni è meno sensibile ai rapidi

raffreddamenti e si presta assai bene quindi a colare getti sottili e resistenti meccanicamente.

Nelle ghise grige ferritico-perlitiche il Ni ha sulla matrice effetti notevolmente benefici. Nella ferrite si trova in soluzione solida e ne aumenta la durezza; conferisce già a bassi tenori una certa resistenza agli agenti atmosferici. Nelle ghise perlitiche abbassa i punti di trasformazione e soprattutto aumenta notevolmente l'isteresi al raffreddamento, tanto che con Ni fino a circa 6% e raffreddamento lento la struttura è ancora perlitica, con Ni 10-22% la struttura diventa martensitica (autotemperante), con Ni > 26% si ha solo più austenite (es. ghise No-Mag col 20-25% di Ni non più magnetiche).

Le aggiunte più comuni di Ni nelle ghise sono dell'ordine dell'1%.

## **Cromo**

Il cromo ha una netta tendenza alla formazione di carburi che nel caso delle leghe ferro carbonio sono generalmente carburi doppi di ferro e Cr.

Questa tendenza porta ad un aumento della durezza nella ghisa che lo contiene. Sulla matrice metallica della ghisa grigia il Cr ha come effetto l'aumento della stabilità del campo del ferro  $\alpha$ , effetto tanto maggiore quanto minore è la presenza del C combinato. Infatti mentre in una matrice senza C combinato basta il 13% di Cr per rendere la struttura completamente ferritica a qualsiasi temperatura con lo 0,25% di C occorre già il 23% di Cr e con 0,40% di C 30% di Cr. Il cromo quindi in assenza di C non agisce sulla capacità di tempra (non allarga infatti la stabilità del campo  $\gamma$  e non aumenta l'isteresi al raffreddamento) ma in presenza di C e quindi formando carburi ha un duplice effetto sulla temprabilità:

1) I carburi, scarsamente solubili nella austenite, formano una specie di reticolo intorno ai grani cristallini, rallentandone l'ingrossamento, e permettendo quindi di raggiungere temperature di tempra più elevate senza avere fenomeni di surriscaldamen-

to; facilitano in questo modo la capacità di tempra.

2) Gli stessi carburi, che sono entrati in piccola parte in soluzione nell'austenite, avendo una bassa velocità di diffusione e quindi di precipitazione da carburo disciolto, aumentano la stabilità dell'austenite e quindi la capacità di tempra.

Il cromo ha ancora l'effetto di spostare verso valori minori di C l'eutettico e l'eutettoide.

Le ghise con aggiunte contemporanee di Ni e Cr sono le più comuni fra le ghise speciali; esse presentano grande uniformità di struttura anche per sezioni molto variabili e una elevata finezza di grano, buona lavorabilità meccanica e buona resistenza all'usura. I rapporti più favorevoli sono di 2% di Ni per 1% di Cr.

## **Molibdeno**

Ha una leggera azione stabilizzante dei carburi e già in piccole % affina fortemente la struttura della grafite.

Agli effetti della matrice metallica ha un comportamento analogo a quello del Cr aumenta cioè la stabilità della fase  $\alpha$  (già col 3% di Mo in una matrice *senza C combinato* sparisce la fase  $\gamma$ ) pur agendo, come già visto per il cromo, in senso favorevole alla temprabilità in presenza di C combinato. Per questo motivo il Mo nelle ghise produce strutture più regolari e uniformi anche in getti di sezioni molto variabili. Inoltre migliora notevolmente la resistenza meccanica all'usura e al calore.

L'azione benefica del Mo sulla struttura della ghisa è neutralizzata dalla presenza del Si, per cui se in ghise normali con tenori di Si < 1,7% già lo 0,12% di Mo fa sentire i suoi effetti, in ghise con tenori di Si > 1,9% occorrono tenori di Mo di almeno 0,50%.

Anche il P dovrà essere contenuto in tenori inferiori al 0,15% per la tendenza che ha il Mo di formare con il P degli eutettici complessi di tipo steaditico, che oltre a sottrarre Mo alla matrice metallica aumentano la fragilità del materiale.

In tenori molto alti (maggiori del 2,5%) il

Mo forma nella ghisa dei carburi complessi molto duri, stabili e difficilmente solubili. Infine l'aumento della temprabilità della ghisa indotto dalla presenza del Mo (che, a seconda delle % genera prima un affinamento della perlite, poi, con l'aumentare del tenore, strutture bainitiche e infine aciculari) viene sfruttato, insieme all'azione del Ni, nella produzione di ghise aciculari (tipica è la presenza in queste ghise di 1,5% di Ni e 0,5 % di Mo).

## **Vanadio**

---

Ha una fortissima azione stabilizzante sui carburi, affina la perlite fino a dare strutture sorbitiche già al raffreddamento del getto nella staffa.

Rende più uniforme la distribuzione della grafite e ne rimpicciolisce le dimensioni. Per queste sue alte qualità affinanti si aggiunge quando si voglia ottenere una struttura omogenea in getti con notevoli variazioni di spessori (caratteristica peculiare delle ghise al vanadio è la totale assenza di ferrite anche a cuore di grossi getti).

Si aggiunge in % dello 0,2-0,3% in ghise contenenti Ni e Ti, per compensare il loro effetto di addolcimento.

## **Rame**

---

Il rame ha tendenza grafitizzante ma più blanda di quella del silicio (circa 1/4). La sua presenza aiuta quindi l'azione del Si ad evitare la formazione di ghise bianche. Ha effetto affinante sulla struttura primaria delle ghise (specialmente quelle bianche) e tende a rendere la grafite più dispersa e arrotondata.

Il rame ha inoltre un effetto indurente notevole in quanto, oltre ad agire come già detto sulla struttura primaria, agisce sulla matrice acciaiata della ghisa allargando il campo del ferro  $\gamma$  ed aumentando l'isteresi al raffreddamento; rende cioè la matrice più temprabile allo stesso modo del Ni. Ha quindi una energica azione antiferritizzante, al contrario del Si, al posto di una parte del quale si usa in quei casi in cui, per ne-

cessità di evitare la formazione di ghisa bianca in getti molto sottili, e quindi a raffreddamento rapido, si dovrebbe aumentare talmente il tenore di Si da ottenere una ghisa, grigia sì, ma tutta ferritica.

Per l'azione antiossidante alle alte temperature (fino a 700°) dovuta probabilmente alla formazione di un velo di ossido di rame superficiale che agisce da protettivo per gli strati inferiori, viene usato per ghise refrattarie al Cr Cu (0,3% di Cr; 1-2% di Cu). Mentre per l'azione protettiva agli agenti atmosferici e per l'azione austenitizzante viene aggiunto con il Cr-Ni e con il Ni-Mn nelle ghise austenitiche in % del 6-8%.

Il rame inoltre aumenta notevolmente il limite elastico.

Altro comportamento importante del rame riguarda la sua solubilità nel ferro. Nel ferro  $\gamma$  può entrare in soluzione fino a 8-10%, nel ferro  $\alpha$  fino alla temperatura di  $A_1$  può entrare in soluzione fino al 1,3%, mentre a temperatura ambiente la solubilità scende fino a 0,4%. Questa variazione di solubilità dà luogo a possibilità di indurimento per precipitazione da soluzione sovrassatura di particelle di rame: si può scaldare la ghisa (naturalmente con più dello 0,4% di Cu) fino vicino ad  $A_1$  se è ferritica, a temperature inferiori che non diano luogo a trasformazioni in ferro  $\gamma$  se perlitica, e raffreddando rapidamente fino a temperatura ambiente. Dopo di che si rinvia a 450° circa per parecchie ore e si ottiene un indurimento per precipitazione delle particelle di Cu da soluzione sovrassatura (circa 10 Kg/mm<sup>2</sup> di aumento di durezza). Altro procedimento può essere il riscaldamento fino al campo  $\gamma$ : nel caso di ghisa ferritica si può avere sempre il solito indurimento per successiva precipitazione del rame; nel caso di ghisa perlitica, nel raffreddamento rapido fino a temperatura ambiente, si ha la formazione di martensite tanto più completa in quanto c'è la presenza del rame che aumenta la temprabilità, e nel successivo rinvenimento la diminuzione della durezza e dello snervamento (dovuti alla decomposizione della martensite) viene in parte compensata dalla precipitazione del rame.

## **Alluminio**

---

L'alluminio in percentuali dello 0,5-1,5% viene aggiunto alle ghise insieme al Cr (0,2 ÷ 2%) e al Mo (0,30-0,70%) allo scopo di poterle indurire mediante nitrurazione. Infatti è fortissimo il suo effetto indurente per la formazione di nitruri di alluminio. Fino al 4% l'alluminio ha effetto grafitizzante e le ghise con questi tenori di Al hanno notevoli doti di inossidabilità a caldo e resistenza alla solforazione.

Oltre questa percentuale l'effetto grafitizzante diminuisce, tanto che col 10% di alluminio tutto il carbonio si combina col Fe e l'Al per formare un carburo complesso, detto fase  $\Sigma$ , e la ghisa solidifica bianca. Oltre il 18% di alluminio riappare invece la grafite, che è dispersa in una matrice ferritica, mentre al 27% si forma un carburo di alluminio ( $Al_4 C_3$ ) che appare in forma aciculare in matrice ferritica.

Con l'aumentare della percentuale di Al aumentano la resistenza alla ossidazione a caldo anche in presenza di zolfo e la resistività elettrica, mentre diminuisce la densità della ghisa. Oltre il 5% aumenta notevolmente anche la fragilità. Sulla matrice l'alluminio ha un effetto ferritizzante molto forte, tanto che nel ferro con l'1% di alluminio scompare la fase  $\gamma$ .

## **Magnesio-Cerio**

---

Questi due elementi, di recente introduzione quali elementi aggiuntivi nelle ghise, hanno la particolare proprietà di fare solidificare la ghisa con la grafite a forma sferoidale anziché lamellare. Gli enormi vantaggi che derivano da una simile trasformazione sono stati determinanti per un rilancio dei getti fusi in ghisa a scapito di quelli in acciaio. Ma di questi tipi di ghisa sarà bene parlare diffusamente più avanti (alla voce ghise sferoidali o nodulari).

## **Tellurio**

---

L'aggiunta di tellurio in % dello 0,2% circa ha un notevole effetto carburogeno e faci-

lita quindi l'ottenimento di strutture bianche anche in getti di notevole spessore (100 mm). Caratteristica di questi carburi è quella di non essere stabili alla ricottura, per cui si decompongono facilmente in grafite e metallo. L'aggiunta di tellurio nella ghisa liquida dà origine a vapori tossici.

## **Bismuto**

---

Presente in percentuale dello 0,005 ÷ 0,02 ha effetto analogo a quello del tellurio; in più ha il vantaggio di non provocare vapori dannosi.

## **Titanio**

---

Il titanio fino al 0,20% è un elemento grafitizzante con un'azione circa 1/3 di quella del Si. Ha potere affinante sulle dimensioni della grafite, ed è soprattutto un energico disossidante e desolforante. Si combina infatti con lo zolfo, che non è stato neutralizzato dal manganese, per dare solfuro di titanio rilevabile come inclusione nella matrice metallica della ghisa come il solfuro di manganese. Ha una notevole affinità anche per l'azoto, col quale si combina per dare carbonitruri di titanio, per cui è necessario evitare durante il processo di fabbricazione della ghisa la solubilizzazione dell' $N_2$  nel bagno fuso.

## **Stagno**

---

Lo stagno è un antiferritizzante ed un anti-grafitizzante molto energico; già con lo 0,10% è garantita l'assenza di ferrite anche in getti con molto silicio e spessori notevoli. Le proprietà meccaniche della ghisa migliorano quindi notevolmente e si può parlare di aumenti di durezza di 30-40 Hd.

## **Boro**

---

In aggiunte dell'ordine dello 0,25-0,50% aumenta la durezza e la resistenza. Nella ghisa colata in conchiglia aumenta lo spessore della zona indurita per effetto della conchiglia.

# GHISE DA FONDERIA

L'esame del comportamento della ghisa alle diverse velocità di raffreddamento e il successivo esame delle influenze che possono avere gli elementi in lega sui risultati che le diverse velocità di raffreddamento dovrebbero originare, danno un'idea della complessità del problema di determinare per via teorica la struttura di una ghisa avente una analisi chimica definita.

A suo tempo, da vari studiosi, sono stati proposti vari diagrammi per stabilire, in via approssimata, il tipo di struttura e di conseguenza le caratteristiche meccaniche che si possono ottenere da diverse combinazioni di elementi leganti e da diverse velocità di raffreddamento. A titolo puramente didattico possiamo riportare uno dei primi e dei più semplici: il diagramma di Maurer.

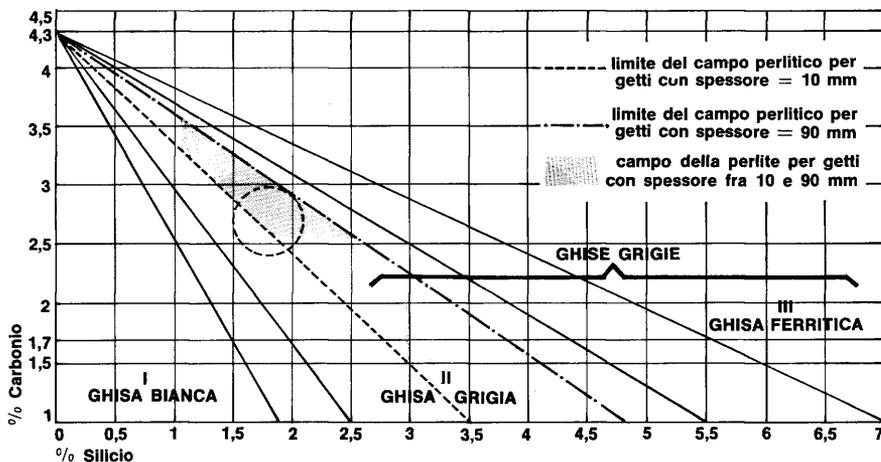
Il diagramma non tiene conto delle diverse velocità di raffreddamento e questa è una delle lacune più gravi, ma serve ugualmente ad orientare, per velocità di raffreddamento

definite semplicemente come « normali », l'influenza combinata del Si e del C contemporaneamente presenti nella ghisa. Dal diagramma si nota che per ottenere una ghisa perlitica (e quindi più facilmente soggetta alle trasformazioni strutturali dei trattamenti termici) oltre a dover restare in determinati campi di concentrazione di C e Si, ad ogni aumento di C deve corrispondere una diminuzione di Si e viceversa, non solo ma a parità di Si, più il C è alto e più la ghisa tende a diventare grigia e ferritica e a parità di C più il Si è alto e più la ghisa (come si è già visto parlando del Si) è grigia e ferritica. La zona delimitata dal circolo tratteggiato è quella corrispondente alla ghisa con le più elevate caratteristiche meccaniche.

Dal diagramma risulta ancora come determinante è la concentrazione del C nella formazione della struttura e delle caratteristiche meccaniche della ghisa.

Dell'influenza del C si è già parlato nel-

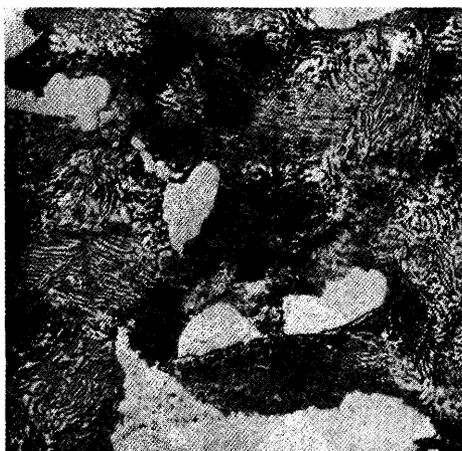
DIAGRAMMA DI MAURER



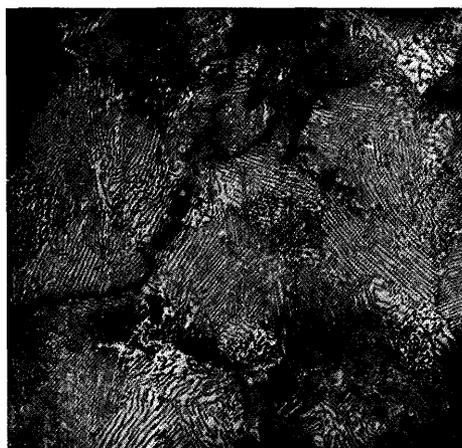
l'esame dei diagrammi di stato Fe C a proposito delle varie strutture possibili nella ghisa in assenza di altri elementi leganti. Sarà bene quindi ora esaminare in modo più completo la funzione del tenore di C nella « ghisa » intesa nel significato tecnologico della parola, cioè lega di Fe-C-Si ecc.

Innanzitutto la presenza di grafite nella ghisa non presuppone la sua formazione durante la solidificazione della stessa nell'ipotetico equilibrio stabile, ma può essere originata anche dalla decomposizione dei carburi. Poiché la velocità di decomposizione dei carburi è tanto più alta quanto maggiore è la temperatura è evidente che la maggior quantità di grafite sarà originata dalla cementite ipereutettica, poi dalla eutettica, infine dalla cementite ipereutettoide e dalla eutettoide. Analoghe decomposizioni avverranno in tutti i riscaldi cui, per motivi diversi, potranno venir sottoposte le ghise dopo solidificazione, fino al raggiungimento del limite della completa grafitizzazione della ghisa con conseguente massimo aumento di volume per la separazione della grafite.

La ghisa commerciale può dunque contenere, al limite, quasi esclusivamente carbonio grafitico e ferrite, per arrivare, al limite opposto, ad una ghisa contenente esclusivamente carbonio combinato come cementite e costituita quindi da una elevata quantità di cementite primaria e di perlite (ghisa bianca). Le ghise bianche sono durissime e fragili a causa dell'elevata % di cementite che appunto è un costituente duro e fragile. Ma nella maggior parte dei casi le ghise commerciali sono costituite da carbonio grafitico e C combinato in proporzioni variabili (ghise grigie); comunemente il C combinato è del 0,25/1,50% mentre la rimanenza è C grafitico. Le proprietà della ghisa dipenderanno dunque dal C combinato, che contribuisce in modo determinante a creare le proprietà della matrice acciaiata della ghisa (specialmente resistenza e durezza) e dal C grafitico che tende invece a interrompere la continuità di questa matrice acciaiata in modo più o meno notevole a seconda della sua quantità e della forma nella quale è distribuita



Ghisa ipereutettoide (perlite, cementite e grafite) carbonio combinato 1,2%.



Ghisa eutettoide (perlite e grafite) carbonio combinato 0,8%.



Ghisa ipoeutettoide (ferrite, perlite e grafite) carbonio combinato 0,3%.

(effetto massimo con grafite "lamellare" e minimo con grafite "sferoidale").

Nelle ghise quasi prive di C combinato la matrice risulterà costituita da ferrite pura e perciò avrà (la matrice) le caratteristiche di un ferro più o meno puro; con l'aumentare del C combinato, la matrice assumerà la struttura di un acciaio ipoeutettoide con presenza sempre più notevole di perlite fino ad un massimo di circa 0,8% di C combinato, ed una struttura quasi completamente perlitica che offre il massimo delle caratteristiche meccaniche e della possibilità di intervento sulle stesse mediante trattamenti termici.

Con un tenore di C combinato ancora più alto si avrà presenza di cementite libera come negli acciai ipereutettoidi (vedi fig. 6). Come si vede dunque la matrice aumenta le sue caratteristiche meccaniche fino ad un massimo di 0,8 di C combinato, quindi le migliori qualità di ghisa si otterranno con questo tenore di C combinato e con la minima presenza possibile di C libero (quest'ultimo distribuito nel modo più uniforme possibile e in forme le più raccolte possibili).

La somma del C combinato + il C libero viene indicata come C totale.

Nella pratica della fonderia l'abbassamento del tenore di C si ottiene aggiungendo rottami di ferro nel cubilotto (che di conseguenza abbassano per la loro più elevata purezza in elementi dannosi quali S e P, anche la % di questi elementi nella ghisa) e la ghisa così ottenuta viene impropriamente chiamata ghisa acciaiata.

La forma della grafite, oltre che con il processo di fabbricazione della ghisa sferoidale della quale si parlerà più avanti, può essere migliorata, affinandola, agendo sulla temperatura di colata. Quando infatti la ghisa viene portata in fusione la solubilizzazione della grafite avviene in tempi abbastanza lunghi e a temperature piuttosto elevate (vedi diagramma di stato Fe-C stabile) per cui alle normali temperature di colata esistono già sempre delle particelle di grafite indissolte che agiscono da centri di cristallizzazione e portano alla formazione di grafite lamellare grossolana. Innalzando invece la temperatura a 1400-

1500°, a seconda del tenore di Si, la grafite al raffreddamento successivo si separerà in aghi minutissimi per l'eliminazione di questi centri di cristallizzazione (fig. 7). La forma e la distribuzione della grafite è tanto importante da aver imposta una unificazione delle caratteristiche che può assumere (vedi fig. 8).

## Carbonio equivalente e grado di saturazione eutettica

Si è visto come la somma del C combinato con il C libero determini il C totale della ghisa. Prescindendo quindi dagli altri elementi in lega che, come è stato detto, spostano i tenori % dell'eutettico e dell'eutettoide, avremo delle ghise ipereutettiche, eutettiche e ipoeutettiche a seconda che il tenore totale di C sia maggiore uguale o minore di 4,3. Nella pratica però la ghisa ha sempre dei tenori di Si che con il P, costituiscono i due elementi che maggiormente influenzano la posizione dell'eutettico e dell'eutettoide nel diagramma Fe-C.

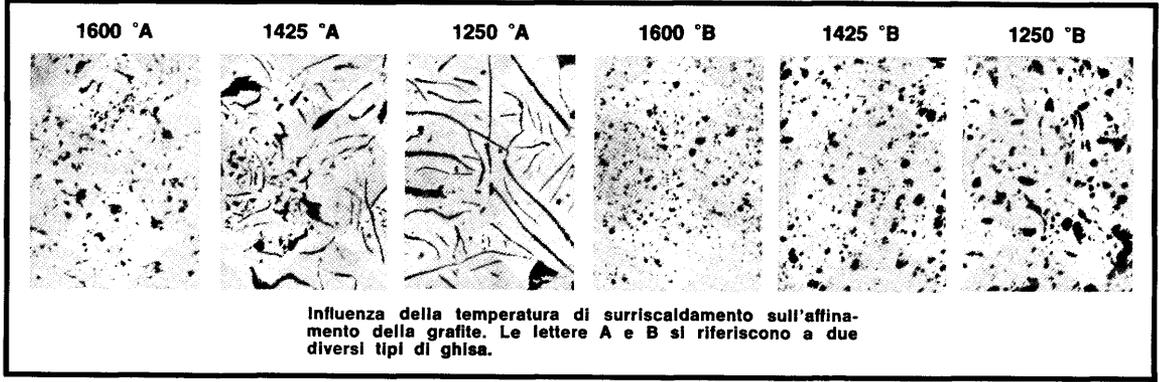
A titolo di esempio si possono riportare i diagrammi di stato secondo Greiner Marsh e Stoughton relativi a una ghisa rispettivamente con 4% - 2% - e 0% di Si, nei quali si nota sensibilmente il variare della posizione dei punti critici, ed addirittura, agli effetti del raffreddamento della lega, la solidificazione non più a temperatura costante dell'eutettico, ma in un certo intervallo di temperatura (vedi fig. 9).

In considerazione del comportamento del Si e del P si è potuto stabilire che approssimativamente il punto eutettico della ghisa intesa come lega non solo Fe-C ma lega tecnologica può essere considerato:

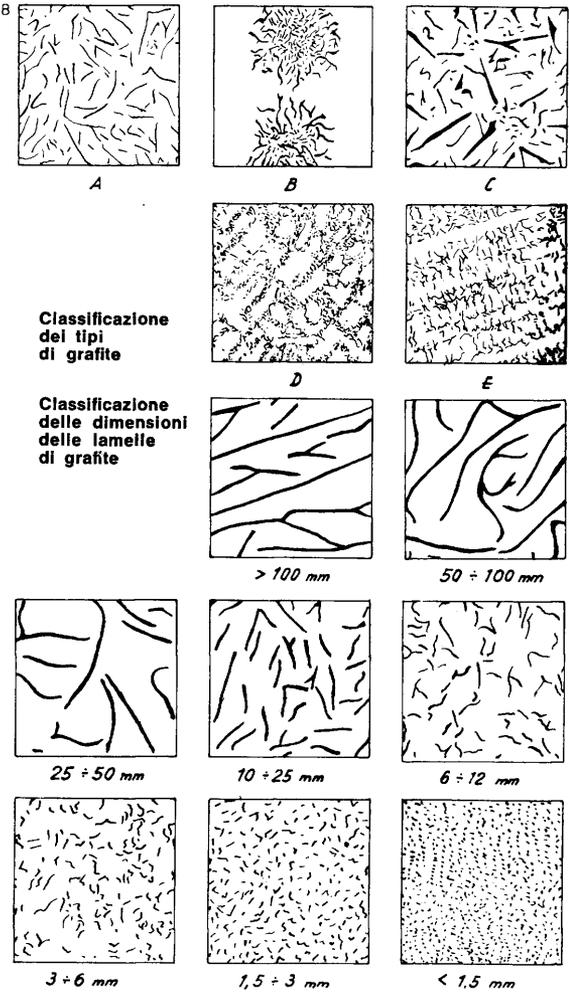
$$C \text{ eutettico} = 4,3\% - \frac{1}{3} (Si\% + P\%) \quad (a)$$

Non solo ma agli effetti della posizione di una ghisa rispetto al diagramma Fe-C non è più sufficiente conoscere il tenore % di C ma bisognerà tener conto degli altri elementi per cui si parlerà di CARBONIO EQUIVALENTE o di EQUIVALENTE in CARBONIO. (C. E.).

$$C.E. = C \text{ tot. } \% + \frac{1}{3} (Si\% + P\%).$$



Influenza della temperatura di surriscaldamento sull'affinamento della grafite. Le lettere A e B si riferiscono a due diversi tipi di ghisa.



Classificazione dei tipi di grafite

Classificazione delle dimensioni delle lamelle di grafite

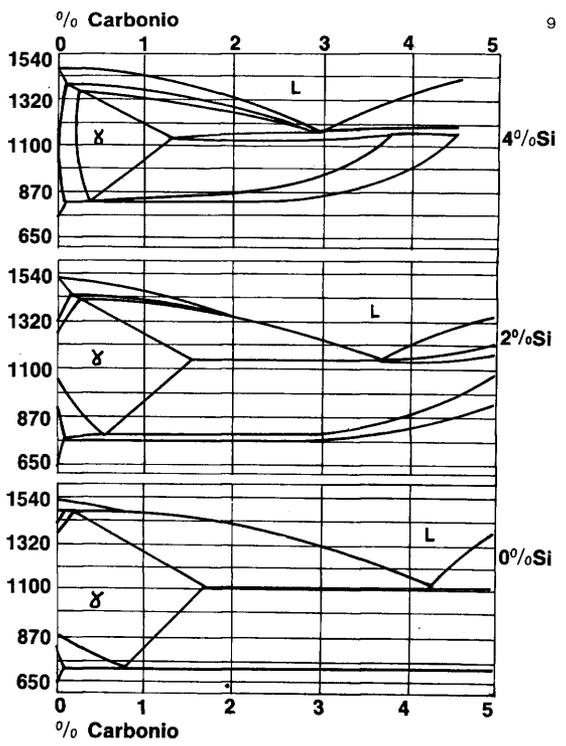
Per cui una ghisa sarà ipo, eutettica o iper a seconda che sia C.E.  $\leq$   $\geq$  4,3%. Una ulteriore classificazione è possibile rapportando la % di C totale della ghisa in esame rispetto all'eutettico. Si parla in questo caso di *grado di saturazione eutettica* (G. S. E.).

G.S.E. =  $\frac{C \text{ tot. } \%}{4,3}$  che sarà maggiore, uguale o minore a 1 secondo che la ghisa sarà iper, eutettica o ipo.

Applicando a questo rapporto il concetto di carbonio eutettico secondo la formula (a) si avrà:

$$G.S.E. = \frac{C \text{ tot. } \%}{4,3 - \frac{1}{3} (Si\% + P\%)}$$

Gli altri elementi di lega nella ghisa non influiscono sensibilmente sulla posizione dell'eutettico se in % normali; nella maggior parte dei casi il loro effetto tende ad annullarsi reciprocamente.



---

# GHISE GRIGE PER GETTI

---

## Struttura

Strutturalmente le ghise grige sono già state definite: sono leghe ferro-C, nelle quali entrano a far parte altri elementi leganti (Si, Mn, S, P, ecc.), costituite da una matrice acciaiata formata da ferrite, perlite, cementite martensite, bainite, sorbite in proporzioni variabilissime, nella quale si trovano annegate lamelle o fiocchi variamente distribuiti e dimensionati di grafite.

## Struttura primaria delle ghise grige

È già stato detto, a proposito del raffreddamento delle ghise (pag. 13) dalla temperatura di fusione, come inizialmente dal liquido di una ghisa ipoeutettica si separino delle dendriti di austenite satura via via più ricca di C man mano che scende la temperatura avvicinandosi al punto eutettico di solidificazione e via via più ricca di impurezze.

Giunti alla temperatura di solidificazione dell'eutettico ci troviamo quindi con delle dendriti immerse in un liquido che tende a solidificare tutto insieme. A questa temperatura si creano dei nuclei, tanto più numerosi quanto è maggiore la sottrazione di calore e quindi il sottoraffreddamento, attorno ai quali solidifica il liquido eutettico. La crescita di questi nuclei avrà andamento all'incirca sferico e ingloberà nel loro interno le dendriti di austenite già formate. Le ultime particelle di questi nuclei che solidificheranno saranno le più impure e quindi creeranno una specie di reticolo di im-

purezza intorno alle "celle eutettiche" così formate. Saranno proprio queste impurità che, evidenziate con opportuni attacchi con reattivi chiamati appunto primari, metteranno in evidenza all'esame microscopico le celle eutettiche (vedi fig. 10). Il numero di celle eutettiche per unità di volume si definisce "grado di nucleazione eutettica" ed è influenzato da parecchi fattori: diminuisce con l'aumento della temperatura di fusione o della permanenza in fusione della ghisa, aumenta con la "inoculazione" (1) e con l'aumentare dei tenori di S e P (la presenza di Mn quindi agisce in senso contrario perché elimina lo S come solfuro di Mn).

Le dimensioni delle celle eutettiche variano da 0,03 a 10 mm e in genere sono comprese fra 0,3 e 3 mm.

All'interno delle celle eutettiche precipita durante la fase del loro accrescimento la grafite a forma di lamelle aventi direzione radiale rispetto alla cella stessa. L'accrescimento delle lamelle di grafite avviene contemporaneamente all'accrescimento della cella per cui saranno a diretto contat-

(1) Inoculazione: è un procedimento usato in fonderia consistente in una aggiunta nella ghisa, sul canale di colata durante la fase di spillatura dal forno, di sostanze a granulometria adatta ( $\varnothing$  5-10 mm), al fine di modificare l'analisi chimica e quindi la struttura della ghisa nella successiva solidificazione. Fra gli inoculanti più usati ci sono prodotti di Si Ca; Cu; Sn che garantiscono assenza di ferrite, anche in getti sottili, colati con ghisa ricca di Si per evitare zone bianche.

Designazione UNI della ghisa grigia per getti (tab. 5007)	G 10	G 15	G 20	G 25	G 30	G 35	G 00
Resistenza alla trazione minima kg/mm <sup>2</sup>	10	15	20	25	30	35	non si richiede carico di rottura

to con la fase liquida e saranno tanto più lunghe quanto più sarà basso il grado di nucleazione. La forma e le dimensioni delle lame di grafite dipenderà quindi dal sotto-raffreddamento e dagli altri fattori che determinano il grado di nucleazione eutettica.

Anche se l'esame fin qui effettuato riguarda le ghise ipoeutettiche è evidente che, con la sola differenza della precipitazione della grafite primaria o "di schiuma" al po-

sto delle dendriti di austenite, le osservazioni fatte valgono anche per le ghise grigie ipereutettiche.

## ANALISI CHIMICA

Una classificazione chimica delle ghise per la produzione di getti è già stata fatta all'inizio inglobandola nello schema generale della classificazione chimica delle ghise (vedi pag. 10: ghise da fonderia destinate alla fabbricazione di getti serie 3000, 4000, 5000).

Le norme U.N.I. prevedono una classificazione ancora più dettagliata che ha pur sempre come base il tenore di fosforo. In questa classificazione avremo quindi ghise a basso P, commercialmente chiamate "ematiti", con P minore allo 0,10‰; ghise con tenore di P fra 0,12 e 0,30, chiamate "semieematiti"; ghise con P fra 0,30 e 1‰ dette a "medio fosforo", infine ghise con P fra 1 e 2‰ dette a "alto fosforo". Le ghise ematiti corrispondono alla serie 3000, le ghise a medio P corrispondono alla serie 4000 infine le ghise ad alto P corrispondono alla serie 5000 (vedi tabelle pag. 30 e segg.).

## CARATTERISTICHE MECCANICHE

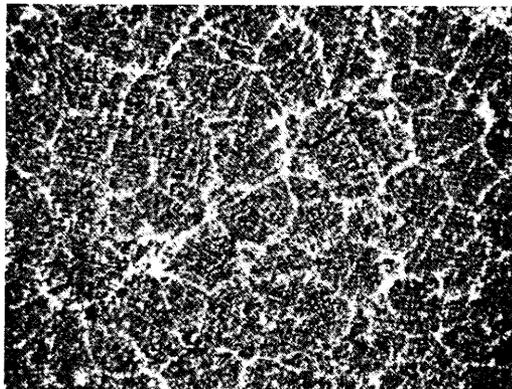
Si tratta ora di esaminare dal punto di vista delle caratteristiche meccaniche la classificazione delle ghise per getti.

Le norme U.N.I. (tab. 5007) stabiliscono una classificazione in base alla resistenza a trazione che dà una barretta della ghisa in esame ricavata da un provino colato in forma di sabbia, avente diametro 30 mm.

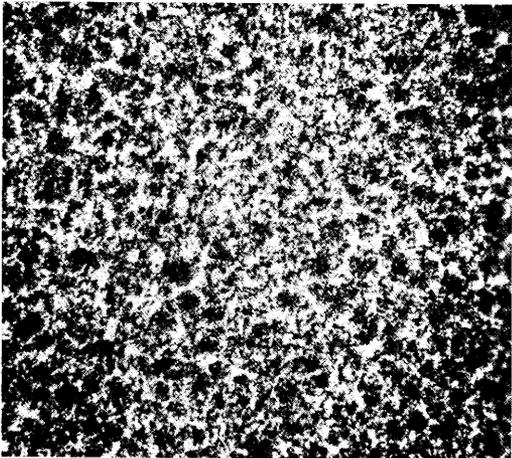
Non vengono meglio specificate analisi chimica e struttura che le ghise rispondenti a dette caratteristiche devono possedere, e questo evidentemente perché l'analisi chimica, che determina a parità di velocità di raffreddamento approssimativamente la medesima struttura, può essere variabilissima nei componenti che giocano ruoli contrastanti fra loro. A parità di analisi chimica

10

Celle eutettiche in una ghisa non inoculata (grado di nucleazione 720 celle/cm<sup>2</sup>) - Attacco: Reattivo Stead-Le Chatelier X 15.



Celle eutettiche nella stessa ghisa inoculata con 0,30‰ di SiCa (grado di nucleazione 2570 celle/cm<sup>2</sup>) - Attacco: Reattivo Stead-Le Chatelier X 15.



la struttura e quindi la resistenza può ancora essere variabilissima a seconda della velocità di raffreddamento. La velocità di raffreddamento dei getti può a sua volta essere condizionata da molte variabili, prima fra tutte lo spessore del getto medesimo. Da queste brevi considerazioni nasce evidente il problema di poter predeterminare quale tipo di ghisa usare per ottenere nel getto la resistenza richiesta dal progettista e come collaudare tale getto con una provetta che rispetti le caratteristiche del getto. L'analisi chimica da assegnare alla ghisa non è specificabile, essendo troppe le variabili che possono condurre allo stesso risultato di struttura e quindi di resistenza. Sarà quindi l'esperienza del fonditore e la disponibilità di materie prime che determineranno l'analisi tale da conferire la resistenza richiesta sul provino di  $\varnothing 30$ . La relazione fra la resistenza del provino  $\varnothing 30$  e la resistenza dei getti da colare con la stessa ghisa sarà quindi legata al rap-

porto delle diverse velocità di raffreddamento dovute ai diversi spessori dei getti rispetto alla provetta. Se il getto sarà più sottile della provetta la sua resistenza sarà maggiore e viceversa.

Da quasi un secolo il problema della definizione di questo rapporto è stato studiato da vari metallurgisti che hanno proposto equazioni più o meno complicate per stabilire questa relazione. A titolo di esempio, al fine di chiarire la complessità del problema in termini di risoluzioni puramente teoriche possiamo citare l'equazione che Colclaud mise a punto nel 1944:

$$\log R_x = \log R_{30} + 1,57 (\log H_d x - \log H_{d30})$$

dove  $R_x$  = resistenza del getto.

$R_{30}$  = resistenza della provetta diametro 30 colata con la stessa ghisa.

$H_d x$  = durezza Brinell riscontrata sul getto.

$H_{d30}$  = durezza Brinell riscontrata sul provino.

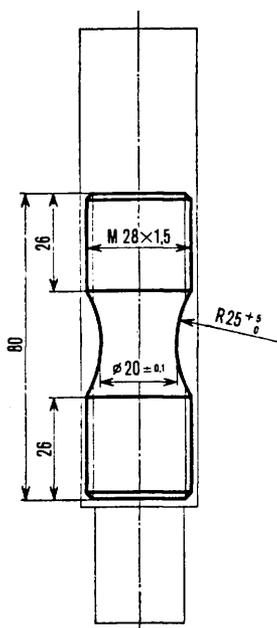
1,57 = costante fissa.

Come si vede questa equazione presuppone la conoscenza della durezza Brinell del getto e quindi presuppone che il getto sia già colato (da notare come la durezza Brinell della ghisa non sia, come per l'acciaio, in relazione diretta con la resistenza).

Da ulteriori elaborazioni di queste relazioni si è comunque pervenuti alla costruzione di diagrammi che prevedono, in base al tipo di ghisa adottato e alla "massività" del getto (cioè alla sua velocità di raffreddamento rispetto alla provetta di ghisa diametro 30) le caratteristiche meccaniche del getto stesso.

Questi diagrammi sono ora adottati da quasi tutte le unificazioni; a titolo di esempio riportiamo quello adottato dalla U.N.I. (tabella 5007 pag. 34).

Il diagramma, naturalmente usato con cautelativa approssimazione, può servire sia al progettista per prescrivere un certo tipo di ghisa per la fusione di un getto (es. ghisa G 30 per ottenere una resistenza a trazione di  $18 \text{ kg/mm}^2$  su un getto a spessore fra 30 e 50 mm), sia al collaudatore per risalire alle caratteristiche del getto strappando una provetta ricavata da un saggio di 30 mm colato col getto stesso.



