



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



PAS _ A020 _ UNIPD _ 2015

*Didattica delle tecnologie meccaniche di
processo e di prodotto.*

Professore Domenico Fernando Antonucci



PAS _ A020 _ UNIPD _ 2015



*Didattica delle tecnologie meccaniche di
processo e di prodotto.*

Analisi, Riflessioni, Esercitazioni

Professore Domenico Fernando Antonucci



Tipi di materiali

I materiali possono essere raggruppati in tre grandi famiglie: quella dei *metalli*, quella dei *polimeri* o *materie plastiche*, quella dei *materiali ceramici*.

I *semiconduttori* verranno esaminati a parte, sia per le loro caratteristiche che per la loro sempre crescente importanza nelle applicazioni tecnologiche.

Infine si esamineranno i *materiali compositi*, costituiti cioè da un insieme di materiali di diversa natura.

Fig.4 Tavola periodica degli elementi, con l'indicazione del numero atomico e del peso atomico (in unità di massa atomica, amu). Un numero di grammi pari al peso atomico di un elemento contiene 6×10^{23} atomi di quell'elemento. I metalli liberano con facilità gli elettroni più esterni, i non-metalli possono assumere o mettere in compartecipazione elettroni addizionali.



Un metallo può essere subito riconosciuto da chiunque grazie alla sua elevata conducibilità termica (rilevabile qualitativamente toccando il materiale e constatando come questo ceda o sottragga calore alla mano).

È pure risaputo che un metallo ha una buona conducibilità elettrica, che è opaco, che spesso (ma non sempre) è pesante e deformabile meccanicamente, che quasi sempre può essere trattato superficialmente fino a renderlo lucido. Non è però altrettanto noto da dove derivino al metallo tali proprietà. Eppure la spiegazione di questi fenomeni risiede semplicemente nel fatto che nei metalli alcuni elettroni possono lasciare gli atomi che li ospitano e trasferirsi abbastanza liberamente presso altri atomi, cosa che al contrario non si verifica né per i polimeri né per i materiali ceramici.

La mobilità degli elettroni dà subito la ragione della facoltà, che hanno i metalli, di trasferire cariche elettriche (FIG. 3). Ogni elettrone ha una carica di $1,6 \times 10^{-19}$ coulomb (C), vale a dire $1,6 \times 10^{-19}$ A s, in quanto un coulomb è la carica trasferita da una corrente dell'intensità di un ampere (A) in un secondo. In secondo luogo gli elettroni, trasferendosi rapidamente da una zona calda del metallo a una meno calda, trasportano l'energia termica, intervenendo quindi nella conduzione termica.

L'elevato peso specifico, che contraddistingue molti materiali metallici rispetto a quelli non metallici, non può essere preso come una proprietà generale dei metalli; esistono infatti metalli, così detti leggeri, con peso specifico anche inferiore a 2 (ad esempio il magnesio ha densità $1,74 \text{ g/cm}^3$ e il sodio $0,97 \text{ g/cm}^3$).



Nella FIG. 4 è riportata la tavola periodica degli elementi sulla quale sono identificati gli elementi classificati, da un punto di vista tecnologico, come metalli. * Da un suo esame è facile dedurre che almeno i tre quarti degli elementi sono di tipo metallico e che il 90% degli elementi con peso atomico superiore a 40 sono metalli. Quest'ultimo fatto spiega perché molti metalli hanno un elevato peso specifico, senza che questa grandezza sia di per sé una loro proprietà caratteristica.

La lucentezza dei metalli, cioè la loro capacità a riflettere la luce, è correlata con la risposta degli elettroni liberi alle vibrazioni con la frequenza della luce. Da quanto si è detto risulta ampiamente dimostrato

che le proprietà dei metalli sono. preminentemente influenzate dalla presenza caratteristica degli elettroni liberi.



ESEMPI

Gli atomi di magnesio pesano circa il 50% in più di quelli di ossigeno (24,3 contro 16 unità di massa atomica, amu, FIG. 4); che percentuale in peso costituiscono gli atomi di ossigeno nel composto MgO?

