

1

Leghe ferrose

1.1 Generalità

Le leghe ferrose sono quelle in cui il ferro è il principale componente. Gli acciai sono le leghe più importanti e sono costituiti da ferro, piccole quantità di carbonio ($< 2\%$) e, molte volte, da altri elementi. In quest'ultimo caso si parla di elementi alliganti e i relativi acciai sono definiti legati. Le ghise sono altre leghe ferro-carbonio: rispetto agli acciai hanno un contenuto di carbonio superiore, in genere dal 2 al 4,6%.

Il gran consumo di acciaio e ghisa è dovuto a tre motivi fondamentali:

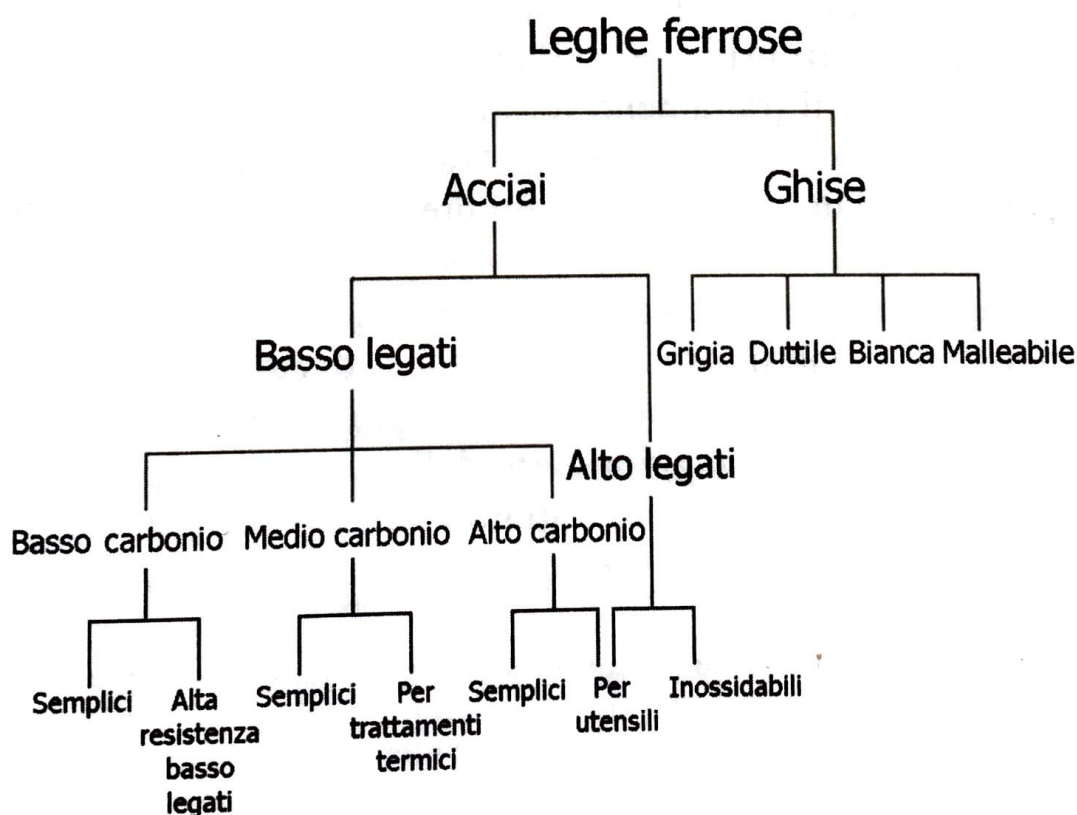


Figura 1.1 Classificazione delle leghe ferro-carbonio.

- i composti contenenti ferro sono abbondanti nella crosta terrestre;
- il ferro e le leghe sono prodotti relativamente economici;
- la facilità con la quale se ne può variare la microstruttura, e quindi le caratteristiche meccaniche, in funzione del contenuto di carbonio e di trattamenti termici.

Lo svantaggio di quasi tutte le leghe ferrose è la loro predisposizione a corrodarsi.

La Figura 1.1 mostra uno schema di classificazione delle varie leghe Fe-C, d'interesse nell'industria edile.

1.2 Diagramma di stato ferro-carbonio

Le proprietà fisiche e tecnologiche delle leghe dipendono dal tipo e dalle caratteristiche delle fasi costituenti. La loro caratterizzazione è quindi essenziale per stabilire il comportamento delle leghe.

L'esistenza di forme cristalline differenti, nelle quali il C è solubile nel Fe parzialmente, conduce a una varietà notevole di microstrutture. I vari tipi di cristalli che costituiscono queste leghe, al variare della temperatura e del contenuto di C, sono indicati graficamente nel diagramma Fe-C. La parte di questo diagramma di maggiore interesse è quella che va dal ferro puro al composto *carburo di ferro* (detto anche *cementite*) Fe_3C (Figura 1.2)¹. Questo indica, in funzione della *temperatura* e della *composizione* i campi di esistenza delle varie fasi cristalline², in condizioni di equilibrio termodinamico. Nelle leghe Fe-C si possono formare anche altre fasi in condizioni di non equilibrio che, nella pratica industriale, possono essere ottenute con opportuni trattamenti termici.

Nel diagramma sono riportate sulle ordinate le temperature e sulle ascisse le percentuali dei due componenti presenti nel sistema (Fe e C). Nel diagramma Fe-C si usa far riferimento alle percentuali del solo C.

Questo diagramma di stato non è un vero diagramma di equilibrio, poiché il composto Fe_3C che si forma non è una fase di equilibrio: in particolari condizioni, Fe_3C si decompone nelle fasi più stabili *ferro* e *carbonio* (grafite). Tuttavia, per la maggior parte delle condizioni pratiche, Fe_3C è molto stabile e può quindi essere trattato come una fase di equilibrio.

Si osserva anzitutto che il Fe puro, rappresentato sulla verticale in cor-

¹ Diagrammi di stato: questi diagrammi sono ottenuti sperimentalmente mediante rilevazioni, in genere termiche, effettuate su varie miscele dei componenti in studio, raffreddate (o più di rado riscaldate) molto lentamente. Sulle ascisse è riportato il percento di uno dei due componenti la lega, essendo l'altro definito per differenza a 100. Sulle ordinate le temperature alle quali si ha la trasformazione delle fasi presenti.

² Fase: in un sistema liquido o solido dicesi fase ogni parte che è chimicamente e fisicamente omogenea e separata dalle altre da una superficie definita.

rispondenza dell'ascissa 0 ($C = 0$), al di sotto della temperatura di fusione, cambia due volte la sua struttura reticolare³. La struttura cristallina cubica a corpo centrato⁴, che è stabile a partire da 1536 °C, si trasforma nella cubica a facce centrate⁵ a 1400 °C, per ricomparire al di sotto di 910 °C, come è schematizzato nella Figura 1.2.