UNI 5007 - Saggi per prova di trazione.

**GHISE EMATITI**  
**BASSO TENORE DI P =**  
**MAX 0,12%**

Numero di serie (designazione provvisoria)	fosforo %	Tenore di		
		silicio %	manganese %	
3232 3233	≤ 0,08	> 1,0 e ≤ 1,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
3242 3243		> 1,5 e ≤ 2,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
3252 3253		> 2,0 e ≤ 2,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
3262 3263		> 2,5 e ≤ 3,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
3272 3273		> 3,0 e ≤ 3,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
3282 3283		> 3,5 e ≤ 4,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
3292 3293		> 4,0 e ≤ 4,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
3302 3303		> 4,5 e ≤ 5,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
3312 3313		> 5,0 e ≤ 5,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
3322 3323		> 5,5 e ≤ 6,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
3432 3433		> 0,08 e ≤ 0,12	> 1,0 e ≤ 1,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5
3442 3443			> 1,5 e ≤ 2,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5
3452 3453			> 2,0 e ≤ 2,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5
3462 3463			> 2,5 e ≤ 3,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5
3472 3473			> 3,0 e ≤ 3,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5
3482 3483			> 3,5 e ≤ 4,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5
3492 3493	> 4,0 e ≤ 4,5		> 0,7 e ≤ 1,9 > 1,0 e ≤ 1,5	
3502 3503	> 4,5 e ≤ 5,0		> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
3512 3513	> 5,0 e ≤ 5,5		> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
3522 3523	> 5,5 e ≤ 6,0		> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	

**GHISE SEMIEMATITI**  
**BASSO TENORE DI P =**  
**DA 0,12% A 0,30%**

4032 4033	> 0,12 e ≤ 0,18	> 1,0 e ≤ 1,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5
4042 4043		> 1,5 e ≤ 2,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5

**GHISE SEMIEMATITI  
BASSO TENORE DI P =  
DA 0,12% A 0,30%**

Numero di serie (designazione provvisoria)	fosforo %	Tenore di silicio %	manganese %
4052	> 0,12 e ≤ 0,18	> 2,0 e ≤ 2,5	> 0,7 e ≤ 1,0
4053			> 1,0 e ≤ 1,5
4062		> 2,5 e ≤ 3,0	> 0,7 e ≤ 1,0
4063			> 1,0 e ≤ 1,5
4072		> 3,0 e ≤ 3,5	> 0,7 e ≤ 1,0
4073			> 1,0 e ≤ 1,5
4082		> 3,5 e ≤ 4,0	> 0,7 e ≤ 1,0
4083			> 1,0 e ≤ 1,5
4092		> 4,0 e ≤ 4,5	> 0,7 e ≤ 1,0
4093			> 1,0 e ≤ 1,5
4012		> 4,5 e ≤ 5,0	> 0,7 e ≤ 1,0
4103			> 1,0 e ≤ 1,5
4112		> 5,0 e ≤ 5,5	> 0,7 e ≤ 1,0
4113			> 1,0 e ≤ 1,5
4122	> 5,5 e ≤ 6,0	> 0,7 e ≤ 1,0	
4123		> 1,0 e ≤ 1,5	
4232	> 0,16 e ≤ 0,30	> 1,0 e ≤ 1,5	> 0,7 e ≤ 1,0
4233			> 1,0 e ≤ 1,5
4242		> 1,5 e ≤ 2,0	> 0,7 e ≤ 1,0
4243			> 1,0 e ≤ 1,5
4252		> 2,0 e ≤ 2,5	> 0,7 e ≤ 1,0
4253			> 1,0 e ≤ 1,5
4252		> 2,5 e ≤ 3,0	> 0,7 e ≤ 1,0
4263			> 1,0 e ≤ 1,5
4272		> 3,0 e ≤ 3,5	> 0,7 e ≤ 1,0
4273			> 1,0 e ≤ 1,5
4282		> 3,5 e ≤ 4,0	> 0,7 e ≤ 1,0
4283			> 1,0 e ≤ 1,5
4292		> 4,0 e ≤ 4,5	> 0,7 e ≤ 1,0
4293			> 1,0 e ≤ 1,5
4302	> 4,5 e ≤ 5,0	> 0,7 e ≤ 1,0	
4303		> 1,0 e ≤ 1,5	
4312	> 5,0 e ≤ 5,5	> 0,7 e ≤ 1,0	
3313		> 1,0 e ≤ 1,5	
4322	> 5,5 e ≤ 6,0	> 0,7 e ≤ 1,0	
4323		> 1,0 e ≤ 1,5	

**GHISE A MEDIO P  
TENORE DI P =  
DA 0,3% A 1%**

4432	> 0,30 ≤ 0,50	> 1,0 e ≤ 1,5	> 0,7 e ≤ 1,0
4433			> 1,0 e ≤ 1,5
4442		> 1,5 e ≤ 2,0	> 0,7 e ≤ 1,0
4443			> 1,0 e ≤ 1,5
4452	> 2,0 e ≤ 2,5	> 0,7 e ≤ 1,0	
4453		> 1,0 e ≤ 1,5	
4462	> 2,5 e ≤ 3,0	> 0,7 e ≤ 1,0	
4463		> 1,0 e ≤ 1,5	

**GHISE A MEDIO P**  
**TENORE DI P =**  
**DA 0,3% A 1%**

Numero di serie (designazione provvisoria)	Tenore di			
	fosforo %	silicio %	manganese %	
4472 4473	> 0,30 e ≤ 0,50	> 3,0 e ≤ 3,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
4482 4483		> 3,5 e ≤ 4,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
4492 4493		> 4,0 e ≤ 5,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
4502 4503		> 4,5 e ≤ 5,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
4512 4513		> 5,0 e ≤ 5,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
4522 4523		> 5,5 e ≤ 6,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
4632 4633		> 1,0 e ≤ 1,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
4642 4643		> 1,5 e ≤ 2,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
4652 4653		> 2,0 e ≤ 2,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
4662 4663		> 2,5 e ≤ 3,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
4672 4673		> 0,5 e ≤ 0,7	> 3,0 e ≤ 3,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5
4682 4683			> 3,5 e ≤ 4,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5
4692 4693			> 4,0 e ≤ 4,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5
4702 4703			> 4,5 e ≤ 5,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5
5712 4713	> 5,0 e ≤ 5,5		> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
4722 4723	> 5,5 e ≤ 6,0		> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
4832 4833	> 0,7 e ≤ 1,0		> 1,0 e ≤ 1,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5
4842 4843			> 1,5 e ≤ 2,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5
4853 4853			> 2,0 e ≤ 2,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5
4862 4863			> 2,5 e ≤ 3,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5
4872 4873		> 3,0 e ≤ 3,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
4882 4883		> 3,5 e ≤ 4,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
4892 4893		> 4,0 e ≤ 4,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
4902 4903		> 4,5 e ≤ 5,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
4912 4913		> 5,0 e ≤ 5,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
4922 4923		> 5,5 e ≤ 6,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	

**GHISE AD ALTO P**  
**TENORE DI P =**  
**DA 1% A 2%**

Numero di serie (designazione provvisoria)	fosforo %	Tenore di		
		silicio %	manganese %	
5032 5033	> 1,0 e ≤ 1,4	> 1,0 e ≤ 1,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
5042 5043		> 1,5 e ≤ 2,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
5052 5053		> 2,0 e ≤ 2,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
5062 5063		> 2,5 e ≤ 3,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
5072 5073		> 3,0 e ≤ 3,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
5082 5083		> 3,5 e ≤ 4,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
5092 5093		> 4,0 e ≤ 4,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
5102 5103		> 4,5 e ≤ 5,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
5112 5113		> 5,0 e ≤ 5,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
5122 5123		> 5,5 e ≤ 6,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
5232 5233		> 1,4 e ≤ 2,0	> 1,0 e ≤ 1,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,0
5242 5243			> 1,5 e ≤ 2,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5
5252 5253			> 2,0 e ≤ 2,5	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5
5262 5263			> 2,5 e ≤ 3,0	> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5
5272 5273	> 3,0 e ≤ 3,5		> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
5282 5283	> 3,5 e ≤ 4,0		> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
5282 5293	> 4,0 e ≤ 4,5		> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
5302 5303	> 4,5 e ≤ 5,0		> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
5312 5313	> 5,0 e ≤ 5,5		> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	
5322 5323	> 5,5 e ≤ 6,0		> 0,7 e ≤ 1,0 > 1,0 e ≤ 1,5	

## PROVE MECCANICHE

### Resistenza alla trazione

I saggi per la prova di trazione sono ricavati da provette colate in sabbia come da tabella U.N.I. 5007 (vedi disegno) e sono costituiti da barrette cilindriche aventi diametro  $30_{-0}^{+2}$  mm, che vengono successivamente lavorate di macchina fino ad arrivare ad ottenere  $20_{-0,1}^{+0,1}$  mm nella zona

che dovrà essere strappata.

È la prova più comune richiesta dal collaudo.

I dati di R. richiesti per una ghisa grigia sono stati elencati nella tabella, alla voce caratteristiche meccaniche delle ghise grige. L'allungamento varia a secondo del tipo di ghisa da 0,2 fino all'1%. È molto basso per l'effetto intagliante dovuto alle lamelle di grafite che interrompono la continuità della matrice acciaiata.

# CORRELAZIONE TRA LE CARATTERISTICHE MECCANICHE E LE DIMENSIONI DEI GETTI IN FUNZIONE DEI TIPI DI GHISA

TIPI DI GHISA UNI 5007 - 69

GETTI

Categoria	Dimensioni		G 10		G 15		G 20		G 25		G 30		G 35	
	Diametro per getti prevalente mente cilindrici mm	Spessore di parete mm	Carico unitario di rottura a trazione* R kgf/mm <sup>2</sup>	Durezza Brinell* HB 10/3 000/30 kgf/mm <sup>2</sup>	Carico unitario di rottura a trazione* R kgf/mm <sup>2</sup>	Durezza Brinell* HB 10/3 000/30 kgf/mm <sup>2</sup>	Casco unitario di rottura a trazione* R kgf/mm <sup>2</sup>	Durezza Brinell* HB 10/3 000/30 kgf/mm <sup>2</sup>	Carico unitario di rottura a trazione* R kgf/mm <sup>2</sup>	Durezza Brinell* HB 10/3 000/30 kgf/mm <sup>2</sup>	Carico unitario di rottura a trazione* R kgf/mm <sup>2</sup>	Durezza Brinell* HB 10/3 000/30 kgf/mm <sup>2</sup>	Carico unitario di rottura a trazione* R kgf/mm <sup>2</sup>	Durezza Brinell* HB 10/3 000/30 kgf/mm <sup>2</sup>
Getti leggeri	15	3,5 - 7,5	16	215	21	225	26	235	31	250	**	**	**	**
Getti medi	30	7,5 - 15	10	175	15	185	20	200	25	220	30	235	35	255
Getti pesanti	60	15 - 30	**	**	13	165	15	175	21	195	27	215	32	235
Getti molto pesanti	90	30 - 60	**	**	**	**	12	155	16	170	21	190	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 prospetto, 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.

## Durezza Brinell

La durezza Brinell nelle ghise grigie è data dalla media fra la durezza della matrice e la grafite. Essa può variare da 150 (ghise ferritiche) fino a 400 ÷ 500 Hd (ghise martensitiche). Come già accennato non esiste per le ghise una relazione costante fra durezza e resistenza come per l'acciaio; al massimo in questo caso la durezza può darci un'idea della resistenza della matrice acciaiiosa della ghisa. Per mettere in corrispondenza la durezza e la resistenza a trazione di una ghisa occorre tener conto del modulo di elasticità della ghisa stessa, osservando inoltre che:

1) lo stesso modulo di elasticità diminuisce nella ghisa rispetto all'acciaio per la presenza di grafite;

2) le ghise grigie non hanno un vero modulo di elasticità in quanto non obbediscono alla legge di proporzionalità fra carichi e deformazioni (legge di Hooke) ma per scopi pratici si considera la secante alla curva carichi/deformazioni in corrispondenza del 25% del carico di rottura.

La legge che regola i rapporti fra durezza, resistenza e modulo elastico è:

$$R = 10,3 \cdot 10^{-6} \text{ Hd. E.}$$

È evidente però che conosciuta in un getto la durezza Brinell non è possibile per risalire alla resistenza determinare il valore del modulo di elasticità.

## Modulo di elasticità o di "Young"

Ritenendo valida, nei limiti sopra detti, la legge di Hooke, cioè di proporzionalità fra carichi  $\sigma$  deformazioni  $\epsilon$  per modulo di elasticità si intende il rapporto dei due, e

$$\text{precisamente: } E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Dalla formula esposta nel titolo precedente si può ancora ricavare, per il caso specifico della ghisa:

$$E = \frac{R}{10,3 \cdot 10^{-6} \text{ HB}} = \text{Kg/mm}^2.$$

A titolo orientativo le ghise grigie comuni hanno un modulo di elasticità medio determinato a 20° C, che può variare da 7000 a 13000 Kg/mm<sup>2</sup>, corrispondente approssimativamente ad una R di 10 ÷ 35 Kg/mm<sup>2</sup>.

## Resilienza

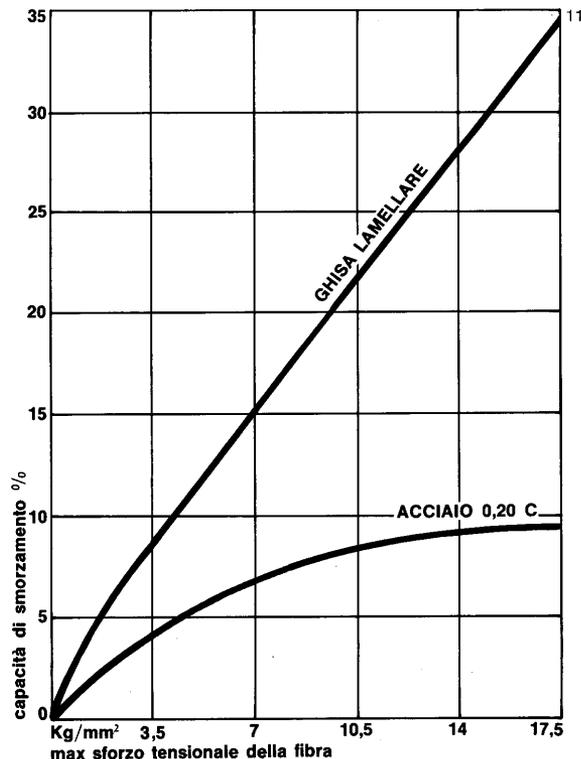
Ancora più marcatamente che per l'allungamento, la presenza di lamelle di grafite nella matrice acciaiiosa della ghisa determina un abbassamento drastico della resilienza; tanto che questo valore non è neanche preso in considerazione agli effetti della classificazione della ghisa grigia.

## Limite di fatica a flessione rotante

Per la presenza degli intagli creati dalla grafite, la ghisa grigia normale è assai poco adatta a utilizzazioni in cui sia assoggettata a sollecitazioni alterne. Sempre per lo stesso motivo è assai poco sensibile all'influenza degli intagli. Il valore medio indicativo è di 10 ÷ 20 Kg/mm<sup>2</sup>.

## Capacità di smorzamento delle vibrazioni

Una caratteristica positiva della ghisa rispetto all'acciaio è la sua maggiore capacità di assorbire e neutralizzare le vibrazioni. Questa qualità è soprattutto necessaria in quelle macchine che, soggette a forti vibrazioni dovute a parti in veloce movimen-



to, possono portare i pezzi che la compongono, per fenomeni di risonanza, a valori di sforzo notevolmente superiori rispetto a quelli calcolati durante la progettazione; non solo ma nel caso di macchine utensili di precisione la vibrazione non assorbita è causa di notevoli imperfezioni dimensionali. La ghisa grigia è dunque in questo caso la lega ideale per costruire basamenti di macchine e supporti di parti soggette a notevoli vibrazioni.

Purtroppo non esistono prove specifiche che permettano di valutare o almeno raffrontare queste qualità. Comunque per avere un dato orientativo si può affermare che la capacità di smorzamento di una ghisa rispetto all'acciaio è di circa 3 volte superiore; mentre quella di una ghisa nodulare è di circa due volte superiore (fig. 11).

## TRATTAMENTO TERMICO DELLE GHISE GRIGIE DA FONDERIA

Le ghise grigie da fonderia o, come vengono comunemente chiamate, ghise meccaniche, per la loro facile colabilità e il loro prezzo modesto rispetto all'acciaio sono oggetto di larga utilizzazione nella meccanica in tutti quei casi in cui non siano richieste particolari caratteristiche di tenacità. La ghisa inoltre presenta una buona resistenza all'usura per il potere antigrippante del carbonio libero che è sempre presente, anche se in questo caso è necessario ridurre al minimo la presenza della ferrite per la sua scarsa durezza, ed ottenere la massima quantità possibile di perlite che si è rivelata a questo fine la struttura più adatta. Come per tutte le leghe, si possono migliorare le qualità delle ghise sottoponendole a trattamenti termici appropriati, anche se esistono parecchie difficoltà nella realizzazione di alcuni di essi: innanzitutto esiste la fragilità che crea problemi di rotture sia nel riscaldamento che nel raffreddamento successivo; difficoltà ampliata dalla scarsa conducibilità termica della ghisa, che tende ad accentuare le differenze di temperature e quindi le tensioni all'interno del pezzo. La conduttività termica della ghisa da 100° a 400°, che rappre-

senta l'intervallo più critico in quanto a queste temperature il materiale non può ancora essere plastico per effetto del calore come comincia ad esserlo verso 500°, è:

$$\approx 43 \frac{\text{K cal}}{\text{m. h. } ^\circ\text{C}}$$

contro la conduttività del ferro che è

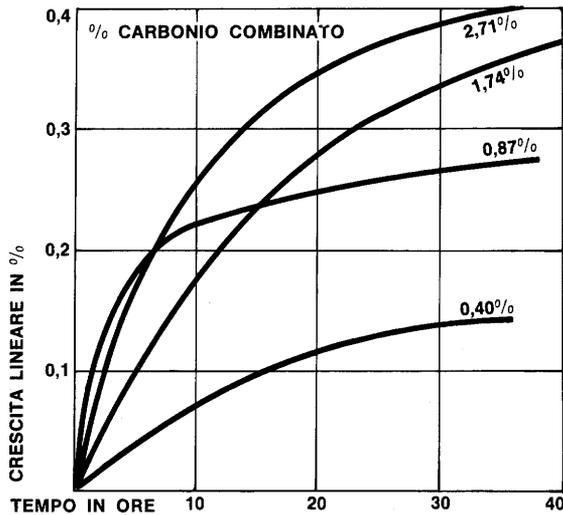
$$\approx 72 \frac{\text{K cal}}{\text{m. h. } ^\circ\text{C}}$$

Altra caratteristica costante di tutte le ghise sottoposte a riscaldamento è lo aumento di volume dovuto alla decomposizione del carbonio combinato in C grafittico. L'aumento naturalmente è minimo per le ghise ferritiche, massimo per le ghise perlitiche in presenza di elementi grafitizzanti (silicio, rame, nichel), mentre è meno notevole se nelle ghise esistono elementi che stabilizzano i carburi (manganese, molibdeno, vanadio, titanio). Il fenomeno inoltre comincia ad essere notevole a 450° ed aumenta con l'aumentare della temperatura. Se il riscaldamento non avviene in atmosfera neutra, ma in forni a muffola con i pezzi al contatto dell'aria, l'aumento di volume si accompagna con l'ossidazione superficiale del pezzo, con conseguente decarburazione e formazione di ossidi di ferro. Questo fenomeno porta anch'esso ad un aumento di volume che è logicamente limitato alla superficie dei pezzi. Nel caso che si raggiungano temperature elevate (oltre i 700°) il fenomeno diventa così evidente che la superficie tende a formare delle scaglie di ossido che si staccano dal pezzo tanto più rapidamente quanto più la ghisa è sottoposta a sbalzi termici. Il fenomeno riveste particolare importanza nel caso di ghise da utilizzare a temperature elevate e sarà ripreso quando si parlerà di queste ultime (vedi fig. 12).

## Trasformazioni strutturali al riscaldamento e al raffreddamento

Sarà opportuno, prima di passare all'elencazione dei vari trattamenti termici cui può venire sottoposta la ghisa grigia per getti, riprendere brevemente le nozioni, i concetti e la terminologia che presiedono ai fenomeni di trasformazione strutturale verificantisi al riscaldamento e al raffreddamento

12 INFLUENZA DEL CARBONIO COMBINATO SULLA CRESCITA LINEARE DELLA GHISA GRIGIA NEL VUOTO A 650 °C



di queste leghe, (che sono del tutto simili a quelli che i vari testi di trattamento termico degli acciai chiariscono).

È evidente che non si potrà parlare di temperature esatte alle quali possono avvenire le trasformazioni perché queste sono influenzate dalla presenza dei vari elementi che entrano in lega, ma si dovrà parlare di punti di trasformazione austenitica, martensitica, punti  $A_1$   $A_2$   $A_3$  ecc. La definizione di questi punti, anche se non è problematica per un laboratorio metallurgico, diventa un noioso inconveniente nella pratica di tutti i giorni per chi deve sottoporre a trattamenti termici ghise che gli vengono sottoposte senza altra indicazione se non la resistenza meccanica o la durezza. È auspicabile che almeno per le ghise sferoidali, che più delle altre sono sottoposte a trattamenti termici, siano presto stabiliti dei limiti analitici unificati che permettano al pari dell'acciaio, di classificare agli effetti dei trattamenti termici le varie ghise che vengono prodotte.

Se una ghisa viene riscaldata ad una temperatura inferiore al punto di trasformazione  $A_{c1}$  non si possono avere variazioni strutturali, al massimo l'aumentata mobilità atomica permette l'assestamento di eventuali tensioni esistenti nei getti.

Ad una temperatura oscillante intorno ad  $A_{c1}$  invece, sia per l'aumentata mobilità atomica, sia per l'inizio della formazione della fase  $\gamma$  nelle zone a concentrazione

eutettoide della perlite che facilita la distruzione delle molecole di carburi sciogliendoli, gli atomi di carbonio della cementite precipitano sulle lamelle di grafite già esistenti o si raccolgono in piccoli globuli lasciando una matrice completamente ferritica. Il fenomeno è naturalmente più rapido in quelle ghise ricche di elementi ferritizzanti (Si Al ecc.) e la ferrite così ottenuta si chiama *indiretta* per distinguerla da quella che si origina direttamente durante il processo di solidificazione del getto a questo stesso punto critico di trasformazione.

Portando la temperatura oltre  $A_{c1}$  le zone perlitiche si trasformano completamente in austenitiche mentre le zone ferritiche e i carburi complessi si trasformano (le prime) e si sciolgono (i secondi) via via che la temperatura aumenta seguendo le linee SG e SE (vedi diagramma ferro-carbonio), fino ad ottenere una matrice completamente austenitica con lamelle di grafite. La grafite in lamelle nell'austenite tende a sciogliersi fino al raggiungimento della saturazione di quest'ultima. Si tratta però di un processo molto lento rispetto alla dissoluzione dei carburi, che sono molto più finemente suddivisi, ma comunque positivo perché tende ad arricchire la austenite di carbonio che è il principale elemento indurente agli effetti della tempra successiva. La soluzione dei carburi e la conseguente diffusione del C nel ferro fino ad ottenere una soluzione omogenea è funzione della temperatura e del grado di suddivisione degli stessi. Infatti Mehl ha dimostrato che la velocità di solubilizzazione dei carburi a temperatura costante è proporzionale all'area interfacciale carburi-austenite, per cui nell'ordine si scioglieranno per primi i carburi finissimi delle strutture sorbitiche, quindi quelli delle strutture perlitiche, poi i carburi ledeburitici e quelli complessi delle strutture primarie di fusione, ed infine si scioglierà la grafite.

A questo punto possiamo esaminare il comportamento di una ghisa austenizzata alle varie velocità di raffreddamento.

Il raffreddamento può avvenire a velocità lentissima tale da riprodurre abbastanza fedelmente le condizioni di equilibrio stabile,

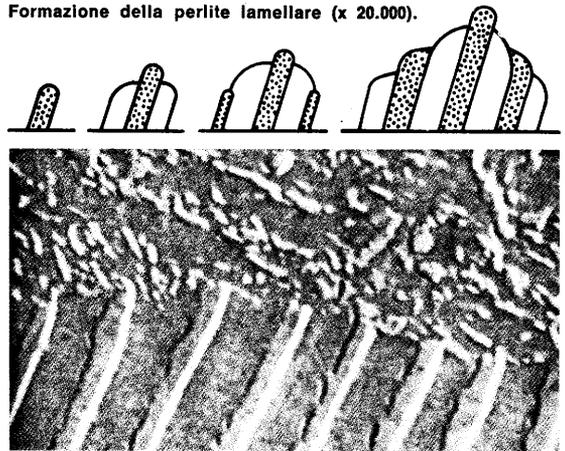
per cui avremo inizialmente, se la concentrazione in C dell'austenite è ipereutettoide, una separazione del C lungo la linea ES seguita da una diffusione dello stesso verso le lamelle di grafite preesistenti, sulle quali si deposita fino al raggiungimento della temperatura di trasformazione  $\gamma - \alpha$  al punto eutettoide. Sempre se si riescono a rispettare le condizioni di equilibrio stabile, quindi velocità di raffreddamento ancora più lenta per la diminuita mobilità atomica a temperatura ormai bassa, a questo punto si separerà ancora grafite (che andrà di nuovo a depositarsi sulle lamelle preesistenti) e ferrite. Avremo in questo modo realizzato una ricottura completa della ghisa ottenendo esclusivamente ferrite e grafite. È evidente che la velocità di raffreddamento dovrà essere tanto più lenta quanto più alta è la presenza di elementi carburogeni (Mn Cr Mo V) e potrà essere veloce, fino a raggiungere il raffreddamento all'aria, quando sia notevole la presenza di elementi ferritizzanti (Si Al ecc.): si parla allora in questo caso di ghise ferritiche (Es. ghise con Si > 3%).

Se il raffreddamento dell'austenite avviene a velocità leggermente superiore a quella dell'equilibrio stabile, al punto di trasformazione  $A_1$  gli atomi di C sciolti nell'austenite non hanno più la possibilità di diffondersi fino a raggiungere le lamelle di grafite, ma, per la diminuita mobilità atomica dovuta alla bassa temperatura e la tendenza alla formazione di germi di nuclei di ferro  $\alpha$  che li espellono dal loro interno, sono obbligati a legarsi chimicamente agli atomi di ferro per dare origine a molecole di

Struttura bainitica - Attacco Nital - X 500.



Formazione della perlite lamellare (x 20.000).



carburo che si raggruppano in grani cristallini.

La formazione isoterma della perlite inizia quindi quando alla precipitazione di un nucleo di ferrite segue la precipitazione di un nucleo di cementite (vedi fig. 13).

La quantità e la grossezza dei nuclei dipendono dalla mobilità atomica e quindi dalla temperatura di sottoraffreddamento alla quale avviene la formazione della perlite.

La presenza di elementi leganti ha un effetto ritardante sulla formazione della perlite in quanto sia gli elementi ferritizzanti che quelli carburogeni hanno una lenta diffusione, nella ferrite i primi e nella cementite i secondi. Il risultato di tali presenze è una maggiore capacità di sottoraffreddamento della lega e quindi una maggiore temprabilità della stessa. La formazione della struttura perlitica è caratteristica del trattamento di normalizzazione delle ghise, cioè del riscaldamento a temperatura di austenitizzazione e successivo raffreddamento all'aria. Naturalmente anche in questo caso l'ottenimento della struttura è subordinato all'analisi chimica della ghisa e agli spessori dei getti, comunque nel caso di ghise perlitiche il trattamento è utile per omogeneizzare la struttura grezza di fusione eliminando i carburi complessi che ostacolano la lavorabilità pur senza diminuire la durezza finale della ghisa.

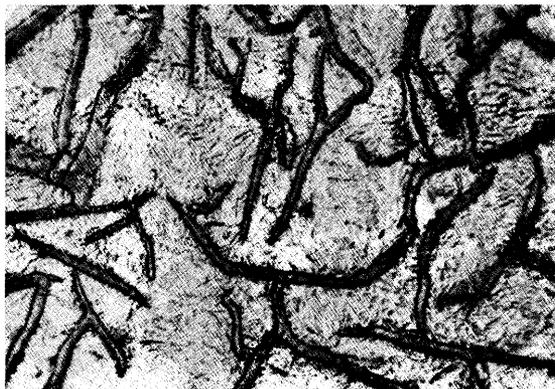
Aumentando ancora la velocità di raffreddamento di una struttura austenitica otteniamo una perlite a lame sempre più serrate, che si forma a temperatura sempre più

bassa rispetto al punto  $A_{r1}$ , fino a giungere ad una struttura che si manifesta essenzialmente ai bordi dei grani dell'austenite, che sono quelli dove più facilmente avviene la precipitazione dei carburi, chiamata troostite. La troostite pur essendo ancora ritenuta formata di lamelle di ferrite e cementite accostate, è talmente fine da non essere più risolvibile al microscopio ottico (vedi fig. 14).

Aumentando ancora la velocità di raffreddamento, l'aspetto della struttura cambia radicalmente ed assume l'aspetto caratteristico aciculare proprio delle strutture di trasformazione a bassa temperatura dell'austenite, ed è chiamata bainite. (Vedi fig. 15). La trasformazione avviene a temperatura talmente bassa che non è possibile la separazione per diffusione della cementite dalla ferrite, pur formandosi però ancora di certo la cementite; osservabile questa non più al microscopio ottico ma con fortissimi ingrandimenti al microscopio elettronico.

La bainite è ancora classificabile in superiore ed inferiore a seconda se si forma a temperatura più alta o prossima alla formazione di martensite. La bainite superiore appare al microscopio sotto forma di piume, quella inferiore decisamente aciculare, (vedi fig. 16). La bainite è l'ultimo gradino nella scala delle velocità di raffreddamento che permette ancora la formazione di carburo di ferro sia pure allo stato molto disperso.

Troostite e martensite (x 1500)



Martensite - Attacco Nitral - X 600.

Ad un ulteriore aumento di velocità oltre ad abbassarsi ulteriormente la temperatura di trasformazione, questa avviene in un modo quasi istantaneo e quindi senza possibilità di diffusione del carbonio per la formazione di carburi. Ci troviamo così in presenza di una soluzione soprassatura di carbonio nella ferrite detta martensite, che ha aspetto aghiforme (ved. fig. 17) durezza e fragilità elevatissime. Che si tratti già di una struttura ferritica è dimostrato dal fatto che la lega è magnetica, ma la presenza di atomi di C, che può arrivare teoricamente fino all'1,7% contro una solubilità massima del C nella ferrite dello 0,01% a temperatura ambiente, provoca delle deformazioni dimensionali del reticolo cubico a corpo centrato della ferrite, trasformandolo in un reticolo tetragonale. Il sistema cristallino tetragonale è caratterizzato da tre assi cristallografici fra loro perpendicolari, e inoltre da due parametri orizzontali uguali mentre il terzo è diverso. La distorsione del reticolo tetragonale è proporzionale al contenuto di C. Logicamente, quindi, più è alto quest'ultimo più elevata è la durezza della martensite.

La trasformazione austenite/martensite è altresì accompagnata da aumento di volume, come tutte le trasformazioni del ferro  $\gamma$  in ferro  $\alpha$ . La pressione, che i cristalli già formati di martensite esercitano su quelli di austenite non ancora trasformati, tende ad impedire la trasformazione di questi ed a lasciare della austenite residua. L'austenite residua è dannosa, fra l'altro, per la sua bassa durezza, che diminuisce



Bainite superiore (x 1500)



Bainite inferiore (x 1800).

quella della martensite che la contiene, e per la tendenza a trasformarsi col tempo in martensite provocando variazioni dimensionali nei pezzi finiti usati allo stato tem-

prato. Altre cause della formazione di austenite possono essere:

velocità di raffreddamento troppo elevata (drasticità del bagno di tempra troppo elevata)

temperatura di austenitizzazione troppo elevata

presenza di elementi che allargano il campo  $\gamma$  (Ni Mn ecc.) in maniera tale da renderla stabile a temperatura ambiente o, se in % minori, da diminuire la velocità critica di tempra.

Per completare la trasformazione della austenite in martensite è necessario continuare senza interruzione (altrimenti si stabilizza) il raffreddamento di tempra fino a trasformazione completa che si può verificare a temperature molto più basse dello zero °C ( $-60 \div 70$ ).

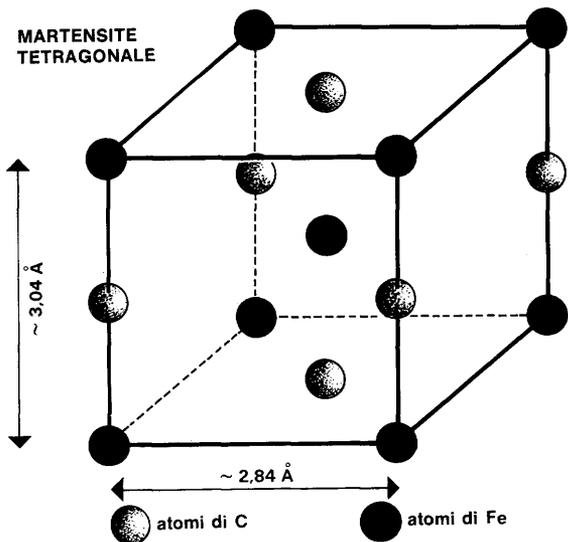
### Trasformazioni al riscaldamento della martensite

Riscaldando la martensite tetragonale oltre 100° il reticolo cristallino comincia a diventare cubico e gli atomi di C cominciano a spostarsi raggiungendo posizioni di maggior spazio nell'edificio cristallino cubico. La durezza comincia a diminuire ed anche il volume. La martensite così trasformata prende il nome di cubica o martensite  $\beta$  (vedi fig. 18). Anche al microscopio, pur conservando la forma aciculare, la martensite cubica è distinguibile dalla tetragonale per il suo aspetto più grigio (vedi fig. 19).

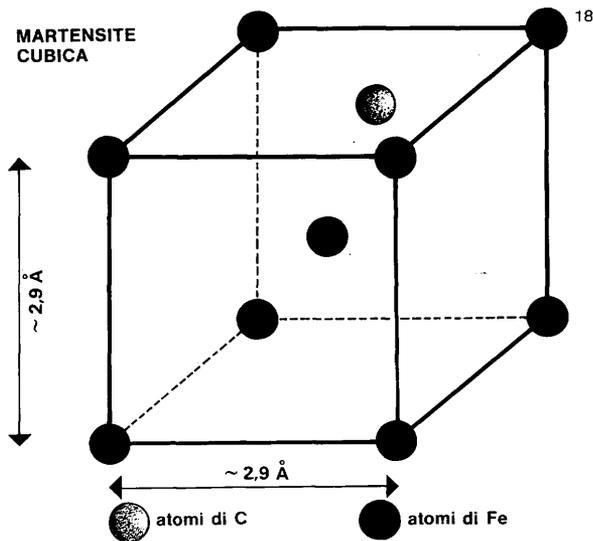
Arrivando a 200° comincia a precipitare un composto chimico che ha analisi paragonabile a quella della cementite, ma più ricca in C chiamato carburo  $\epsilon$ .

Da 200° a 300°, se non vi sono elementi leganti che la ritardano, avviene la decomposizione della eventuale austenite residua in martensite, e finalmente a 300°  $\div$  400° si comincia a formare la cementite vera e propria, in aggregati finissimi, e comincia a verificarsi un calo sensibile della durezza e della fragilità della struttura. Aumentando ancora la temperatura si arriva ad ottenere una struttura ferrite-cementite, non risolvibile al microscopio ottico, uguale alla troostite ottenuta per tempra diretta del-

MARTENSITE  
TETRAGONALE

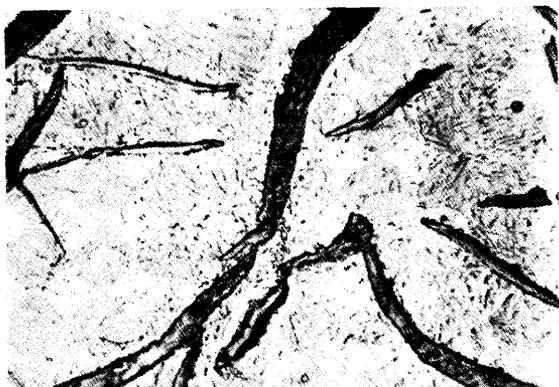


MARTENSITE  
CUBICA



la ghisa. Per distinguerla da questa viene chiamata troostite secondaria o di rinvenimento. A temperature di  $500^{\circ} \div 600^{\circ}$  le particelle di carburo s'ingrossano ancora sino a diventare visibili al microscopio, e

Martensite di tempra - Attacco Nital X 400.



Martensite di rinvenimento - Attacco Nital X 400.



la struttura così ottenuta si chiama sorbite.<sup>1</sup> (vedi fig. 20).

Se invece di partire da una struttura martensitica, per una tempra male eseguita si parte da una struttura bainitica, si ottiene una bainite rinvenuta, cioè una sorbite che al microscopio presenta ancora gli orientamenti aciculari della bainite. Mentre se si parte da una troostite primaria si ottiene sorbite normale.



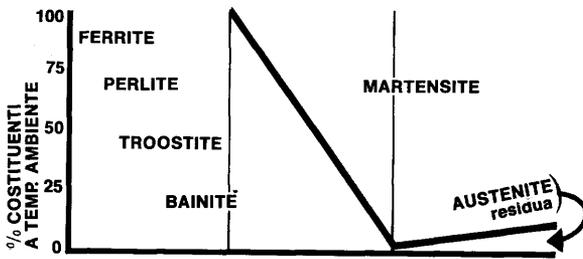
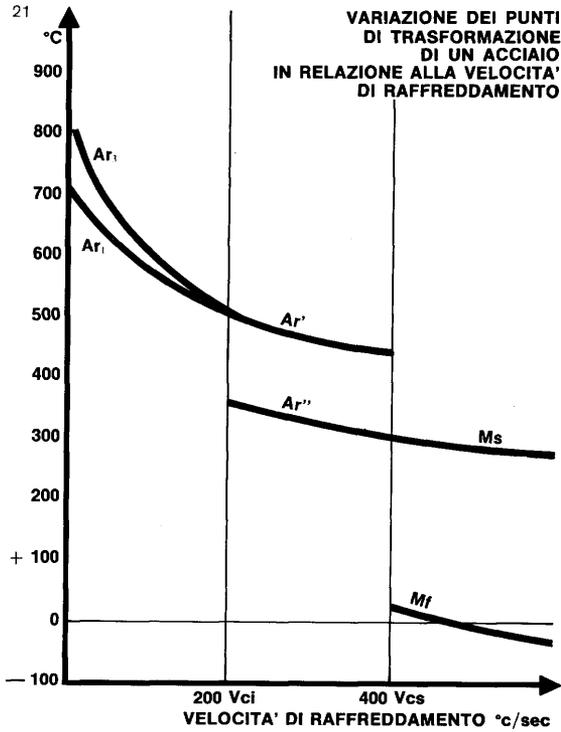
Sorbite - Attacco Nital - X 400.