SOLUZIONE

Prendendo come base 100 ioni Mg^{++} e 100 ioni O^{--} , si ha:

$$\text{peso } \text{Mg}^{++} = 100 \times 24,3 \text{ amu} = 2430 \text{ amu}$$

$$\text{peso } \text{O}^{--} = 100 \times 16 \text{ amu} = 1600 \text{ amu};$$

in tutto si hanno $(2430 + 1600) \text{ amu} = 4030 \text{ amu}$; di queste:

$$\% \text{ in peso } \text{Mg}^{++} = \left(\frac{2430}{4030} \right) \times 100 = 60\%$$

$$\% \text{ in peso } \text{O}^{--} = \left(\frac{1600}{4030} \right) \times 100 = 40\%$$

Commenti. L'ossido di magnesio, MgO, contiene il 50% di atomi di magnesio e il 50% di atomi di ossigeno; questi ultimi però, essendo più leggeri, costituiscono solo il 40% in peso del composto.

MgO è un tipico materiale ceramica, molto stabile (punto di fusione 2800 °C) grazie ai forti legami tra i cationi Mg^{++} e gli anioni O^{--} .



Metalli e loro struttura

Metalli a un singolo componente

Prendiamo dapprima in considerazione i materiali costituiti da atomi di un solo tipo; in questa categoria rientrano molti degli oggetti metallici che usiamo comunemente: i fili elettrici in rame, gli utensili da cucina in alluminio e la carrozzeria in acciaio di un'automobile. Questi ed altri metalli, considerati puri da un punto di vista commerciale, in realtà contengono, in quantità diverse, altri elementi, che non sono stati allontanati al momento della produzione del metallo. In questa categoria possiamo collocare: la maggioranza degli acciai, gli ottoni, i bronzi, le leghe brisanti, la maggior parte delle leghe di alluminio, e, per finire, le leghe per impieghi ad alta temperatura, applicate negli impianti per la produzione di energia.



non verranno presi in considerazione questi materiali

metallici, ma l'interesse verrà puntato sui metalli veramente puri, in quanto costituiti da atomi tutti uguali di uno stesso elemento. In questo modo, parlando della struttura, si potrà trascurare una variabile, la composizione, in quanto ogni atomo è contornato da atomi identici. È chiaro come sia possibile, in queste ultime condizioni, calcolare il numero di atomi presenti nell'unità di volume (ad esempio 1 cm^3) ricordando quanto è già stato accennato nel primo capitolo (si veda la FIG. 4). Il numero che rappresenta il peso atomico di un elemento, se è espresso in unità di massa atomica, è lo stesso che, una volta espresso in grammi, rappresenta la massa di 6×10^{23} atomi di quell'elemento. Quest'ultimo numero è chiamato *numero di Avogadro* e verrà impiegato spesso in seguito.

Per il rame ad esempio, dato che 63,54 è il peso atomico di questo elemento, occorreranno 63,54 g di metallo perché si disponga di 6×10^{23}



atomi; occorreranno invece 26,98 g di alluminio (peso atomico 26,98) oppure 55,85 g di ferro (peso atomico 55,85), sempre per avere 6×10^{23} atomi dell'elemento preso in considerazione. Premesso questo ed essendo noto che 1 cm³ di rame pesa 8,96 g, si può agevolmente calcolare che sono presenti $0,85 \times 10^{23}$ atomi di rame per cm³, come risulta dai rapporti: $(8,96 \text{ g/cm}^3) / (63,54 \text{ g} / 6 \times 10^{23} \text{ atomi})$.*