Al variare della concentrazione in C e/o della temperatura, dal diagramma si nota che varia il limite di solubilità del C nel Fe, ottenendosi soluzioni solide diverse⁶.

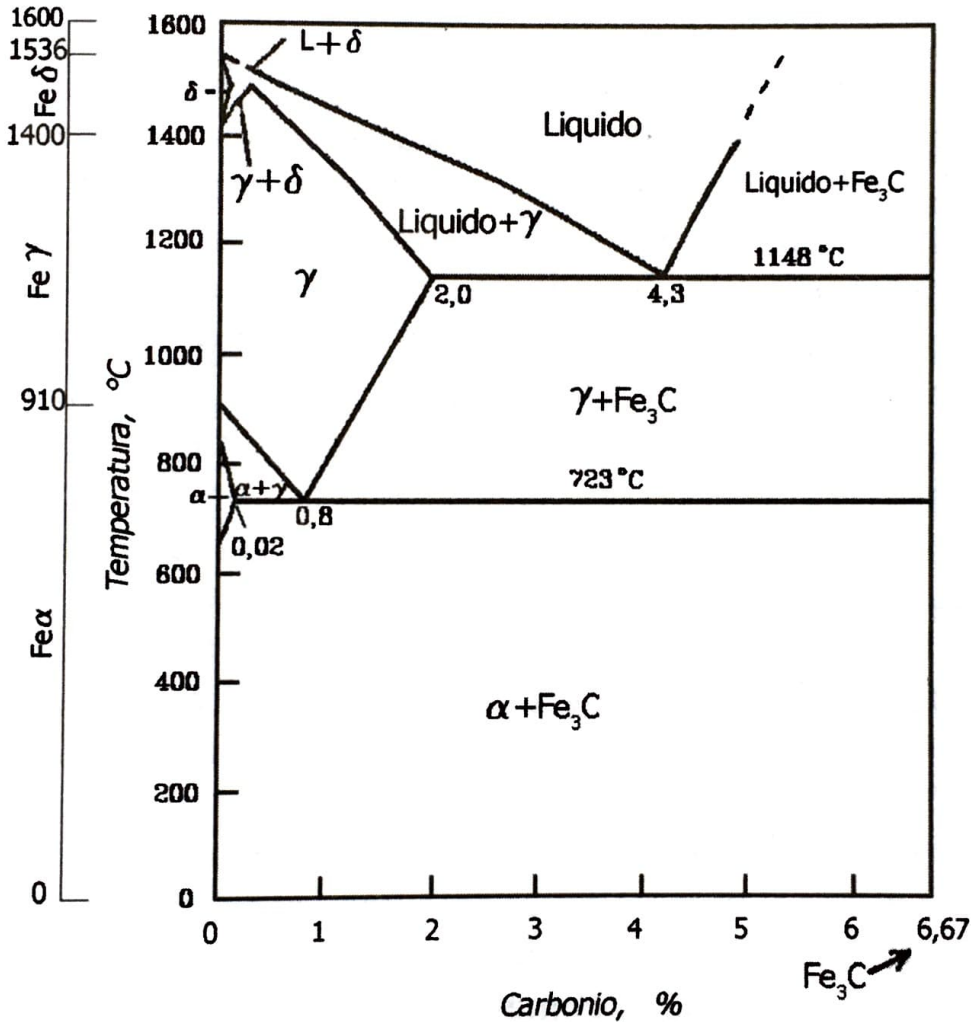


Figura 1.2 Diagramma di stato ferro-carburo di ferro (Fe₃C).

³ Reticolo cristallino: quando un metallo solidifica, i suoi atomi si dispongono in modo regolare, secondo una propria geometria caratteristica, costituendo un reticolo cristallino. Ogni punto del reticolo si trova in posizione equivalente a quella degli altri. Ad ogni punto del reticolo può essere associato un atomo.

⁴ Struttura cubica a corpo centrato: indicata in genere CCC. Gli atomi di Fe occupano posizioni poste sia ai vertici sia al centro di un cubo.

⁵ Struttura cubica a facce centrate: indicata in genere FCC. Gli atomi di Fe occupano posizioni poste ai vertici e al centro di ogni faccia del cubo.

⁶ Soluzione solida interstiziale: gli atomi del soluto si collocano negli interstizi fra gli atomi del solvente. Nel nostro caso del Fe. Nella soluzione solida sostituzionale, invece, gli atomi del soluto si collocano in posizione reticolare, in sostituzione di parte degli atomi del solvente.

Il C è poco solubile nelle forme cristalline α e δ [quest'ultima fase non interessa ai nostri fini in quanto si presenta a temperature molto elevate ($> 1400\text{ }^\circ\text{C}$)], e più solubile nella forma γ . Il diagramma mostra, infatti, che la soluzione solida del C nel reticolo cristallino CCC del Fe ha una estensione limitata, con una solubilità massima dello 0,02% a $723\text{ }^\circ\text{C}$. La solubilità decresce allo 0,005% a temperatura ambiente. Questa soluzione è detta *ferrite* e, talvolta, indicata come fase α o solo α .

La soluzione solida di C nel Fe γ (detta *austenite*, ma indicata anche come fase γ o solo γ), ha un campo di stabilità tra 723 e $1493\text{ }^\circ\text{C}$, più esteso del campo dello stesso Fe puro γ , con una percentuale massima di C del 2,0%. Il diagramma mostra anche che l'austenite non è stabile sotto $723\text{ }^\circ\text{C}$ e si trasforma nei composti stabili a quella temperatura, vale a dire ferrite e Fe_3C . L'aggiunta di alcuni alliganti può ampliare il campo di stabilità dell'austenite portandolo fino a temperatura ambiente.

In definitiva, gli effetti prodotti dal C possono essere così riassunti.

– Abbassamento della temperatura di solidificazione della fase liquida omogenea (Fe + C), a partire da 1536 fino a $1148\text{ }^\circ\text{C}$. A questa temperatura (temperatura eutettica) il liquido si smescola nella fase solida austenite con il 2,0% di C e nella fase solida Fe_3C ⁷. Questa rappresenta la composizione della miscela eutettica, che prende il nome di ledeburite.

– Esistenza di due aree monofasiche, indicate con austenite e con ferrite, dove sono stabili le soluzioni solide aventi rispettivamente struttura FCC e CCC. L'austenite si estende fino al 2,0% di C. La ferrite occupa una zona più ristretta. Al di là di questi limiti di solubilità, il C forma con il Fe il carburo, Fe_3C .

– La cementite (Fe_3C) è un esempio di composto intermetallico, formato da un metallo e da un non metallo, avente una propria struttura cristallina. Questi composti non obbediscono alle normali regole di valenza e sono in genere duri e fragili. Poiché la cementite agisce come un componente indipendente, si spiega che il diagramma di Figura 1.2 sia tracciato fra Fe e Fe_3C , dove la composizione del 6,67% di C rappresenta il percento stechiometrico di C nel Fe_3C .