## Trasformazioni isotermeche dell'austenite

Si è visto che aumentando la velocità di raffreddamento dell'austenite le trasformazioni di questa avvengono a temperature sempre più basse (isteresi di raffreddamento). La velocità, alla quale comincia a comparire la martensite, è detta velocità critica inferiore (v.c.i.), quella alla quale si forma solo più martensite è detta velocità critica superiore (v.c.s.). La temperatura alla qua-

le inizia la formazione di martensite è indicata con Ms, quella al disotto della quale tutta l'austenite è trasformata in martensite Mf. Le varie fasi e temperature possono essere schematizzate nei due seguenti diagrammi (vedi fig. 21).

Come per gli acciai, anche per le ghise è



possibile tracciare dei diagrammi T.T.T. (trasformazione tempo temperatura).

Questi diagrammi rappresentano delle curve di trasformazioni ricavate operando su dei campioni estremamente sottili, tali da ridurre al minimo (teoricamente eliminando) l'effetto rallentante della massa agli effetti degli sbalzi di temperatura. Se si prende un siffatto campione, lo si austenitizza e poi, immergendolo in bagni di sali fusi, lo si porta istantaneamente a temperature via

via inferiori, si nota che dopo un certo periodo di tempo, detto incubazione, si trasforma nelle varie strutture prese prima in considerazione a seconda della temperatura alla quale è portato.

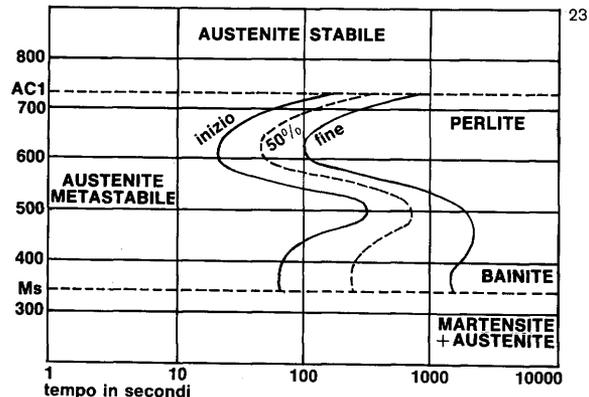
Se si uniscono alle varie temperature i punti di inizio e fine di questa trasformazione si ottengono i diagrammi TTT, o curve ad S (per la loro forma) o curve di Bain, o curve di trasformazione isotermica (vedi fig. 22).

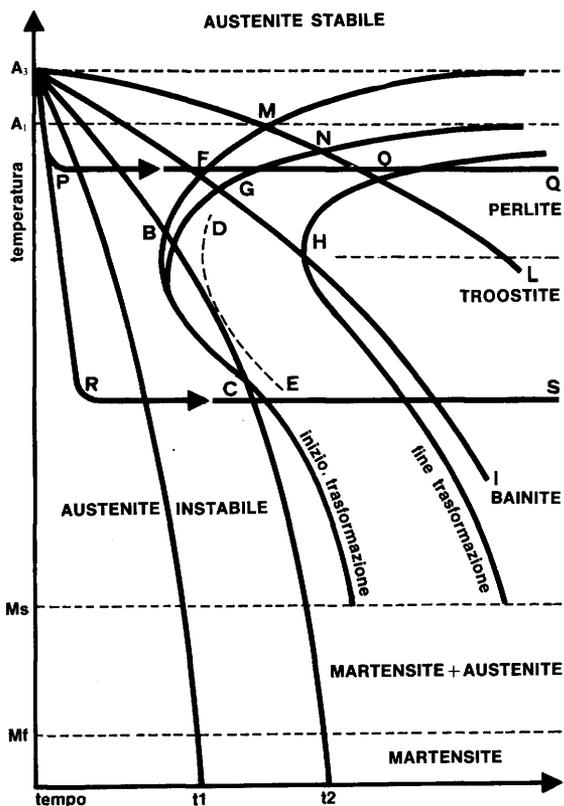
Le curve sono caratteristiche per ogni colata di ghisa e al di sopra del gomito si ha il campo perlitico, al di sotto quello bainitico. Per le ghise legate la curva tende ad assumere la forma di una doppia C. La C più alta è il campo perlitico, la più bassa quello bainitico. (vedi fig. 23).

Più è alta la % di C disciolta nell'austenite e più alta la % di elementi leganti, più le curve sono spostate a destra: aumenta cioè il periodo di incubazione e quello di trasformazione, aumenta cioè la temprabilità.

Nella pratica comune dei trattamenti termici, anche quelli definiti isotermici, per le masse non trascurabili dei pezzi da trattare non è possibile realizzare velocità di raffreddamento tali da riprodurre le condizioni nelle quali si opera nella costruzione dei diagrammi a S, ma si potranno realizzare, a seconda della massa dei pezzi e della drasticità dei bagni di spegnimento, delle curve che si possono per semplicità immaginare come quelle segnate sul diagramma. (vedi fig. 24).

Se un pezzo si raffredda secondo la curva A<sub>3</sub> t<sub>1</sub>, non si hanno intersezioni con le curve di trasformazione e l'austenite arriva fino





al punto  $M_s$ , in cui comincia a trasformarsi in martensite per completare la trasformazione a temperatura corrispondente a  $M_f$ . Se  $M_f$  si trova al di sotto della temperatura ambiente e non si raffredda fino a tale temperatura la ghisa, avremo come prodotto finale martensite e austenite.

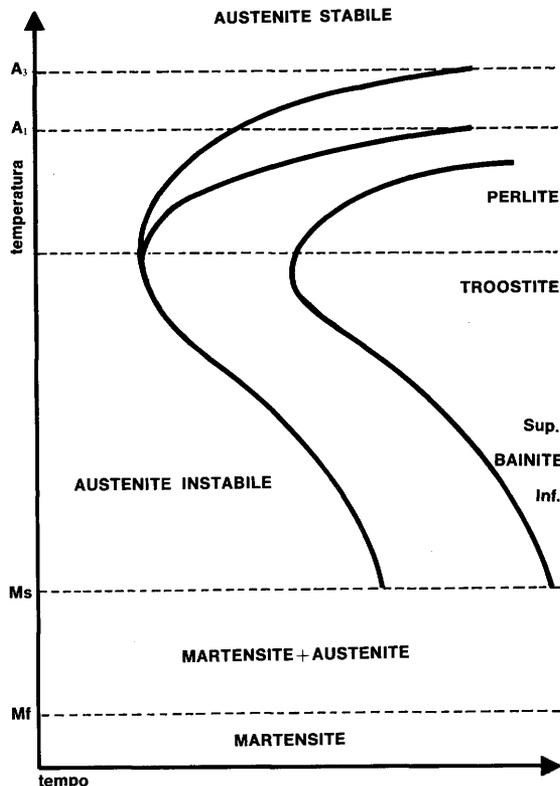
Secondo la curva  $A_3t_2$ , che interseca la linea inizio trasformazioni in  $BC$  all'altezza della bainite e troostite per poi proseguire fino ad arrivare in campo martensitico, avremo una struttura finale formata da bainite e troostite per circa un 50% se la curva arriva per es. a sfiorare la linea  $DE$  che rappresenta tale % di trasformazione, e per il restante 50% martensite.

Secondo la curva  $A_3l$  avremo inizialmente formazione di ferrite nel tratto  $FG$ , poi perlite e infine bainite nel restante tratto. Raggiunta la temperatura  $H$ , qualunque velocità di raffreddamento non riuscirà più a creare modifiche nella struttura.

Secondo la curva  $A_3L$  avremo dapprima separazione di ferrite e poi di perlite a lamelle molto grossolane (struttura caratteristica della ricottura completa).

Resta ancora da precisare che, come non si riesce nella pratica a realizzare velocità di raffreddamento tali da riprodurre le curve isoterme, così la velocità di raffreddamento in ogni singolo pezzo sarà diversa passando dalla superficie al cuore, per cui nel medesimo pezzo potranno verificarsi contemporaneamente molte delle curve ora esaminate e si potranno avere delle strutture che vanno dalla martensite alla superficie fino alle ferrite-perlite al cuore. Pur tenendo conto di queste difficoltà pratiche, si è tuttavia tentato (proprio in seguito alla realizzazione di queste curve TTT) di sviluppare dei trattamenti, naturalmente su pezzi con masse molto piccole, che realizzino le trasformazioni strutturali a temperatura costante:

*Raffreddamento secondo ARS.* Si raffredda rapidamente il pezzo fino al punto  $R$  e si mantiene a questa temperatura fino al termine della trasformazione. Si ottengono strutture troostitiche o bainitiche a seconda della temperatura di  $R$ . Questo trattamento si chiama austempering o bonifica isoterma, e viene realizzato con raffreddamento



damento in bagni di sali fusi mantenuti alla temperatura voluta. I vantaggi sono soprattutto nella diminuzione delle deformazioni (non si passa attraverso la martensite) e nella eliminazione delle possibilità di cricche perché si opera a temperatura in cui il materiale è ancora plastico.

*Raffreddamento secondo A3PQ.* Si raffredda rapidamente fino al punto P e si mantiene questa temperatura fino al termine della trasformazione. Più è alta la temperatura del punto P, maggiore deve essere la permanenza per ottenere la trasformazione completa e tanto più la struttura perlitica sarà a lame larghe e dolci; viceversa, per le temperature più basse di P. Inizialmente precipita la ferrite se la austenite è ipoeutettoide, oppure la cementite se è ipereutettoide. Il trattamento è conosciuto come ricottura isotermica e permette di ottenere durezza basse e strutture facilmente lavorabili in tempi relativamente brevi.

Un terzo tipo di trattamento isoteramico è il martempering o tempra scalare o martensitica, che consiste nel raffreddare in bagni salini fino alla temperatura  $M_s$  i pezzi, mantenendoli a tale temperatura fino a completa uniformazione e raffreddandoli poi in aria. La trasformazione martensitica ha così luogo contemporaneamente in tutto il pezzo, eliminando le fortissime tensioni che si creano nella tempra tradizionale.

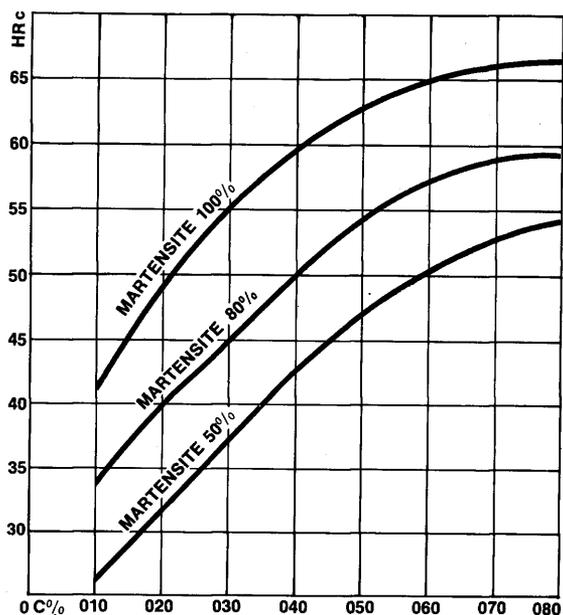
Questi trattamenti isoteromici presuppongono oltre che dimensioni ridotte dei pezzi, che permettano bruschi passaggi di temperatura, anche la conoscenza esatta della posizione delle curve isoteromiche, per cui nel caso della ghisa in cui non si è ancora arrivati neanche alla classificazione chimica, si tratta di procedimenti applicabili solo su grandi produzioni di serie che giustificano l'ausilio costante del laboratorio metallurgico. Comunque proprio perché si tratta di ghisa, cioè di materiale estremamente soggetto a rotture durante la tempra per la discontinuità e gli inneschi provocati dalle lamelle di grafite, gli accorgimenti nel raffreddamento di tempra, che permettono gli spegnimenti isoteromici, sono particolarmente utili.

## Attitudini alla tempra

L'attitudine alla tempra di una ghisa è data da due parametri:

- 1° Intensità di indurimento
- 2° Penetrazione di tempra

*Intensità di indurimento.* È la massima durezza che può conseguire il materiale quando è temperato nelle condizioni ottimali. Nel caso della ghisa la durezza è direttamente proporzionale alla quantità di C che può sciogliersi nella austenite durante il riscaldamento di tempra, in quanto la durezza della martensite è proporzionale alla % di C che contiene in soluzione (vedi fig. 25).



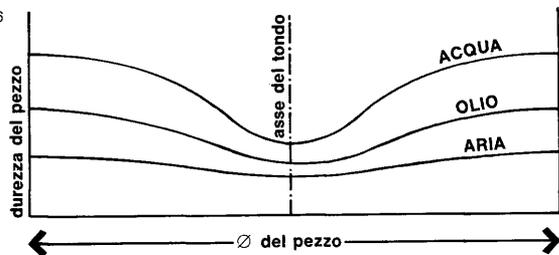
*Misura della penetrazione di tempra.* Come già accennato, le curve di raffreddamento di un pezzo saranno diverse dalla superficie al cuore del pezzo, maggiormente per la ghisa rispetto all'acciaio per la minore conducibilità termica. Anche la struttura di tempra di un pezzo sarà diversa dalla superficie al cuore.

Vi sono diversi tipi di prove per determinare la penetrazione di tempra:

*Curve ad U.* Per tracciare le curve ad U o curve di penetrazione di tempra di un tondo di ghisa temprato, è sufficiente segnare

su un diagramma le durezze (asse delle ordinate) riscontrate lungo il diametro (asse della ascisse - vedi fig. 26).

VARIAZIONE DELLA DUREZZA DALL'ESTERNO A CUORE A SECONDA DEI MEZZI TEMPRANTI



**Diametro critico**

Il diametro critico  $D_c$  è il diametro di un tondo che dopo tempra presenti al centro il 50% di martensite; esso dipende a parità di ghisa dalla drasticità del mezzo temprante. L'indice di drasticità di tempra  $H$  di un liquido è valutabile esattamente e può variare da zero a infinito (vedi fig. 27). Si dice diametro critico ideale ( $D_i$ ) di una ghisa il diametro critico relativo ad un mezzo di tempra ideale avente drasticità infinita. Conoscendo il  $D_c$  e la drasticità del mezzo di tempra si può risalire al  $D_i$ , che è direttamente proporzionale alla temprabilità (vedi fig. 28).

**Proma Jominy**

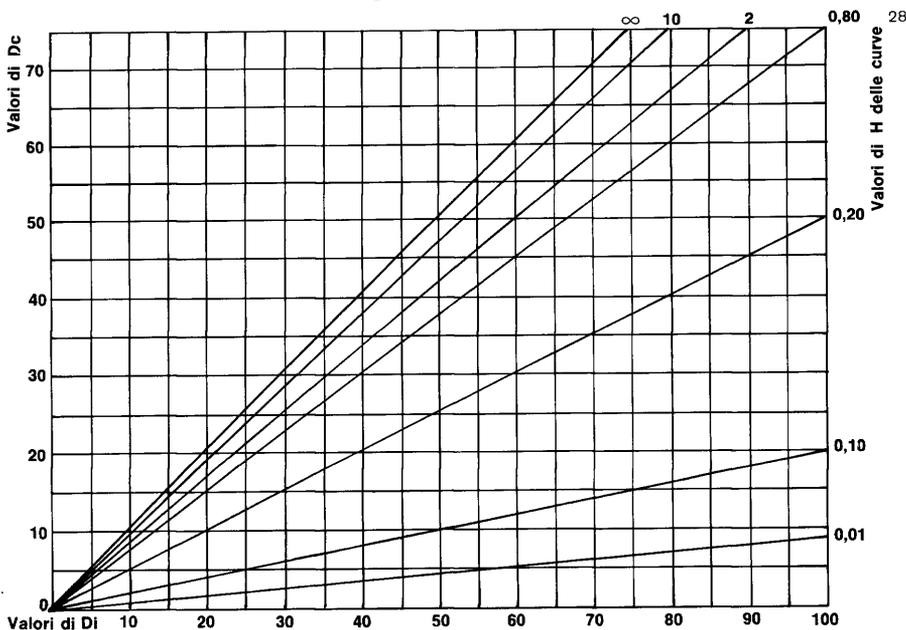
La prova Jominy è un metodo per misurare la penetrazione di tempra, che per la sua semplicità è ormai adottato universalmente.

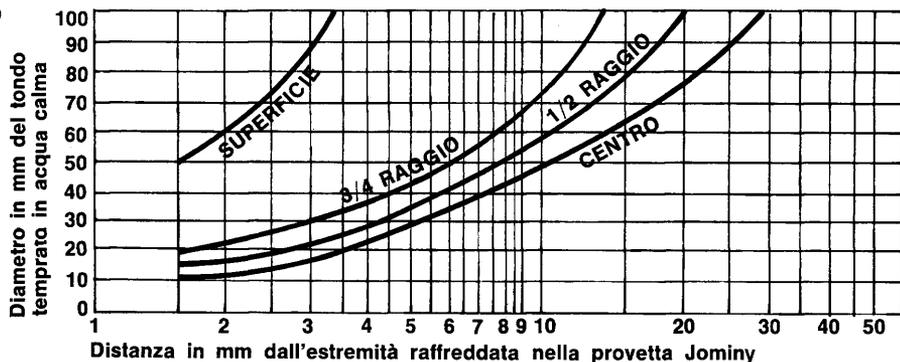
Si tratta di raffreddare in determinate condizioni l'estremità di una barretta tonda, di misure prestabilite, con uno spruzzo d'acqua. Si determinano poi le durezze su tutta una generatrice del cilindretto e si ri-

GRADO DI AGITAZIONE	VALORI DI H PER:		
	olio	acqua	acqua salata
nessuno	0,25-0,30	0,9-1	2
lieve	0,30-0,35	1-1,10	2 - 2,2
moderato	0,35-0,40	1,20-1,30	
notevole	0,40-0,50	1,40-1,50	
forte	0,50-0,80	1,60-2	
violento	0,80-1,10	4	5

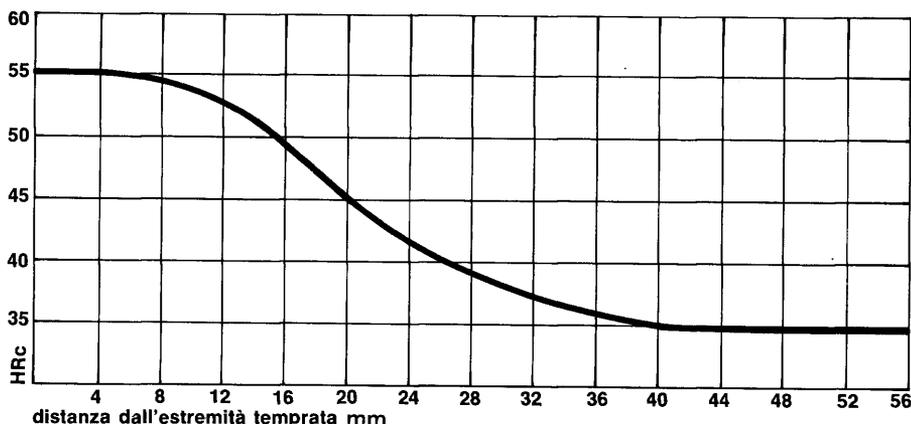
portano su un diagramma  $HRC$ /distanza dall'estremità temprata. Si ottengono delle curve caratteristiche per ogni colata. Da tale curva oltre a ricavare la capacità di tempra di una colata rispetto a un'altra, è possibile risalire alle durezze ottenibili in pratica su profili di determinate sezioni nei loro diversi punti facendo uso di altri diagrammi di corrispondenza. (vedi fig. 29).

DIAMETRO CRITICO IDEALE IN FUNZIONE DEL DIAMETRO CRITICO E DELL'INDICE DI DRASTICITA' H (Grossmann)





CORRISPONDENZA  
FRA LE VELOCITÀ  
DI RAFFREDDAMENTO  
E QUINDI FRA LE  
DUREZZE DELLA  
PROVETTA JOMINY  
E QUELLE DI TONDI  
DI GHISA TEMPRATA



ESEMPIO  
DI CURVA JOMINY

Terminata questa breve parentesi riassuntiva delle trasformazioni cui va soggetta la ghisa sottoposta a trattamenti termici e delle nozioni di temprabilità, passiamo ora alla elencazione dei vari trattamenti cui viene abitualmente sottoposta la ghisa nella pratica d'officina. Per un più approfondito esame di quanto sopra riassunto si rimanda ai vari testi sui trattamenti termici degli acciai.

### Invecchiamento o distensione o stabilizzazione

Il termine metallurgicamente improprio di invecchiamento nel caso della ghisa deriva dalla pratica ancora in uso non molti anni fa nelle officine meccaniche di lasciar "stagionare" i getti di ghisa destinati alla costruzione di macchine utensili di precisione, prima di sottoporli alla lavorazione meccanica. La pratica aveva lo scopo, lasciando i pezzi di ghisa nei cortili alle variazioni di temperatura stagionali, di permettere alla ghisa di fare quei movimenti

che le tensioni interne provocano, prima della messa in opera del pezzo. A parte l'immobilizzo di capitale, che almeno inizialmente ha giocato a sfavore di questa pratica, è evidente che un trattamento del genere è insufficiente. Il termine comunque è rimasto nella pratica d'officina per indicare un trattamento di distensione o stabilizzazione dimensionale, che si effettua sui getti prima di sottoporli a lavorazione meccanica. Tale trattamento non deve provocare sensibili riduzioni di durezza per cui non deve superare di norma 600°; ma d'altra parte deve arrivare almeno a 500° perché la ghisa assuma un minimo di plasticità per detensionarsi.

Se la temperatura è più bassa la permanenza dovrà essere maggiore, e viceversa

Alcune norme americane indicano come temperature più adatte di riscaldamento:

510°-565° per ghise non legate.

565°-595° per ghise poco legate.

595°-650° per ghise altamente legate.

I forni più adatti per questo tipo di tratta-

mento sono quelli elettrici o quelli mufolati a fiamma indiretta, perché il gradiente di temperatura deve essere il più possibile uniforme e regolabile. La temperatura di partenza del forno deve essere tanto più bassa quanto più il pezzo è grande e complicato. Se per getti di dimensioni di pochi cm è addirittura possibile caricare con il forno già in temperatura, per getti dalle dimensioni dell'ordine di metri è consigliabile partire da temperature non più alte di  $200^{\circ} \div 300^{\circ}$ .

E' infatti molto più probabile rompere il getto durante il riscaldamento che non durante il raffreddamento, in quanto durante il riscaldamento il materiale già sotto tensione viene sottoposto ad ulteriori sollecitazioni determinate dalla diversità di temperatura che si creano nel pezzo. Le rotture dovute a riscaldamento troppo rapido hanno la caratteristica di partire dal centro del pezzo: infatti le parti esterne del pezzo, più calde aumentano di volume determinando una tensione di trazione nelle parti centrali più fredde e quindi non ancora dilatate come quelle esterne, e più fragili perché ancora al disotto della temperatura di plasticità. Per questo stesso motivo bisogna assolutamente evitare di caricare più pezzi a diretto contatto fra di loro, ma occorre sempre adottare opportuni distanziatori che permettono ai pezzi di ricevere il calore da tutti i lati.

Viceversa le rotture dovute a raffreddamento troppo rapido partono dall'esterno del pezzo, anche se queste ultime sono molto più improbabili perché il pezzo durante il raffreddamento è già detensionato e ha una struttura più uniforme, (eventuali tracce di bainite o troostite si sono già trasformate). È difficile quindi stabilire dei gradienti di temperatura al riscaldamento perché direttamente legati alla dimensione dei pezzi e alla loro forma. In linea di massima si può dire che un riscaldamento di  $50^{\circ}$  all'ora dà buone garanzie per pezzi di dimensioni molto grandi e complicati purché si parta da temperature del forno dell'ordine di  $200^{\circ}/300^{\circ}$ . Per pezzi piccoli la velocità può essere più alta.

La permanenza in temperatura deve essere



Esempio tipico di rottura dovuto a riscaldamento troppo rapido su di un basamento di ghisa grigia.

tale da garantire la omogeneità di temperatura anche a cuore e quindi sarà proporzionale alla dimensione del pezzo. A questo proposito sarà bene ricordare che la conducibilità termica della ghisa è bassa e quindi paragonabile a quella degli acciai fortemente legati per i quali l'esperienza prescrive una permanenza in temperatura di circa 1' per ogni mm di spessore.

Il raffreddamento deve essere il più lento possibile compatibilmente con le esigenze di utilizzo del forno. Velocità di raffreddamento di  $50^{\circ}$  ora fino a  $200^{\circ}$  sono tali da garantire la perfezione del trattamento. Non è detto che un raffreddamento diretto all'aria annulli i benefici del detensionamento avvenuto durante il riscaldamento: si ricordi a questo proposito che le tensioni sono soprattutto originate dai diversi tempi di solidificazione degli spessori diversi e dalle diverse strutture che si originano nel raffreddamento attraverso il passaggio dei punti critici di trasformazione di questi spessori. Il riscaldamento a temperatura inferiore di quella critica annulla quindi questi motivi di tensione senza creare le premesse per crearne altri. Pur non rappresentando la perfezione, si può ritenere quindi utile una distensione fatta con raffreddamento all'aria.

## Ricottura

Il trattamento di ricottura sulle ghise grigie ha lo scopo principale di aumentarne la lavorabilità all'utensile. La omogeneizzazione della struttura di fusione e la diminuzione della durezza sono motivi invece che molto raramente determinano la richiesta di una ricottura su di una ghisa. Molto raramente quindi la ricottura si esegue su ghise in assenza di carburi liberi. In questo caso si tratta di addolcire una struttura che, per una inesatta analisi chimica al momento della colata, anziché essere completamente ferritico-perlitica ha delle zone

nelle parti più sottili che possono essere troostiche o addirittura bainitiche-martensitiche. È evidente che in questo caso l'addolcimento può essere ottenuto con un riscaldamento che arrivi ad oscillare attorno al punto A<sub>1</sub>, che per le ghise grige non legate è a circa 750°, seguito da un raffreddamento all'aria. La struttura che si ottiene sarà ferritico-perlitica con tendenza al prevalere della ferrite quanto più lunga sarà stata la permanenza in temperatura.

Per le modalità pratiche di questo trattamento valgono gli accorgimenti già visti a proposito della stabilizzazione.

Molto più frequentemente le ghise vengono sottoposte a ricottura per la presenza di carburi liberi che si formano soprattutto quando, magari come impurezze, sono presenti elementi carburogeni (Cr-Mo-Va, ecc.). In questo caso, il più delle volte, alla prova di durezza Brinell la ghisa apparentemente sembra perfettamente lavorabile perché è esattamente nel limite di durezza, mentre gli utensili perdono quasi subito l'affilatura e non riescono più a tagliare perché incontrano questi carburi durissimi immersi nella matrice tenera della ferrite-perlite. Si tratta dunque in questo caso di portare in soluzione i carburi della struttura greggia di fusione ed ottenere una struttura omogenea ferritico perlitica. In genere è sufficiente portare la ghisa a temperatura di austenitizzazione completa (850°) e mantenerla per il tempo necessario per omogeneizzare la temperatura all'interno del pezzo, perché i carburi si sciolgano nella austenite.

Nel caso in cui i carburi siano di cromo e quindi più difficilmente solubili è necessario portare la temperatura di austenizzazione almeno a 900°, meglio a 950°, e mantenere tale temperatura alcune ore dopo l'omogeneizzazione della temperatura nei pezzi, per ottenere dei risultati soddisfacenti.

Il raffreddamento sarà lentissimo soprattutto nell'intervallo di trasformazione A<sub>1</sub> compreso fra 700°-760°.

L'esecuzione di questa ricottura dovrà essere effettuata in forni muffolati, elettrici o a fiamma indiretta, con le modalità già descritte per la stabilizzazione fino alla tem-

peratura di almeno 600°, dopo di che la velocità di riscaldamento può essere aumentata senza rischi di rottura perché il materiale avrà raggiunto un buon grado di plasticità. Quando il materiale avrà raggiunto la temperatura di regime (momento controllabile empiricamente perché guardando attraverso un foro spia del forno lo si vedrà dello stesso colore delle pareti), si comincerà il conteggio di 1' per mm di spessore per garantire che la temperatura giunga fino a cuore. Nel caso di ghisa al cromo a questo conteggio si aggiungono tre o quattro ore in più di permanenza.

Un accorgimento importante in questa operazione di riscaldamento è cercare di evitare le deformazioni dei pezzi, soprattutto quelli grandi e pesanti, cercando di sopportarli il più possibile: alle temperature di 900-950° la ghisa ha già una plasticità notevole. A questo punto può iniziare la discesa dalla temperatura di permanenza, che è la fase più delicata del trattamento. Se si dispone della collaborazione di un laboratorio per l'analisi delle curve di raffreddamento della ghisa in esame e se la partita di materiale ha una consistenza tale da giustificare quest'onere, è possibile adottare un raffreddamento di tipo isotermico che oltre a garantire strutture migliori aumenta notevolmente la velocità del ciclo, altrimenti bisognerà accontentarsi di un raffreddamento continuo nel forno fino ad almeno 500°, dopo di che i pezzi possono essere estratti all'aria. Se durante il raffreddamento si fa una sosta di alcune ore a 700° ÷ 750° (temperatura intorno a A<sub>1</sub>), si può ottenere la decomposizione della perlite appena formata in ferrite più grafite.

Con questo trattamento oltre alla solubilizzazione dei carburi si ottiene il massimo addolcimento della ghisa.

Un altro ciclo, che unisce alla relativa rapidità di esecuzione dei risultati soddisfacenti, consiste in un raffreddamento all'aria da una temperatura di austenitizzazione di 850° per 4 ore ed in un successivo riscaldamento, di globulizzazione delle particelle di carburi formatesi nel passaggio da A<sub>1</sub>, per quattro ore a 750°. Nel caso di ghise legate al cromo (2,5 ÷ 3% di Cr con struttura greg-

gia di fusione contenente: grafite lamellare, ledeburite ed eutettico ternario con carburo di Cr, perlite fine e bainite) con questo trattamento non si ha che la solubilizzazione parziale dei carburi primari, però la struttura della matrice acciaiata diventa tale da permettere una lavorabilità all'utensile accettabile. La durezza Brinell passa in questo caso da oltre 400 a meno di 270 Hd.

## Normalizzazione

Consiste nel riscaldamento fino alla temperatura di austenitizzazione, seguito da un raffreddamento all'aria. Nelle ghise con struttura primaria di fusione ha lo scopo di omogeneizzare la struttura, portando in soluzione i carburi e nel successivo raffreddamento, se la velocità di raffreddamento è più alta di quella realizzata nella staffa, aumentare la quantità di perlite a scapito della ferrite primaria. I risultati sono comunque sempre incerti, perché la velocità di raffreddamento non è evidentemente controllata e le strutture possono essere diverse nello stesso pezzo a seconda degli spessori e da pezzo a pezzo a seconda della posizione nella carica del forno.

## Tempra

Le ghise, in quanto leghe ferrose austenitizzabili, sono temprabili come gli acciai. La tempra delle ghise grigie viene fatta seguire da rinvenimento di bonifica, al fine di migliorare le caratteristiche meccaniche (essenzialmente la durezza), e la omogeneità strutturale, oppure viene fatta seguire da una distensione a  $150^{\circ} \div 200^{\circ}$  a scopi antiabrasivi. Il riscaldamento avverrà lentamente fino a  $600^{\circ}$ , dopo di che si potrà procedere rapidamente fino alla temperatura voluta, tenendo conto di tutte le osservazioni già fatte a proposito del riscaldamento nella ricottura completa. Siccome il forno di tempra lavorerà ad una temperatura costantemente elevata sarà necessario in questo caso eseguire un preriscaldamento fino a  $600^{\circ}$  in un altro forno destinato allo scopo.

La temp. di trasformazione per le ghise non legate si aggira intorno agli  $800^{\circ}$  e può essere calcolata con approssimazione con la

formula: Temp. di trasf.  $^{\circ}\text{C} = 730 + 28 \times \% \text{Si} - 25 \times \% \text{Mn}$ ;

per entrare sicuramente nel campo dell'austenite bisogna aumentare di una cinquantina di gradi tale temperatura.

Prove pratiche eseguite su saggi di  $\varnothing 30$  lung. 100 di ghisa G20 e G30 gregge di fusione, con analisi rispettivamente

C = 3,4; Si = 2,2; Mn = 0,7; S = 0,07.

C = 3,2; Si = 2,05 Mn = 0,7; S = 0,07 struttura ferritica-perlitica la 1<sup>a</sup> e perlitica la 2<sup>a</sup>, hanno dato i valori della tabella qui sotto riportata di durezza a varie temperature di austenitizzazione seguite da spegnimento in acqua.

TIPO GHISA	TEMPERATURA DI TEMpra		
	840°	880°	920°
G 20	HRc 44,5	HRc 43,5	HRc 43
G 30	HRc 54,5	HRc 53	HRc 50,5

Dalla tabella si deduce che un aumento eccessivo di temperatura, oltre quella normalmente necessaria per entrare nel campo austenitico, provoca addirittura una diminuzione di durezza, per cui è nettamente controproducente. La durezza inferiore della martensite ottenuta dalla tempra della G 20 rispetto a quella della G 30 indica che la prima è più povera di carbonio e quindi dimostra come in soluzione nel ferro  $\gamma$  dell'austenite è entrato solo il C che si trovava disperso come carburi della perlite mentre il C delle lamelle di grafite è talmente lento a sciogliersi che non ha potuto saturare l'austenite o almeno portarla a concentrazione di carbonio vicina all'austenite della G 30.

Facendo riferimento al diagramma della durezza della martensite in relazione al tenore di C in soluzione (vedi diagramma pag. 44), è possibile risalire approssimativamente alle  $\%$  di C che nelle due ghise si sono disciolte nell'austenite e precisamente per la G20  $\sim 0,15\%$  e per la G30  $\sim 0,28\%$ .

Se ne deduce che il comportamento della matrice acciaiata di queste due ghise è all'incirca paragonabile a un acciaio rispettivamente con C  $0,15\%$  e C  $0,28\%$  e  $2\%$

di Si. (L'influenza del Si è già stata illustrata all'inizio - pag. 17).

Stabilita la temperatura ottimale di tempra a 840°, sempre le stesse due ghise hanno dato per permanenze crescenti in forno a questa temperatura i dati sottosegnati:

TIPO GHISA	DURATA ORE (840° tempra H <sub>2</sub> O)		
	1	2	3
G 20	HRC 44,5	HRC 44,5	HRC 44,5
G 30	HRC 54,5	HRC 54,5	HRC 54,5

La deduzione è che la permanenza in forno oltre il tempo necessario per ottenere la omogeneizzazione della temperatura nel pezzo è inutile.

### Penetrazione di tempra

Le stesse due ghise sottoposte a prova di penetrazione di tempra col metodo Jominy hanno forniti i dati seguenti (vedi a piè di pagina tabella e diagramma).

Tenendo conto che si definisce accettabile, ai fini della bonifica di un pezzo, una struttura a cuore che sia martensitica almeno al 50%, e tenendo conto che per la ghisa G 20 il 100% di martensite corrisponde a una durezza di 44 Hrc si può definire accettabile a cuore una durezza a tutta tempra di 28 Hrc corrispondente al 50% di martensite (vedi diagramma pag. 44). Questa durezza accettabile è ottenuta a una

distanza di circa 17 mm sulla barretta Jominy. Riportando questa distanza sul diagramma di pag. 46 fig. 29 e cercando a quale tondo corrisponde una durezza a cuore di 28 Hrc, si ottiene che il diametro massimo temprabile in acqua di questa ghisa G 20 è di 68 mm.

Con procedimento analogo è possibile determinare le dimensioni massime temprabili per ogni tipo di ghisa.

### TEMPRA DI GHISE FERRITICHE

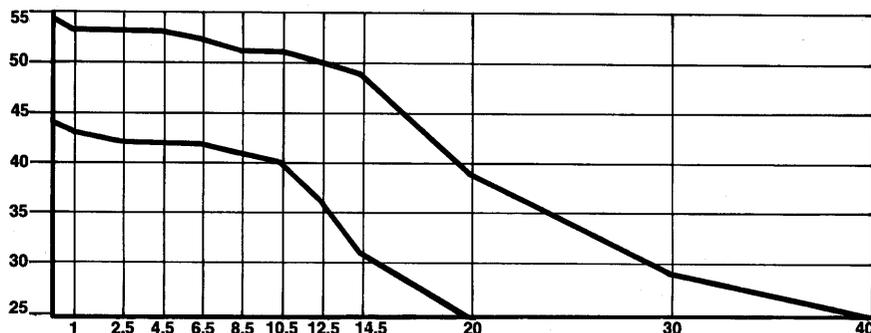
In questo caso è necessario operare una netta distinzione fra ghise a ferrite diretta e quindi tali per la loro specifica composizione chimica già fin dal raffreddamento dal punto di fusione, e ghise a ferrite indiretta, dovuta cioè a particolari cicli di trattamento termico di ricottura.

Nel primo caso il trattamento termico di tempra non ha alcuna possibilità di riuscita: innanzitutto si parte da una matrice ferritica che come tale possiede pochissimo C sciolto (0,01%) e assenza totale di carburi che, come si è detto, sono i primi a sciogliersi nella austenite; ma soprattutto osservando il diagramma di equilibrio Fe-C in funzione del Si (vedi la figura n. 30) si nota come in presenza di tenori molto bassi di C (come nel nostro caso) già con la presenza di 2,5% di Si scompare la fase  $\gamma$ . In pratica, si è già detto, con un tenore di Si > 3% in ghise non legate, tutto il C precipita sotto forma di grafite per cui in queste ghise si verifica la scomparsa del-

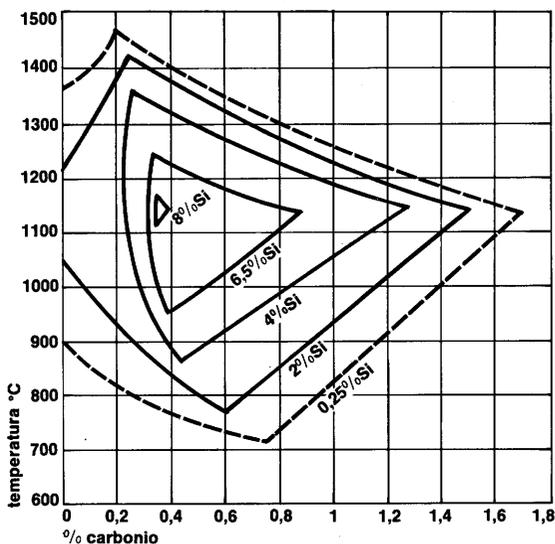
DUREZZA IN HRC ALLE DISTANZE SEGNATE

mm	0	1	2,5	4,5	6,5	8,5	10,5	12,5	14,5	20	30	40
G 20	44	43	42	42	42	41	40	36	32	24	11	7
G 30	54	53	53	53	52	51	51	50	49	39	29	25

DIAGRAMMA RICAVATO CON I DATI DELLA TABELLA SUPERIORE



30  
**EFFETTO DEL TENORE DI SI SULLA  
 VARIAZIONE DEL CAMPO AUSTENISTICO DEL SISTEMA  
 FERRO-CARBONIO (SATO)**



la fase  $\gamma$  e pertanto non risultano più temprabili.