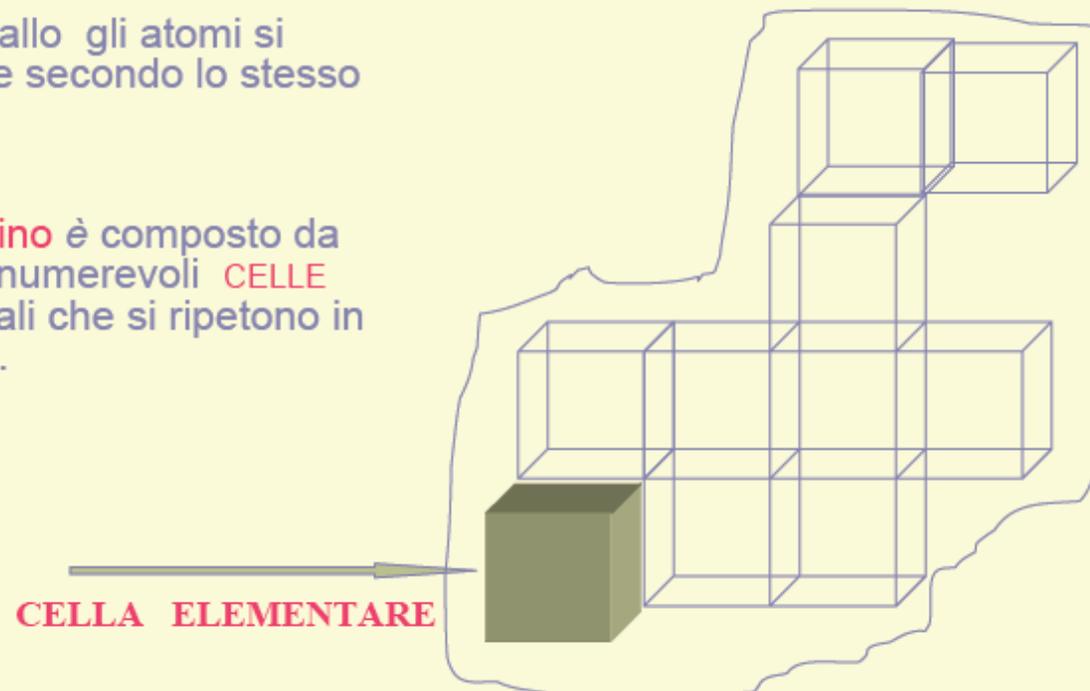


STRUTTURA CRISTALLINA DEI METALLI

In un metallo puro , allo stato solido , gli atomi si dispongono secondo una **geometria ordinata e regolare**, chiamata **reticolo cristallino**, che si sviluppa in tutta la massa .

Nello stesso metallo gli atomi si dispongono sempre secondo lo stesso reticolo .

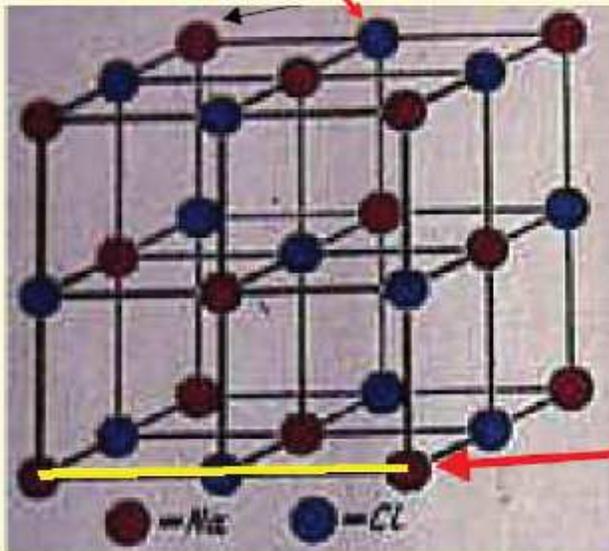
Il **reticolo cristallino** è composto da un insieme di innumerevoli **CELLE ELEMENTARI** uguali che si ripetono in tutte le direzioni .





RETICOLO CRISTALLINO

Atomi



Il reticolo cristallino è una struttura virtuale ottenuta unendo le particelle (atomi, gli ioni o le molecole) che formano il solido ; in esso si distinguono :

- Nodi : punto ove si trova l'atomo
- Filari : insieme di atomi allineati
- Piani reticolari : insieme di nodi che sono su un piano
- Celle elementari : unità che si ripete indefinitamente nella massa



Raggio atomico

La distanza tra gli atomi presenti in un solido può essere misurata per mezzo della diffrazione a raggi X. Esula dal compito di questo volume descrivere in dettaglio questo metodo; basterà tuttavia tenere presenti i valori riportati nella TAB. V, che sono il risultato di queste misure. Va anticipato, inoltre, che in seguito verrà usato per descrivere gli atomi del metallo il modello semplificato a *sfere rigide*, immaginando cioè gli atomi come sferici e a contatto. In questo modo è possibile definire un *raggio atomico* (R), rappresentato dalla metà della distanza tra il centro di due atomi contigui; per il rame, essendo 0,2556 nm la distanza, si avrà un raggio, R_{Cu} di 0,1278 nm.**

Una volta noto il raggio, è semplice calcolare il volume della sfera corrispondente, $8,7 \times 10^{-3} \text{ nm}^3$ ($8,7 \times 10^{-24} \text{ cm}^3$). Tenendo conto del fatto che in un sistema di sfere rimangono necessariamente degli spazi vuoti, si può stimare che ogni atomo occupa poco più di 10^{-23} cm^3 e quindi che in 1 cm^3 sono presenti poco meno di 10^{23} atomi di rame. Questo risultato concorda pienamente con il calcolo precedente, secondo il quale sono presenti $0,85 \times 10^{23}$ atomi di rame per cm^3 di metallo.