– La temperatura della trasformazione Fe $\gamma \rightarrow$ Fe α si abbassa, per la presenza del C, da 910 a $723\text{ }^\circ\text{C}$. D'altra parte, la solubilità del C nell'au-

⁷ Eutettico: se due componenti (nel nostro caso Fe γ e Fe_3C) sono completamente miscibili allo stato liquido ma completamente o parzialmente immiscibili allo stato solido, al diminuire della temperatura, in funzione della composizione del liquido iniziale, uno o l'altro dei componenti cristallizza. Al raggiungimento di una specifica temperatura (nel nostro caso $1148\text{ }^\circ\text{C}$), dal liquido cristallizza anche l'altro componente, formando il composto *eutettico*. La temperatura della reazione eutettica, detta *temperatura eutettica*, è caratteristica perché sono in equilibrio la fase liquida e le due fasi solide, è la più bassa temperatura di coesistenza delle tre fasi.

stenite, al diminuire della temperatura da 1148 a 723 °C, scende da un massimo del 2,0% allo 0,8%. A questa temperatura si realizza la trasformazione eutettoidica⁸



Il prodotto, composto da cristalli lamellari alternati di ferrite e di cementite, si chiama perlite per il suo aspetto madreperlaceo all'esame micrografico.

Un acciaio al carbonio che contiene l'0,8% di C è detto *acciaio eutettoidico*. Se l'acciaio contiene meno di 0,8% di C è detto *acciaio ipoeutettoidico*, se più di 0,8% *acciaio ipereutettoidico*.

Acciai al carbonio eutettoidici. Quando un acciaio di composizione eutettoidica (cioè con 0,8% di C) è solidificato e raffreddato a circa 750 °C la sua struttura è austenitica. Se poi l'acciaio è raffreddato lentamente, appena sopra la temperatura eutettoidica, la struttura rimane austenitica come indicato dal punto *a* di Figura 1.3. Un ulteriore raffreddamento appena sotto la temperatura eutettoidica, al punto *b* di Figura 1.3, trasforma l'intera struttura da austenite ad una struttura costituita da laminette alternate di ferrite e Fe₃C, cioè *perlite*, in un rapporto quantitativo costante.

La solubilità del C nella ferrite e nella cementite varia molto lentamente allorché la temperatura scende da 723 °C a quella ambiente, perciò non avviene nessuna altra trasformazione.

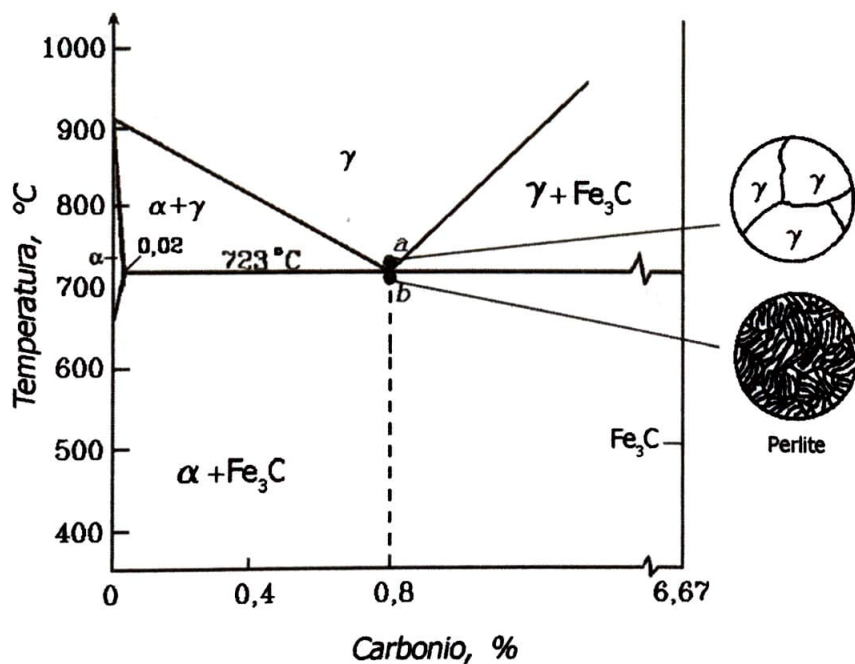


Figura 1.3 Formazione di un acciaio eutettoidico. (Per chiarezza, è riportata ingrandita, parte della Figura 1.2.)

⁸ Reazione eutettoide: è simile a quella eutettica, ma avviene partendo da una fase solida che si smescola in due altre fasi solide.

Acciai al carbonio ipoeutetoidici. In un acciaio, per esempio, con 0,4% di C (acciaio ipoeutetoidico) raffreddato lentamente a 900 °C (punto *a* in Figura 1.4), la struttura è costituita da austenite. Se l'acciaio è poi raffreddato sempre lentamente alla temperatura *b* di Figura 1.4 (circa 775 °C) inizia a nucleare ferrite proeutetoidica⁹ la quale cresce principalmente ai bordi dei grani¹⁰ austenitici. Al procedere del raffreddamento la quantità di ferrite continua ad aumentare. Poiché il contenuto di C nella ferrite che si forma è minore dello 0,4% dell'acciaio di partenza, il C che si libera va ad arricchire la rimanente austenite. Al punto *c* la struttura consiste di ferrite e di austenite. Sotto 723 °C, punto *d*, l'austenite si trasforma in perlite, cosicché la struttura finale consiste di grani di ferrite (con 0,02% di C) e di laminette alternate costituenti la perlite.

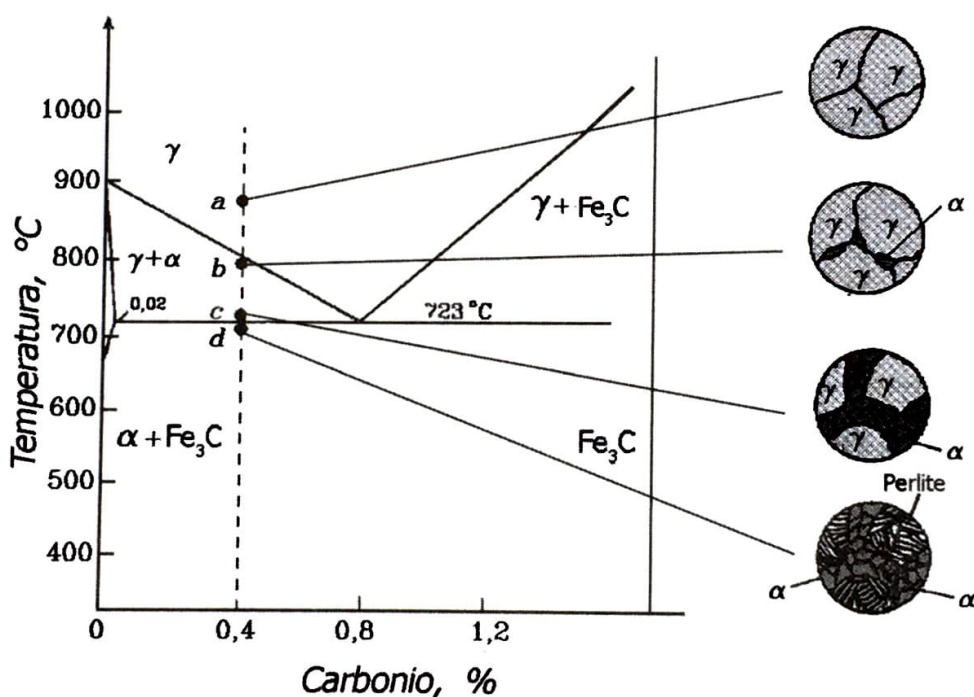


Figura 1.4 Formazione di un acciaio ipoeutetoidico con 0,4% C.