Nelle ghise ferritiche composte da ferrite indiretta l'analisi chimica è tale che le curve di equilibrio  $\alpha/\gamma$ , seppure modificate, non sono eliminate, per cui se più difficile è la soluzione del C grafítico nella austenite che non nel caso di ghise perlitiche, è però possibile ottenerla in un tempo accettabile e produrre strutture martensitiche. A tal riguardo si osservi come una ghisa prevalentemente perlitica (40% di ferrite, 60% di perlite) e la stessa ghisa totalmente ferritica dopo ricottura si comportano agli effetti della temprabilità con la prova Jominy: Analisi ghisa C 3,70 - Si 2,7 - Mn 0,30 - Ni 0,35. Tempo di austenitizzazione: un'ora a 840° (vedi fig. 31). La prova di temprabilità sta ad indicare come anche la ghisa ferritica, quando la sua analisi lo permetta, può entrare nel campo  $\gamma$ , sciogliere il C, in questo caso grafítico, e trasformarsi in martensite al raffreddamento. Le durezze ottenute confermano la difficoltà del C precipitato come grafite a sciogliersi nella fase  $\gamma$ .

Aumentando la permanenza alla temperatura di austenitizzazione le durezze delle due ghise tendono a sovrapporsi, mentre, al contrario, per riscaldi molto brevi, dell'ordine di pochi secondi, la martensite che si origina dalla ghisa ricotta è limitata ad una

zona molto stretta intorno alla grafite mentre la parte restante si ritrova allo stato di ferrite. In pratica il riconoscimento di una ghisa ferritica o perlitica è possibile effettuarlo riscaldandola a temperatura di austenitizzazione e lasciandola raffreddare all'aria. Un controllo al microscopio è naturalmente il più esatto, ma in mancanza di questo una durezza, dopo tale trattamento, superiore a 180 Hd è già un buon segno di riconoscimento di una ghisa perlitica.

### RAFFREDDAMENTO DI TEMPRA

La più grossa difficoltà che si incontra nella tempra delle ghise è la loro fragilità determinata dalle lamelle di grafite che creano una miriade di intagli e quindi di innesci alla rottura. Nelle pagine precedenti si è parlato anche di tempra in acqua, ma è questa una condizione che nella pratica d'officina, almeno per le ghise lamellari, non potrà mai essere adottata pena la rottura dei pezzi.

Durante la tempra la trasformazione martensitica del materiale crea un aumento di volume. Questo aumento non sarà però contemporaneo e uniforme in tutto il pezzo, ma le parti più superficiali e quelle più sottili si trasformeranno prima di quelle all'interno, quando queste ultime subiranno la trasformazione con aumento di volume spingeranno verso l'esterno dove la crosta di materiale già martensitico non può sopportare deformazioni. Si creeranno quindi delle tensioni fortissime che se superano il carico di rottura daranno luogo a cricche. Il mezzo di tempra più adatto per le ghise sarà quindi l'olio, che realizzando velocità di raffreddamento più lente permetterà un passaggio attraverso alla martensite con minori diversità di temperatura fra cuore ed esterno.

Non solo, ma osservando le curve di drasticità dei vari mezzi tempranti si nota (vedi figura 32) come l'olio al contrario dell'acqua rallenta il raffreddamento proprio in vicinanza della trasformazione martensitica, creando così le condizioni più idonee per evitare rotture. Qualora l'entità delle partite e la piccola dimensione dei pezzi lo permetta, è possibile usufruire degli enormi vantaggi delle tempre che sfruttano

**DUREZZA IN HRC  
ALLE DISTANZE  
SEGNATE**

mm	0	1	2,5	4,5	6,5	8,5	10,5	12,5	14,5	20	30	40
GHISA GREGGIA	59	59	58	58	55	52	46	37	33	31	29	28
GHISA RICOTTA	56	56	56	54	51	45	37	30	28	26	24	23

la conoscenza della posizione delle curve ad S, e che vengono effettuate in bagni di sale tenuti a temperatura appropriata. Si potrà così usufruire della

**TEMPRA SCALARE O MARQUECHING:**

Si raffredda il pezzo fino alla temperatura Ms (naturalmente senza che incontri la curva ad S), si lascia a tale temperatura finché si uniformizza e poi si estrae dal bagno e si lascia raffreddare in aria.

**TEMPRA ISOTERMICA O MARTEMPERING**

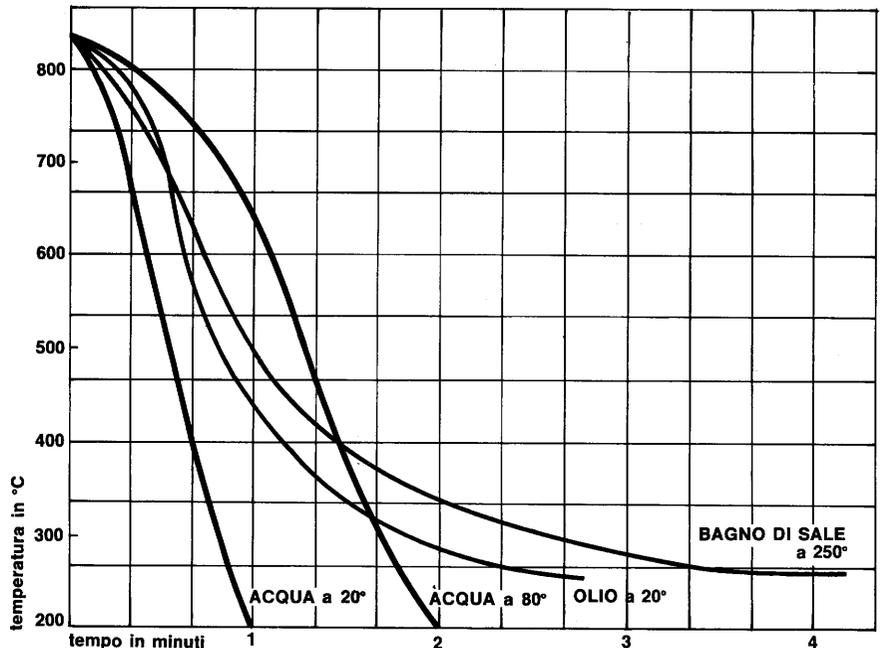
Si mantiene il pezzo leggermente sopra alla temperatura Ms, fino a quando non ha passato le curve di trasformazione inizio e fine bainite inferiore e si estrae all'aria.

**Bonifica**

Per bonifica s'intende una tempra che dia origine a struttura martensitica, seguita da un rinvenimento generalmente a 600° con formazione di struttura sorbitica. Per le ghise grige lamellari non è possibile parlare di miglioramento sensibile delle caratteri-

stiche meccaniche con il trattamento di bonifica perché alcune di esse sono quasi esclusivamente condizionate dalla presenza degli intagli creati dalle lamelle di grafite (resilienza, allungamento, strizione). I motivi che possono portare all'adozione della bonifica in questo caso sono o l'aumento della durezza e della resistenza quasi sempre per quei casi in cui l'errata composizione chimica ha portato la ghisa greggia di fusione ad essere più tenera del richiesto, o l'omogeneizzazione della struttura soprattutto quando sono presenti dei carburi primari che la semplice ricottura subcritica non riesce a sciogliere, mentre la ricottura completa renderebbe la ghisa troppo tenera e la normalizzazione le durezze non troppo costanti. La bonifica in questo caso, se eseguita correttamente, porta alla eliminazione dei carburi liberi e delle zone ferritiche, creando una matrice omogenea di ferro  $\alpha$  nella quale sono uniformemente e finemente disperse le particelle di carburo (vedi fig. 20 pag. 41).

**CURVE DI TEMPERATURA  
TEMPO PER MEZZI  
TEMPRANTI NON AGITATI  
(PROVINO IN ACCIAIO  
INOX Ø 50 mm)**



Da questo punto di vista la bonifica è il miglior trattamento di preparazione dei pezzi di ghisa per la tempra ad induzione e alla fiamma. Per quanto riguarda la esecuzione pratica del trattamento, a proposito della tempra si è già parlato, mentre per il rinvenimento valgono tutti quegli accorgimenti già elencati a proposito della stabilizzazione per il riscaldamento mentre il raffreddamento può essere effettuato decisamente all'aria.

### **Bonifica isotermica o austempering**

È il trattamento di bonifica che sfrutta la conoscenza delle curve a S.

Si tratta di portare rapidamente il pezzo dalla temperatura di austenitizzazione ad una temperatura che corrisponde alla bainite superiore o alla troostite a seconda delle durezza desiderate, tenerlo a tale temperatura finché non si sia trasformato completamente, per poi lasciarlo raffreddare a qualsiasi velocità.

I vantaggi e i limiti sono quelli già elencati per gli altri trattamenti isotermici di tempra.

### **Tempra ad induzione e fiammatura**

Sono procedimenti di tempra superficiale che sfruttano la rapidità di riscaldamento della fiamma ossiacetilenica (fiammatura) o il riscaldamento superficiale provocato dal passaggio di correnti indotte ad alta frequenza in materiali ferromagnetici (tempra ad induzione). Per quel che riguarda il riscaldamento a induzione quanto più alta sarà la frequenza della corrente impiegata, tanto più le correnti indotte sul pezzo circoleranno in superficie. Così con frequenze di 10 KHz si otterranno profondità di riscaldamento dell'ordine da 3 a 10 mm., con 500 KHz profondità dell'ordine da 0,5 a 2 mm.

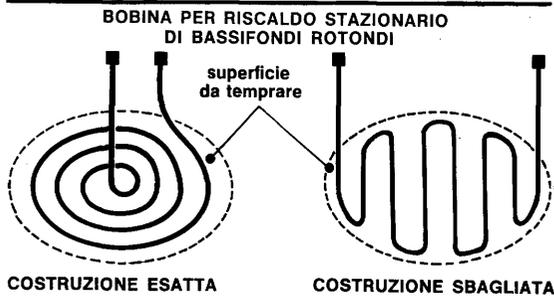
Le correnti vengono indotte avvicinando il più possibile al pezzo da riscaldare un elettrodo di forma tale da copiare la sagoma del pezzo. Tale elettrodo inoltre dovrà essere costruito con tubo di rame all'interno del quale circola una quantità d'acqua in grado di assorbire tutto il calore che si genera al passaggio della corrente per effetto Joule.

È evidente che l'area della superficie riscal-

data nell'unità di tempo sarà proporzionale alla potenza erogata dalla macchina e inversamente proporzionale allo spessore di materiale riscaldato, quindi più bassa sarà la frequenza più profondo sarà il riscaldamento e più piccola sarà la superficie riscaldata nell'unità di tempo a parità di potenza. Senza entrare nel merito di formule che si possono agevolmente trovare su testi specializzati, a titolo orientativo si può dire che a 500 KHz con una potenza alla bobina di 30 KW si può arrivare a temprare agevolmente dei tondi fino a  $\varnothing 70$  con il metodo a passaggio (si fa cioè avanzare entro una bobina circolare il pezzo mano a mano che si riscalda, facendolo poi temprare da una doccia situata subito dopo la bobina), mentre con la stessa potenza, su di una macchina a 10 KHz, il diametro massimo agevolmente temprabile è dell'ordine di  $40 \div 50$  mm.

La forma della bobina è essenziale agli effetti dell'utilizzo pieno della potenza della macchina. Se per la tempra di tondi non esistono problemi in quanto la bobina non potrà che avere forma circolare con intraferro minore possibile (1-3 mm.), per la tempra di altri particolari (ingranaggi — cammes — ecc.) andrà studiata di volta in volta tenendo conto che il massimo rendimento si ottiene cercando di far girare le spire sempre nello stesso senso, al fine di non annullare i campi magnetici che si formano ad ogni giro.

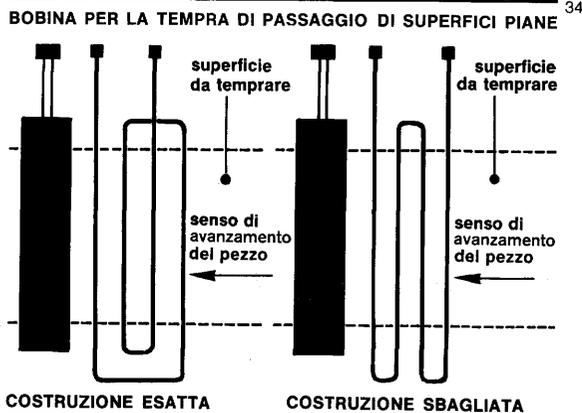
Esistono naturalmente delle eccezioni dettate da situazioni contingenti. Nella tempra di bancali di ghisa molto grandi, nei quali è indispensabile avere una bobina, come quella di fig. 34, almeno a quattro spire (per avere durante il passaggio una efficace azione di preriscaldamento), può succedere che la potenza della macchina non sia tale da permettere la costruzione di una bobina come quella di sinistra della fig. 34, tanto grande da lasciare fuori dei bordi della superficie da riscaldare le parti piegate a  $90^\circ$  per i ritorni (in queste zone il riscaldamento non è uniforme). Si dovrà allora ricorrere alla soluzione di destra, che permette l'utilizzo completo della lunghezza della bobina perché nei ritorni non crea grosse disuniformità di riscaldamento.



Il riscaldamento mediante fiammatura è di così semplice concezione che non ha certamente bisogno di chiarimenti particolari. L'unica difficoltà sta nel costruire bruciatori di forma appropriata che non creino zone di surriscaldamento. Naturalmente anche i bruciatori andranno raffreddati con opportuna circolazione di acqua. Gli inconvenienti della fiammatura sono, oltre ad una minore facilità di controllo delle operazioni da parte dell'operatore, la creazione di una situazione ambientale (temperatura e umidità) difficilmente sopportabili dall'operatore specialmente nei mesi caldi. Questi motivi hanno determinato un graduale abbandono del procedimento, anche se proprio nei confronti della ghisa, per la sua maggiore gradualità e lentezza nel riscaldamento fornisce risultati a volte migliori del riscaldamento induttivo.

## METALLURGIA DELLA TEMPRA AD INDUZIONE

Metallurgicamente la tempra ad induzione non è che un riscaldamento veloce alla temperatura di austenitizzazione, seguito da un raffreddamento tale da provocare la formazione di martensite. Richiamandoci quindi a quanto detto a proposito della tempra del-



le ghise, risulta subito evidente che questo trattamento non può essere applicato alle ghise ferritiche con ferrite diretta in quanto non austenitizzabili.

Sottoponendo a tempra ad induzione le due ghise G20 e G30 (già esaminate a pag. 49) si sono ottenuti questi dati:

TIPO GHISA	DUREZZA STRATO TEMPRA INDUZIONE	PROFONDITA' STRATO TEMPRA	DUREZZA TEMPRA IN FORNO A MUFFOLA
G 20	HRc 42	2,5 mm	HRc 44,5
G 30	HRc 51	2,5 mm	HRc 54,5

Le minori durezze ottenute per tempra ad induzione rispetto a quelle ottenute con riscaldamento in forno tradizionale sono spiegabili col rapidissimo riscaldamento (pochi secondi), che non permette al C perlitico di entrare completamente in soluzione nella au-

stenite. Sottoponendo invece alla stessa prova la ghisa già esaminata a pag. 51 (e precisamente una ghisa ferritico-perlitica greggia di fusione e la stessa ghisa ricotta fino ad essere completamente ferritica) si ottiene:

TIPO GHISA	DUREZZA STRATO TEMPRA INDUZIONE	PROFONDITA' STRATO TEMPRA	DUREZZA TEMPRA IN FORNO A MUFFOLA
ghisa greggia	HRc 34	1,6	HRc 59
ghisa ricotta	HRc 23	—	HRc 56

La diversità di durezza notevole alla tempra ad induzione conferma come il C, non più finemente suddiviso come nella perlite, nel caso della ghisa ferritica non ha il tempo per entrare in soluzione nella austenite. L'esame microscopico conferma nel caso della ghisa ferritica un esiguo contorno di martensite solo ai bordi della grafite. Sempre all'esame microscopico si evidenzia ancora un'altra caratteristica note-

vole, quando si è in presenza di strutture miste ferritico-perlitiche. La martensite che si ottiene in questo caso non ha un aspetto omogeneo ma si presenta a chiazze che a prove di microdurezza rivelano valori nettamente diversi di durezza: le prove eseguite per comodità su di un acciaio C 50 hanno dato le microstrutture sottoriportate (vedi fig. 35) a profondità crescenti con valori di durezza riportati in tabella:

DUREZZA MICROVIKERS MEDIA					
distanza dalla superficie	0,2-0,3 mm	0,5-0,6 mm	0,9-1 mm	1,3-1,4 mm	2,1-2,4 mm
aree costituite da perlite prima della tempra	926	898	805	828	277
aree costituite da ferrite prima della tempra	729	629	541	336	225

Dalla tabella si può notare come in superficie, dove la temp. è più alta, la diffusione del C è stata notevole, anche se non totale, verso le zone ferritiche, mentre la diffusione è pressoché nulla ad una profondità di  $1,3 \div 1,4$  mm.

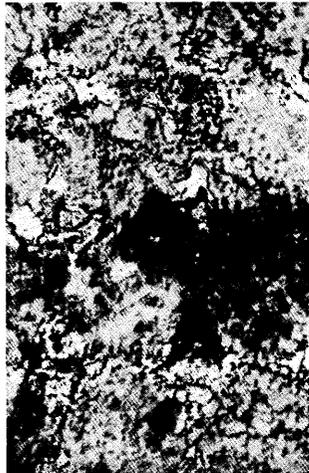
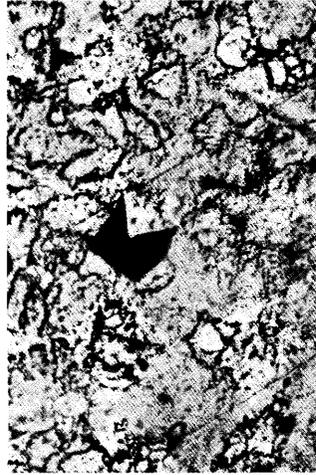
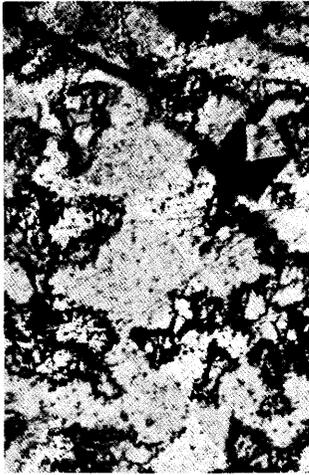
Seppure la mancata diffusione del C perlitico nelle aree ferritiche può provocare delle disuniformità di durezza nella sopravvenuta martensite a livello di microstruttura, e quindi un tenore più basso della durezza media che misurano i metodi normali d'officina, gli insuccessi più totali sono da attribuire, come abbiamo visto, alla sola presenza di C grafiteo con mancanza di perlite. Si tratta quindi, per ottenere i migliori risultati di durezza e uniformità nella tempra ad induzione, di partire da una ghisa che contenga la maggior quantità possibile di carbonio sotto forma di carburi, il più possibile finemente suddivisi.

*La miglior condizione di partenza per la tempra ad induzione di una ghisa è quindi lo stato bonificato.*

Quanto fin qui illustrato può anche contribuire a chiarire ciò che empiricamente gli esecutori di tempra ad induzione di bancali di ghisa adottano per conseguire risultati più costanti nella durezza. Quasi sempre i bancali da temprare ad induzione sono grezzi di fusione e quindi con struttura grossolana e disuniforme; la tempra ese-

guita in questi casi con una bobina classica (quale si userebbe per la tempra di una superficie di acciaio) e cioè una bobina con un tubo di andata e uno di ritorno, darebbe dei risultati scarsi di durezza e di omogeneità. Si ricorre allora ad una bobina doppia (ved. pag. 54), che durante l'operazione di tempra a passaggio dà la possibilità con i primi tre tubi di eseguire un buon preriscaldamento e di mantenere già a temp. di trasformazione austenitica la ghisa prima che passi sotto il quarto tubo, che crea le condizioni di temperatura più adatte per la tempra successiva con la doccia. La maggiore permanenza della ghisa a temperatura di austenitizzazione permette di mandare in soluzione nell'austenite maggiori quantità di C e quindi ottenere durezze più elevate e costanti. È lo stesso motivo per cui con la fiammatura, che presenta le caratteristiche di un riscaldamento più lento, le durezze che si ottengono sulla ghisa greggia sono più alte e uniformi.

Le ghise comuni più adatte alla tempra ad induzione sono quelle che dopo normalizzazione diventano completamente perlitiche, con lamelle di grafite piccole e alla rinfusa e con durezza di almeno 180 Hd. Le ghise a grafite grossolana possono inoltre presentare dopo tempra delle porosità dovute alla eliminazione per combustione della grafite stessa.



## MISURA DELLA DUREZZA DELLO STRATO TEMPRATO

A seconda del metodo usato per eseguire la tempra superficiale (fiammatura, alta o media frequenza) si avranno delle profondità di tempra diverse. Minori con l'alta frequenza e la fiammatura, maggiori con la media frequenza. La durezza comunque sarà massima in superficie e decrescerà rapidamente in profondità. La tabella mostra chiaramente questo andamento per due ghise temprate ad alta frequenza.

La minor durezza superficiale è attribuibile nel primo caso ad una leggera decarburazione (ossidazione) superficiale, nel secondo caso a presenza di austenite residua formatasi per la presenza di elementi leganti. Dato l'esiguo spessore della pellicola temprata non è possibile misurare la durezza con una macchina Brinell da 3000 Kg in quanto la sfonderebbe dando valori più bassi; d'altro canto è anche sconsigliabile adottare apparecchi con carichi troppo bassi ( $1 \div 10$  kg) perché la scarsa omogeneità della ghisa per la presenza di grafite libera falserebbe ugualmente i dati. I dati più attendibili sono quindi quelli ottenuti con apparecchi Rockwell con carico 150 kg o scleroscopi ridotti, che diano profondità di impronte non superiori a  $0,1 \div 0,2$  mm.

### DEFORMAZIONI - ROTTURE

La tempra ad induzione può provocare deformazioni sui pezzi per tre motivi fondamentali:

Esistenza di tensioni nel pezzo che con il riscaldamento parziale si liberano dal lato del riscaldamento facendo assumere al pezzo un nuovo equilibrio.

Deformazioni dovute alla trasformazione martensitica con relativo aumento di volume della zona temprata, per cui una lama sottile tende ad assumere una forma convessa dalla parte che ha subito la tempra.



Deformazioni dovute al riscaldamento, che al momento della tempra si aggiungono a quelle della trasformazione martensitica. Le deformazioni al riscaldamento avvengono su pezzi grossi e rigidi e sono dovute alla tempra di passaggio. Se noi scaldiamo in un punto un pezzo lungo e rigido, otteniamo un aumento di volume del materiale nel punto scaldato che tenderebbe a piegare il pezzo in modo convesso rispetto al punto; essendo il pezzo rigido e il materiale nel punto scaldato plastico, questo ultimo si comprime diminuendo di volume. Al raffreddamento successivo questa parte di materiale segue la legge del ritiro e nel frattempo, diminuita la temperatura, perde la plasticità per cui si trascina nel ritiro la faccia sulla quale si trova. Giunto alla temperatura di trasformazione martensitica aumenta nuovamente di volume, per cui il pezzo diventa concavo o convesso a seconda se prevale l'azione del ritiro o quella dell'aumento di volume dovuto alla martensite.

Quasi sempre quando si tratta di pezzi molto massicci le deformazioni non sono mai tali da superare i normali sovrametalli di rettifica. Qualora però le deformazioni fossero eccessive, non esiste altra soluzione che operare su di un pezzo e, stabilita l'entità e la direzione delle deformazioni, tenerne conto nella lavorazione meccanica di preparazione degli altri pezzi curvandoli dal lato opposto di egual misura.

Conseguenza diretta delle deformazioni dovute al riscaldamento e alla trasformazione martensitica sono le cricche che nel caso della ghisa sono notevolmente frequenti. Si tratta quasi sempre di ghise non detensionate o con presenza di notevoli quantità di carburi che infragiliscono la matrice acciaiata, non permettendole di subire le dilatazioni che i grossi sbalzi termici comportano.

Il rimedio più efficace in questi casi è la bonifica che detensiona i pezzi, solubilizza i carburi e permette di ottenere durezze accettabili senza dover scaldare eccessivamente durante l'operazione di tempra.

### CONTROLLO PROFONDITA' DI TEMpra

Il più rapido e più semplice metodo per il controllo della profondità di tempra consiste nel rompere un pezzo se si tratta di una

**ANALISI DI GHISE PARTICOLARMENTE ADATTE PER L'INDURIMENTO SUPERFICIALE**

ANALISI DI GHISE PARTICOLARMENTE ADATTE PER L'INDURIMENTO SUPERFICIALE											
Ghisa	Analisi chimica									Durezza ottenibile	
	Ct	Cc	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	HRc	Hd
Comune perlitica	3,2	0,7	1,70	0,7	0,20	0,10				55	550
al Ni Cr	3,0	0,6	1,80	0,7	0,15	0,10	0,25	1,00		54	545
al Ni Cr	3,1	0,5	1,60	1,0	0,15	0,10	0,20	1,50		50	530
al Mo	3,2	0,65	1,70	0,75	0,20	0,10			0,50	55	550
al Mo	3,2	0,58	1,75	0,65	0,20	0,05			0,50	56	550
al Ni Mo	3,2	0,53	2,00	0,65	0,10	0,10		1,20	0,50	52	535
al Cr Mo	3,2	0,6	2,20	0,65	0,10	0,10	0,50		0,50	53	540
al Cr Ni Mo	3,35	0,6	1,95	0,75	0,15	0,10	0,35	0,50	0,50	52	530

**ESEMPI DI PROFONDITA' DI TEMPRA E DI DUREZZE OTTENIBILI CON LA TEMPRA SUPERFICIALE**

TIPO GHISE	DUREZZA HRc ALLE PROFONDITA' INDICATE					
	superficie	mm 0,8	mm 1,6	mm 2,37	mm 3,17	mm 3,98
Grigia comune	45	49	47	40	30	18
al Ni Cr Mo	52	52	52	54	52	30

partita, o un provino se si tratta di pochi pezzi, ed esaminare la frattura. Una cristallizzazione ed un colore diverso indicheranno lo strato temprato, il cui spessore è possibile leggere con un monoculare per prove Brinell.

Metodo microscopico: consiste nel tagliare il provino perpendicolarmente alla superficie e pulirlo per l'attacco, il tutto senza scaldarlo. Attaccarlo con Nital 5% e misurare lo strato completamente martensitico. Lo strato fra la martensite e il metallo base viene chiamata zona di transizione.

### DETENSIONAMENTO

È sempre consigliabile far seguire alla tempra superficiale un trattamento di distensione, che elimini o almeno attenui le tensioni che si sono create per effetto della tempra stessa. La temperatura più adatta è limitata a 150 ÷ 160 °C in quanto maggiori temperature provocherebbero un abbassamento eccessivo della durezza; in compenso la permanenza in temperatura deve essere la più lunga possibile (almeno 8-10 ore).

### Nitrurazione

La nitrurazione è un trattamento di cementazione di acciai e ghise di particolare composizione chimica, che si svolge ad una

temperatura di 490 ÷ 530° C, in presenza di ammoniaca. L'ammoniaca libera azoto nascente, che viene assorbito dalla superficie del metallo e provoca un indurimento notevolissimo. La nitrurazione si effettua su acciai e ghise previamente sottoposti a trattamento termico di bonifica e non necessitano più, dopo raggiunta la profondità voluta dello strato nitrurato, di alcun trattamento termico.

Come già in altre occasioni, verranno esaminate del trattamento le variazioni specifiche dovute alla sua applicazione sulla ghisa anziché sull'acciaio, rimandando ai vari testi che trattano la nitrurazione dell'acciaio per la conoscenza e l'approfondimento della metallurgia e delle tecnologie di esecuzione.

La ghisa può essere sottoposta quindi al procedimento di nitrurazione anche se la grafite costituisce una specie di barriera contro la diffusione dell'azoto, tanto che, a parità di durata e di temperatura del processo, la penetrazione dell'azoto nella ghisa è inferiore. Se in un acciaio da nitrurazione con 80 ore di permanenza a 500° si può facilmente ottenere una profondità di 7/10 di mm. nella ghisa con 100 ore di permanenza si arriva a delle profondità di circa 5/10 di mm.

Le durezze ottenibili sono dell'ordine di  $850 \div 1000$  HV e quindi paragonabili a quelle dell'acciaio.

L'analisi chimica della ghisa deve prevedere cromo e alluminio in percentuali tali da permettere una buona diffusione dell'azoto ed un buon indurimento; generalmente il Cr varia dall'1 all'1,5% e l'alluminio dallo 0,5 all'1,5%.

Contemporaneamente l'analisi deve dare la possibilità di ottenere delle perfette strutture sorbitiche dopo il trattamento di bonifica dei getti, al fine di garantire oltre che una durezza più elevata una bassa fragilità dello strato nitrurato. La struttura di ricottura è da evitare per la fragilità che comporta allo strato nitrurato.

La presenza di Mo in questa ghisa è indispensabile come per gli acciai al fine di evitare la fragilità di rinvenimento. La sua presenza può variare dallo 0,2 allo 0,3% raramente arriva fino allo 0,7% (in quest'ultimo caso più per motivi di temprabilità che per la fragilità di rinvenimento). Ultimamente si è arrivati anche all'aggiunta di piccole % di Va ( $0,1 \div 0,2\%$ ), che aumentano sia la penetrazione che la durezza dello strato nitrurato.

I risultati migliori sono ottenuti però agendo su ghise con distribuzione uniforme e soprattutto finissima della grafite. A tale scopo è necessario colare i getti in conchiglia, al fine di avere una struttura di ghisa prevalentemente bianca ed assenza di grafite libera. Quindi, è necessario un primo trattamento di ricottura completa a  $900 \div 950^\circ$  C durante il quale i carburi si sciolgono lentamente nella matrice austenitica e quando l'austenite è satura cominciano a formarsi i primi germi di cristallizzazione della grafite; durante la permanenza in temperatura i carburi continuano a sciogliersi nell'austenite e il C in eccesso precipita sui germi di cristallizzazione formando dei noduli di grafite più o meno tondeggianti. Il raffreddamento dovrà essere particolarmente lento per evitare la formazione di carburi dall'austenite lungo la linea ES del diagramma Fe-C e soprattutto andrà curato nel passaggio attraverso Ar<sub>1</sub> ( $720 \div 760^\circ$  C).

Se il trattamento è condotto bene al termine

avremo una struttura perfettamente lavorabile alle macchine utensili e composta da ferrite, perlite e grafite a globuli finemente suddivisi e uniformemente distribuita.

Dopo le lavorazioni di sgrossatura alla macchina bisognerà eseguire un trattamento di bonifica (in atmosfera controllata, se i sovrametalli sono minimi, per evitare le dannosissime decarburazioni agli effetti della nitrurazione), quindi la finitura e la nitrurazione.

## Sulfinizzazione o solfonitrurazione

È un trattamento essenzialmente antigrippante.

Si immergono i pezzi in un bagno salino composto da solfuri e cianuri di sodio e potassio "invecchiati", ossia ossidati tramite un apposito dispositivo che fa gorgogliare aria nel bagno. La temperatura è di  $560 \div 580^\circ$  C e i pezzi restano immersi per circa due ore. Dopo il trattamento i pezzi vengono generalmente spenti in acqua per lavarli dal sale e per impedire la precipitazione di azoturi.

L'analisi chimica degli strati solfonitrurati rivela la presenza di C, N e S sia allo stato di solfuro che di S elementare, che con l'azoto dà le caratteristiche antigrippanti. Il processo è applicabile alla ghisa come all'acciaio e, indipendentemente dalla sua efficacia, presenta il notevole inconveniente di utilizzare cianuro con tutte le difficoltà di ordine legislativo e ambientale che ciò comporta.

## Nitrurazione morbida

È così definita perché non conferisce durezza al pezzo, ma serve prevalentemente a creare uno strato antigrippante. L'aumento di durezza si verifica solo per alcuni acciai particolari (rapidi, inossidabili austenitici) e non è molto sensibile.

Si immergono anche in questo caso i pezzi in un bagno salino composto da cianuri di Na e K "invecchiati" con insufflazione di aria: i cianuri si trasformano in cianati, sviluppando azoto nascente che nitrura i pezzi. La temp. del bagno è di circa  $550^\circ$  e la durata del processo è di qualche ora per ottenere profondità di alcuni decimi di mm.

# **GHISA GRIGIA PER IMPIEGHI AUTOMOBILISTICI**

L'impiego della ghisa nelle costruzioni automobilistiche, per il volume della produzione e per i problemi specifici che comporta, ha determinato la necessità di creare dapprima tabelle riassuntive da parte delle singole ditte di costruzioni automobilistiche, quindi, nel tentativo di unificare queste varie classificazioni, una tabella redatta dall'ente nazionale di unificazione italiano (UNI). La classificazione di queste ghise avviene, anziché secondo la resistenza alla trazione di una provetta colata con diametro 30 mm, secondo la durezza Brinell del getto. Le norme UNI prevedono i seguenti tipi di ghisa:

in evidenza come per getti con spessori fra 3,5 e 7,5 mm non sia possibile ottenere durezza minori di 170 Hd a meno di ricorrere a ricotture ferritizzanti, e come non sia possibile colare ghisa con Hd maggiore 250 per spessori fra 30 e 50 mm senza ricorrere al trattamento di bonifica o ad aggiunte di elementi leganti.

Inoltre se è richiesto un certo tipo di ghisa (es. la Gh 190) per fabbricare getti di spessore fra 30 ÷ 50 mm si dovrà colare una ghisa che in provetta di diametro 30 mm dia una resistenza di almeno 25 kg/mm<sup>2</sup> oppure una durezza Brinell di almeno 210 Hd per ottenere sul getto le caratteristiche richie-

DESIGNAZIONE GHISA	Gh 130	Gh 170	Gh 190	Gh 210	Gh 230
DUREZZA BRINELL kg/mm <sup>2</sup>	130-180	170-220	190-240	210-260	230-280

Con la sola limitazione, per la composizione chimica, dello S e del P che non devono superare rispettivamente i limiti di 0,15 e di 0,25%.

Sempre la stessa tabella UNI (5330-69) riporta un diagramma di Collaud con i valori di resistenza a trazione R in kg/mm<sup>2</sup> (linee tratteggiate) e del modulo di elasticità E in kg/mm<sup>2</sup> (linee continue) dei getti grezzi in funzione della dimensione e della durezza Brinell (vedi diagramma).

Il diagramma, che può essere considerato la rappresentazione grafica della tabella già riportata a proposito della classificazione delle ghise grigie per getti (pag. 34), pone

ste: dati all'incirca corrispondenti a quelli che si sarebbero ottenuti usando la tabella UNI di pag. 34.

È da tenere presente comunque che i dati del diagramma e della tabella sono valori puramente orientativi.

Se questa della UNI è una classificazione estremamente generica, le norme delle singole ditte costruttrici comprendono, pur mantenendo a base della classificazione la durezza Brinell del getto, suddivisioni che tengono conto delle esigenze specifiche di lavoro cui è destinato il materiale.

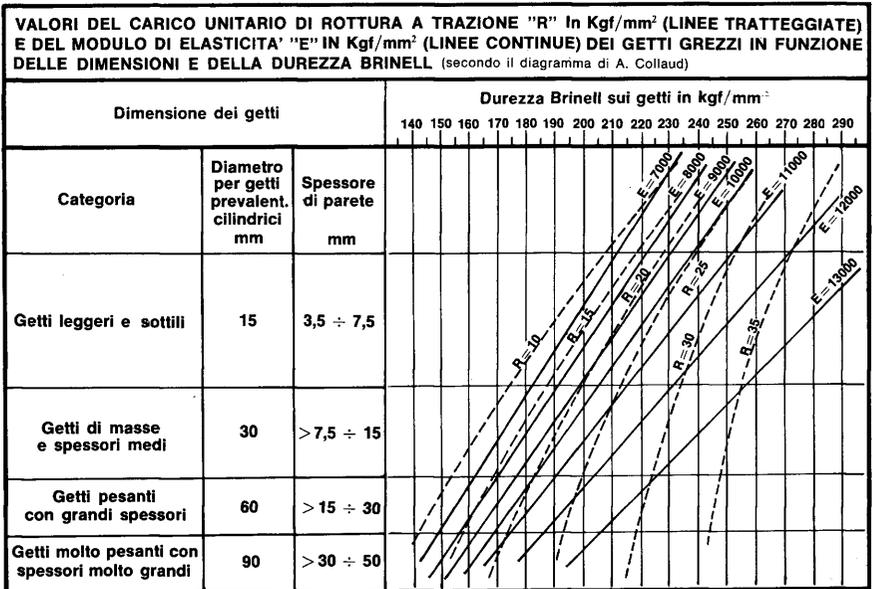
Così per esempio, se in alcune ghise è permessa una presenza del 5% di ferrite, qua-

lora i particolari siano soggetti ad usura, tale % non è più tollerata e la ghisa dovrà essere totalmente perlitica.

Le ghise da sottoporre a tempra ad induzione o fiammatura (es alberi di distribuzione) dovranno essere colate con Cr Mo quali elementi leganti, al fine di assicurare una durezza maggiore di 50 Hrc.

La composizione chimica di quasi tutti i tipi non è lasciata alla discrezione del fonditore ma deve essere contenuta entro determinati limiti di tolleranza, il che porta come utile conseguenza la facilità di stabilire eventuali cicli termici per il miglioramento delle strutture.

**VALORI DEL CARICO UNITARIO DI ROTTURA "R" IN Kgf/mm<sup>2</sup> (LINEE TRATTEGGIATE) E DEL MODULO DI ELASTICITA' "E" IN Kgf/mm<sup>2</sup> (LINEE CONTINUE) DEI GETTI GREZZI IN FUNZIONE DELLE DIMENSIONI E DELLA DUREZZA BINELL (secondo il diagramma di A. Collaud)**



---

# **GHISE SFEROIDALI (O DUTTILI O NODULARI)**

---

Le ghise a grafite sferoidale, di recente introduzione nella tecnologia metallurgica (furono presentate per la prima volta nel 1950), pur appartenendo alle ghise grige, hanno caratteristiche così importanti nei confronti delle normali ghise grige lamellari, da dover essere esaminate a parte.

Per ghise sferoidali si intendono quelle ghise colate esclusivamente in sabbia per gravità, nelle quali la grafite si trova prevalentemente sotto forma di sferoidi (è tollerata una presenza di grafite non sferoidale in quantità minori del 18%).

## **FABBRICAZIONE**

La ghisa nodulare si ottiene aggiungendo alla ghisa fusa del magnesio (o del cerio) sotto forma di leghe contenenti 10 ÷ 15% di Mg e resto Ni (oppure nichel-silicio; rame-silicio ecc.), e facendo seguire una inoculazione di ferro-silicio o siliciuro di calcio. Essendo il magnesio un fortissimo disossidante e desolforante è necessario che l'aggiunta avvenga quando la ghisa è ben dissossidata e che il tenore di S non superi lo 0,02%. Se lo S supera questa %, parte del Mg viene consumata a neutralizzarlo.

La quantità di Mg necessaria perché si formi la globulazione è dello 0,04-0,07%, ma la presenza anche solo di piccole tracce di elementi come titanio, stagno, piombo, alluminio, antimonio, arsenico, bismuto possono impedire il fenomeno. L'azione di questi elementi può essere neutralizzata mediante l'aggiunta di cerio. Inoltre il Mg alla

temperatura di fusione della ghisa si trova allo stato gassoso e quindi tende a liberarsi dal liquido; la evaporazione produce una perdita dello 0,001% di Mg ogni minuto, quindi è necessario colare il più rapidamente possibile i getti dopo la sua aggiunta. Il tenore di fosforo deve essere il più basso possibile (massimo 0,08%), come per l'acciaio, perché tende a creare anche in questo caso fragilità a freddo.

La composizione più adatta per la produzione di ghisa sferoidale è la seguente:  
C 3,5 ÷ 3,8% Si 2,3 ÷ 2,7% Mn 0,25 ÷ 0,50%  
P 0,03 ÷ 0,08% Ni 0,00 ÷ 1,5%.

## **Caratteristiche strutturali**

La formazione della grafite nodulare non ha ancora trovato una teoria in grado di spiegare esaurientemente tutti gli aspetti del fenomeno. Sembra comunque probabile che la formazione dei germi di cristallizzazione della grafite sferoidale avvenga nel liquido proprio per il notevole effetto di sovraraffreddamento (o sottoraffreddamento) del magnesio sulla ghisa e che la diffusione del C verso gli sferoidi avvenga attraverso l'austenite, cioè attraverso lo stato solido, e che, a solidificazione avvenuta, possano anche generarsi sferoidi dalla cementite.

Lo schema di formazione degli sferoidi in una ghisa ipoeutettica potrebbe quindi essere questo:

Dapprima si formano le dendriti austenitiche (in quantità inferiore a quanto previsto dal diagramma di stato del Fe-C per lo stato

di sottoraffreddamento in cui si trova la ghisa), poi, raggiunta la trasformazione eutettica, attorno ai nuclei di grafite comincia a solidificare con forma tendenzialmente sferica il liquido eutettico sotto forma di austenite saturo. Il carbonio in eccesso nel liquido va, attraverso l'austenite, a depositarsi sui germi di cristallizzazione ingrossandosi. Mentre il liquido continua a solidificare come austenite saturo, il C in eccesso continua a depositarsi, attraverso l'austenite, sugli sferoidi ormai formati, fino alla completa trasformazione da liquido a solido. Le ultime parti a solidificare saranno le più impure e saranno quelle che creano un reticolo intorno alle celle eutettiche così formate (vedi pag. 28 celle eutettiche).

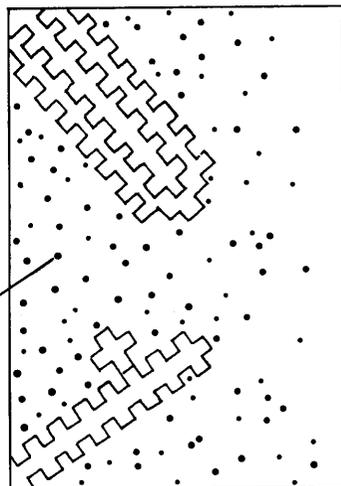
È evidente che l'ingrossamento dei nuclei di grafite sarà tanto più difficoltoso quanto più grosse sono le celle eutettiche in cui si trovano, fino ad un limite oltre il quale il rimanente liquido eutettico tenderà a solidificare come ledeburite. L'inoculazione, dopo aggiunta di Mg, di ferro silicio o silicuro di calcio ha appunto lo scopo di aumentare il numero dei germi di cristallizzazione di grafite, e quindi delle celle eutettiche, per impedire la precipitazione della ledeburite.

Anche nella ghisa nodulare la migliore matrice acciaiosa è quella perlitica. Purtroppo il raggiungimento di una tale struttura al 100% non è molto facile tenendo soprattutto conto che gli spessori (e quindi la velocità di raffreddamento) possono variare molto anche nello stesso getto. Il problema nel caso di questa ghisa non è però così importante come lo è nella ghisa lamellare, in quanto, come si vedrà in seguito, le ghise sferoidali possono essere facilmente assoggettate ai trattamenti termici per cui le strutture possono essere convenientemente modificate. Esistono però accorgimenti che possono già dare, anche allo stato grezzo di fusione, caratteristiche ottime.

Uno degli inconvenienti più frequenti che si riscontra in queste ghise, è la presenza di zone di ferrite diretta intorno ai noduli di grafite (vedi fig. 36).

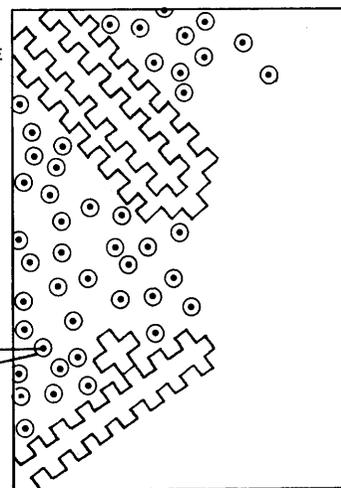
La ferrite diretta si forma durante il raffreddamento della ghisa nelle staffe di colata

FORMAZIONE  
DI DENDRITI  
DI AUSTENITE  
DAL LIQUIDO



germi  
di cristallizzazione  
di grafite

TEMPERATURA  
EUTETTICA  
INIZIO DI FORMAZIONE  
DI AUSTENITE  
INTORNO AI GERMI  
DI GRAFITE



germi  
di cristallizzazione  
di grafite

globuli di austenite  
che si ingrossano

e la sua presenza è sempre legata ad una composizione chimica ricca di elementi ferritizzanti, il più importante dei quali è il Si, ed a una insufficiente presenza di elementi antiferritizzanti come Mn e Cu; inoltre la presenza di ferrite diretta è anche legata alla velocità di raffreddamento. La ferrite diretta si forma preferibilmente intorno ai grani di grafite, perché in questa zona durante la trasformazione eutettoide della austenite in perlite e quindi quando la austenite diventa soprassatura di C, questo tende a precipitare sugli sferoidi di grafite ed impoverisce la zona circostante di C che diventerà ferrite. Il Si, che aumenta la temperatura del punto di trasformazione eutettoide e che quindi la fa avvenire quando maggiore è ancora la mobilità atomica, favorisce questo fenomeno.



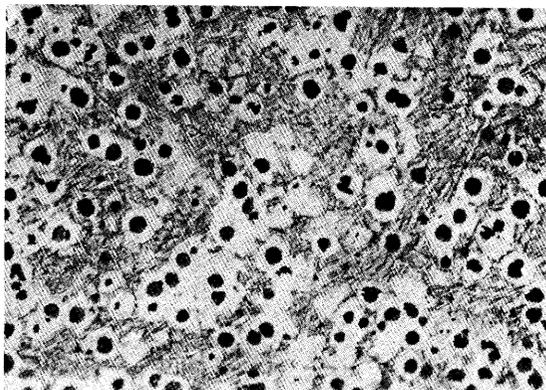
Ghisa sferoidale con matrice ferritico-perlitica - Attacco Nital X 200.

Inoltre la maggiore affinità del Si per il ferro (dà dei composti chimici tipo Fe Si; Fe<sub>3</sub> Si) ostacola la formazione di carburi stabili (il C è spostato per azione di massa verso la forma grafite).

Invece gli elementi che allargano il campo della presenza della fase  $\gamma$  e quindi abbassano la temperatura di trasformazione  $\gamma/\alpha$  verso temperature in cui la mobilità atomica è più bassa, impediscono la ferritizzazione (Mn Cu Ni), e così pure gli elementi che tendono a formare carburi (in questo caso il C è spostato per azione di massa verso la forma combinata) come il Mn Cr Va.

L'influenza delle elevate velocità di raffreddamento sulla scomparsa della ferrite è da attribuirsi al fenomeno di sottraffreddamento, per cui la trasformazione  $\alpha/\gamma$  viene spostata a valori più bassi di temperatura e

Ghisa sferoidale con sferoidi contornati da ampie aureole di ferrite e matrice di perlite mista a cristalli di cementite libera - Attacco Nital X 300.



quindi con minori possibilità di diffusione del C verso i noduli di grafite.

Per eliminare quindi la presenza di aloni ferritici, nel caso ad es. della micrografia (fig. 36), è sufficiente aggiungere, o aumentare l'aggiunta, di Mn, oppure inoculare del Si Cu.

il caso della micrografia di fig. 37 mostra una struttura di un getto sottile, che pur raffreddando rapidamente (presenza di cementite libera) ha delle aureole ferritiche intorno alla grafite. In questo caso l'aggiunta di Mn, anche se potrebbe eliminare le zone ferritiche, aggraverebbe la presenza dei carburi liberi. Si dovrà quindi aumentare la inoculazione del Si dopo l'aggiunta del Mg, o meglio inoculare Si-Cu (il Si elimina i carburi, mentre il Cu elimina le zone ferritiche - vedi micrografie a pag. 68).

## Resistenza al calore e alla corrosione

La resistenza all'ossidazione ad alta temperatura delle ghise sferoidali rispetto alle ghise di analoga composizione ma lamellari è notevolmente più alta; infatti l'ossidazione dalla superficie verso l'interno si propaga preferibilmente attraverso le lamelle di grafite che entrano come cunei verso l'interno; è evidente quindi come con la presenza di grafite sferoidale venga a mancare questa forma di penetrazione dell'ossigeno.

Per quanto riguarda l'aumento di volume dovuto alla grafitizzazione dei carburi, anche in questo caso la struttura più adatta è la ferritica, che si ottiene con alte % di Si. Le ghise sferoidali resistenti al calore hanno a questo scopo contenuti di Si che variano dal 2,8 fino al 6%. L'aumento del Si, se migliora la resistenza al calore, peggiora la caratteristica di resistenza agli urti termici.

La resistenza alla corrosione atmosferica è superiore di circa 5 volte rispetto a quella dell'acciaio al C.

Le ghise sferoidali ad alti tenori di elementi di lega, in particolare le ghise austenitiche sono indicate per recipienti di contenimento di alcali, acidi, sali, acqua di mare.

**GHISA  
A GRAFITE SFEROIDALE  
PER GETTI (UNI 4544)**

Designazione convenzionale	Prova di trazione			Prova di durezza Brinell Hd 10/3000/30 kg/mm <sup>2</sup>	Prova di resilienza (Mesnager) K		Struttura della matrice
	Carico di rottura	Carico di snervam.	Allungam.		media kgm/cm <sup>2</sup>	minima kgm/cm <sup>2</sup>	
	R kg/mm <sup>2</sup>	S (0,2) kg/mm <sup>2</sup>	Ap5 %				
GS 42/10	42	30	10	140-190			prevalentemente ferritica
GSQ 42/15	42	38	15	130-170	2	1,5	ferritica
GS 50/5	50	38	5	160-220			perlitico-ferritica
GS 55/2	55	40	2	190-250			prevalentemente perlitica

Quando per la ghisa GS 55/2 si richiedono carichi di rottura maggiori di 60 kg/mm<sup>2</sup>, la misura dell'allungamento e della durezza hanno carattere puramente indicativo

### Caratteristiche meccaniche

Il vantaggio enorme delle ghise sferoidali sulle lamellari si rivela proprio all'esame delle caratteristiche meccaniche. All'origine di questo miglioramento sta evidentemente la forma della grafite, in quanto l'effetto intagliante delle lamelle di grafite, che crea concentrazioni fortissime degli sforzi agli spigoli di queste, viene a mancare ed il comportamento della ghisa si avvicina molto a quello dell'acciaio.

Infatti in una ghisa sferoidale il C costituisce all'incirca il 3% del peso che corrisponde, essendo la densità della grafite circa la terza parte del ferro, a circa il 9% del volume: la resistenza a trazione di una ghisa sferoidale rispetto ad un acciaio di pari durezza è solo del 15% inferiore a quest'ultimo.

Le norme UNI ancora una volta scelgono la resistenza a trazione come base di classificazione delle ghise sferoidali (vedi la tabella UNI 4544).

È inteso che le resistenze sono relative a getti greggi di colata, per cui a parità di analisi chimica è possibile ottenere i quattro tipi di ghisa agendo sia sulle velocità di raffreddamento, sia, e questo è il caso più frequente perché la velocità di raffreddamento è in larga misura dipendente solo dalle dimensioni del getto, dosando opportunamente gli elementi aggiunti con il procedimento di inoculazione. La stessa diversità di durezza è però ottenibile, a parità di analisi chimica, con opportuni tratta-

menti termici da eseguire sul getto grezzo di fusione. In questo caso le strutture saranno molto più omogenee e affinate.

### RESISTENZA

Le barrette per le prove di trazione sono ricavate da saggi esattamente dimensionati dalle tabelle UNI; così pure le provette.

L'analogia con l'acciaio è direttamente rilevabile già alla prova di trazione: carichi di rottura notevolmente più alti, carico di snervamento direttamente rilevabile, proporzionalità carichi / deformazioni prima del limite di snervamento. L'allungamento assume valori notevoli e i minimi assegnati dalle tab. UNI sono largamente superati.

A dimostrare definitivamente il miglioramento delle caratteristiche date dalla presenza di sferoidi nella ghisa sta il diagramma di pagina 67, nel quale si nota come, con l'aumentare della % degli sferoidi e la diminuzione delle lamelle, in una ghisa trattata con quantitativi crescenti di Mg, migliorino l'allungamento e la resistenza, e come netto sia il salto fra la ghisa trattata al Mg e quella non trattata.

### DUREZZA BRINELL

La durezza è ancor sempre la media fra la durezza della matrice acciaiata e quella della grafite, ma mentre per le ghise lamellari non può sussistere nessun rapporto con la resistenza per l'effetto intagliante delle lamelle di grafite, ora si può approssimativamente parlare di un coefficiente di tra-

sformazione per le ghise bonificate o almeno normalizzate: il rapporto R/Hd è circa 0,3.

### **MODULO DI ELASTICITA'**

Come è già stato detto è ora possibile parlare di applicabilità della legge di Hooke, cioè di proporzionalità fra carichi e deformazioni prima del raggiungimento dello snervamento.

Per la presenza notevole (9% in volume) di grafite nella matrice acciaiata, il modulo elastico è comunque ancora leggermente inferiore a quello dell'acciaio.

### **RESILIENZA**

I valori di resilienza sono notevoli. Anche se la tabella UNI prende in considerazione solo la GSQ 42/15 dando valori limite di 1,5 Kgm/cm<sup>2</sup>, alcune tabelle ad uso interno di grosse ditte danno valori orientativi per i loro uffici tecnici che vanno da 8 Kgm/cm<sup>2</sup> per una ghisa corrispondente alla GSQ 42/15 fino a 2 Kgm/cm<sup>2</sup> per una ghisa avente una resistenza a trazione di 75 kg/mm<sup>2</sup>.

### **LIMITE DI FATICA**

Mancando l'effetto degli intagli il limite di fatica aumenta notevolmente. Significativo è il diagramma di pagina 67, nel quale si nota l'aumento del limite di fatica con l'aumento della % di grafite sferoidale rispetto a quella lamellare, ottenuto con aggiunte crescenti di Mg, e il netto salto di qualità passando dalla ghisa non trattata a quella trattata al Mg. La prova di fatica presa in esame per la costruzione di questo diagramma è la flessione piana simmetrica.

In genere si può affermare che nelle ghise sferoidali il limite di fatica può variare dal 20 al 40% del carico di rottura e risente dell'effetto degli intagli (vedi tabella).

### **Trattamenti termici**

Per tutti i trattamenti termici delle ghise sferoidali vale quanto già detto per le ghise lamellari (vedi pag. 36). Vi sono però alcune considerazioni da evidenziare in quanto peculiari della caratteristica fondamentale di questa ghisa: la grafite a forma di

sferoidi. Le ghise sferoidali infatti sono le più adatte ad essere sottoposte al trattamento termico in quanto rispondono ad esso come l'acciaio. Se è pur sempre necessario procedere in modo cauto nella velocità di riscaldamento per la più bassa conducibilità termica rispetto all'acciaio, non esistono più nella tempra i pericoli di rottura dovuti all'effetto di intaglio delle lamelle di grafite.

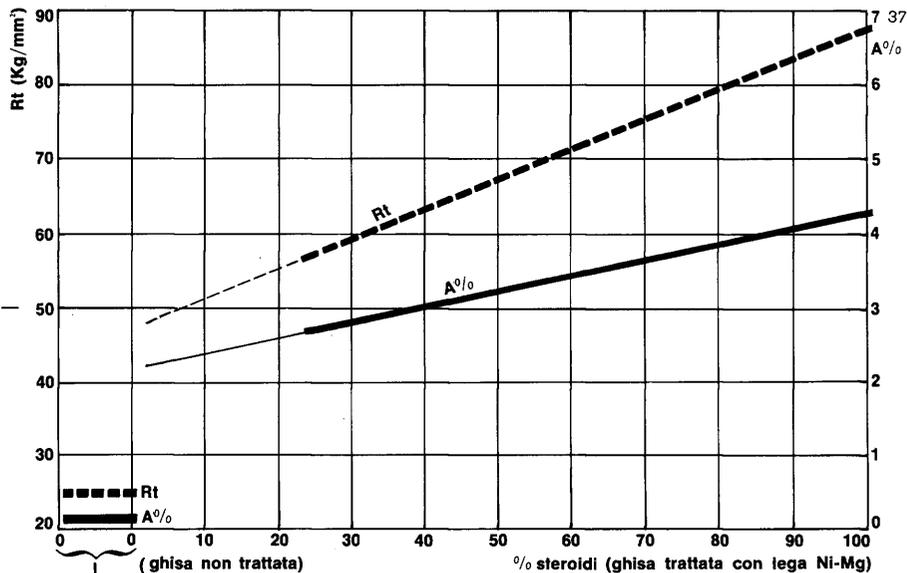
Diventa quindi in queste condizioni un vero sciupio non sfruttare a fondo tutte le possibilità di miglioramento che può offrire, con onere relativamente modesto, il trattamento termico.

Si è già visto come la struttura primaria della ghisa greggia di fusione sia tutt'altro che omogenea. Liquazioni (anche se in minor misura ne esistono come per l'acciaio), impurità ai bordi delle celle eutettiche, tensioni dovute a differenze di velocità di raffreddamento nella staffa, danno luogo a prestazioni assai al disotto di quanto la ghisa è in grado di offrire, per cui è consigliabile un trattamento a temperatura di almeno 880 ÷ 900° per alcune ore, seguito da un raffreddamento a velocità più o meno alta a seconda delle caratteristiche desiderate dei getti di ghisa. Tale trattamento agisce sulla struttura primaria modificandola in tutti i suoi aspetti.

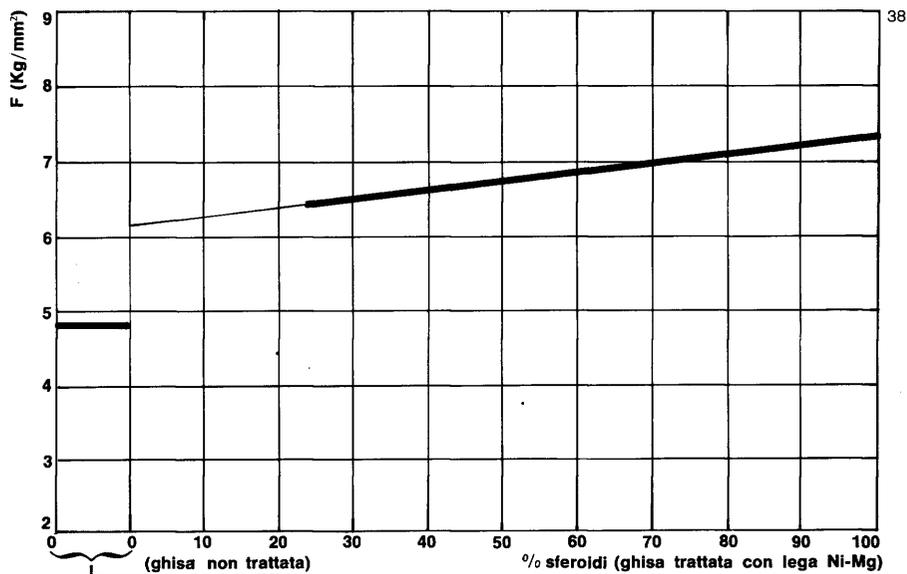
Il C combinato e, parzialmente, quello grafiteo entrano in soluzione nella matrice austenitica che si forma ad alta temperatura per poi separarsi per lo più in piccoli sferoidi durante il raffreddamento lungo la linea ES del diagramma ferro-carbonio, operando di fatto un ridimensionamento dei noduli di grafite primaria ed aumentando il numero totale degli sferoidi. Operazione questa che porta ad un affinamento ed a una omogeneizzazione della grafite nella ghisa con indubbi vantaggi per le caratteristiche meccaniche della ghisa stessa.

La struttura greggia di fusione, formata da dendriti primarie di austenite attorno alle quali si sono formate le celle eutettiche con al centro il nodulo di grafite ed ai bordi le impurità ultime solidificate formanti un reticolo che le delimita e circonda, è un altro motivo per sottoporla a trattamento. Il reticolo di impurità delle celle eutettiche è

**CORRELAZIONE FRA  
RESISTENZA A TRAZIONE  
ALLUNGAMENTO  
E TENORE IN SFEROIDI**



**CORRELAZIONE FRA  
RESISTENZA A FATICA  
E TENORE IN SFEROIDI**

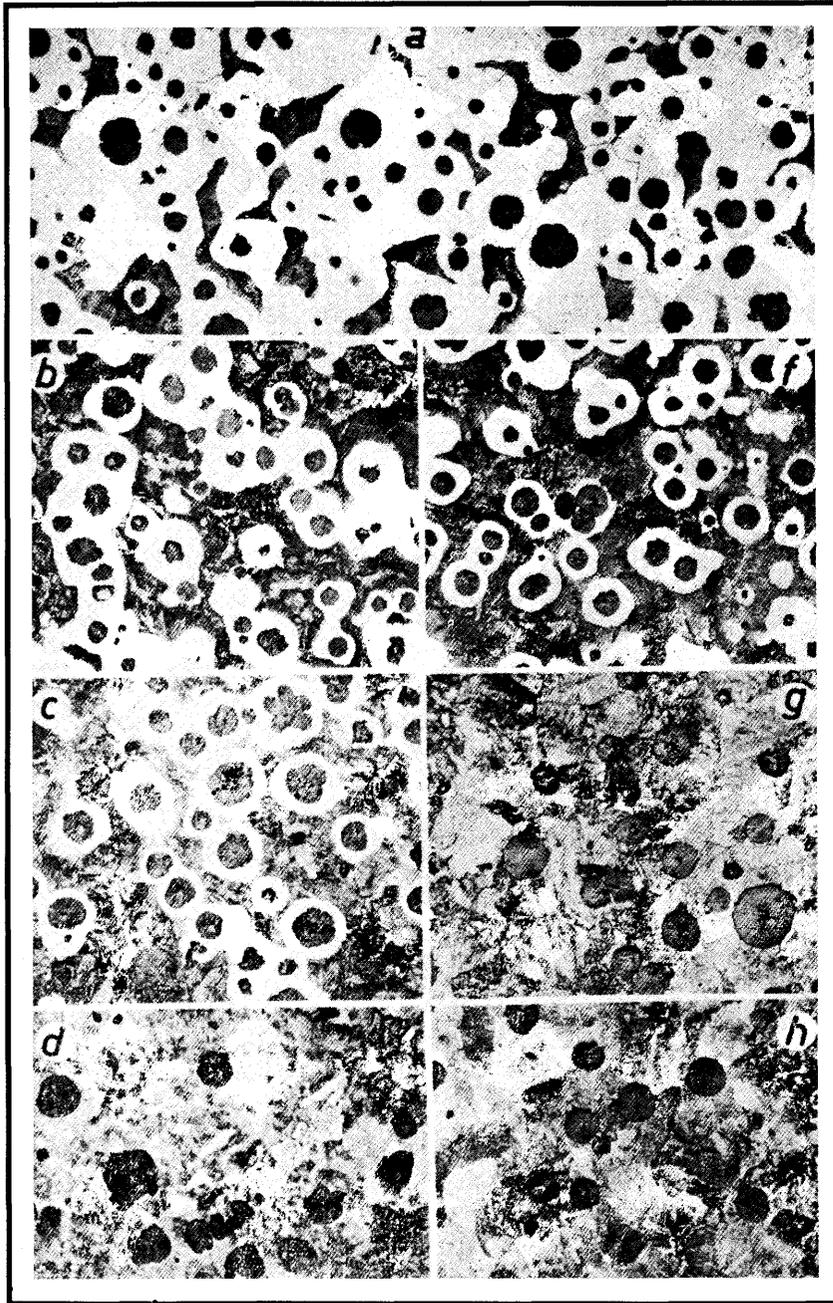


infatti una vera e propria ragnatela che indebolisce tutta la struttura. Durante la permanenza ad alta temperatura tali impurità vengono lentamente sciolte nella matrice austenitica ed al successivo raffreddamento non si ritrovano più concentrate a formare un reticolo continuo che interrompe la struttura. Il miglioramento delle caratteristiche meccaniche è anche in questo caso evidente.

L'eliminazione delle tensioni interne dei getti è infine a tale temperatura totale, per cui, venendo a mancare le sollecitazioni interne del getto, che si sommano agli sfor-

zi cui il getto viene sottoposto quando lavora, le sollecitazioni che il pezzo può sopportare aumentano.

Questi motivi sono più che sufficienti per giustificare una operazione di omogeneizzazione su tutti i getti di ghisa sferoidale prima della loro messa in opera o addirittura prima di qualsiasi altra operazione termica. Non a caso per l'acciaio questa norma è ormai universalmente accettata e, se non è più pensabile di poter utilizzare un getto di acciaio greggio di colata, non si vede perché la ghisa debba essere utilizzata in tali condizioni.



Comparazione dell'effetto anti-ferritizzante del Mn e del Cu  
 a = ghisa di base a composizione C 3,8%, Si 2%, Mn 0,25%  
 b = Mn 1,14%  
 c = Mn 1,33%  
 d = Mn 1,47%  
 f = Cu 0,20%  
 g = Cu 0,82%  
 h = Cu 1,60%

RELAZIONE FRA CARICO  
 E ROTTURA E LIMITE  
 DI FATICA DELLE  
 GHISE SFEROIDALI

tipo ghisa sferoidale	stato o trattamento termico	carico di rottura		fatica senza intaglio		fatica con intaglio a V di 45°		fattore di conc. della sollecitazione $K_I = E_p/E_n$
		Hd	R kg/mm <sup>2</sup>	limite fatica kg/mm <sup>2</sup> Ep	rapporto fatica Ep/R	limite fatica kg/mm <sup>2</sup> En	rapporto fatica En/R	
GS 42/10	ricotta	170	50	22	0,44	14,7	0,29	1,49
GS 50/5	greggia di fusione	254	63	28,7	0,45	16,8	0,27	1,70
GS 50/5	temp. olio e rimvenuta	290	94,5	34,5	0,36	21	0,22	1,63

Alcune prove eseguite su due tipi di ghisa sferoidale dimostrano praticamente i vantaggi del trattamento di omogeneizzazione e successivamente di bonifica, sulle caratteristiche meccaniche di tali ghise:

GHISA A	C 3,6	Si 2,5	Mn 0,4	P 0,05	
GHISA B	C 3,5	Si 2,75	Mn 0,35	P 0,04	Ni 0,9

TRATTAMENTO TERMICO		R	S	A	HD
GHISA A	grezza fusione	63	56	1,5	280
	normalizz. 900°	78	61	3	304
	bonif. 850° olio rinvenuta a 650°	68	53	6,5	241
GHISA B	grezza fusione	74	49	8	240
	normalizz. 900°	107	96	8	315
	bonif. 850° olio rinvenuta a 650°	94	64	10	275

## Vantaggi delle ghise sferoidali

Da quanto finora esaminato risulta evidente come la ghisa sferoidale, pur conservando tutti i vantaggi che offre la ghisa in fonderia (bassa temperatura di colata, elevata fluidità e facilità di riempire forme complicate, facilità di pulizia dei getti dalla terra refrattaria ecc.), offre delle caratteristiche meccaniche che sono paragonabili a quelle dell'acciaio. Non solo, ma rispetto all'acciaio presenta ancora dal punto di vista meccanico tutti i vantaggi che la ghisa tradizionale presenta:

La presenza di grafite garantisce una azione lubrificante, che unita alla presenza di una struttura perlitica fa della ghisa un materiale resistente all'usura di caratteristiche eccellenti. La presenza di grafite facilita inoltre la lavorazione meccanica all'utensile sia per l'effetto lubrificante sull'utensile, sia per la rottura del truciolo dovuta alla discontinuità della matrice metallica: a parità di durezza la velocità di taglio di una ghisa è molte volte superiore a quella di un acciaio.

Infine la ghisa sferoidale conserva, seppure in misura minore della lamellare, una ottima capacità di smorzamento delle vibrazioni.

---

# **GHISA MEEHANITE**

---

È da più di mezzo secolo che i metallurgisti studiano la possibilità di migliorare le caratteristiche della ghisa cercando di influire sia sulla struttura della matrice che sulla forma e distribuzione della grafite. E se intorno al 1950 fu messo a punto il procedimento per la fabbricazione della ghisa nodulare, già fin dal 1923 Meehan aveva ottenuto brillanti risultati sia aggiungendo in siviera, o, ancor meglio, inoculando (vedi pag. 27) un grafitizzante come il siliciuro di calcio nella ghisa, sia partendo da materie prime selezionate e corrette con rottami di ferro.

La ghisa meehanite meccanica è appunto una ghisa lamellare che ha un struttura greggia di fusione molto omogenea (Fig. 10 pag. 28) completamente perlitica, lamelle di grafite piccole e uniformemente suddivise.

La struttura perlitica omogenea si ottiene con inoculazioni di siliciuro di Ca in quantità determinata, esaminando l'aspetto di una provetta a forma di cuneo colata con la ghisa in esame un momento prima di spillarla dal forno. Maggiore è la profondità di tempra ottenuta partendo dalla punta del cuneo, maggiore sarà l'aggiunta del siliciuro di Ca.

Il procedimento brevettato meehanite ha messo a punto un sistema di controlli e di accorgimenti per ottenere delle ghise a qualità costante e con caratteristiche appositamente studiate per soddisfare a tutta una serie di esigenze dei progettisti.

La costanza della qualità di questi getti e le relativamente alte prestazioni meccaniche (rispetto alle ghise grige lamellari normali) hanno determinato il loro successo. Il procedimento di controllo sulla qualità viene esteso anche a ghise appositamente studiate per resistere all'usura, al calore e alla corrosione, per cui sono coperte da brevetto e marchio meehanite anche tutta una serie di ghise oltreché grige, bianche, trotate, legate e non legate.

La classificazione comprende quattro gruppi di ghise:

## **GHISE MECCANICHE**

Tipo G M (altissima resistenza, per speciali applicazioni)

Tipo GA (altissima resistenza, ottima lavorabilità)

Tipo GAH (massima resistenza o durezza ottenuta con trattamento termico)

Tipo GB (alta resistenza per molteplici usi)

Tipo GC (alta resistenza, in particolare per tenuta a pressione)

Tipo GD (buona resistenza, indicato per getti che devono subire estese lavorazioni meccaniche)

Tipo GE (resistenza media, per getti comuni)

Tipo GF (resistenza media, per getti comuni)

## **GHISE RESISTENTI AL CALORE**

Tipo HD (per temp. sino a 620°, lavorabile durezza Hd 200)

Tipo HA (per temp. sino a 650°, lavorabile durezza Hd 225)

Tipo HB HC (per temp. sino a 875° lavorabile con widia, Hd 300)

Tipo HR (per temp. sino a 850°, buona indeformabilità e minimo aumento di volume: ingrossamento per anno 2÷10 mm/m; durezza Hd 400, lavorabile con widia)

Tipo HR1 (per temp. sino a 790°, durezza Hd 300/500 non lavorabile)

Tipo SC (per temp. sino a 900°, alta resistenza all'ingrossamento: mm/m 0/2 durezza Hd 300 lavorabile con widia)

Tipo HE (per servizio a temp. intermittente, lavorabile)

### GHISE RESISTENTI ALL'USURA

Tipo WA (lavorabile, adatta per resistenza all'usura e soggetta contemporaneamente a forti sollecitazioni Durezza Hd 230÷300 che può essere aumentata con trattamento termico)

Tipo WAH (lavorabile prima del trattamento termico al quale va sempre sottoposta, durezza Hd 550)

Tipo WB (non lavorabile, per alta resistenza all'usura abrasiva, analoga a quella dell'acciaio al Mn. Durezza Hd 300÷550)

Tipo super WH (non lavorabile, massima resistenza all'usura abrasiva. Durezza Hd 580)

Tipo WBC (non lavorabile, per getti in conchiglia quindi con superficie durissima; Hd 550 e cuore tenero e tenace: es. cilindri per laminatoi)

Tipo WEC (come la WBC ma per getti più sottili)

### GHISE RESISTENTI ALLA CORROSIONE

Tipo CB3 (per acidi concentrati)

Tipo KC (per alcali)

Tipo CC (d'uso generale per prodotti chimici)

Dal punto di vista delle caratteristiche meccaniche le più interessanti sono le ghise meccaniche per le quali sono garantiti i dati della tabella sottoriportata ottenuti operando su saggi colati a parte aventi diametro di 25 mm.

### Trattamenti termici delle ghise meehaniti

È già stato detto come le ghise meccaniche meehaniti, per il loro particolare e controllato procedimento di fabbricazione, offrono delle buone garanzie di possedere una struttura completamente perlitica, con lamelle di grafite uniformemente distribuite ed una struttura primaria con celle eutettiche molto piccole (vedi pag. 28: effetti della inoculazione sulle celle eutettiche). Ci avviciniamo cioè, per quanto riguarda la matrice acciaiosa, ad una struttura corrispondente ad un acciaio eutettoide con C = 0,85% e quindi ad una lega che può offrire il massimo delle caratteristiche meccaniche e rispondere nel modo più brillante all'azione dei trattamenti termici, sia di indurimento sia di bonifica. La struttura primaria è già di per sé abbastanza omogenea e non può che migliorare ancora al trattamento termico, mentre la dimensione minima delle lamelle di grafite offre il minimo disturbo rispetto alle ghise grige tradizionali nelle operazioni di riscaldamento e di raf-

	GM	GA	GB	GC	GD	GE	GF
Resistenza alla trazione kg/mm <sup>2</sup>	38	35	31	28	25	21	16
Modulo elasticità kg/mm <sup>2</sup>	16000	14700	13400	12300	10500	8400	8000
Resistenza alla compressione kg/mm <sup>2</sup>	140	125	115	110	95	80	70
Resistenza alla fatica kg/mm <sup>2</sup>	18	15	14	12	10	9	8
Resistenza all'urto (Charpy) kgm/cm <sup>2</sup>	030	027	024	020	017		
Durezza Brinell	230	220	210	195	185	175	170
Conducibilità termica da 10 °C a 230 °C $\frac{K \text{ cal}}{m.h. \text{ °C}}$	44	43	42	40			
Peso specifico	748	743	737	725	713	702	

TABELLA DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLE GHISE MEEHANITI MECCANICHE A GRAFITE SFEROIDALE

freddamento rapido. Queste caratteristiche fanno della Meehanite una ghisa di pronta e facile risposta ai vari trattamenti termici. Naturalmente si tratta pur sempre di ghisa lamellare, quindi tutte le precauzioni raccomandate nel riscaldamento e nel raffreddamento a proposito dei trattamenti termici delle ghise grige meccaniche vanno anche in questo caso scrupolosamente seguite.

#### *Distensione o stabilizzazione (invecchiamento artificiale)*

È soprattutto necessario per quei getti che avendo forme complesse e bruschi cambiamenti di sezione durante il raffreddamento si caricano di tensioni dovute alle diverse velocità di raffreddamento. Il trattamento di stabilizzazione sarà vario in funzione del getto e del grado di riduzione delle tensioni richiesto; le temperature raccomandate sono le seguenti:

TIPO GE-GD	510°-540°
TIPO GC-GB	550°-575°
TIPO GA-GM	580°-620°

cioè i tipi a resistenza più alta richiedono una temperatura maggiore.

Il tempo di riscaldamento deve essere tale da garantire l'arrivo in temperatura di tutto il getto fino a cuore, quindi almeno un minuto di permanenza in temperatura per ogni mm del massimo spessore del getto, senza però aumentare eccessivamente la permanenza oltre questo limite. Il raffreddamento quanto più sarà lento, tanto migliore sarà il detensionamento.

#### *Ricottura per migliorare la lavorabilità*

La ghisa Meehanite meccanica, se non in caso di errori nell'esecuzione, deve essere perfettamente lavorabile all'utensile. È tuttavia possibile ricorrere al trattamento di ricottura per particolari esigenze di lavorazioni meccaniche. Anche per questa ghisa esistono due tipi di ricottura:

*Ricottura subcritica o a bassa temperatura* che si adotta quando non si vuole ridurre eccessivamente la durezza e la resistenza. *Ricottura completa o ad alta temperatura* quando si vuole ottenere il massimo di lavorabilità e non ha importanza la perdita notevole della resistenza e della durezza.

La Meehanite Metal Company consiglia per le sue ghise le seguenti temperature:

TIPO	RICOTTURA	
	A BASSA TEMPERATURA	AD ALTA TEMPERATURA
GE-GD	665°-680° C	845° C
GC-GB	670°-695° C	860° C
GA-GM	675°-705° C	870° C

Il tempo di permanenza consigliato è di 1 ora ogni 25 mm di spessore ed il raffreddamento, almeno nel caso della ricottura completa, il più lento possibile. Per le modalità pratiche del trattamento si rimanda a quanto detto a proposito della ricottura delle ghise grige (pag. 47).