Acciai al carbonio ipereutetoidici. In un acciaio con 1,2% di C (acciaio ipereutetoidico) raffreddato lentamente a circa 950 °C (punto *a* in Figura 1.5) la struttura è costituita da austenite con 1,2% di C. Se poi l'acciaio è

⁹ Il prefisso *pro* significa “prima” e pertanto il termine *ferrite proeutetoidica* è usato per distinguere questo costituente dalla *ferrite eutetoidica* che si forma durante la trasformazione eutetoidica a 723 °C.

¹⁰ Grano: cristalli individuali e contigui contenuti nel materiale metallico. Nel materiale monofasico i grani hanno lo stesso tipo di reticolo cristallino, ma con orientazione in genere diversa. La zona denominata bordo del grano funge da raccordo tra i reticoli dei grani adiacenti e, bloccando le dislocazioni (vedi nota 15, pag. 13), influenzano la deformazione plastica (che presenta valori maggiori per grani grossi) e la resistenza meccanica (con valori maggiori per grani piccoli).

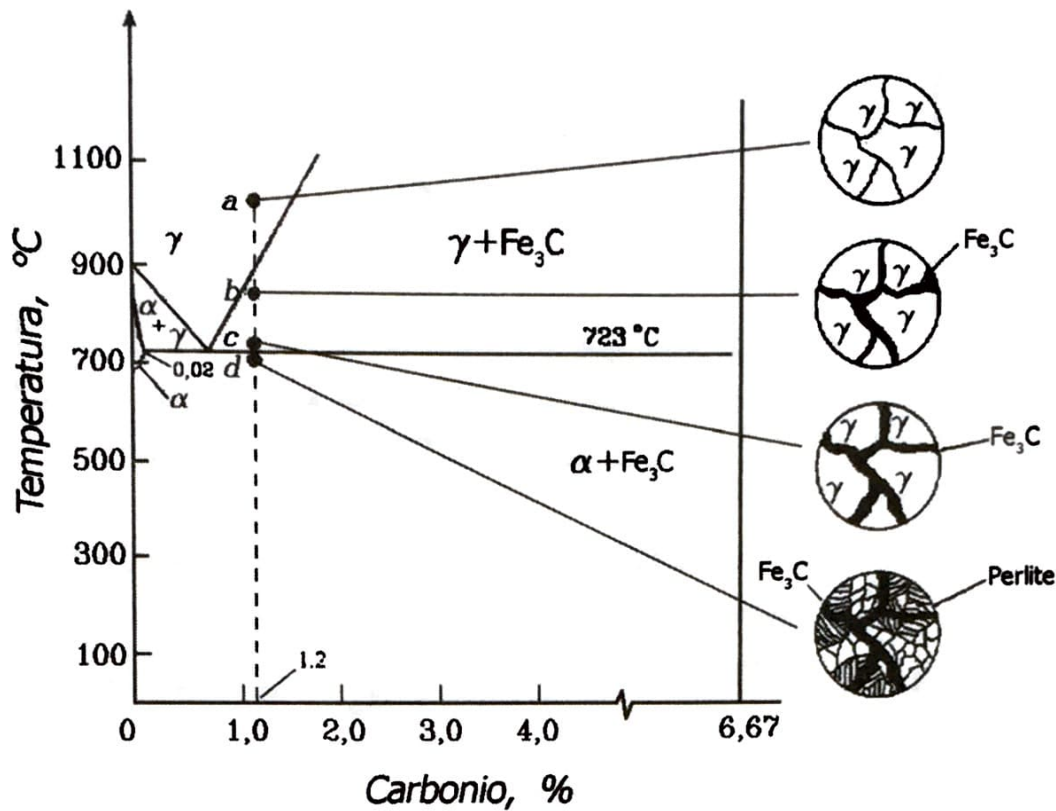


Figura 1.5 Formazione di un acciaio ipereutettoidico con 1,2% C.

raffreddato alla temperatura *b*, inizia a nucleare *cementite proeutettoidica* al bordo dei grani austenitici. Per un ulteriore lento raffreddamento al punto *c*, cioè appena sopra i 723 °C, la quantità di *cementite proeutettoidica* aumenta. A questo punto la struttura consiste di *cementite* e di *austenite* che si è progressivamente impoverita di C fino all'0,8%. Con un ulteriore raffreddamento appena sotto a 723 °C, l'*austenite* si trasforma in *perlite*, come indicato dal punto *d*. La *cementite* formata durante la trasformazione eutettoidica è detta *cementite eutettoidica* per distinguerla dalla *proeutettoidica* formatasi a temperatura superiore a 723 °C.

Trattamenti termici di ricottura

Appropriati trattamenti termici provocano variazioni delle caratteristiche meccaniche del materiale. La ricottura è un trattamento di riscaldamento seguito da raffreddamento lento.

Ricottura di distensione o di lavorabilità

È il più semplice fra i trattamenti termici e porta alla scomparsa delle tensioni interne generate dalle contrazioni differenziate che si generano al raffreddamento della lega liquida (zona calda - zona fredda) e/o dalla lavorazione a freddo. È condotta a temperature inferiori alla temperatura eutettoidica, cioè ad una temperatura inferiore a quella necessaria alla ricristallizzazione¹⁶.

Ricottura di omogeneizzazione detta anche di normalizzazione

Elimina le differenze di composizioni che si creano al raffreddamento quando questo non è condotto in condizioni di continuo equilibrio.

La temperatura di lavoro non ha un valore uguale per tutti gli acciai perché dipende dalla composizione: un acciaio eutettoide necessita, infatti, di una temperatura minore di quella di un acciaio alligato.

¹⁶ La ricristallizzazione è un processo termicamente attivato, che avviene al di sopra di una temperatura, caratteristica per ogni materiale, che porta alla formazione di nuovi grani di dimensione dapprima piccoli e poi sempre più grandi.

Ricottura completa

Trattamento condotto a temperatura superiore di 10-40 °C alla trasformazione austenitica, seguito da un raffreddamento lento (in fornace) così da ottenere perlite grossa e, di conseguenza, un acciaio duttile.