#### *Tempra e rinvenimento (bonifica)*

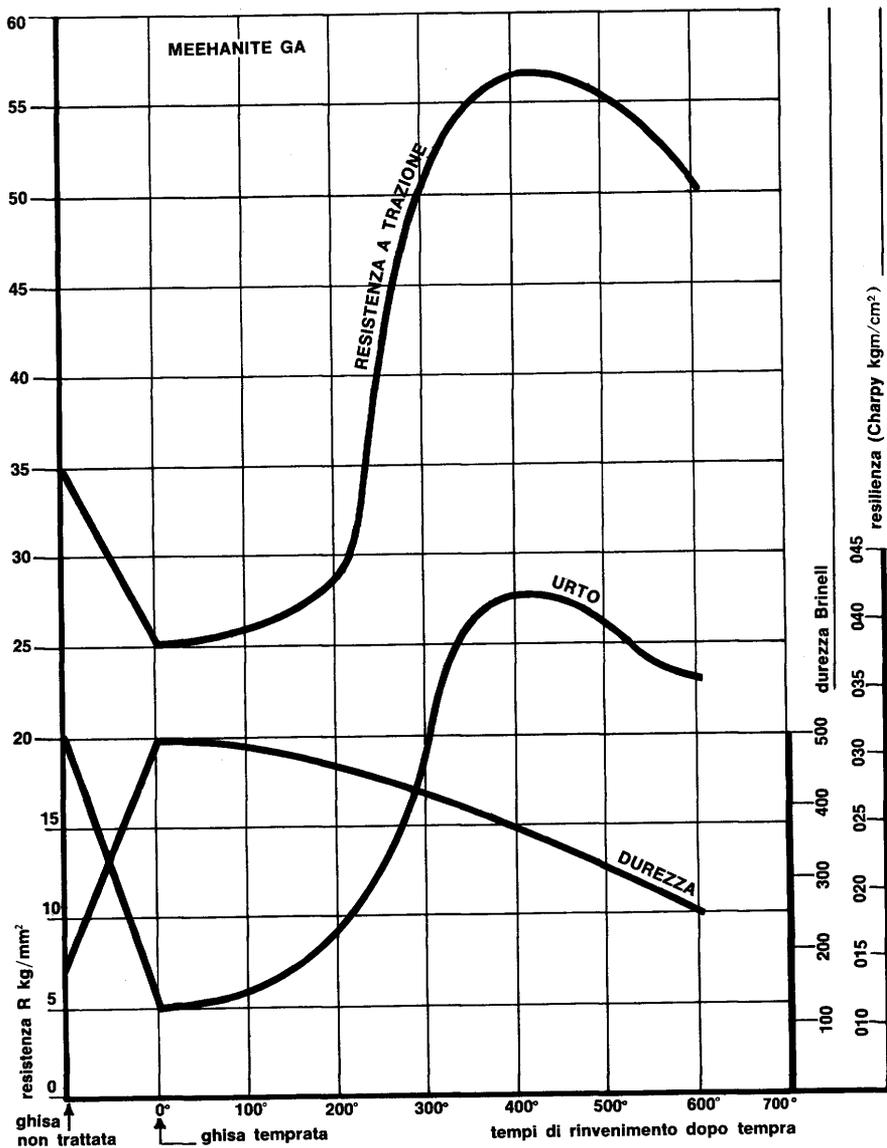
Per quanto riguarda il trattamento di tempra e di bonifica delle Meehaniti vale quando già detto a proposito delle ghise grige (vedi pagg. 49 e seg.) con l'unica considerazione che in questo caso si opera su matrici quasi completamente perlitiche con tutti i vantaggi che questa struttura comporta.

A questo proposito può essere interessante esaminare il diagramma che la Soc. Meehanite fornisce sulle caratteristiche meccaniche del tipo GA sottoposto a tempra e successivo rinvenimento, per constatare come il trattamento di bonifica migliori le caratteristiche della ghisa.

Dal diagramma risulta evidente come la massima resistenza alla trazione e all'urto si ottiene rinvenendo a 380÷430°. Non solo ma i dati forniti sui valori di resilienza, seppure molto bassi perché si è pur sempre in presenza di grafite lamellare, confermano la omogeneità e la costanza delle caratteristiche microstrutturali della ghisa.

#### **Considerazioni sulle meehaniti**

Le caratteristiche fin qui esposte delle ghise meehaniti cioè l'assenza di porosità, la omogeneità strutturale, la rigidità notevole alle vibrazioni (caratteristica questa comune a tutte le ghise), la elevata resistenza alla fatica, l'alto modulo di elasticità, ne fanno delle leghe adatte alla costruzione di particolari meccanici altamente sollecitati, come ad es. alberi a gomito per



VARIAZIONI DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLA GHISA TIPO GA SOTTOPOSTA A TEMpra E SUCCESSIVO RINVENIMENTO ALLE TEMPERATURE INDICATE

motori a scoppio, corpi per valvole ad alta pressione, cilindri di motori, matrici di imbutitura per lamiera, ecc.

I vantaggi della facile colabilità della ghisa possono inoltre essere sfruttati per ottenere dei pezzi con tolleranze minime dimensionali. È possibile ad es. colare alberi a gomito con una resistenza di 40 ÷ 50 kg/mm<sup>2</sup> ed elevato modulo di elasticità, che dopo sbavatura e pulitura possono già essere sottoposti all'operazione di rettifica senza altre lavorazioni intermedie di sgrossatura, tanto sono precise le dimensioni delle superfici.

### Ghise meehaniti sferoidali

In seguito alla messa a punto del processo per la produzione di ghisa sferoidale anche le meehaniti hanno elaborato particolari ghise, che contengono la grafite con tale struttura. Alla gamma delle ghise già elencate se ne aggiungono altre con la suddetta caratteristica. Le ghise meccaniche beneficiano in questo caso di aumenti della resistenza a trazione, dell'allungamento e della resilienza, come risulta dalla tabella di pagina 74.

Per le ghise resistenti al calore è stato creato un tipo di ghisa sferoidale avente sigla

**CARATTERISTICHE  
MECCANICHE DELLE  
GHISE MEEHANITI  
A GRAFITE SFEROIDALE**

<b>GHISE MEEHANITI a grafite sferoidale</b>	<b>SFF</b>	<b>SF</b>	<b>SPF</b>	<b>SP</b>	<b>SHN</b>
<b>Resistenza alla trazione kg/mm<sup>2</sup></b>	40	43	55	60	75
<b>Snervamento kg/mm<sup>2</sup></b>	25	30	35	40	50
<b>Allungamento</b>	20	15	7	2	2
<b>Durezza Hd</b>	140-180	150-190	170-230	180-240	240-300
<b>Resilienza (Charpy) kgm/cm<sup>2</sup></b>	2	1,5	0,5	0,3	
<b>Resistenza a fatica a flessione senza intagli kg/mm<sup>2</sup></b>	17	18	22	24	
<b>Resistenza a fatica a flessione con intaglio kg/mm<sup>2</sup></b>	12	13	15	16	
<b>Modulo elasticità kg/mm<sup>2</sup></b>	16.000	16.500	17.000	17.300	17.300

SH per temperature sino a 900°, durezza Brinell 220 ÷ 300, lavorabilità discreta.

Per le ghise resistenti all'usura esistono ora due tipi di sferoidali, che uniscono alle doti caratteristiche dei tipi tradizionali di meehanite una maggiore tenacità. Si tratta della ghisa SH/H con durezza Brinell 280 ÷ 450 e della ghisa W SH con durezza Brinell fino a 600. Tali durezza si ottengono dopo

trattamento termico di tempra in olio; perciò le ghise possono essere lavorate all'utensile allo stato ricotto, quindi finite di mola dopo la tempra.

Per le ghise resistenti alla corrosione è stata creata una serie di tipi a grafite sferoidale, denominata CRS, la cui matrice austenitica resiste alla corrosione molto meglio delle strutture ferritico-perlitiche.

---

# GHISE MALLEABILI

---

Le ghise malleabili costituiscono un prodotto che ha caratteristiche intermedie fra la ghisa e l'acciaio. Pur possedendo una certa plasticità e duttilità che non hanno certo le ghise comuni, non arrivano però ad avere le caratteristiche dell'acciaio. La loro relativa plasticità, che permette entro certi limiti di piegarle e foggiarle, ha valso loro il nome di malleabili. Non sono però fucinabili, e quindi lo scopo della loro fabbricazione è l'utilizzo nella forma definitiva nella quale vengono colate.

La ghisa malleabile può quindi sostituire i getti di acciaio o addirittura i fucinati e gli stampati di acciaio quando le caratteristiche meccaniche richieste non siano eccessive, per contro la ghisa può facilmente riprodurre getti anche molto complicati e sottili e dare superfici facilmente pulibili e molto precise come grado di finitura, per cui il costo di fabbricazione di un pezzo di ghisa malleabile risulta molto inferiore al prezzo di un pezzo analogo di acciaio fuso o stampato.

Il processo di fabbricazione delle ghise malleabili è basato sulla metastabilità della cementite. Più è alta la temperatura di una ghisa contenente carburi, più alta sarà la velocità di decomposizione degli stessi fino al raggiungimento dell'equilibrio stabile ferro-grafite.

La ghisa malleabile è prodotta secondo due diversi procedimenti:

Ghisa malleabile a cuore bianco detta anche europea.

Ghisa malleabile a cuore nero detta anche americana.

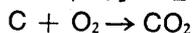
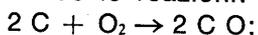
La terminologia è dovuta all'aspetto della frattura, che è bianca nel primo caso per l'assenza di carbonio (almeno nella superficie) e nera per la presenza di grafite nel secondo caso.

La ghisa di partenza è nei due processi ghisa bianca (cementite, ledeburite, perlite) con esclusione totale di grafite libera, seppure con analisi diverse per i due tipi perché diversi sono i processi e i risultati cui si deve giungere (vedi fig. 38). Nel caso della ghisa a cuore bianco infatti, questa viene sottoposta ad una ricottura ossidante a  $900 \div 1000^\circ$ , che elimina almeno superficialmente (e nel caso di getti sottili pochi mm anche a cuore) il carbonio, e a cuore lo trasforma in grafite a forma più o meno tondeggiate; mentre nel caso della "cuore nero" la ghisa bianca di partenza viene sottoposta ad una ricottura a  $900 \div 950^\circ$  in atmosfera neutra, che non elimina il carbonio ma lo trasforma completamente in grafite avente forma rotondeggiate. In entrambe i casi però il meccanismo delle trasformazioni chimico-strutturali procede allo stesso modo: durante il riscaldamento della ghisa bianca si arriva al punto di trasformazione A1 (circa  $720^\circ$ ), oltre il quale la perlite presente si trasforma in austenite che, a mano a mano che sale la temperatura, può sciogliere ancora altro carbonio (vedi linea SE diagramma ferro-carbonio).



Struttura tipica di ghisa bianca per malleabile (cementite, ledeburite, perlite) - Attacco Nital X 200.

Quindi i carburi cominceranno a sciogliersi nella austenite fino a saturarla di C alla temperatura di ricottura raggiunta. A questo punto ad ogni oscillazione della temperatura del forno, accompagnata quindi da un leggero abbassamento di temperatura della austenite, il C si troverà in soluzione soprassatura e tenderà a precipitare sotto forma di grafite creando dei germi di cristallizzazione che si ingrosseranno via via. D'altro canto ad ogni leggero aumento di temperatura l'austenite si troverà in condizioni di sciogliere altro C che gli verrà fornito dai carburi, e che ad un successivo abbassamento di temperatura si trasformerà ancora in C grafítico che precipiterà sul germe di cristallizzazione grafítico, ingrossandolo. I germi grafíticos e quindi i floculi di grafite si formeranno di preferenza fra le interfacce della austenite, cementite, perché in questa zona per la tensione superficiale, che esiste sia ai bordi della austenite che a quelli della cementite, c'è una tendenza alla loro separazione e quindi la possibilità di inserirsi di una terza fase grafítica (vedi micrografia Fig. 39). A trasformazione cementite - grafite ultimata sarà realizzato il processo di formazione della ghisa grigia, mentre nel caso della ghisa bianca la grafite che si forma alla superficie del getto viene ancora "eliminata" dalla presenza di atmosfera ossidante secondo le reazioni:



che la trasformano quindi in gas CO —



Floculi di grafite in corso di accrescimento durante il trattamento di ricottura in una ghisa bianca - Attacco Nital X 500.

CO<sub>2</sub>. La superficie del getto resta così priva di C mentre il cuore ne è ricco per cui si crea una migrazione del C verso l'esterno dove viene ancora volatilizzato sotto forma di CO e CO<sub>2</sub>. Alla fine del procedimento si avrà uno strato più o meno decarburato a seconda della permanenza in temperatura, del valore della temperatura, dell'atmosfera del forno più o meno decarburante, della composizione chimica della ghisa. In entrambe i casi però è fondamentale che la ghisa di partenza non contenga lamelle di grafite, che creerebbero i noti disturbi degli intagli ed impedirebbero la tenacità e la duttilità; mentre è altrettanto fondamentale che la grafite che si separa (a cuore nella bianca, e in tutta la massa nella nera) abbia forma tondeggiante e sia uniformemente distribuita. Da questo punto di vista le ghise malleabili, (e particolarmente quelle a cuore nero) possono essere considerate le antenate delle moderne ghise sferoidali nelle quali la forma tondeggiante della grafite è ottenuta direttamente durante la solidificazione del getto anziché nella laboriosa ricottura di grafittizzazione.

## GHISA MALLEABILE A CUORE BIANCO

Il primo procedimento di fabbricazione risale al 1700 ad opera del francese Reaumur. La ghisa di partenza è in genere ottenuta al cubilotto ed ha la seguente analisi media: C 2,8 ÷ 3,1% Si 0,45 ÷ 0,80% Mn 0,10 ÷

0,40% P 0,06% S 0,10%. Il Mn deve comunque essere in quantità sufficiente per eliminare l'effetto dello S (vedi pag. 18), altrimenti lo S impedirebbe la precipitazione della grafite sotto forma di floculi con gravi inconvenienti per le buone caratteristiche della ghisa. Il P deve essere a sua volta molto basso, perché con il suo effetto fragilizzante a freddo deteriorerebbe la malleabilità della ghisa ottenuta. Per la fabbricazione di questa ghisa si deve quindi partire da ghise ematiti (basso contenuto di S e P), con aggiunta in misura notevole di rottami di acciaio per abbassare il tenore di C e di Si nelle tolleranze richieste. Il trattamento termico tradizionale per la malleabilizzazione consiste nel ricoprire i getti in apposite cassette con una miscela di terra e di minerale di ferro (generalmente ematite, che contiene  $Fe_2O_3$  al  $70 \div 90\%$  e che con l'uso si trasforma in  $Fe_3O_4$ ). Le cassette vengono poi poste in un forno, che viene mandato a  $900 \div 1000^\circ$  in 36 ore circa; dopo 48 ore di permanenza a tale temperatura durante la quale il C viene in gran parte eliminato, inizia la discesa ad una velocità di  $5 \div 10^\circ$  ora, che deve essere rispettata soprattutto nell'intervallo critico di trasformazione  $A_1$  compreso fra  $760^\circ$  e  $720^\circ$ ; infatti a questa temperatura un raffreddamento veloce potrebbe produrre strutture aciculari nel cuore della ghisa, che contiene ancora quantità notevoli di C.

Alla fine del ciclo, a seconda degli spessori dei getti, avremo una superficie completamente ferritica con lo strato più superficiale ossidato, mentre via via che si va verso il cuore avremo una struttura perlitica contenente noduli di grafite (vedi micrografia fig. 41).

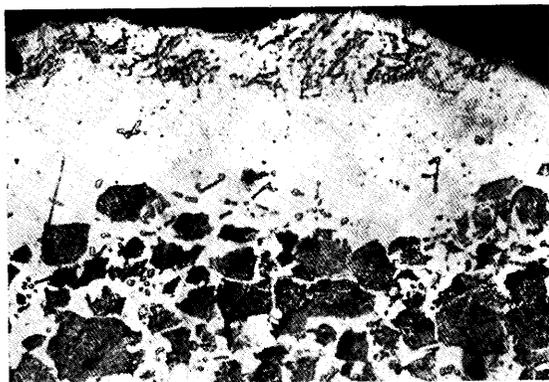
Un ulteriore addolcimento del cuore perlitico si può avere effettuando una ricottura di globulizzazione della perlite, portando i pezzi ad una temperatura intorno ad  $A_c1$  ( $720 \div 760^\circ$ ) per un periodo di molte ore (vedi micrografia fig. 42).

Come conseguenza della decarburazione i pezzi di ghisa subiscono una diminuzione di peso che può variare da 0,5 a 3% a seconda degli spessori del getto.

Le moderne tecnologie di produzione e controllo di atmosfere da immettere nei forni destinati al trattamento termico e la costruzione di forni che a loro volta possono essere a perfetta tenuta di queste atmosfere, hanno reso ormai superato il vecchio procedimento di ossidazione utilizzando le cassette contenenti ossidi di ferro.

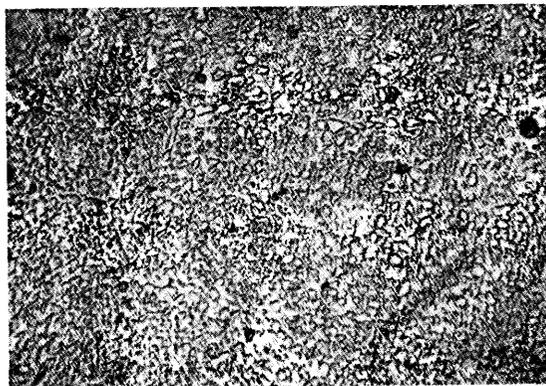
I pezzi vengono caricati in contenitori senza minerali di ferro e quindi immessi nel forno ad atmosfera controllata, che può essere continuo o discontinuo; già la mancanza del peso del minerale da riscaldare costituisce una economia, inoltre il pezzo è a diretto contatto con l'atmosfera riscaldante del forno e quindi può salire molto più rapidamente in temperatura. Il processo di decarburazione può essere controllato nella sua intensità analizzando con appositi strumenti il contenuto di uno dei componenti del gas di atmosfera, ad es.

Struttura di ghisa malleabile a cuore bianco (a partire dal bordo esterno: strato di ossido, strato di ferrite, zona centrale perlitica) - Attacco Nital X 35.



41

Perlite globulare in un getto di ghisa malleabile a cuore bianco - Attacco Nital X 400.



42

il CO<sub>2</sub> o l'H<sub>2</sub> che sono in equilibrio per la legge di azione di massa con tutti gli altri gas. Apposite tabelle possono segnalare, per ogni temperatura qual'è l'analisi più adatta del gas da immettere per conseguire la massima velocità di decarburazione senza provocare ossidazioni dannose alla superficie del getto. Il gas è ottenuto per combustione, in appositi generatori, di idrocarburi gassosi con aria, e la sua analisi finale può essere corretta con aggiunte di piccole quantità dello stesso idrocarburo. Il prodotto finale, oltre ad essere meno costoso, è più uniforme e costante, ed il tempo di esecuzione più breve.

*Le caratteristiche meccaniche* della ghisa malleabile bianca sono oggetto di una classificazione della UNI, che le definisce con la sigla GMB. Secondo le norme UNI, la GMB deve avere uno strato decarburato di almeno 0,8 mm (salvo diverso accordo all'atto dell'ordinazione) e deve essere saldabile coi normali procedimenti di saldatura relativamente allo strato decarburato.

(Vedi tabella UNI GMB 3779/69 a pag. 79). Il fatto che la provetta debba essere greggia di fusione e debba aver subito il trattamento di decarburazione assieme ai getti, spiega perché le provette di diametro maggiore diano una resistenza più alta. L'unica lavorazione ammessa è sulle teste per l'appoggio nelle morse.

Le caratteristiche meccaniche riportate a tabella confermano come l'assenza di lamelle di grafite avvicina la ghisa alle caratteristiche dell'acciaio: allungamento notevole, proporzionalità fra resistenza e durezza, ottima rispondenza ai trattamenti termici di bonifica o comunque di affinamento della struttura.

È evidente che la GMB non è assoggettabile alla tempra superficiale.

Il sistema di produzione della GMB è adatto soprattutto per getti sottili, in quanto troppo lunga sarebbe l'operazione di decarburazione per pezzi di dimensioni notevoli, anche se, come già visto, si dà il nome impropriamente di ghisa a cuore bianco anche a quella che non è decarburata fino a cuore.

## **GHISA MALLEABILE A CUORE NERO O AMERICANA**

Fu introdotta nella tecnologia metallurgica verso l'inizio del 1800, ad opera di Seth di Newark nel New Jersey.

La ghisa di partenza deve avere un'analisi media che è difficilmente ottenibile al cubilotto per il basso contenuto di S e di C. Si ricorre in genere al cubilotto ed ad una successiva affinazione al forno elettrico (processo duplex), che oltre a diminuire i valori di C e di S aumenta la temperatura del bagno reso poco fluido dai bassi valori ottenuti di questi due elementi. L'analisi media è la seguente:

C 2,3 ÷ 2,7% Si 0,5 ÷ 1,2% Mn 0,25 ÷ 0,35%  
P < 0,20 S 0,03 ÷ 0,08%.

L'analisi, oltre ad avere Mn in quantità sufficiente a neutralizzare lo S per i motivi già detti a proposito della GMB, deve costituire un compromesso fra la necessità di avere una struttura greggia di fusione completamente bianca, anche in pezzi relativamente grandi, e la necessità di avere carburi non molto stabili in modo che la durata del tempo di grafitizzazione ad alta temperatura non sia eccessivamente lungo. Questa esigenza aveva fino a qualche decina d'anni fa limitato la produzione di ghisa malleabile a getti sottili e quindi facilmente ottenibili con struttura bianca. Con l'introduzione del processo duplex che ha permesso di abbassare il tenore di C ed aumentare il tenore di Si, si è potuto ridurre notevolmente il tempo di ricottura, e con l'aggiunta di piccole % di tellurio (0,2% circa), che facilita la formazione di carburi durante la solidificazione senza peraltro renderli stabili alla ricottura, si è potuto ottenere ottime strutture bianche anche in pezzi di 200 kg con spessore superiore a 200 mm. Allo stesso modo agiscono il boro e il bismuto. È stato determinato che lo 0,001% di boro neutralizza l'effetto stabilizzante dei carburi, dovuto alla presenza di 0,10% di cromo.

Il trattamento termico classico vuole l'introduzione dei getti in apposite cassette contenenti materiali inerti (sabbia o scoria macinata), che ha lo scopo di mantenerli isolati dal contatto dell'aria per impedirne l'os-

# GHISA MALLEABILE BIANCA GMB

Le ghise malleabili bianche sono classificate come indicato nel prospetto seguente.

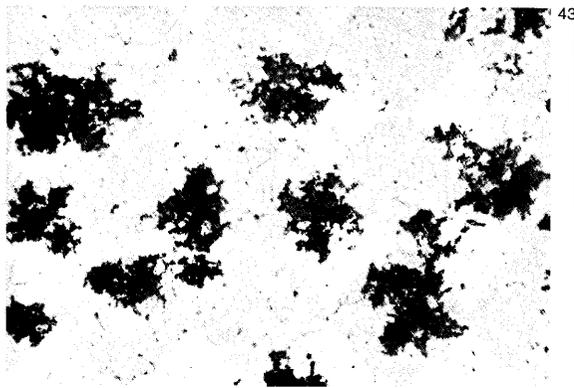
Tipo	Prova di trazione				Durezza Brinell  kgf/mm <sup>2</sup>	Prova di piegamento		Caratteristiche strutturali**	
	Diametro provetta  mm	Carico unitario di rottura R min. kgf/mm <sup>2</sup>	Carico unitario di snervamento* R <sub>s</sub> min. kgf/mm <sup>2</sup>	Allunga- mento su 3 diametri A <sub>3</sub> min. %		Diametro del mandrino D  mm	Angolo di piega- mento  α	Zona intermedia	A cuore
GMB 35	9 12	34 35	- 19	7 6	125 - 200	60	90°	Ferrite - Perlite - C di ricottura	Perlite - C di ricottura
GMB 40	9 12	38 40	22	12 10	125 - 200	60	120°	Ferrite - Perlite - C di ricottura	Perlite - C di ricottura
GMB 45	12	45	26	7	150 - 210	-	-	Ferrite - Perlite - C di ricottura	Perlite - C di ricottura
GMB 50	12	50	30	5	160 - 230	-	-	Ferrite - Perlite globulare - C di ricottura	Perlite globu- lare - C di ri- cottura
GMB 55	12	55	33	4	190 - 240	-	-	Ferrite - Perlite globulare (fine) - C di ricottura	Perlite globula- re (fine) - C di ricottura
GMB 65	12	65	39	3	210 - 250	-	-	Perlite - C di ricottura	
GMB 70	12	70	50	2	240 - 285	-	-	Struttura di bonifica - C di ricottura	

\* I valori del carico unitario di snervamento sono dati a titolo indicativo e non costituiscono oggetto di verifica agli effetti del collaudo, salvo diversi accordi all'atto dell'ordinazione. Essi si riferiscono ad una deformazione permanente dello 0,2%.

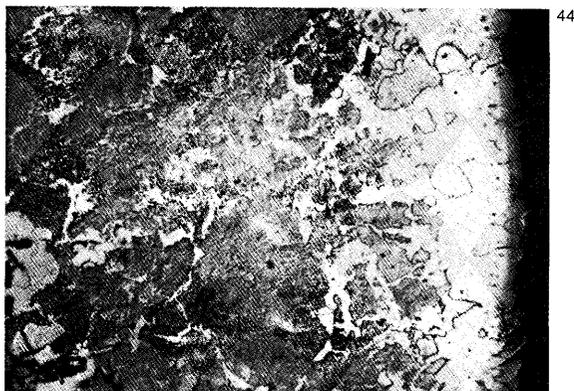
\*\*\* La struttura di base è costituita: in superficie da uno strato decarburato (ferritico) (vedere anche punto 2.1.2); - nella zona intermedia ed a cuore secondo il prospetto.

sidazione. Le cassette poste in forni vengono portate alla temperatura di  $840 \div 950^\circ$  e mantenute a tale temperatura per circa 48 ore, poi lasciate raffreddare lentamente ( $5 \div 10^\circ$  ora) specialmente nell'intervallo della trasformazione  $A_1$  ( $720 \div 760^\circ$ ), e poi a  $600^\circ$  raffreddate in aria. Durante la permanenza ad alta temperatura si ha la grafitizzazione completa dei carburi e la riunione in floculi, più o meno compatti, della grafite. Durante il raffreddamento la velocità sarà talmente lenta che l'austenite satura libererà grafite (vedi linea ES del diagramma Fe-C), che andrà a depositarsi sui floculi, e durante il passaggio attraverso il punto critico  $A_1$  l'austenite si trasformerà in ferrite e il C che conteneva in soluzione andrà a depositarsi ancora sui floculi. La struttura tipica della ghisa malleabile a cuore nero sarà quindi una matrice completamente ferritica, nella quale si trovano dispersi uniformemente dei floculi di grafite (vedi micrografia fig. 43). Siccome non si ha eliminazione del C ma solo la globulizzazione, è evidente come si tenda ad avere la minor quantità possibile di C nella ghisa di partenza, per avere la minor quantità possibile di grafite nella struttura ferritica: si ottengono così le migliori caratteristiche meccaniche. Non sempre il trattamento è così perfetto come è stato descritto: a volte lo strato superficiale può risultare decarburato o addirittura leggermente ossidato, perché non ben protetto dalla presenza dell' $O_2$  dell'aria; il riscaldamento troppo veloce o il raffreddamento non sufficientemente lento possono determinare una struttura finale non completamente ferritica, ma con presenza di zone perlitiche.

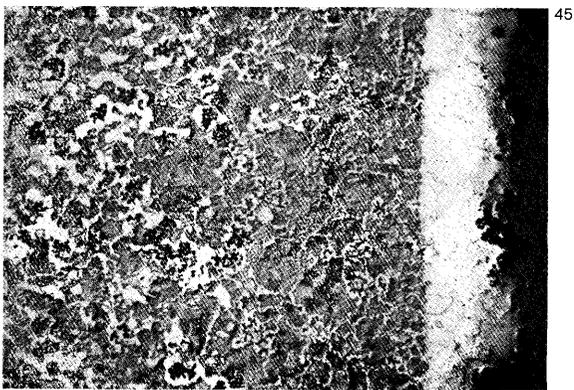
Es. micrografia fig. 44. Il bordo esterno è costituito da ferrite, mentre subito sotto vi è presenza di perlite. Evidentemente la velocità di raffreddamento è stata troppo alta, ma il bordo esterno è risultato ugualmente ferritico perché il C è stato completamente eliminato ad alta temperatura dalla presenza di una atmosfera decarburante. Questo è anche confermato dal fatto che in questa zona superficiale non esistono floculi di grafite neanche nella zona perlitica. Il fenomeno della decarburazione è par-



Struttura tipica di ghisa malleabile a cuore nero - Attacco Nital X 100.



Bordo di getto di ghisa malleabile a cuore nero con strato di perlite, sotto una pellicola di ferrite - Attacco Nital X 65.



Struttura del bordo di un getto di ghisa malleabile a cuore nero, dal caratteristico aspetto ad «occhio di bue» - Attacco Nital X 65.

ticolarmente dannoso per quelle ghise che dovranno subire un trattamento di tempra superficiale.

Altro difetto caratterizzato da un aspetto particolare della struttura è quello definito

ad "occhio di bue" (vedi micro fig. 45). La ghisa presenta un aspetto prevalentemente perlitico con i noduli di grafite circondati da un alone di ferrite. Si tratta di un raffreddamento troppo veloce intorno al punto critico  $A_1$ , per cui il C sciolto nell'austenite che riesce a depositarsi sui flocculi esistenti è solo quello vicino ad essi, l'altro non ha il tempo di diffondere e quindi appena la temperatura è scesa al disotto del limite critico precipita come carburo sotto forma di perlite.

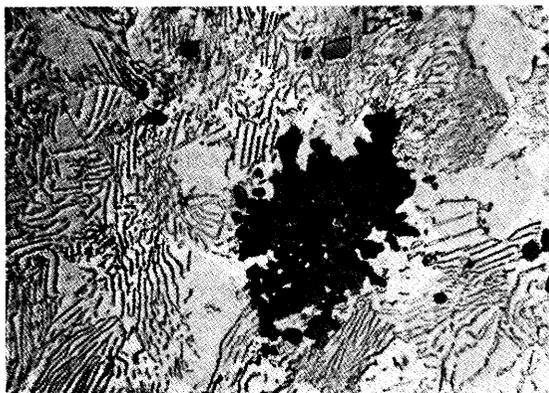
Anche nella produzione della ghisa malleabile grigia si è ormai abbandonato, sia per motivi economici, sia per le condizioni ambientali migliori che realizza, il vecchio sistema della ricottura in cassette per utilizzare forni di riscaldamento ad atmosfera controllata. In questo caso non è necessario che l'atmosfera sia decarburante come per la GMB, ma è sufficiente garantire che sia inerte, tale cioè che non ossidi e non decarburì i pezzi. In questi forni la durata del ciclo può essere notevolmente abbreviata arrivando anche solo a 20 ore, che paragonate alle 150 ore necessarie nelle vecchie fonderie con forni di ricottura a casse, costituiscono un notevole progresso.

## GHISA MALLEABILE PERLITICA

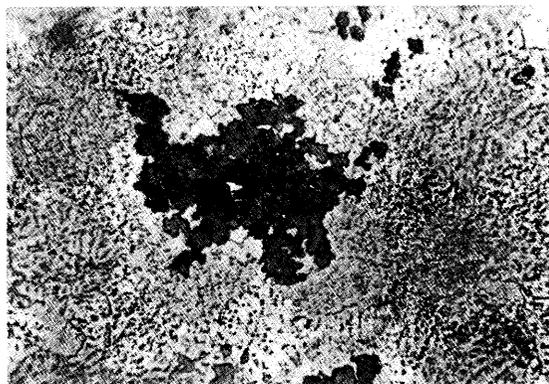
Si è già detto che la struttura classica della ghisa malleabile a cuore nero è la ferritica con noduli di grafite. Trattandosi di ghisa che deve presentare il massimo di duttilità è evidente che questa è la struttura limite da ottenere.

Si è già visto che il miglioramento della ghisa, addirittura l'avvicinamento alle caratteristiche dell'acciaio, è dovuto principalmente alla formazione di una grafite non più a forma lamellare, ma flocculare. È evidente quindi che, se anche non è presente una struttura ferritica, le caratteristiche della ghisa saranno sempre nettamente superiori a quelle della ghisa lamellare.

Questi aspetti sono stati determinanti nella affermazione di tipi di ghisa malleabile a cuore nero non più con struttura esclusivamente ferritica ma perlitica e anche sorbitica (naturalmente quest'ultima dopo il trattamento termico di bonifica).



Struttura di ghisa malleabile perlitica - Attacco Nital X 400.



Struttura di ghisa malleabile perlitica, temprata con aria soffiata e rinvenuta - Attacco Nital X 400.

I modi per ottenerla possono essere parecchi.

Il più rapido e meno impegnativo, anche se dà risultati non molto brillanti e riproducibili, consiste in un aumento del tenore di elementi stabilizzatori dei carburi (in questo caso il Mn viene portato a tenori dello  $0,5 \div 0,9\%$ ) che, durante il raffreddamento, nel ciclo di malleabilizzazione, impediscono la totale precipitazione del C come grafite, tanto che al punto  $A_{r1}$  il C ancora in soluzione nella austenite dà origine a carburi che formano la perlite.

Un altro metodo consiste nel riscaldare la ghisa con l'analisi classica in forni ad atmosfera controllata e possibilmente continui (perché permettono un controllo preciso e sbalzi rapidi di temperatura) per  $4 \div 6$  ore a  $940^\circ$ , dopo di che si raffredda lentamente fino a  $870 \div 850^\circ$ . A questa temperatura i getti vengono raffreddati il più

# GHISA MALLEABILE NERA GMN

TAB. 3779/69

Le ghise malleabili nere sono classificate come indicato nel prospetto seguente.

Tipo	Prova di trazione				Durezza Brinell kgf/mm <sup>2</sup>	Prova di piegamento		Caratteristiche strutturali
	Diametro provetta mm	Carico unitario di rottura R min. kgf/mm <sup>2</sup>	Carico unitario di snervamento* R <sub>s</sub> min. kgf/mm <sup>2</sup>	Allungamento su 3 diametri A <sub>3</sub> min. %		Diametro del mandrino D mm	Angolo di piegamento α	
GMN 35	12	35	19	12	110 - 150	60	90°	Ferrite - C di ricottura
GMN 37	12	37	22	14	120 - 160	60	120°	Ferrite - C di ricottura
GMN 45	12	45	26	7	150 - 210	-	-	Perlite - Ferrite - C di ricottura
GMN 50	12	50	30	5	170 - 230	-	-	Perlite - Ferrite - C di ricottura
GMN 55	12	55	33	4	190 - 240	-	-	Perlite globulare - C di ricottura - Presenza eventuali tracce di ferrite
GMN 65	12	65	39	3	210 - 250	-	-	Perlite globulare - C di ricottura
GMN 70	12	70	50	2	240 - 285	-	-	Struttura di bonifica - C di ricottura

\* I valori del carico unitario di snervamento sono dati a titolo indicativo e non costituiscono oggetto di verifica agli effetti del collaudo, salvo diversi accordi all'atto dell'ordinazione. Essi si riferiscono ad una deformazione permanente dello 0,2%.

rapidamente possibile fino a temperatura ambiente, usando magari aria soffiata. La struttura che si ottiene è una matrice perlitica (vedi fig. 46) con fioculi di grafite nelle sezioni sottili; nelle sezioni più massicce, per il raffreddamento più lento, intorno ai fioculi di grafite posson formarsi degli aloni di ferrite generando la tipica struttura ad "occhio di bue" (vedi Fig. 45 pag. 80).

Per omogeneizzare la durezza ed eliminare le tensioni si sottopone poi la ghisa ad un rinvenimento che può variare da 590° fino a 730° a seconda delle caratteristiche meccaniche desiderate. La perlite assume l'aspetto globulare di (fig. 47) al quale corrisponde, fra l'altro, il massimo di lavorabilità meccanica all'utensile.

Un terzo metodo, che può essere considerato senz'altro il migliore per la precisione, omogeneità e ripetibilità delle caratteristiche che si ottengono, è attuato mediante la bonifica sui pezzi già sottoposti al trattamento di malleabilizzazione. I pezzi vengono portati, con tutte le precauzioni già accennate a proposito dei trattamenti termici delle ghise grige (vedi pag. 52), alla temperatura di austenitizzazione (800 ÷ 850°) e quindi temprati in olio o in aria se sono particolarmente sottili e complicati. Si fa quindi seguire un rinvenimento a temperature diverse a seconda della durezza desiderata. Se la bonifica è eseguita con cura, la struttura ottenuta è completamente sorbitica

## Caratteristiche meccaniche

Le caratteristiche meccaniche delle ghise malleabili a cuore nero dipendono essenzialmente dalla % di C che contengono, e la resistenza meccanica e la duttilità sono sensibilmente ridotte via via che tale tenore aumenta.

Anche per queste ghise esistono norme UNI, che prevedono la classificazione in base alle caratteristiche meccaniche ed alla microstruttura. Come si vede nella tabella, sono comprese nelle ghise malleabili a cuore nero anche quelle a struttura perlitica e sorbitica, in quanto prerogativa essenziale per la GMN non è tanto la struttura ferritica, richiesta solo per le più basse resistenze, quanto l'omogeneità della struttura indipendentemente dagli spessori.

Queste ghise, quando sono a struttura perlitica e sorbitica, possono essere sottoposte a tempra superficiale e possono dare durezza fino a 55 Hrc.

Non è ammessa invece la saldatura strutturale; le uniche saldature ammesse sono quelle di riparazione dei difetti dei getti in zone non critiche ed eseguite prima del trattamento di malleabilizzazione (vedi tab. UNI GMN 3779/69).

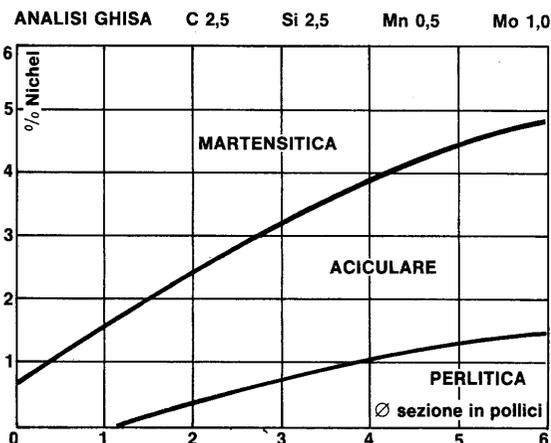
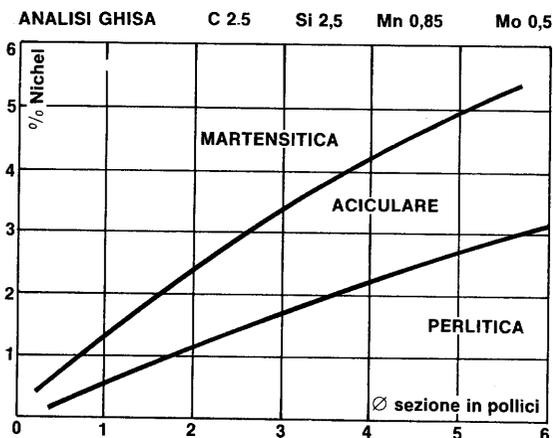
# GHISE ACICULARI

Le ghise aciculari sono ancora delle ghise grige perché nella loro struttura è ancora presente la grafite, lamellare o sferoidale, a seconda del procedimento di fabbricazione. Il loro nome deriva dalla loro particolare struttura, allo stato greggio di fusione, bainitico-martensitica, che è appunto una struttura aciculare (vedi micrografia fig. 48). Tale struttura, che nelle ghise non legate o debolmente legate si ottiene solo con un trattamento termico di tempra, è in questo caso ottenuto con l'aggiunta di elementi leganti in quantità tale da rendere la ghisa autotemperante.

Si tratta in genere di aggiunte di 0,8 ÷ 1,2% di Mo e di Ni in quantità variabili da 0,8 a 3,5% secondo lo spessore dei getti. Gli altri elementi sono presenti nei seguenti limiti: C 2,5 ÷ 3,2%, Si 1,8 ÷ 2,5 per cento (secondo gli spessori) Mn 0,6 ÷ 0,9% P + S 0,12 max. I due diagrammi sottoripor-  
tati danno un'idea di come la composizione chimica sia condizionata dagli spessori per l'ottenimento della struttura aciculare.

Alla struttura aciculare corrispondono caratteristiche meccaniche assai elevate. Carico di rottura da 40 a 55 kg/mm<sup>2</sup> (che può essere elevato con trattamento termico), ottima resistenza all'usura, elevata capacità di smorzamento delle vibrazioni, insensibilità all'effetto d'intaglio, relativamente buona resilienza. Queste ghise trovano quindi impiego negli alberi a gomito, camice per motori, cammes e in tutti in quei particolari meccanici in cui sia richiesta un'elevata re-

sistenza all'usura e un'alta durezza (la durezza può essere contenuta a 300 ÷ 320 Hd e permettere quindi ancora una discreta lavorabilità all'utensile).



## Trattamenti termici

È consigliabile sottoporre le ghise aciculari ad un rinvenimento di distensione a  $250 \div 370^\circ$ . Questo trattamento aumenta la lavorabilità e la resistenza a trazione, mentre diminuisce la resilienza. L'aumento di resistenza è spiegabile con la decomposizione dell'austenite residua (che queste ghise fortemente legate quasi sempre portano in % più o meno notevoli fino a temperatura ambiente), in martensite rinvenuta o bainite. La decomposizione della austenite è anche possibile ottenerla raffreddando la ghisa a  $-45^\circ \div -73^\circ \text{C}$ , sempre con il risultato di ottenere un aumento di resistenza ed una diminuzione di resilienza. A questo raffreddamento è sempre consigliabile far seguire una distensione, in questo caso anche a temperature più basse ( $180 \div 220^\circ$ )

## Strutture aciculari per trattamento termico

Una categoria particolare di ghise aciculari è quella nella quale tale struttura anziché essere ottenuta dalla fusione direttamente durante la solidificazione, è ottenuta per successivo trattamento termico; due sono i metodi usati:

Nel primo si adotta un'analisi chimica tale che la ghisa alla velocità di raffreddamento nella staffa risulti tendenzialmente perliti-

gior velocità di raffreddamento realizzata. Si tratta evidentemente di un trattamento applicabile solo su grandi serie di pezzi per la difficoltà di centrare l'analisi chimica e la velocità di raffreddamento.

Il secondo metodo, applicabile solo a pezzi di dimensioni modeste, sfrutta la tempra "austempering" (vedi pag. 53) e presuppone la conoscenza delle curve del diagramma TTT della ghisa da trattare. Se fatto in bagno di sale le deformazioni sono molto piccole, non vi sono tensioni residue e la struttura è più uniforme che non nel caso precedente della tempra in aria, perché la trasformazione avviene a temperatura costante.



Struttura con matrice aciculare in una ghisa grigia legata con nichel e molibdeno - Attacco Picral 4% - X 500.

ca, mentre ad un successivo trattamento di austenitizzazione e raffreddamento all'aria assume la struttura aciculare per la mag-

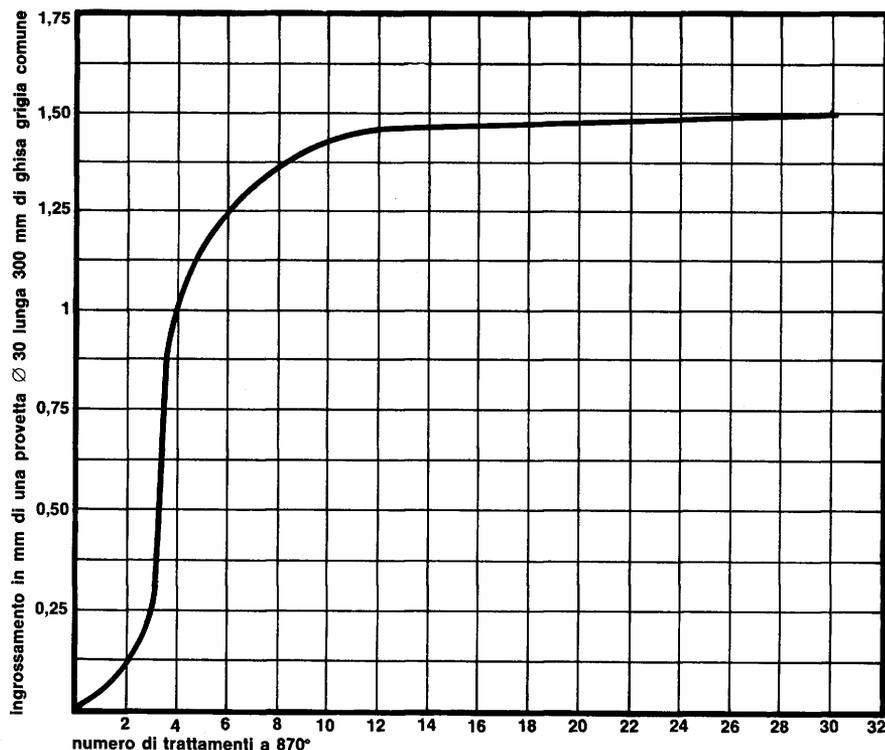
# GHISE RESISTENTI AL CALORE E ALLA CORROSIONE

L'effetto del calore comporta sulle ghise una serie di fenomeni che è necessario esaminare prima di procedere alla loro classificazione:

## Aumento di volume

È determinato dalla grafitizzazione dei carburi ed è già sensibile a 500°. Tale aumento è tanto maggiore quanto più alta è la % di C combinato, quanto maggiori sono gli

elementi grafitizzanti presenti (Si Ni Al Cu ecc.) e naturalmente quanto più alta è la temperatura raggiunta e il numero di cicli termici effettuati. Per contro l'aumento di volume sarà ostacolato dalla presenza di elementi che rendono stabili i carburi (Mn Cr Mo Va) e sarà tanto minore quanto più la ghisa è povera di carburi, cioè tendenzialmente ferritica (vedi diagramma crescita lineare ghisa, pag. 37, e diagramma sottoriportato).



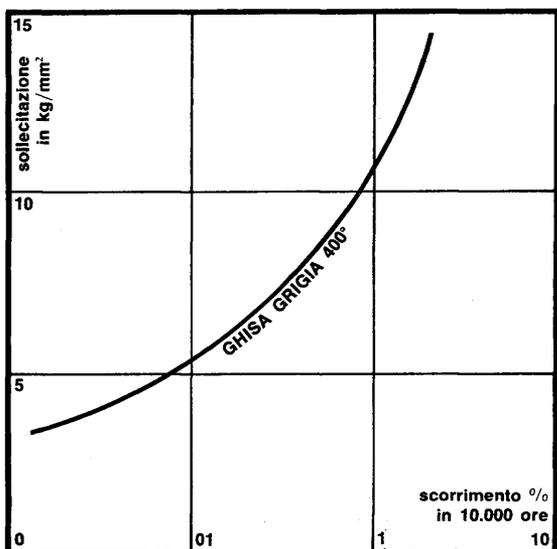
AUMENTO DI VOLUME  
DI UNA GHISA GRIGIA  
SOTTOPOSTA A RIPETUTI  
CICLI TERMICI

## Scorrimento viscoso

È un altro effetto, come si è visto, del calore sulla ghisa.

Per scorrimento viscoso si intende la deformazione permanente che il materiale subisce nel tempo per una sollecitazione costantemente applicata. Nei getti sottoposti al calore è necessario quindi prevedere che questa deformazione sia accettabile.

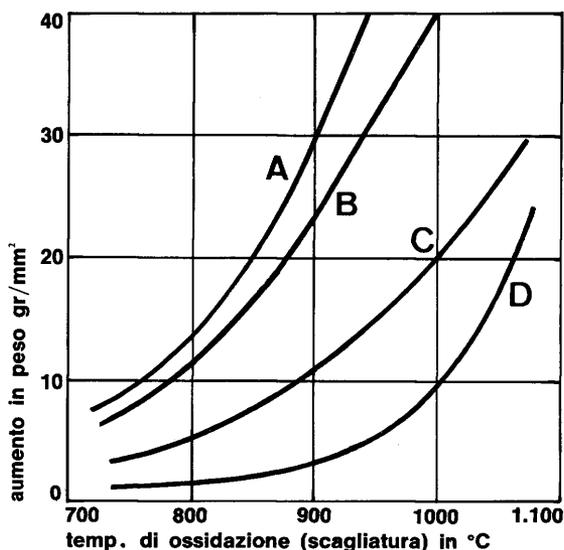
La ghisa grigia comune ha una resistenza allo scorrimento viscoso assai scarso: a 400° il limite di viscosità per 1% di deformazione permanente dopo 10000 ore è di circa 10 ÷ 15 kg/mm<sup>2</sup> (vedi diagramma).



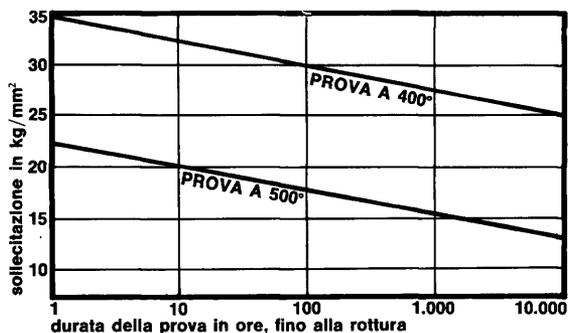
Tale comportamento può essere migliorato con l'aggiunta di elementi leganti (Cr Ni ecc.) e naturalmente con il miglioramento delle caratteristiche meccaniche a freddo, ottenuto con una struttura particolarmente omogenea, perlitica o meglio sorbitica e con grafite finemente suddivisa. È evidente che questo accorgimento può aver valore per temperature non molto elevate (500° max), dopo di che si può agire esclusivamente con aggiunte di elementi leganti. La resistenza a rottura a caldo è direttamente legata allo scorrimento viscoso a caldo ed è illustrata dal diagramma riportato a lato.

## Ossidazione superficiale del pezzo

È il terzo effetto del calore sulla ghisa. Questo fenomeno comincia ad avere importanza dopo 550° se il riscaldamento avviene nelle normali condizioni atmosferiche, se invece avviene in presenza di vapori o di gas corrosivi comincia ad essere appariscente già a 350°. L'assorbimento di ossigeno da parte della superficie comporta un aumento di peso e di volume della stessa, fino alla formazione di scaglie a temperature elevate (800°), che staccandosi durante gli sbalzi termici possono apportare diminuzioni dimensionali e di peso durante l'esercizio (consumo superficiale) - vedi diagramma e tabella.



Le ghise sferoidali, non avendo le lamelle di grafite che agiscono come cunei per la penetrazione dell'ossigeno all'interno della superficie, sono più resistenti delle lamellari alla ossidazione a caldo. Per lo stesso



**SCAGLIATURA  
DI QUATTRO TIPI  
DI GHISA,  
DOPO 200 ORE  
ALLE TEMPERATURE  
INDICATE, IN ARIA  
(VEDI DIAGRAMMA  
A PAGINA PRECEDENTE)**

TIPI DI GHISA	C tot.‰	Si‰	Mn‰	P‰	Ni‰	Cr‰	Cu‰
<b>A Ghisa grigia a basso Si</b>	<b>2,98</b>	<b>1,14</b>	<b>1,07</b>	<b>0,18</b>			
<b>B Ghisa grigia al Ni Cr</b>	<b>3,45</b>	<b>1,64</b>	<b>1,03</b>	<b>0,15</b>	<b>1,18</b>	<b>0,92</b>	
<b>C Ni resist</b>	<b>2,74</b>	<b>1,93</b>	<b>0,89</b>	<b>0,04</b>	<b>14,6</b>	<b>2,10</b>	<b>7,10</b>
<b>D Nicrosilam</b>	<b>1,78</b>	<b>4,63</b>	<b>0,91</b>	<b>0,10</b>	<b>22,4</b>	<b>2,50</b>	

motivo sono più resistenti le ghise con lamelle fini e uniformemente distribuite. Anche agli effetti della resistenza alla ossidazione superficiale per effetto del calore è necessario però, per conseguire risultati notevoli, ricorrere all'aggiunta di elementi leganti che agiscono per effetto della loro inossidabilità, oppure perché, passivandosi con l'ossidazione, formano delle pellicole resistenti alla ulteriore penetrazione dell'ossigeno (es. cromo).

Da quanto fin qui esposto risulta che per ottenere buone prestazioni da un getto di ghisa che deve lavorare ad alte temperature bisogna in ogni caso ricorrere ad elementi leganti che ne migliorino le caratteristiche fisiche meccaniche.

Esiste però anche un problema di forme e dimensioni da dare ai getti per ottenere il massimo di durata in esercizio: occorre cioè che il pezzo sia di spessore il più possibile uniforme, che le eventuali variazioni siano ampiamente raccordate e soprattutto che la forma sia tale da evitare che, per effetto degli aumenti di volumi dovuti al calore, alcune parti si vengano a trovare sia sotto sforzo di trazione che di compressione.

## Corrosione

È l'ultimo fenomeno importante da esaminare per lo studio di queste ghise. La corrosione a freddo e a caldo è strettamente legata al fenomeno dell'ossidazione (a freddo e a caldo). Le ghise grige lamellari hanno già, rispetto al ferro comune, una resistenza agli agenti atmosferici migliore; questa proprietà aumenta ancora in presenza di grafite sferoidale perché viene a mancare la penetrazione dell'ossigeno e degli agenti corrosivi attraverso i cunei costituiti dalle lamelle di grafite della ghisa lamellare. Ma i risultati più notevoli si ottengono con l'aggiunta di elementi leganti

(Ni Cr Mo Cu Si ecc.), che agiscono nel modo già visto nei confronti dell'ossigeno, e possono servire, aggiunti in ‰ adatte, per creare ghise resistenti agli acidi, alcali e sali a seconda delle esigenze dell'industria.

La moderna metallurgia ha creato una gamma vastissima di ghise più o meno legate che hanno come qualità essenziale la resistenza al calore o alla corrosione o ad entrambe, e sono per lo più ghise grige.

Si sono già elencate, sia pure in modo sommario, le ghise meehaniti resistenti al calore e alla corrosione a proposito della loro presentazione e classificazione (pag. 70). Vantaggio di queste leghe è la finezza e la uniformità di distribuzione delle lamelle di grafite. Un'altra serie di ghise grige create per resistere al calore e alla corrosione sono quelle note con il nome commerciale di « Ni-resist ». Si tratta di ghise con alto contenuto di Ni, Cr, Cu, Mn, variamente presenti ma in ‰ tali da determinare una struttura austenitica stabile a bassa temperatura che presenta le seguenti caratteristiche chimico-fisiche-meccaniche:  
Resistenza all'ossidazione e alla corrosione  
Minimo aumento di volume a temp. elevate  
Resistenza all'ossidazione a temp. elevate  
Alta tenacità

Alta resistenza elettrica

Le ghise Ni-resist possono essere fabbricate anche con il procedimento di sferoidizzazione della grafite, per cui a tutti i tipi normali a grafite lamellare possono essere affiancati quelli con la stessa analisi ma con grafite sferoidale; questi ultimi avranno anche ottime caratteristiche meccaniche di resistenza, allungamento resilienza.

(Vedi micrografie figure 49 e 51).

La loro specifica denominazione commerciale a seconda del tipo di grafite è elencata nelle due tabelle a pag. 89 e 90.

## COMPOSIZIONE CHIMICA % DELLE GHISE Ni RESIST A GRAFITE LAMELLARE

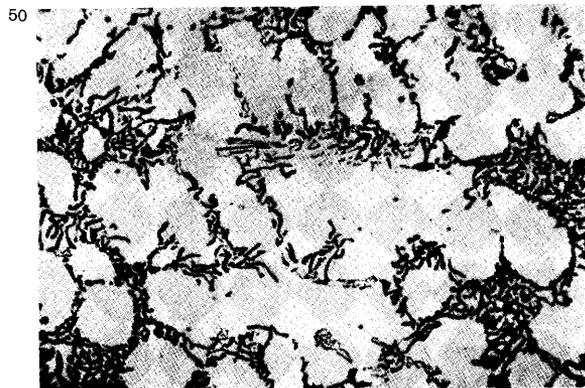
DENOMINAZIONE COMMERCIALE	C max	Si	Mn	Ni	Cr	Cu
Ni resist 1	3,0	1,0-2,8	1,0-1,5	13,5-17,5	1,0-2,5	5,5-7,5
Ni resist 1B	3,0	1,0-2,8	1,0-1,5	13,5-17,5	2,5-3,5	5,5-7,5
Ni resist 2	3,0	1,0-2,8	1,0-1,5	18-22	1,0-2,5	
Ni resist 2B	3,0	1,0-2,8	1,0-1,5	18-22	2,5-3,5	
Ni crosilal	2,5	3,5-5,5	1,0-1,5	18-22	1,5-4,5	
Ni resist 3	2,6	1,0-2,0	0,4-0,8	28-32	2,5-3,5	
Ni resist 4	2,6	5,0-6,0	0,4-0,8	29-32	4,5-5,5	
Ni resist 5	2,4	1,0-2,0	0,4-0,8	34-36		
No mag	3,0	1,5-3,0	6,0-7,0	12-14		



Struttura di ghisa grigia austenitica Ni Resist contenente nichel, rame, cromo e fosforo - Attacco: HCl 10% bollente - X 400.



Struttura tipica di ghisa grigia austenitica Ni-Resist - Attacco: HCl 10% bollente - X 100.



Struttura tipica di ghisa grigia austenitica Nicrosilal Attacco: HCl 10% bollente - X 200.

La presenza di carburi primari in queste ghise a matrice austenitica è quanto mai dannosa sia per le proprietà meccaniche (la infragiliscono) sia per la resistenza a caldo (si decompongono); è quindi neces-

sario operare sia sui contenuti di Cr e Mn, sia sulla quantità di Si e C. La seguente tabella indica il tenore di Si e C in rapporto allo spessore dei getti per la ghisa Ni resist:

TENORE DI SI E C IN RAPPORTO ALLO SPESSORE DEI GETTI PER LA GHISA Ni RESIST		
Contenuto C%	spessore in mm	% Si
2,6-2,9	minore di 12,5	2,5-2,25
	da 12,5 a 25	2,25-1,75
	da 25 a 50	1,75-1,50
	maggiore di 50	meno dell'1,50
2,9-3,2	minore di 12,5	2,25-2,0
	da 12,5 a 25	2,0-1,5
	da 25 a 50	1,5-1,2
	maggiore di 50	meno dell'1,20

Nel campo delle ghise resistenti alla corrosione si possono ancora citare le ghise

**COMPOSIZIONE  
CHIMICA  
DELLE GHISE  
NI RESIST  
A GRAFITE  
SFEROIDALE**

Denominazione commerciale	Composizione chimica %					
	C max	Si	Mn	Ni	Cr	Cu
Ni resist D2	3,0	1,7-3,0	0,7-1,5	18-21	1,0-2,5	
Ni resist D2B	3,0	1,7-3,0	0,7-1,5	18-22	2,5-4,0	
Nicrosilal Sferonic	3,0	3,5-5,5	1,0-1,5	18-22	1,0-2,5	
Ni resist D2C	3,0	1,7-3,0	1,8-2,4	21-24		
Ni resist D2M	2,2-2,6	1,9-2,6	4,0-4,4	22-24		
Ni resist D3	2,6	1,8-2,8	0,5 max	28-32	2,5-3,5	
Ni resist D3A	2,6	1,5-2,0	0,5 max	28-32	1,0-1,5	
Ni resist D4	2,6	5,0-6,0	0,5 max	29-32	4,5-5,5	
Ni resist D5	2,4	1,5-2,8	0,5 max	34-36		
Ni resist D5B	2,4	1,5-2,8	0,5 max	34-36	2,0-3,0	
Nodumag	3,0	2,0-3,0	6,0-7,0	12-14		

ad alto tenore di Si (Duriron), ad alto tenore di Si con Mo (Duriclor) a struttura ferritica, che hanno ottima resistenza agli acidi e agli alogeni ma non agli alcali. La loro composizione media è la seguente:

Duriron: C 0,4 ÷ 1, Mn 0,4 ÷ 1, Si 14 ÷ 17

Duriclor: C 0,4 ÷ 1, Mn 0,4 ÷ 1

Si 14 ÷ 17 Mo 0 ÷ 3,5

La loro durezza è elevata (450 ÷ 500 Hd).

Esistono poi le ghise ad alto tenore di Cr resistenti agli acidi con analisi media:

C 1,2 ÷ 2,5 Mn 0,3 ÷ 1 Si 0,5 ÷ 2,5 Ni 0,5 Cr 20 ÷ 35

Struttura ferritica e durezza Brinell 300 ÷ 400.

Nel campo delle ghise resistenti al calore esistono anche ghise ad alto tenore di Si (Silal) con analisi media:

C 1,6 ÷ 2,5 Mn 0,4 ÷ 0,8 Si 4 ÷ 6 per temperature massime di 900° (che mal sopporta gli shock termici specialmente a bassa temperatura).

Ghise ad alto tenore di Cr con analisi media:

C 1,8 ÷ 3 Mn 0,3 ÷ 1,5 Si 0,5 ÷ 2,5 Ni 0 ÷ 5 Cr 15 ÷ 35 per temp. fino a 1000° (più resistenti agli shock termici della ghisa precedente).

Infine esistono, ultime arrivate nella metallurgia della ghisa, le ghise all'alluminio con la seguente analisi media:

C 1,3 ÷ 1,7 Mn 0,4 ÷ 1,0 Si 1,3 ÷ 6 Al 18 ÷ 25 per temperatura fino a 1000°, struttura ferritica, resistenti anche in atmosfera contenente S (sotto forma di SO<sub>2</sub>; SO<sub>3</sub>; H<sub>2</sub>S).

## **GHISE PER IMPIEGHI A BASSA TEMPERATURA**

Come per gli acciai, anche le ghise con l'abbassarsi della temperatura decadono delle loro proprietà meccaniche. Il valore che subisce lo sbalzo più drastico è la resistenza all'urto, che può ridursi per temperature di alcune decine di gradi sotto lo 0° C quasi a zero. È quindi soprattutto a questa caratteristica che dovrà rispondere con serie garanzie una lega destinata a lavorare a temperature molto basse: le esigenze dell'industria moderna possono richiedere elevate prestazioni per temperature fino a -200° C (es. produzione e conservazione di gas criogeni). La ghisa, che riesce a rispondere alle caratteristiche meccaniche richieste a questa temperatura offre rispetto alle altre leghe (es. acciai legati al Ni) il vantaggio della colabilità relativamente più facile.

Particolarmente adatte si sono rivelate le ghise austenitiche al Nichel (tipo Ni resist) che rispondano però a determinate caratteristiche chimico fisiche:

1° la grafite dovrà essere a forma sferoidale, per evitare l'effetto degli intagli provocati dalla grafite lamellare.

2° Assenza di carburi eutettici, che interrompendo la continuità delle matrici austenitiche ne diminuiscono la tenacità. Particolarmente dannosa a questo effetto sarà

quindi la presenza di Cr, che dà origine a carburi difficilmente eliminabili anche con una ricottura di solubilizzazione a  $900 \div 950^\circ$

3° Stabilità dell'austenite fino almeno alla temperatura di utilizzo. È cioè necessario che la trasformazione austenite-martensite (punto MS) inizi a temperatura più bassa di quella di utilizzo, pena l'infragilimento della matrice austenitica. Il punto Ms e Mf di una lega è però funzione dell'analisi chimica e gli elementi che abbassano tale punto sono in ordine di intensità di azione: Mn-Cr-Ni-Mo-Si.

Il cromo, si è visto, è da evitare per cui si dovrà agire sui contenuti di Ni e di Mn. Si è constatato che col 4% di Mn in una ghisa contenente il 20% di Ni il punto di

trasformazione Ms si abbassa al disotto di  $-200^\circ$  C.

Unico inconveniente, facilmente eliminabile, è la presenza di carburi di Mn allo stato greggio di fusione, che possono diminuire la resilienza. Si tratta in questo caso di sottoporre la ghisa a un trattamento di solubilizzazione dei carburi a  $900 \div 950^\circ$ , con una permanenza di 4 ore o più in temperatura, seguito da un raffreddamento all'aria o in forno fino a  $550^\circ$ .

Il raffreddamento in forno è consigliabile solo agli effetti di una maggiore stabilità dimensionale dei pezzi.

Ghise di questo genere, con trattamento termico di solubilizzazione, danno ancora a  $-195^\circ$  valori di resilienza con provetta Charpy (intaglio a V) maggiori di 2,2 Kgm/cm<sup>2</sup>.

# GHISE BIANCHE PER GETTI

## STRUTTURA

Si è già visto come caratteristica fondamentale della ghisa bianca sia la sua struttura contenente carbonio completamente allo stato di carburi. L'assenza di grafite determina l'aspetto della rottura che è bianco brillante, donde il nome dato a questo tipo di ghisa.

I carburi, si è visto, sono una fase instabile per cui la loro presenza è dovuta o ad una velocità di raffreddamento molto elevata, (tempra o raffreddamento rapido a mezzo di conchiglie), o alla presenza di elementi leganti che formando con il carbonio carburi stabili riescono a mantenerlo legato chimicamente fino a temperatura ambiente.

La microstruttura della ghisa bianca, a parte l'assenza totale di C sotto forma grafitica, può quindi presentare a seconda degli elementi leganti e delle velocità di raffreddamento i seguenti aspetti:

— Cementite in matrice perlitica (ghisa bianca perlitico-ledeburitica) quando non sono presenti elementi leganti in quantità elevata e la velocità di raffreddamento non è notevole.

— Cementite (e carburi primari degli elementi carburogeni) in matrice martensitica o aciculare (ghisa bianca martensitica-ledeburitica), quando sono presenti elementi leganti in quantità tale da abbassare per isteresi fino al punto Ms la trasformazione  $A_{r1}$ , o quando la velocità di raffreddamento è tale da sopprimere la trasformazione  $A_{r1}$ ,

fino al punto Ms. In questa ghisa la durezza della cementite si somma alla durezza della martensite (vedi micrografia fig. 52). — Cementite (e carburi primari degli elementi carburogeni) in matrice austenitica, quando sono presenti elementi leganti che allargano il campo  $\gamma$  in misura tale da rendere stabile l'austenite a temperatura ambiente, o in seguito a particolari trattamenti termici.

I tre tipi fondamentali di microstrutture possono naturalmente essere presenti in % varie nella stessa ghisa: basti pensare come le velocità di raffreddamento cambino dalla superficie al cuore di un getto, quando questo abbia una massa notevole. Non solo ma è possibile ottenere la presenza di ghisa bianca e grigia nello stesso getto agendo

Struttura di una ghisa bianca contenente elevati tenori di nichel e di cromo (carburi complessi in matrice di martensite) - Attacco Nital 1% - X 200.



52

sulle velocità di raffreddamento mediante conchiglie o piastre raffreddanti nei punti in cui si desidera che sia bianca. Il caso più classico è costituito dai cilindri per laminatoio nei quali è necessaria una elevata durezza alla superficie ed una relativamente alta tenacità a cuore. Questi cilindri si colano in conchiglia con una ghisa avente analisi tale da diventare bianca alla velocità di raffreddamento determinata dal metallo della conchiglia, e grigia alla velocità di raffreddamento del cuore. La zona di transizione sarà ghisa trotata.

## **CARATTERISTICHE MECCANICHE**

Le ghise bianche sono caratterizzate da una estrema fragilità determinata dalla presenza dei carburi primari ledeburitici che sono a loro volta la componente principale che determina la durezza elevata della ghisa.

### **Durezza**

Nel caso di ghise bianche perlitiche la durezza può variare da 350 a 400 Hd, mentre per le ghise martensitiche tale durezza può arrivare fino a 600 Hd (alla durezza dei carburi si aggiunge anche quella della matrice martensitica). Nel caso di ghise al cromo e al molibdeno, che hanno i relativi carburi particolarmente duri, le durezze possono essere ancora maggiori.

### **Resistenza**

Nelle ghise perlitiche può variare fra i 15 e i 50 kg/mm<sup>2</sup>; diminuisce con l'aumentare del contenuto di C perché aumentano i carburi, fragilissimi (soprattutto quelli ipereutettici), mentre aumenta con l'aumentare della finezza della perlite. Anche solo tracce di grafite fanno precipitare i valori di resistenza; mentre, data la fragilità della ghisa, piccolissime deformazioni che provocano cricche superficiali generano la rottura prematura della ghisa. È per questo motivo che si cerca di ottenere nei getti una struttura bianca in superficie e grigia a cuore.

### **Allungamento e resilienza**

Sono talmente bassi che normalmente non vengono presi in considerazione.

## **Resistenza all'usura**

La resistenza all'usura per abrasione è una delle caratteristiche che maggiormente viene sfruttata nella ghisa bianca. L'usura è un fenomeno che interessa la superficie del getto ed è funzione di molte caratteristiche del metallo poiché, oltre all'attrito materiale, questo può essere sottoposto contemporaneamente ad altre azioni. La durezza sarà quindi la più importante caratteristica dei getti resistenti all'usura, ma contemporaneamente dovranno essere rispettati precisi limiti di fragilità, di resistenza alla fatica e a compressione, e di idoneità all'urto termico. Queste caratteristiche specifiche possono essere ottenute in misure rispondenti alle necessità che di volta in volta si presentano, agendo sulla composizione chimica e quindi sulla struttura.

Le ghise bianche ledeburitiche con matrice perlitica, conosciute comunemente come "ghise fuse in conchiglia", possono assumere valori di durezza più elevati aumentando il tenore di C in quanto aumentano i carburi ledeburitici i quali sono la fase che conferisce durezza alla ghisa, ma per contro diminuisce la tenacità. Il compromesso che dà migliori risultati di durezza e tenacità è in questo caso una ghisa con tenore di C eutettico.

Una diminuzione della fragilità a parità di durezza è possibile ottenerla con l'aggiunta di elementi leganti (Cr Ni Mn ecc.) che creano una matrice martensitica. Anche in questo caso però un contenuto troppo alto di elementi leganti o una velocità troppo rapida di raffreddamento possono dar luogo ad una struttura con presenza di austenite residua che diminuisce la durezza e la resistenza all'abrasione e agli urti della lega.

## **ANALISI CHIMICA**

L'analisi chimica può prevedere per le ghise bianche sia una composizione senza elementi di lega, sia aggiunte in misura varia di elementi carburogeni tali da garantire l'assenza di grafite. L'eventuale presenza di elementi grafitizzanti (es. Ni) dovrà essere in misura tale da poter essere

neutralizzata da % adatte di elementi carburogeni (es. Cr Mn).

L'analisi chimica delle ghise non legate tenderà ad avere bassi tenori di Si e relativamente alti tenori di Mn. A titolo indicativo l'analisi di una ghisa normale bianca può essere: C 2,9÷3,5 Mn 0,5÷0,8 Si 1,0÷1,5.

Naturalmente per getti a forte spessore il Si dovrà tendere ai limiti inferiori, mentre il Mn a quelli superiori; viceversa per i getti sottili.

Le ghise bianche legate possono essere suddivise in base ai tenori di elementi leganti che le compongono. Possiamo così avere ghise al Cr; ghise al Cr/Ni; ghise al Cr/Mo, che a seconda delle % di elementi presenti, o dei trattamenti subiti, possono assumere aspetto perlitico, martensitico o austenitico.

L'effetto degli elementi su queste leghe può così essere riassunto. Il C e il Si hanno effetto grafitizzante, il Cr e lo S (se non neutralizzato dal Mn) hanno effetto carburante. Il P in % elevate previene le rotture a caldo dei getti conchigliati. Il Cu Ni Mo affinano e tendono a rendere martensitica la struttura, mentre il Mo agisce anche sull'aumento di tenacità e sulla resistenza agli schok termici.

## TRATTAMENTI TERMICI

Il trattamento termico della ghisa bianca non legata presenta la difficoltà insormontabile della tendenza alla grafitizzazione del C. È possibile ricuocere la ghisa bianca per ottenere durezza che permettano una facile lavorabilità, ma già in questo riscaldamento a temperatura subcritica o ad oltre  $A_{c3}$ , a seconda del tipo di ricottura adottato, è inevitabile una parziale grafitizzazione del C. Questa grafitizzazione aumenterà ancora nella fase del successivo riscaldamento per la austenitizzazione della lega da ritemperare. Il risultato di questa tempra sarà quindi una

ghisa con una durezza inferiore a quella da cui si era partiti, e soprattutto non sarà più una ghisa bianca ma una ghisa grigia temprata.

A questa regola si sottraggono solo le ghise bianche con elevate % di Cr ( $> 7\div 8\%$ ), in quanto la presenza di questo elemento con le sue spiccate qualità carburogene impedisce la decomposizione dei carburi e quindi la grafitizzazione del C. Solo nel caso che si tratti di queste ghise è quindi corretto parlare di trattamento termico delle ghise bianche (vedi ghise bianche al Cr e al Cr/Mo) negli altri casi l'unico trattamento al quale possono essere sottoposte è una distensione per tempi notevolmente lunghi a temperature piuttosto basse ( $180\div 200^\circ\text{C}$ )

## GHISE AL NICHEL CROMO (Ni Hard)

Le ghise al Ni Cr con struttura formata da carburi ledeburitici in matrice austenitico martensitica sono commercialmente note col nome di ghise Ni Hard. La loro utilizzazione è legata alle elevate caratteristiche di durezza e di resistenza all'usura.

Il tenore di C sarà al limite superiore quando si richiede la massima durezza a scapito della tenacità, e viceversa. Così per i due tipi di ghisa al Ni Cr riportati a fondo pagina:

Il primo tipo presenta una resistenza alla trazione di  $28\div 42\text{ kg/mm}^2$  ed una durezza di circa 550 Hd (il valore più alto è ottenuto colando in conchiglia), mentre il secondo pur avendo una durezza minore (520 Hd) e una minor resistenza all'usura, ha una resistenza che varia fra  $32\div 53\text{ kg/mm}^2$  ed è meno fragile.

I contenuti degli elementi leganti (Si-Ni-Cr) dovranno essere tali da garantire una struttura eutettica ledeburitica senza tracce di grafite ed una matrice completamente martensitica (si è già visto come tracce di austenite residua diminuiscano notevolmente

ESEMPI DI GHISA  
BIANCA NI-HARD  
(COMPOSIZIONE  
CHIMICA PERCENTUALE)

	C%	Si%	Mn%	Cr%	Ni%	Mo%
Ni Hard 1	3,0-3,6	0,3-0,5	0,3-0,7	1,5-2,6	3,3-4,8	0-1,0
Ni Hard 2	< 2,9	0,3-0,5	0,3-0,7	1,4-2,4	3,3-5,0	0-1,0

**VARIAZIONE  
COMPOSIZIONE CHIMICA  
DELLA GHISA NI-HARD  
IN FUNZIONE DELLO  
SPESSORE DEI GETTI**

GHISA NI HARD												
composizione chimica	colata in sabbia spessore getti in mm					colata in conchiglia spessori getti in mm						
	12	25	50	75	100	12	25	50	75	100		
Carbonio			3,6	3,2				3,6	3,2			
Silicio	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5	0,3
Manganese			0,3	0,6				0,3	0,6			
Fosforo			< 0,40					< 0,40				
Zolfo			< 0,15					< 0,15				
Nichel	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	3,5	3,8	4,1	4,4	4,7	5,0
Cromo	1,5	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2
Durezza Hd	650-550					725-600						
Carico rottura R kg/mm <sup>2</sup>	34-28					47-31						

la resistenza e la durezza e aumentino la fragilità). La tabella in alto, tratta dalle pubblicazioni "il nichel", dà una idea di come si debba agire per ottenere tali risultati: il trattamento termico di queste ghise si riduce in genere ad un riscaldamento lento e molto lungo a temperatura di 200 ÷ 250° C per operare una distensione del getto, atta ad eliminare le tensioni create durante il raffreddamento della ghisa nella staffa o nella conchiglia. Qualora si desideri eliminare l'austenite residua si può operare un riscaldamento a temperatura di 400 ÷ 450°, che permette all'austenite di trasformarsi (vedi curve TTT). Al successivo raffreddamento è consigliabile far seguire di nuovo una distensione a 200 ÷ 250° per eliminare le tensioni che si sono create con la trasformazione austenite bainite (trasformazione che comporta un aumento di volume).

L'eliminazione della austenite è possibile anche con il trattamento sotto zero, fatto però possibilmente nelle prime ore di distaffamento del getto al fine di evitare che l'austenite si stabilizzi e stenti poi a trasformarsi.

Si tratta di raffreddare la ghisa a meno 50° ÷ 70° C fino a raggiungere il punto Mf della trasformazione martensitica, punto che nelle leghe fortemente legate è sempre a temperature molto basse. Si ottiene in questo caso una trasformazione martensitica che genera quindi la massima durezza. Anche in questo caso è necessario un successivo rinvenimento di distensione.

I trattamenti termici a temperatura elevata non sono consigliabili per queste ghise

perché tendono a dare origine a grafite con forte effetto debilitante per le caratteristiche meccaniche.

Un altro tipo di ghise Ni Hard contempla nella composizione chimica un tenore decisamente più elevato di Ni e Cr (C 2,6 ÷ 3,2 Si 1,8 ÷ 2 Mn 0,4 ÷ 0,6 Cr 8 ÷ 9 Ni 5 ÷ 6,5 Mo 0 ÷ 0,5). La struttura in questo caso è molto diversa dalle precedenti ghise ledeburitiche, in quanto la presenza massiccia di cromo lega quasi totalmente il C sotto forma di carburi di Cr misti con Fe Mn ecc. Questi carburi, chiamati carburi complessi, rispondono generalmente alla composizione chimica che si può esprimere genericamente con la formula M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, dove M sta ad indicare i vari elementi carburogeni che possono entrare a far parte del carburo. A differenza della ledeburite (il cui carburo potremmo ora esprimere con la formula chimica M<sub>3</sub>C), questi carburi non creano dei reticoli continui che determinano la fragilità della ghisa ledeburitica e quindi le ghise sono più tenaci. L'elevato contenuto in Cr di questi carburi li rende poi estremamente stabili, per cui è possibile assoggettare la ghisa ai più svariati cicli termici senza provocare la grafitizzazione del C, e, vista la particolare relativa tenacità, senza eccessivi rischi di rotture. Nel caso della ghisa citata, la composizione chimica è stata studiata in modo da dare origine a una struttura prevalentemente martensitica durante il raffreddamento di solidificazione. È quasi inevitabile però che anche in questo caso si ritrovi un po' di austenite residua nel getto finito a causa dell'alto con-

tenuto in Ni (durezza della struttura greggia di fusione 550 Hd).