1.4 Acciai

Con il nome di acciaio si definiscono le leghe ferro-carbonio in cui il tenore di quest'ultimo elemento è inferiore al 2,0%, limite massimo di solubilità del C nell'austenite. Con il nome di acciai speciali o acciai legati s'intendono quelli che, oltre al ferro e al carbonio, contengono altri elementi volutamente introdotti (*alliganti*). I comuni acciai al carbonio contengono solo residue impurezze, mentre gli acciai speciali contengono elementi diversi in concentrazioni ben determinate. Esistono migliaia di acciai con differenti composizioni e/o trattamenti termici. Le proprietà meccaniche sono sensibili al contenuto di C che, in genere, è inferiore all'1% (in peso). Il ruolo del C è così importante che nell'identificazione dei vari acciai è indicato il suo contenuto. Sono denominati anche dolci (quelli a basso contenuto di C), semidolci (medio contenuto di C) e duri (alto contenuto di C).

Manganese, nichel, cromo, molibdeno sono gli elementi più di frequente introdotti come alliganti negli acciai. Quando queste aggiunte sono contenute entro il 5% in peso, gli acciai sono definiti *acciai bassolegati*. Le caratteristiche di questi acciai sono molto condizionate dai trattamenti termici.

Gli acciai che devono operare in condizioni particolari contengono gran quantità di alliganti (*acciai altolegati*). Fra questi sono noti gli acciai inossidabili.

Le considerazioni fatte sul sistema Fe-C non sono del tutto estensibili agli acciai che contengono altri elementi di lega in quantità significativa. La composizione dell'eutettoide non è più quella con 0,8% di C ed è anche modificata la temperatura di trasformazione eutettoide. In genere, tutti gli elementi producono una diminuzione del contenuto di C nella composizione dell'eutettoide. Alcuni elementi – cromo, tungsteno, silicio, molibdeno, titanio – innalzano la temperatura eutettoide, altri – nichel, manganese – l'abbassano.

Acciai a basso tenore di carbonio

Fra tutti i tipi di acciai, sono quelli prodotti in maggiore quantità. Essi contengono meno dello 0,25% (in peso) di C e non rispondono ai trattamenti termici utilizzati per formare martensite: l'indurimento è ottenuto a freddo con lavorazioni meccaniche (vedi nota 17). Questi acciai hanno

struttura ferritica-perlitica. Di conseguenza, queste leghe presentano bassa resistenza a trazione ma hanno notevole duttilità e tenacità. Sono lavorabili, saldabili e sono i meno costosi tra tutti gli acciai. Tipiche applicazioni comprendono travi e angolari strutturali, lamiere.

Un altro gruppo di acciai a basso tenore di C è quello bassolegato. Essi contengono elementi alliganti quali rame, vanadio, nickel, molibdeno in concentrazioni complessive del 10% circa. Hanno resistenza a rottura più elevata. Possono essere induriti per trattamento termico, sono duttili, formabili e lavorabili alle macchine. In atmosfera normale resistono all'ossidazione più dei comuni acciai al carbonio. Trovano applicazione quando la resistenza strutturale è un fattore critico (per esempio ponti, torri, serbatoi in pressione).

Acciai a medio tenore di carbonio

Gli acciai a medio tenore di C, tra lo 0,25 e lo 0,60% (in peso), possono essere trattati termicamente mediante tempra solo in sezioni molto piccole e con velocità di raffreddamento molto elevate. Aggiunte di cromo, nickel e molibdeno ne migliorano la capacità ad essere trattate termicamente.

Queste leghe sono più resistenti degli acciai a basso tenore di C, ma a scapito della duttilità e tenacità. Per la buona combinazione di elevata resistenza meccanica e resistenza all'usura e tenacità relativamente alta, si utilizzano per ingranaggi, meccanismi vari, alberi a gomito e componenti ad alta resistenza strutturale.

Acciai ad alto contenuto di carbonio

Gli acciai ad alto contenuto di C, avendo un contenuto tra lo 0,60 e l'1,4%, sono i più resistenti meccanicamente e meno duttili fra gli acciai al carbonio. Essi sono quasi sempre utilizzati dopo trattamento d'indurimento e, come tali, sono molto resistenti all'usura e capaci di mantenere il taglio. Fra questi, gli acciai per utensili e stampi, di solito, contengono cromo, vanadio, tungsteno e molibdeno. Questi elementi formano con il C, infatti, carburi molto duri e resistenti all'usura.

Acciai inossidabili

Si definiscono acciai inossidabili gli acciai resistenti alla corrosione. Hanno un'ampia varietà di caratteristiche meccaniche e fisiche, in relazione alla loro composizione chimica. Le norme EN 10088-1 impongono per gli acciai inossidabili un contenuto minimo del 10,5% (in peso) di cromo (quantunque è in genere maggiore del 13%). Oltre al cromo, sono anche

utilizzati nichel e molibdeno e talvolta il titanio: tali elementi influenzano le caratteristiche meccaniche e la resistenza alla corrosione. In particolare, quest'ultima resistenza è incrementata attraverso l'aumento degli elementi in lega e la riduzione del contenuto di C che, in questi acciai, è presente in quantità inferiore all'1%. Per gli acciai inossidabili impiegati nel calcestruzzo, il massimo di C ammesso è 0,07%.

L'elevata resistenza alla corrosione degli acciai inossidabili deriva dalla formazione spontanea di un film sottile e incolore di ossido (in prevalenza Cr_2O_3), ben aderente alla superficie dell'acciaio, che rende il materiale inerte nei confronti dell'ambiente aggressivo circostante (*passività*).

Nell'ambito della famiglia degli acciai inossidabili si possono distinguere almeno quattro grandi classi, sulla base della loro microstruttura:

- acciai inossidabili austenitici;
- acciai inossidabili austeno-ferritici (o duplex);
- acciai inossidabili ferritici;
- acciai inossidabili martensitici.

Acciai inossidabili austenitici

La struttura austenitica si può formare solo in presenza di adeguate percentuali di Ni: per questo motivo, il tipico acciaio austenitico (AISI 304) contiene il 18% di Cr e l'8% di Ni. Sono i comuni acciai inossidabili perché i meno costosi e hanno larghissima applicazione laddove è richiesta resistenza alla corrosione atmosferica. Sono duttili e tenaci. In genere sono amagnetici.

Acciai inossidabili ferritici

Nei ferritici il Ni è in genere assente: l'acciaio tipico (AISI 430) contiene il 17% di Cr e basse percentuali di C (0,1% max). Presentano buona resistenza alla corrosione, soprattutto in ambienti a temperatura elevata. Poiché mantengono la struttura ferritica a tutte le temperature non sono temprabili. Questi acciai, per riscaldamento sopra gli 800 °C (saldatura), sono soggetti a ingrossamento del grano e necessitano quindi di un post-trattamento.

Acciai inossidabili martensitici

Questi acciai possiedono un'ottima temprabilità. Dopo il rinvenimento, la microstruttura è costituita da martensite rinvenuta e da carburi di Cr. Hanno valori del carico di rottura a trazione prossimi a 1000 MPa. D'altra parte, la loro struttura e il limitato contenuto di Cr riducono la resistenza alla corrosione. Questa è inferiore a quella degli acciai austenitici e ferritici in soluzioni aggressive, mentre rimane buono il comportamento agli agenti atmosferici e in soluzioni ossidanti.

1.5 Generalità sulla designazione degli acciai

Il sistema di classificazione degli acciai elaborato a livello europeo, e fatto proprio dalle UNI, è descritto nelle EN UNI 10027-1 e EN 10027-2.

La designazione descritta dalla EN UNI 10027-1 è una combinazione di lettere e di numeri. Con questo sistema gli acciai sono classificati in due gruppi.

- Il *Gruppo 1* definisce gli acciai in funzione delle loro applicazioni e delle proprietà meccaniche o fisiche. La sigla comprende una o più lettere relative alle applicazioni, seguite da un numero relativo alle proprietà. Per esempio, S420ML designa un acciaio strutturale (S) con una tensione di snervamento di 420 MPa minima (420), laminabile a caldo (M) e con un grado d'insensibilità alla frattura fragile nell'intervallo +20 e -50 °C (L).
- Il *Gruppo 2* definisce gli acciai secondo la composizione chimica. Per esempio, X2CrNi18-9 indica un acciaio con contenuto di circa 0,02% di C (2), 18% di Cr (18) e 9% Ni (9).

La EN UNI 10027-2 utilizza, invece, una classificazione numerica. Per tutti gli acciai il primo numero è uno <1>, seguito da un punto e da 4 cifre. Per esempio, le designazioni numeriche per i due sunnominati acciai sono 1.8836 e 1.4307, rispettivamente.

1.6 Saldabilità e acciai di qualità

Molto spesso gli acciai sono posti in opera in costruzioni saldate: devono pertanto essere *saldabili* nel senso di poter essere sottoposti a questo procedimento costruttivo con le normali tecniche di cantiere, senza la necessità di trattamenti termici post-saldatura.

In una giunzione interessata da saldatura per fusione, con o senza materiale di apporto, dal punto di vista metallurgico si possono individuare tre zone diverse (Figura 1.18): la zona di completa fusione (1); la zona termicamente alterata (ZTA o nella letteratura inglese *heat affected zone* HAZ) (2); il materiale base inalterato (3).

La zona 1 è costituita da metallo base fuso e risolidificato nella saldatura autogena (senza metallo di apporto). È invece costituito da una miscela di materiale di apporto e materiale base fusi insieme in caso contrario.

La zona 2 è quella parte del materiale adiacente alla zona fusa che, durante le operazioni di saldatura, ha subito un ciclo termico di riscaldamento e successivo raffreddamento. Ciò ha provocato alterazioni delle proprietà metallurgiche e meccaniche del materiale. Questa zona è di difficile delimitazione in quanto, se da un lato verso il fuso è delimitata da

una zona di parziale fusione larga in genere pochi grani, dall'altro mostra una transizione verso il materiale base senza soluzione di continuità. In questa zona, in dipendenza dell'apporto termico della saldatura, delle caratteristiche di temprabilità del materiale e della geometria del sistema che condiziona la velocità di raffreddamento, è possibile la formazione di microstrutture dure (martensite) sensibili alla cricatura a freddo.

In conclusione, nella zona ZTA possono avvenire, a partire dalla linea di fusione, fenomeni di:

- ingrossamento del grano e formazione di strutture dure;
- diminuzione della resistenza a trazione;
- infragilimento per formazione di precipitati incoerenti.

Affinché un materiale sia saldabile non deve dar luogo ai fenomeni citati in misura tale da compromettere la qualità complessiva del giunto saldato.

Per gli acciai di uso generale, con tenore di C superiore a circa 0,1%, un buon indice della saldabilità è costituito dal cosiddetto carbonio equivalente (CE), calcolato secondo la formula:

$$CE = C + [(Mn/6)] + [(Cr + Mo + V)/5] + [(Ni + Cr)/15]$$

Se il valore di CE è basso, in genere minore di 0,45, l'acciaio è saldabile nelle normali condizioni di cantiere. Per contenuti di C minori di 0,1% si utilizzano formule più complesse.

Acciai di “qualità”

La diffusa utilizzazione della saldatura come tecnica di giunzione in carpenteria ha portato a ridurre il contenuto di C degli acciai di base, con conseguente diminuzione delle caratteristiche meccaniche. Si è cercato perciò di ricorrere ad altri criteri per produrre acciai da carpenteria sia saldabili, e quindi a basso C, sia con migliori caratteristiche meccaniche.

Gli acciai di qualità, rispetto a quelli di base, sono prodotti con tecnologie più avanzate, ma con un ciclo di operazioni in pratica analogo, mantenendo pertanto i costi a livelli competitivi.

Di seguito sono descritti alcuni dei più importanti tipi di acciai di qualità.



Figura 1.18 Rappresentazione schematica di una zona saldata.

- a) *Acciai resistenti alla corrosione atmosferica*. In questi acciai, con denominazione commerciale *Cor-Ten*, sono contenute aggiunte di Cr, Cu e Ni che consentono di ottenere la formazione, in superficie, di un sottile strato di ossido aderente che preserva il materiale da corrosione atmosferica. Questi acciai sono usati anche in campo architettonico senza rivestimenti protettivi.
- b) *Acciai per lamiera da stampaggio*. Sono acciai a basso C (circa 0,06%) dove, in genere, le caratteristiche meccaniche sono ottenute per laminazione finale a freddo¹⁷.
- c) Un particolare ciclo di laminazione controllata porta alla formazione di una struttura mista (*dual-phase*) di ferrite con il 15-18% di martensite e aliquote di bainite, che conferiscono resistenze meccaniche molto interessanti.
- d) *Acciai ad alto limite di snervamento (HSLA)*. Sfruttando l'effetto combinato di microleganti e di laminazione controllata sono stati sviluppati vari tipi di acciai, con caratteristiche ottimizzate per specifiche applicazioni.

1.7 Acciai nell'edilizia

Gli acciai in edilizia sono utilizzati sotto diversissime forme e dimensioni, in un'ampia gamma di prodotti ottenuti sia per lavorazione a caldo¹⁸ sia per lavorazione a freddo, o per una combinazione di entrambi, in funzione dei requisiti meccanici voluti. Si utilizzano sotto forma di lamiera, tubi, profilati e fili.

Le *lamiere* sottili (spessore sotto i 3 mm) sono ottenute da acciaio dolce o semiduro. La resistenza meccanica a trazione varia da 340 a 500 MPa e allungamento dal 20 al 25%. Per aumentarne la resistenza a flessione sono profilate per indurre sagome ondulate, grecate ecc. Sono utilizzabili per pareti di facciata, pannelli di rivestimento, pareti mobili ecc. Queste lamiere quando sono rivestite sulle due facce di zinco sono utilizzate per serrande, grondaie, coperture, condizionatori ecc. Sono infine ricopribili, a causa dell'alto grado di rifinitura superficiale, con pitture e vernici, con smalti inorganici.