L'eliminazione in questo caso dell'austenite si può ottenere riscaldando il pezzo a 750-800°, portandolo cioè oltre AC<sub>1</sub> e rendendolo completamente austenitico, facendo poi seguire un raffreddamento lento (forno od aria calma) tale da permettere la trasformazione dell'austenite in martensite. Con questo trattamento si ottiene un aumento di durezza (l'austenite è molto più tenera della martensite) e di tenacità (durezza della ghisa dopo questo trattamento: 600 Hd). Se è relativamente semplice ottenere una durezza elevata su questa ghisa è però difficilissimo, per le sue caratteristiche autotemperanti e per la presenza di carburi di cromo insolubili a bassa temperatura e molto stabili, ottenere una struttura tenera tale da permetterne la lavorabilità alle macchine utensili. È questo uno dei grossi limiti all'impiego di questi tipi di ghise.

### **GHISA al Cr e al CrMo**

Si è già parlato a proposito delle Ni Hard del comportamento del Cr in alte % nelle ghise: essendo carburogeno, tende a legare completamente il C sotto forma di carburi complessi, le cui composizioni chimiche possono essere definite simbolicamente M<sub>3</sub>C; M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> e M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>; la parte restante entra nella matrice della ghisa agendo come elemento indurente ed esaltante le proprietà inossidabili. Il Mo si trova nei carburi (M<sub>3</sub>C e M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>) e nella matrice; ma è in quest'ultima che esercita la sua maggiore influenza, garantendo strutture martensitiche esenti da perlite anche in getti a forte spessore. Il C in queste ghise dovrà essere contenuto nei limiti di 2 ÷ 4,3%, tenendo conto che la resistenza all'abrasione e la durezza aumenta con il contenuto di C. Per contro la temprabilità diminuisce con l'aumentare del C, per cui in getti a forte spessore con elevato contenuto di C è necessario aumentare la quantità di Cr Mo e a volte ricorrere ad aggiunte di Ni o Cu per ottenere una struttura martensitica con semplice raffreddamento all'aria. Il vantaggio enorme di queste ghise rispetto alle preceden-

ti (Ni Hard) consiste nella possibilità di assoggettarle ai trattamenti termici senza timore di grafitizzazione del C e nella possibilità di ottenere con cicli appropriati di ricottura strutture perlitiche relativamente facili da lavorare all'utensile.

È quindi possibile ottenere in queste ghise tutte le strutture desiderate: austenitica, martensitica, bainitica, perlitica. Contemporaneamente si può con sicurezza affermare che, pur essendo le più costose fra le ghise bianche, sono anche quelle che danno i migliori risultati di tenacità e resistenza all'abrasione.

### **Ghise al 12% di Cr**

La prima delle ghise al Cr-Mo è quella col più basso contenuto di Cr (12%) e corrisponde all'analisi chimica media seguente: C = 2,0 ÷ 3,5 Si < 0,8 Mn = 0,5 ÷ 1 Cr = 11 ÷ 14 Ni < 2 Mo < 1,5 Cu < 1,2.

Coi tenori minimi di C (2% ~) i getti sottili pochi mm diventano martensitici per semplice raffreddamento all'aria senza necessità di presenza di elementi aggiuntivi quali Ni-Cu-Mo; per getti più consistenti o per tenori di C più elevati, è necessaria l'aggiunta di elementi che aumentino la temprabilità oppure si deve ricorrere a raffreddamenti più drastici (olio) con i rischi di deformazioni e rotture che comportano. La ricottura di lavorabilità si effettua riscaldando molto lentamente i getti fino a 850°, mantenendoli 3 ÷ 4 h in temperatura e facendo seguire un raffreddamento lentissimo in forno. Si ottiene una struttura perlitica con carburi a forma tendenzialmente sferoidale (probabile composizione chimica M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>) in matrice ferritica. La durezza che si ottiene si aggira su 400 Hd. La tempra anche in questo caso presuppone, almeno in linea teorica, la possibilità di rendere completamente austenitica la struttura con la dissoluzione completa dei carburi. Questa operazione è particolarmente difficile per la notoria stabilità e indissolubilità dei carburi di Cr. Infatti si devono raggiungere temperature di circa soli 50° inferiori alla linea solidus per ottenere una soluzione completa: quindi per una lega con rapporto Cr/C = 3,5 questa temperatura sarà di

1125° C e per una lega con rapporto Cr/C = 14,5 sarà di 1200° C. È evidente come su scala industriale sia difficile raggiungere questi limiti, per cui si ricorrerà ad una austenitizzazione a temperatura inferiore che lascerà dei carburi indisciolti. In pratica quindi si adotterà una temp. di austenitizzazione di 950 ÷ 970°, che dà i migliori risultati di durezza e di tenacità (durezza dopo tempra 600 Hd). Temperature superiori infatti, portando in soluzione nell'austenite maggiori quantità di C e di elementi leganti, aumenteranno la temprabilità della lega con conseguente presenza di austenite non trasformata nella martensite della struttura temprata. Mentre temperature più basse di austenitizzazione, non sciogliendo C ed elementi di lega a sufficienza, daranno dopo tempra strutture martensitiche con durezza minori a causa del basso contenuto di C della martensite stessa.

Queste leghe temprate da temperature molto alte, e quindi con alti tenori di austenite residua, possono essere utilizzate in casi particolari nei quali i getti devono conservare una elevata durezza anche a temperature piuttosto alte (fino a 500 ÷ 550°). Infatti la diminuzione di durezza dovuta all'aumento di temperatura viene compensata dalla precipitazione dei carburi di Cr dalla austenite residua che si decompone a queste temperature.

### **Ghise al 15% Cr e Mo**

(15-3 e 15-2-1)

La seconda ghisa al cromo contiene circa 15% di Cr e può arrivare fino al 3% di Mo; in questo caso viene commercialmente chiamata ghisa ad alto cromo 15-3; oppure può contenere il 2% di Mo e lo 0,5-1,2% di Cu e Ni ed allora viene chiamata ghisa ad alto cromo 15-2-1.

L'analisi media è la seguente:

C 2,3 ÷ 2,6 Si < 0,8 Mn 0,5 ÷ 0,9 Cr 14 ÷ 16 Ni < 1,2 Mo 2 ÷ 3 Cu < 1,2.

Le ghise al 15-3 (quindi senza aggiunte di Cu o Ni) sono usate per pezzi con spessore fino a 120 mm; gregge di fusione presentano una struttura tendenzialmente perlitica, che non raggiungendo alte durezza

(circa 450 Hd) evita la possibilità di rotture dei getti nelle staffe di colata. D'altronde è possibile assoggettarla a un ciclo di ricottura che ne garantisce la lavorabilità e l'omogeneità creando una struttura perlitica (riscaldamento a 850° circa per 4 h. con raffreddamento in forno: durezza Hd 400). I pezzi possono essere assoggettati alla tempra, dopo l'eventuale ricottura di lavorabilità, con riscaldamento a temperatura di circa 970° e raffreddamento all'aria. La struttura ottenuta è quasi completamente martensitica (durezza circa 600 Hd). Per pezzi con spessori maggiori di 120 mm la struttura ottenibile con tempra all'aria non è più completamente martensitica ma presenta zone perlitiche, per cui è necessario ricorrere ad aggiunte di Ni o Cu che ne aumentino la temprabilità. Le ghise al 15-2-1 (al Ni o Cu) sopperiscono a questa necessità. La loro struttura grezza di fusione non sarà più quasi totalmente perlitica, ma specialmente le zone sottili saranno ricche di austenite. La ricottura di lavorabilità sarà quindi più difficoltosa e la permanenza in temperatura dovrà essere più lunga e seguita da un raffreddamento più lento che non nel tipo 15-3. Non solo, ma al trattamento di tempra successivo le parti sottili dei getti tenderanno a diventare austenitiche, con tutti gli inconvenienti che tale struttura comporta (minor durezza, maggiore fragilità). Naturalmente tale austenite residua è eliminabile con un trattamento sotto zero (—55° ÷ —70° C) seguito da una distensione (180 ÷ 200° C). Risulta evidente però come l'aggiunta di Ni o Cu debba essere fatta con parsimonia, nella misura strettamente necessaria per evitare strutture con presenza di perlite.

### **Ghise al 20% di Cr e Mo**

(20-2-1)

L'analisi media di queste ghise è: C 2,3-2,9 Si < 0,8 Mn 0,5 ÷ 0,9 Cr 18 ÷ 21 Ni < 1,2 Mo 1,4 ÷ 2 Cu < 1,2. Commercialmente vengono chiamate ghise ad alto cromo 20-2-1 per la presenza di circa 2% di Mo e 1% di Cu o Ni. L'analisi chimica più ricca delle precedenti permette di ottenere strutture austenitiche già al raffreddamento nella staffa

di getti con spessore fino a 100 mm. La ricottura è particolarmente difficile e non permette di ottenere durezza di molto inferiori a 420 Hd pur con raffreddamenti molto lenti. La tempra successiva può essere effettuata dopo austenitizzazione a  $950 \div 970^\circ$ , con raffreddamenti molto lenti (in forno) anche per spessori molto grandi. È quindi particolarmente indicata per colare getti molto grandi e con sezioni molto varie, che al raffreddamento di tempra all'aria potrebbero dare origine a rotture del pezzo. La durezza con struttura martensitica è di circa 600 Hd. La maggior parte delle volte quindi i getti colati con questa ghisa vengono utilizzati, per non aumentare le possibilità di rotture, greggi di fusione. La struttura di tali getti, martensitica-austenitica, presenta una durezza di circa 450 Hd e tende ad aumentare durante l'esercizio per effetto dell'indurimento provocato dalla trasformazione della austenite.

### Ghise al 27% di Cr

Questa ghisa presenta la seguente analisi media: C  $2,3 \div 2,9$  Si  $< 1,5$  Mn  $0,5 \div 1,5$  Cr  $24 \div 28$  Ni  $< 1,2$  Mo  $< 0,6$ .

Fra le ghise al Cr è quella che presenta la minor resistenza all'usura ed anche la minor durezza (allo stato temp. 550 Hd). La seguente tabella fornisce valori comparativi di resistenza all'abrasione rispetto ad una ghisa con 1% di Cr e 3,22% C.

Dalla tabella risulta evidente la superiorità delle ghise al Cr-Mo.

La ghisa al Cr presenta comunque una buona temprabilità, che può essere aumentata con piccole aggiunte di Mo o di Ni.

TIPO GHISA	Cr/C	RESISTENZA ALL'ABRASIONE
15 Cr 3Mo	4,68	2,85
13 Cr	5,94	1,75
27 Cr	11,05	1,40

---

# INDICE

---

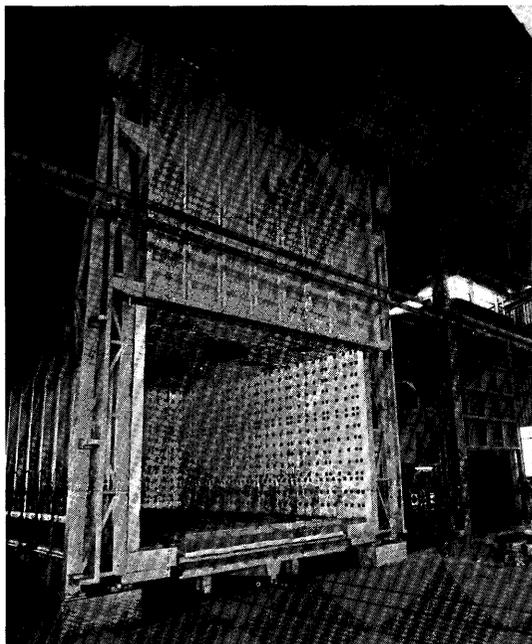
Presentazione . . . . .	pag.	7
Prefazione . . . . .	»	9
<b>DEFINIZIONE DI GHISA - CLASSIFICAZIONE CHIMICA DELLE GHISE . . . . .</b>	»	11
<b>CLASSIFICAZIONE STRUTTURALE DELLE GHISE . . . . .</b>	»	12
<b>DIAGRAMMA FERRO CARBONIO . . . . .</b>	»	12
<b>INFLUENZA DEGLI ELEMENTI LEGANTI SULLA STRUTTURA . . . . .</b>	»	17
<b>SILICIO . . . . .</b>	»	17
<b>MANGANESE - FOSFORO . . . . .</b>	»	18
<b>SOLFO - NICHEL . . . . .</b>	»	19
<b>CROMO - MOLIBDENO . . . . .</b>	»	20
<b>VANADIO - RAME . . . . .</b>	»	21
<b>ALLUMINIO - MAGNESIO - CERIO - TELLURIO - BIS- MUTO - TITANIO - STAGNO - BORO . . . . .</b>	»	22
<b>GHISE DA FONDERIA . . . . .</b>	»	23
Carbonio equivalente e grado di saturazione eutettica . . . . .	»	25
<b>GHISE GRIGE PER GETTI . . . . .</b>	»	27
Struttura - Struttura primaria delle ghise grige . . . . .	»	27
Analisi chimica - Caratteristiche meccaniche . . . . .	»	28
Prove meccaniche - Resistenza alla trazione . . . . .	»	33
Durezza Brinell - Modulo di elasticità o di Young - Resilienza - Limite di fatica a flessione rotante - Capacità di smorzamento delle vibrazioni	»	35
Trattamento termico delle ghise grige da fonderia - Trasforma- zioni strutturali al riscaldamento e al raffreddamento . . . . .	»	36
Trasformazioni al riscaldamento della martensite . . . . .	»	40
Trasformazioni isotermeche dell'austenite . . . . .	»	41
Attitudine alla tempra . . . . .	»	44
Invecchiamento o distensione o stabilizzazione . . . . .	»	46
Ricottura . . . . .	»	47
Normalizzazione - Tempra . . . . .	»	49
Tempra di ghise ferritiche . . . . .	»	50

Raffreddamento di tempra . . . . .	<b>pag. 51</b>
Tempra isotermica o martempering - Bonifica - Austempering . . . . .	» 52
Tempra ad induzione e fiammatura . . . . .	» 53
Metallurgia della tempra ad induzione . . . . .	» 54
Misure della durezza dello strato temprato - Deformazioni - Rotture - Controllo profondità di tempra - Detensionamento. . . . .	» 57
Nitrurazione . . . . .	» 58
Sufinizzazione o solfonitrurazione - Nitrurazione morbida . . . . .	» 59
<b>GHISA GRIGIA PER IMPIEGHI AUTOMOBILI- STICI . . . . .</b>	<b>» 60</b>
<b>GHISE SFEROIDALI (O DUTTILI O NODULARI)</b> . . . . .	<b>» 62</b>
Fabbricazione - Caratteristiche strutturali . . . . .	» 62
Resistenza al calore e alla corrosione . . . . .	» 64
Caratteristiche meccaniche . . . . .	» 65
Trattamenti termici . . . . .	» 66
Vantaggi delle ghise sferoidali . . . . .	» 69
<b>GHISA MEEHANITE . . . . .</b>	<b>» 70</b>
Ghise meccaniche - Ghise resistenti al calore . . . . .	» 70
Ghise resistenti all'usura - Trattamenti termici delle ghise meehaniti . . . . .	» 71
Considerazioni sulle meehaniti . . . . .	» 72
Ghise meehaniti sferoidali . . . . .	» 73
<b>GHISE MALLEABILI . . . . .</b>	<b>» 75</b>
Ghisa malleabile a cuore bianco . . . . .	» 76
Ghisa malleabile a cuore nero o americana . . . . .	» 78
Ghisa malleabile perlitica . . . . .	» 81
<b>GHISE ACICULARI . . . . .</b>	<b>» 84</b>
Trattamenti termici - Strutture aciculari per trattamento termico . . . . .	» 85
<b>GHISE RESISTENTI AL CALORE E ALLA COR- ROSIONE . . . . .</b>	<b>» 86</b>
Aumento di volume - Scorrimento viscoso - Ossidazione super- ficiale del pezzo . . . . .	» 87
Corrosione . . . . .	» 88
Ghise per impieghi a bassa temperatura . . . . .	» 90
<b>GHISE BIANCHE PER GETTI . . . . .</b>	<b>» 92</b>
Struttura . . . . .	» 92
Caratteristiche meccaniche - Analisi chimica . . . . .	» 93
Trattamenti termici - Ghise al nichel cromo (Ni-Hard) . . . . .	» 94
Ghise al Cromo e al Cromo-Molibdeno . . . . .	» 96
Indice . . . . .	» 99

...da meno 95° a più 1400°C



**costruzioni termomeccaniche  
forni industriali  
Torino**

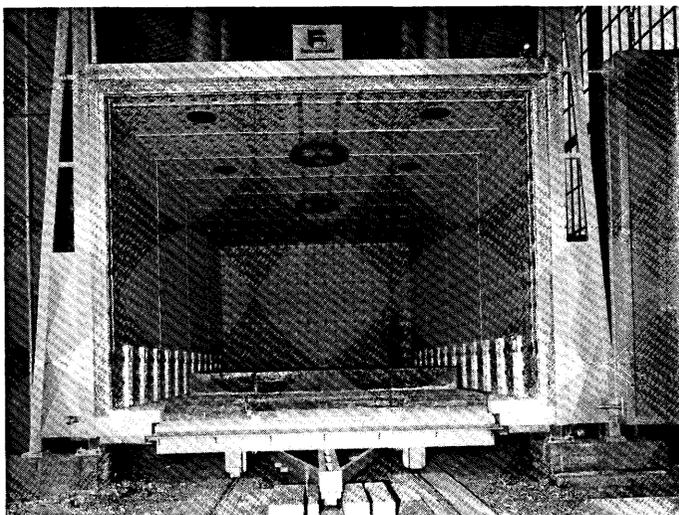


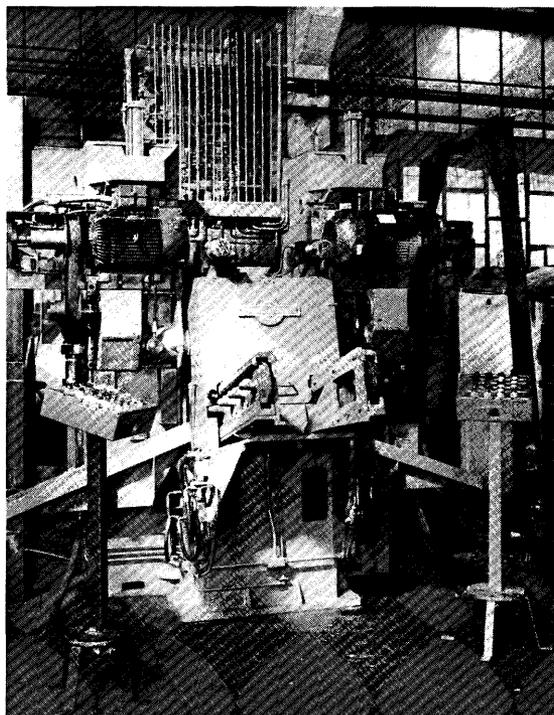
Il nostro programma di fabbricazione comprende:

- forni per trattamenti termici nelle esecuzioni a pozzo, a camera, in linea, continui o discontinui;
- generatori d'atmosfera controllata;
- impianti sottozero per la trasformazione dell'austenite, per le esigenze del laboratorio, dell'officina e della grossa industria.

Ci troverete sui principali elenchi telefonici.

**FORNO A CARRO** (tra i maggiori a livello europeo) destinati al trattamento dei metalli. Capacità di carico 50 t. e oltre. Temperatura massima 1100°C. Riscaldamento a mezzo bruciatori di gas a fiamma modulante continua. Ciclo termico con programma impostato su cammes circolari. Di nuovissima concezione, sono realizzati con un rivestimento in fibra ceramica che presenta un peso unitario appena il 5% di uno tradizionale; la bassissima inerzia termica che ne consegue, permette elevate velocità di riscaldamento, cicli termici pendolari e isotermici, con un forte risparmio di energia.



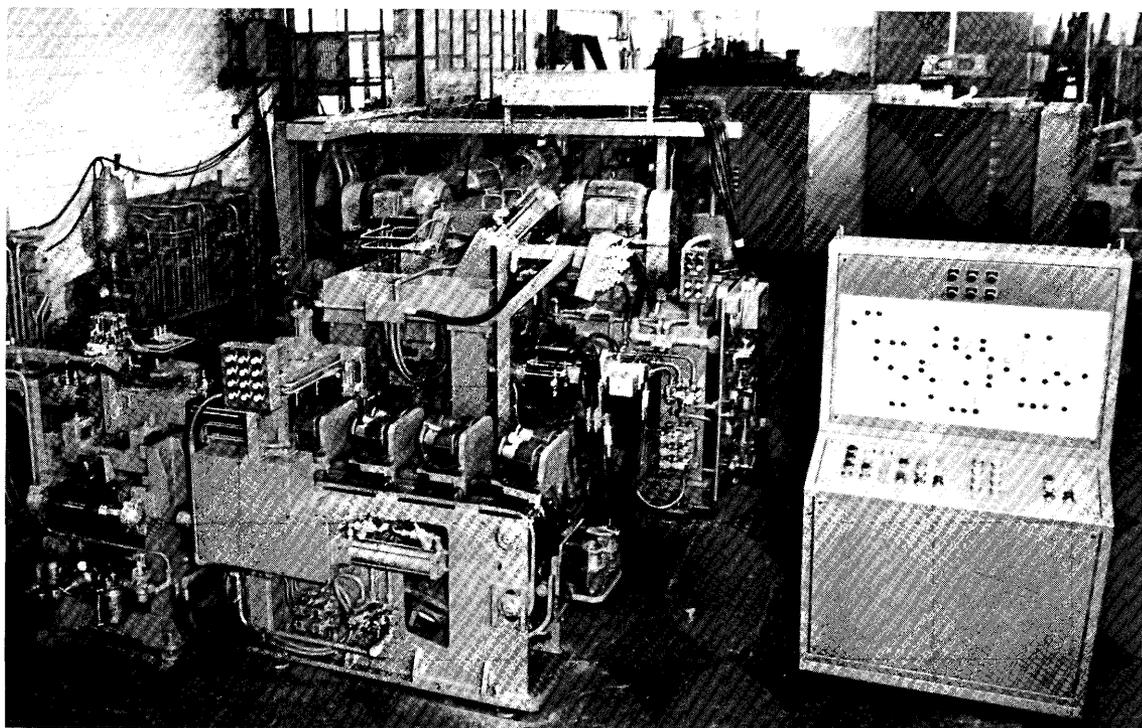
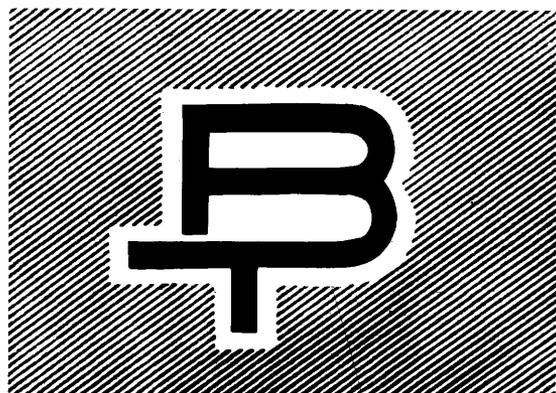


**TRONCATRICE MATEROZZE** - Elemento: tamburo freno. Produzione: 550 pezzi/ora.

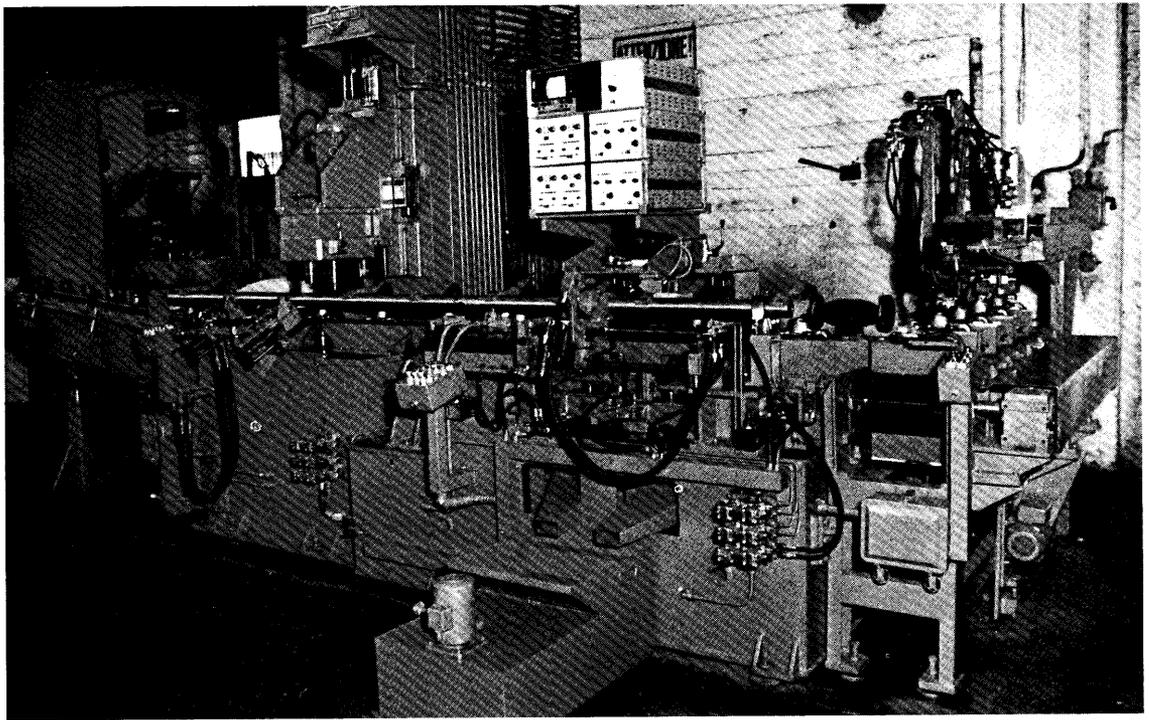
# BONARDO & TUNINETTI

**MACCHINE E ATTREZZATURE  
PER FONDERIA**

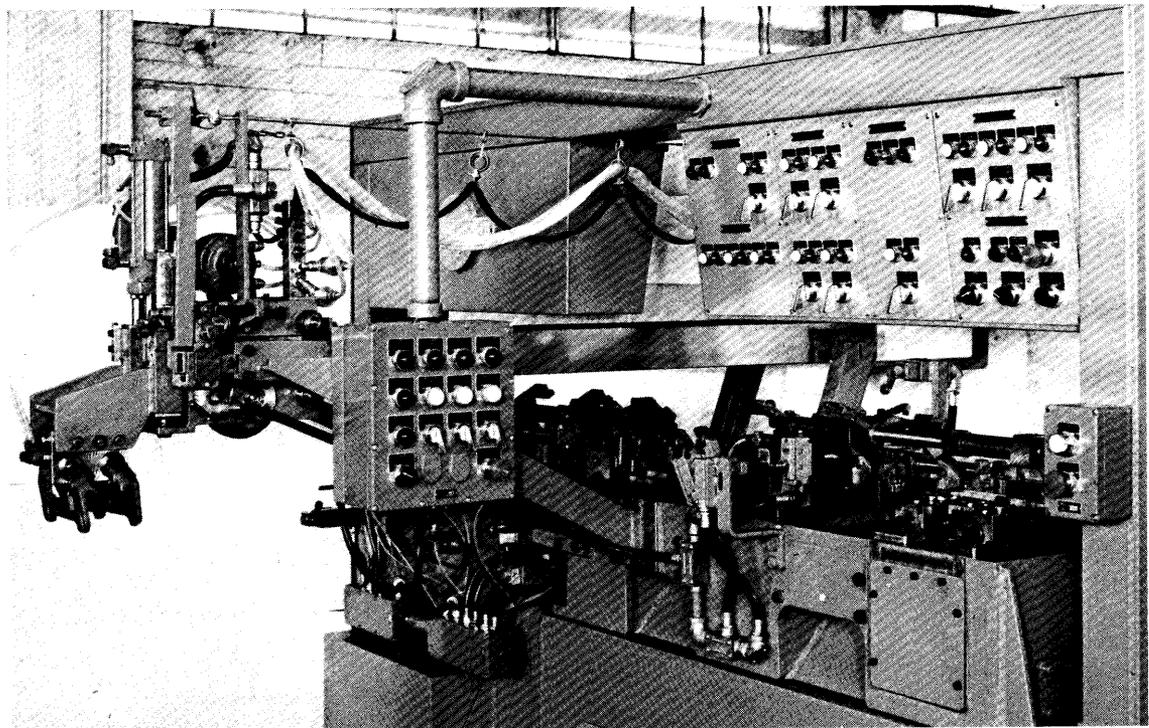
Via Aosta, 21 - Cascine Vica - 10090 TORINO  
Tel. 958.95.95 - 958.65.82



**TRASFERTA PER FINITURA "CANNE ALETTATE"**. Operazioni automatiche. Smaterozzatura - Molatura - Broccatura. Produzione: 550 pezzi/ora.



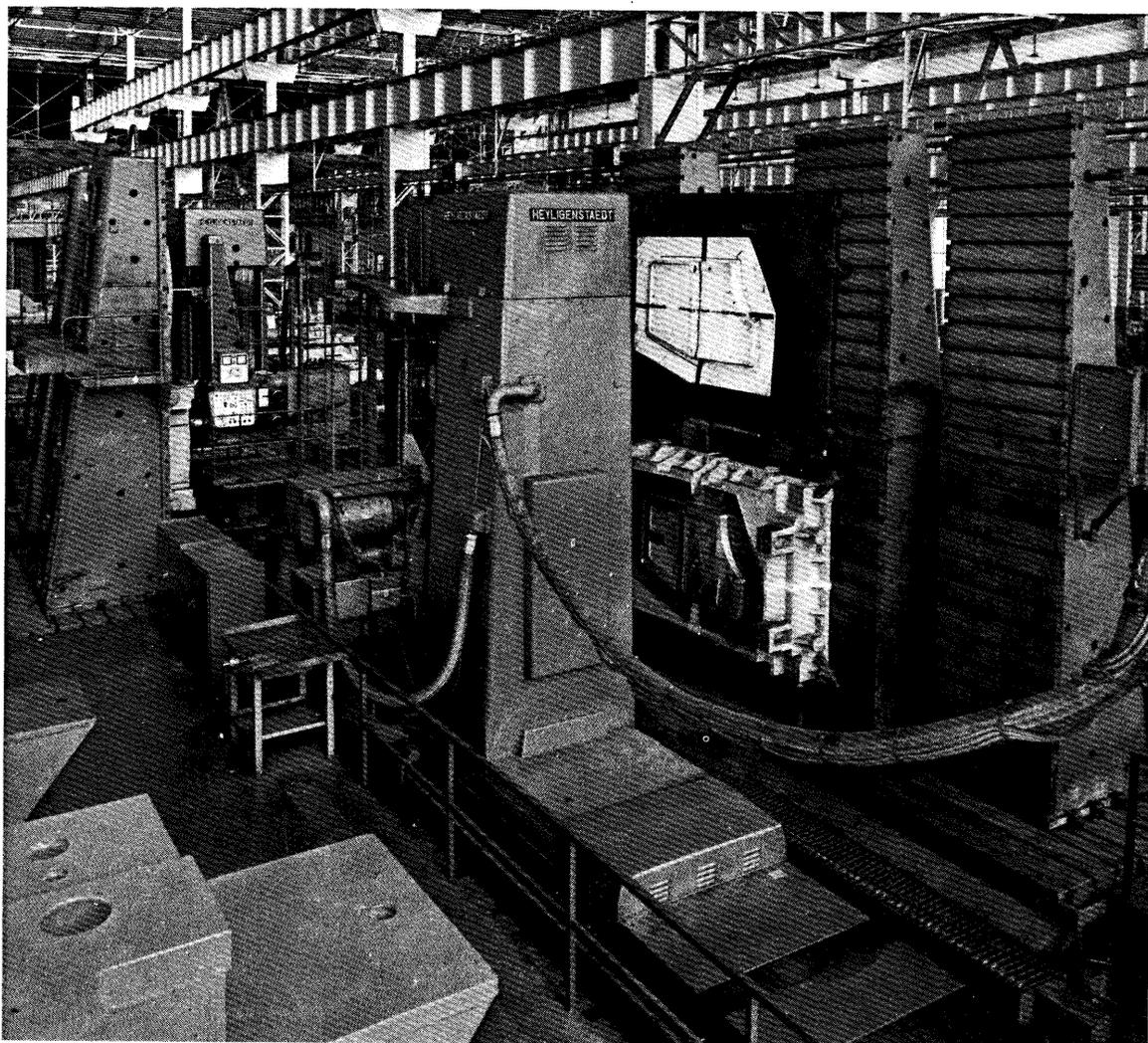
**LINEA AUTOMATICA DI CONTROLLO:** Steroidizzazione con ultrasuoni e impronta durezza con lavorazione della superficie per impronta. Caricamento e scaricamento automatico. Produzione: 360 pezzi/ora.



**LINEA CONTROLLO DIMENSIONALE AUTOMATICO** - Elemento: staffe sostegno pinza freno. Produzione 500 pezzi/ora.



## DAL PROGETTO ALLA REALIZZAZIONE



- PER ELEMENTI CARROZZERIA: STAMPI PICCOLI, MEDI, GRANDI - PUNZONATRICI OLEODINAMICHE E PNEUMATICHE - MASCHERE DI ASSEMBLAGGIO - CALIBRI DI CONTROLLO
- STAMPI PER LAMIERE IN GENERE CON GARANZIA DI STAMPAGGIO AVANSERIE
- ATTREZZATURE ■ MACCHINE SPECIALI ■ TRANSFERTS

## INDUSTRIE MECCANICHE PRECISIONE E STAMPAGGI

10093 COLLEGNO (TORINO) ITALY - VIA MANZONI, 40 - TELEFONI 724.827 - 712.012 (8 LINEE) - TELEX: 21351 TO IMPES



**INDUSTRIA METALLICA - CARPENTERIA - FERRO**

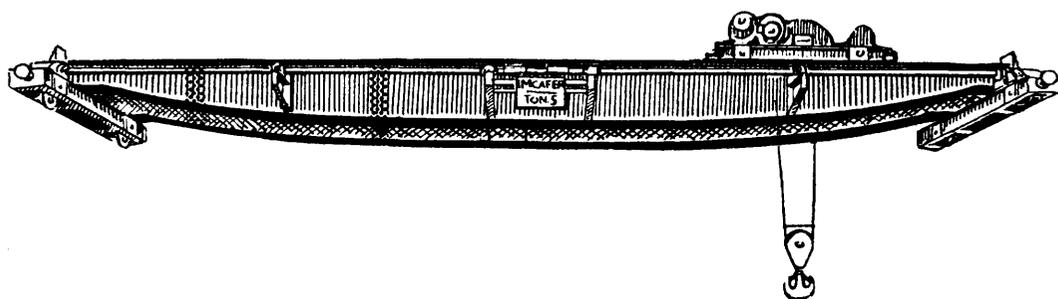
---

**COSTRUZIONI IN CARPENTERIA PESANTE  
E BASAMENTI IN ELETTROSALDATI**

---

**STRUTTURE METALLICHE  
CARPENTERIA IN GENERE**

**COSTRUZIONI GRU**

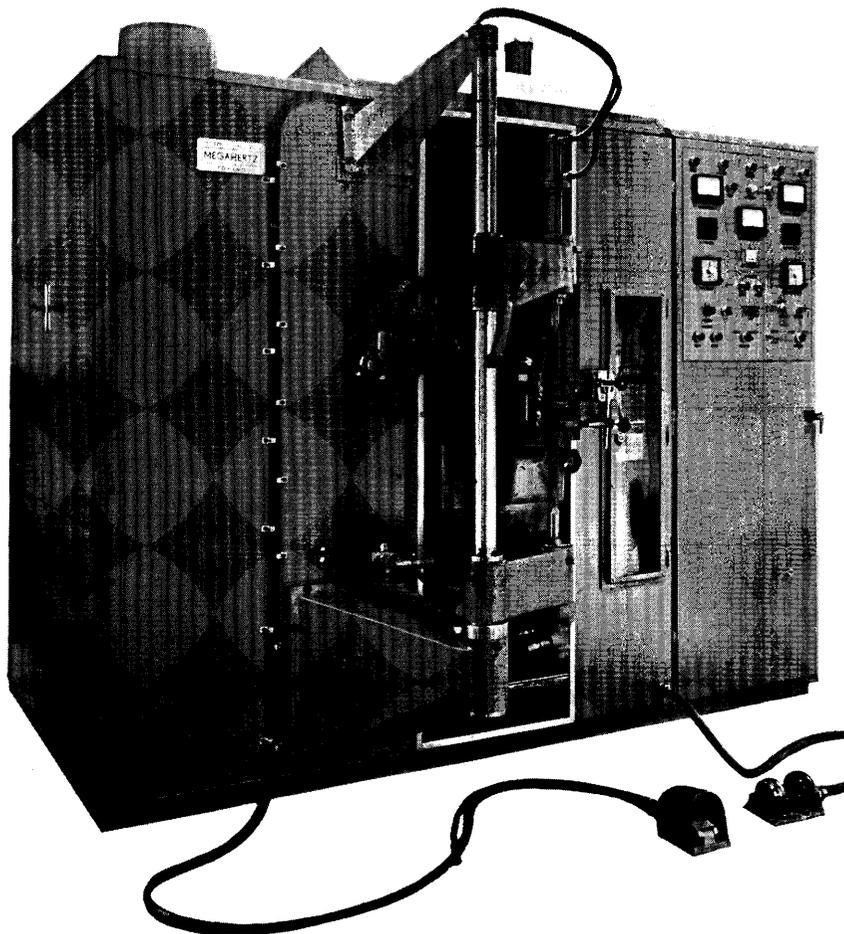


**SEDE E STABILIMENTO:**

**Strada Gay 3 - Telefono (011) 906 41 58 - 10045 PIOSSASCO (Torino)**

# MEGAHERTZ

IMPIANTI COMPLETI  
PER TEMPRA  
RINVENIMENTO FUCINATURA BRASATURA  
AD ALTA E MEDIA FREQUENZA



I TECNICI DELLA "MEGAHERTZ" SONO A DISPOSIZIONE DELLA CLIENTELA  
PER LO STUDIO, LA PROGETTAZIONE E LA REALIZZAZIONE DI OGNI TIPO  
DI IMPIANTO INERENTE A QUESTE LAVORAZIONI  
LA "MEGAHERTZ" GARANTISCE PER LA SUA TRADIZIONE:  
PREZZO QUALITA' E CONSEGNA

ELETTRONICA **MEGAHERTZ** INDUSTRIALE  
Via G. Barbera 4 - 10135 TORINO - Telefoni 34 53 84 / 34 35 75

# **FERIOLI e GIANOTTI**

## **TUTTI I TRATTAMENTI TERMICI DEI METALLI**

**NORMALIZZAZIONI RICOTTURE BONIFICHE PEZZI  
FINO A 50 TONNELLATE**

**FORNO CONTINUO PER RICOTTURE ISOTERMICHE  
E BONIFICHE DA 2000 kg/ORA**

**TEMPRA INDUZIONE  
ALTA MEDIA BASSA FREQUENZA  
(Tondi fino a 500 mm. di diametro e lunghezza fino a 10 m.)**

**CONTROLLI NON DISTRUTTIVI**

**10096 LEUMANN (Rivoli) - Via Vajont 88 - telefono (011) 9587645**