¹⁷ Lavorazione a freddo: lavorazione dei metalli al di sotto della temperatura di ricristallizzazione; in queste condizioni il materiale incrudisce (per la formazione di dislocazioni) con conseguente aumento del carico di rottura e diminuzione di duttilità.

¹⁸ La lavorazione a caldo dei metalli è condotta a temperatura superiore a quella di cristallizzazione. In queste condizioni si verifica contemporaneamente alla deformazione, la ricottura del materiale con diminuzione del numero di dislocazioni.

Le lamiere di maggiore spessore, da 3 a 50 mm, presentano resistenza a trazione che varia da 340 a 850 MPa, tensione di snervamento da 20 a 35 MPa, secondo lo spessore, e allungamento dal 10 al 25%. Sono utilizzate per piastre di fondazione, piastre di giunzione e per l'ottenimento di profili composti per strutture portanti. A caldo sono ottenute le lamiere striate e bugnate, vale a dire con un disegno a forma di losanghe o a forma di tacche, su una sola faccia. Sono utilizzabili per piani di calpestio, scale metalliche ecc.

Acciai a basso contenuto di C (extradolci e semidolci) sono utilizzati per *tubi* a sezione quadrata, rettangolare o circolare. Le dimensioni sono molto varie e gli usi i più diversi: dalle colonne portanti alle reti di distribuzione di gas, aria, acqua e per lavori di carpenteria leggera. Per una maggiore resistenza alla corrosione sono usati con rivestimenti vari (zinco, malta di cemento ecc.).

I tubi a sezione circolare tipo Mannesmann (tubi non saldati) sono prodotti con l'omonimo laminatoio partendo da un lingotto cilindrico che, trascinato da speciali cilindri trono-conici con assi sghembi, è perforato in senso longitudinale da una spina con punta ovoidale e poi rifinito con altre lavorazioni. Questi tubi presentano elevate caratteristiche meccaniche e sono adatti per condotte idrauliche ad alta pressione.

I *profilati*, di diverse dimensioni e forme e sezioni, sono utilizzati per la carpenteria metallica. Profilati di grandi dimensioni sono utilizzati per la realizzazione di strutture portanti, coperture, solai, orditure per pareti.

I *fili di acciaio*, ottenuti per trafilatura a freddo, richiedono l'utilizzo di un acciaio extradolce. Le tensioni indotte nell'incrudimento sono in parte rimosse a seguito di ricottura o durante la loro ricopertura con zinco. Con questi fili si fabbricano, per esempio, le reti elettrosaldate per calcestruzzo armato.

Tabella 1.1 Caratteristiche degli acciai per calcestruzzo B500A e B500B¹⁹ secondo la norma UNI EN 10080

Tipo di prodotto		Barre		Rotoli		Reti saldate	
Designazione	Alfanumerica	B500A	B500B	B500A	B500B	B500A	B500B
	Numerica	1.0438	1.0439	1.0438	1.0439	1.0438	1.0439
\varnothing (mm)		6-16	5-16	5-16	6-16	5-16	6-16
f_{yk} (MPa)		500	500	500	500	500	500
$(f_t/f_y)_k$		1,05	1,05	1,05*	1,08	1,05*	1,08
ϵ_{uk} (%)		2,5	2,5	2,5*	5,0	2,5*	5,0

* per $\varnothing = 5$ mm e $\varnothing = 5,5$ mm, $(f_t/f_y)_k = 1,03$ e $\epsilon_{uk} = 2\%$.

La norma EN 10080 prescrive i requisiti meccanici di resistenza, duttilità e tenacità, attraverso i valori caratteristici della tensione di rottura a trazione (f_{tk}) e di snervamento (f_{yk}) e in base all'allungamento percentuale (A) a rottura, oppure all'allungamento in corrispondenza al carico massimo ϵ_{uk} . Viene inoltre prescritto un minimo per il valore caratteristico del rapporto tra tensione di rottura e di snervamento (f_t/f_y). Per quanto attiene la composizione chimica, sono posti vincoli sul contenuto di determinati elementi (C, P, S ecc.) solo se è richiesta la saldabilità.

In Italia è in vigore il D.M. LL. PP. 9-1-1996 "Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in calcestruzzo normale e precompresso e per strutture metalliche" che in parte recepisce l'Eurocodice 2 (1). In Tabella 1.2 sono riportate le classificazioni e le relative prescrizioni.

Gli acciai per il precompresso devono avere alta resistenza ed elevato valore della tensione di snervamento. Sono detti armonici perché con essi si costruiscono anche corde vibranti di strumenti musicali. Per raggiungere le elevate caratteristiche meccaniche si sottopongono gli acciai normali duri, cioè con 0,8% di C, ad un accurato trattamento termico e meccanico. L'acciaio, già sotto forma di filo, è riscaldato in forno elettrico a 980 °C e poi temprato isotermicamente a 500 °C in un bagno di piombo fuso. Dopo pulitura, per aumentare ancora il limite elastico, l'acciaio è trafilato e sottoposto ad un nuovo trattamento termico a 380 °C. La struttura così ottenuta risulta stabile nel tempo, a differenza di quelle incrudite mediante trattamenti a freddo.

¹⁹ B500A acciaio a duttilità normale.
B500 B acciaio ad elevata duttilità.

Tabella 1.2 Caratteristiche degli acciai per calcestruzzo armato (da D.M. 9 Gennaio 1996 - Parte 1)

Caratteristiche degli acciai per barre	Tonde lisce		A aderenza migliorata	
	Fe B 22 k	Fe B 32 k	Fe B 38 k	Fe B 44 k
R_s tensione caratteristica di snervamento (MPa)	≥ 215	≥ 315	≥ 375	≥ 430
R tensione caratteristica di rottura (MPa)	≥ 335	≥ 490	≥ 450	≥ 540
Allungamento A_s (%)	≥ 24	≥ 23	≥ 14	≥ 12
Piegamento a 180° su mandrino avente diametro D (*)	2 \emptyset	3 \emptyset	Da 3 a 10 \emptyset (**)	Da 4 a 12 \emptyset (**)

(*) La prova di piegamento consiste nel piegare il materiale, gradualmente e lentamente, per mezzo di una sollecitazione meccanica applicata mediante un cilindro. Si registra il carico richiesto per completare una piegatura a 180° oppure, se si verifica dapprima la frattura, si tiene conto del carico e dell'angolo di piegatura. Per i fili e le lamiere sottili è prevista una prova di piegamento a 90° alternata con una successiva in senso opposto. Per le barre laminate a caldo e deformate a freddo, utilizzate per il calcestruzzo armato non precompresso, è prevista una prova di piegamento a 180° , mentre per le barre ad aderenza migliorata è previsto un piegamento a 180° seguito da un raddrizzamento parziale a 30° . Questa prova misura il grado di duttilità.

(**) Il diametro \emptyset del mandrino è funzione di quello della barra tonda liscia equivalente.

Il carico massimo di rottura può variare da 1350 a 1750 MPa mentre il limite di snervamento da 1150 a 1500 MPa. Questi acciai sono forniti sotto forma di fili, con diametro da 4 a 12 mm e di barre di diametro di 18-26 mm. La loro superficie può essere liscia, ondulata, con impronte. Sono forniti anche sotto forma di trecce, cioè due o tre fili avvolti ad elica intorno al loro comune asse longitudinale, o ancora sotto forma di trefoli, cioè gruppi di fili avvolti in uno o più strati intorno ad un filo rettilineo.

Acciai inossidabili nell'ingegneria edile

Inizialmente, la scelta di questi acciai è stata legata alla caratteristica di resistere inalterati, senza rivestimenti protettivi, all'aggressione atmosferica conservando, nel tempo, la loro apparenza bianco-argentea. Successivamente, sono stati utilizzati nell'edilizia in funzione anche di caratteristiche non estetiche, quali manutenzione contenuta, elevata sicurezza e, nel

Tabella 1.3 Composizione e proprietà di alcuni acciai inossidabili

Sigla AISI	% C	% Cr	% Ni	Altri	Resistenza a trazione (MPa)	Tensione di snervamento (MPa)	Allungamento (%)	Trattamento
304	0,08	18-20	8-10,5		517	207	30	Ricotto
316	0,08	16-18	10-14	2-3% Mo	517	207	30	Ricotto
430	0,12	16-18			448	207	22	

caso degli acciai austenitici, buona resistenza al fuoco. Il loro utilizzo va valutato in termini di reale economia, rapportando i maggiori costi alla vita dell'edificio. Gli acciai inossidabili attualmente utilizzati sono:

- i tipi austenitici come l'AISI 304 per tutte le applicazioni esterne, in atmosfere non molto aggressive, come pannelli, rivestimenti esterni, serramenti;
- il tipo legato al molibdeno, l'AISI 316, per le applicazioni esterne, in severe condizioni ambientali, marine o industriali;
- l'acciaio AISI 430 ferritico, di costo inferiore, per le applicazioni interne (rivestimenti ecc.) e per le applicazioni esterne in atmosfere rurali.

In Tabella 1.3 sono riportate le composizioni e le proprietà dei sunnominati acciai.

1.8 Ghise

Si consideri sul diagramma Fe-Fe₃C la lega con un contenuto di C del 4,3%, cui corrisponde la composizione eutettica. Questo contenuto di C ha effetto sulla temperatura di solidificazione del ferro: lo abbassa di circa 400 °C, con notevoli vantaggi economici nel processo di fusione. Se questa lega è raffreddata molto molto lentamente, a 1148 °C si separano, invece che austenite e cementite (*ledeburite*), austenite e grafite. La grafite si separa sotto forme di lamelle.

La tendenza a formare grafite oltre che dalla velocità di raffreddamento è favorita anche dalla presenza, nella lega, di silicio in concentrazione maggiore del 2%.

Le ghise sono leghe ferrose con contenuti di C superiori al 2,0% (in peso). In pratica, la maggior parte delle ghise contiene tra il 3,0 e il 4,5% di C e, spesso, altri elementi di lega. Nella maggior parte delle ghise, il C si presenta sotto forma di grafite. Le ghise più comuni si distinguono in grigie, nodulari, bianche e malleabili.

Ghisa grigia

In queste ghise, la grafite esiste sotto forma di lamine circondate da una matrice ferritica. Per la presenza di queste lamine di grafite, la superficie di frattura ha un colore grigio, da cui il nome. Dal punto di vista meccanico, la ghisa grigia presenta bassa resistenza a trazione ed è fragile: infatti, le estremità delle lamine di grafite sono appuntite e possono agire come punti di concentrazione delle tensioni. La resistenza a compressione è abbastanza elevata.

Le ghise grigie hanno, peraltro, alcune caratteristiche positive per le quali trovano largo impiego. Esse sono molto efficaci nello smorzamento delle energie vibrazionali. Le strutture di base di macchinari pesanti, esposti alle vibrazioni, sono costruite con questa ghisa. In aggiunta, le ghise grigie presentano elevata resistenza all'usura e allo stato liquido hanno un'elevata fluidità alla temperatura di colata: ciò fa sì che i pezzi ottenuti possano avere anche forme molto complicate. La contrazione, poi, al raffreddamento, è bassa. Infine, le ghise grigie sono le meno costose fra tutte quelle prodotte.

Ghisa duttile (o nodulare o sferoidale)

Aggiungendo una piccola quantità di magnesio e/o di cerio alla ghisa grigia prima della colata nello stampo, si forma ancora grafite ma sotto forma di noduli o particelle sferiche invece che di fiocchi. La lega risultante è detta *ghisa duttile* o *nodulare* o *sferoidale*.

La ghisa duttile, pur avendo ancora quasi tutti i pregi delle ghise grigie lamellari, possiede caratteristiche che si avvicinano a quelle dell'acciaio. Per esempio, la ghisa duttile ferritica ha una resistenza alla trazione di circa 380-480 MPa e una duttilità (espressa come percentuale di allungamento) del 10-20%. Con queste ghise si possono colare getti complicati che si lavorano bene alle macchine utensili. Tipiche applicazioni di questo materiale sono valvole, corpi di pompe, ingranaggi.

Ghisa bianca e ghisa malleabile

Nelle ghise con contenuto minore del 2% di silicio, raffreddate rapidamente, la maggior parte del C si trova combinato sotto forma di cementite piuttosto che di grafite. La superficie di frattura si presenta bianca, per questo è denominata *ghisa bianca*.

In conseguenza della gran quantità di cementite presente, la ghisa bianca è molto dura ma anche molto fragile, al punto che non è possibile lavorarla alle macchine utensili. Il suo impiego è limitato alle applicazioni che

necessitano di una superficie molto dura e resistente all'usura ma priva di duttilità, per esempio, macine di mulini e ruote di treni. Comunque, in genere, la ghisa bianca è utilizzata come intermediaria nella produzione di un'altra ghisa, la ghisa malleabile.

La *ghisa malleabile* è ghisa bianca riscaldata a lungo ad una temperatura compresa tra 800 e 950 °C, a contatto di sola sabbia (per prevenire l'ossidazione del C), entro recipienti refrattari. Tale ricottura non decarbura di molto la ghisa, ma più che altro provoca la separazione del C grafítico in noduli distribuiti con uniformità nella massa. Il processo è detto a *cuore nero* ed è applicato su oggetti anche di spessore elevato (fino a 20-25 mm).

Le applicazioni tipiche sono ingranaggi di trasmissione, flange, parti di valvole, raccordi filettati per tubazioni o altri pezzi meccanici che richiedono una buona resistenza a trazione e tenacità.