* Per comodità di conteggio, chimici e metallurgisti hanno introdotto delle unità di misura ad hoc: il *grammoatomo* e la *grammolecola* (o *mole*). Si è convenuto di definire come 1 grammoatomo (o 1 grammolecola) di un certo elemento (o composto) una quantità, espressa in grammi, pari al peso atomico (o molecolare) dell'elemento. Ad esempio H_2SO_4 ha peso molecolare 98, quindi 98 g di H_2SO_4 sono 1 grammolecola di tale composto. Un grammoatomo (e una grammolecola) contengono, indipendentemente dall'elemento (o dal composto) in questione, un numero di atomi (o di molecole) pari al numero di Avogadro.

** Per R si usa comunemente, come unità di misura, l'angstrom, Å ; $1 \text{ Å} = 10^{-8} \text{ cm}$. Nel presente volume ci si è invece uniformati al Sistema Internazionale di misura e per definire le distanze in scala atomica verrà impiegata, come unità di misura, il sottomultiplo del metro: il nanometro, nm: $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 10 \text{ Å}$.



ESEMPIO

Un filo di alluminio con diametro 2,58 mm è lungo 30,48 cm. Quanti atomi contiene?

SOLUZIONE

Peso atomico Al = 26,98; densità Al = 2,699 g/cm³;

$$\text{numero atomi Al} = \frac{(2,699 \text{ g/cm}^3) [\pi(0,129 \text{ cm})^2(30,48 \text{ cm})]}{(26,98 \text{ g} / 6 \times 10^{23} \text{ atomi})} = 0,96 \times 10^{23} \text{ atomi.}$$

Commenti. Vi sono $0,6 \times 10^{23}$ atomi Al per cm³, mentre per il rame vi sono $0,85 \times 10^{23}$ atomi Cu per cm³; questo significa che $R_{\text{Al}} > R_{\text{Cu}}$, come si può verificare nella TAB. V.



TAB. V - DISTANZE INTERATOMICHE E RAGGI ATOMICI
NEI METALLI

Metallo	Simbolo chimico	Struttura	Distanza interatomica (nm) ¹	Raggio atomico (nm)
argento	Ag	fcc	0,2888	0,1444
alluminio	Al	fcc	0,2862	0,1431
oro	Au	fcc	0,2882	0,1441
berillio	Be	hcp	0,228 ²	0,114 ²
cadmio	Cd	hcp	0,296 ²	0,158 ²
cobalto	Co	hcp	0,250 ²	0,125 ²
cromo	Cr	bcc	0,2498	0,1249
rame	Cu	fcc	0,2556	0,1278
ferro α	Fe (α)	bcc	0,24824	0,12412
ferro γ	Fe (γ)	fcc	0,2540	0,1270
potassio	K	bcc	0,4624	0,2312
litio	Li	bcc	0,3038	0,1519
magnesio	Mg	hcp	0,322 ²	0,161 ²
molibdeno	Mo	bcc	0,2725	0,1362
sodio	Na	bcc	0,3714	0,1857
nichel	Ni	fcc	0,2491	0,1246
piombo	Pb	fcc	0,3499	0,1750
platino	Pt	fcc	0,2775	0,1386
titanio α	Ti (α)	hcp	0,293 ²	0,146 ²
titanio β	Ti (β)	bcc	0,285	0,142
vanadio	V	bcc	0,2632	0,1316
wolframio (o tungsteno)	W	bcc	0,2734	0,1367
zinco	Zn	hcp	0,278 ²	0,139 ²
zirconio	Zr	hcp	0,324 ²	0,162 ²

¹ 1 nm = 10⁻⁹ m = 10 Å.

² Per la struttura hcp viene indicato un valore medio, poiché il raggio varia con la direzione; il modello di atomo non è sferico ma ellissoidale.



ESEMPIO

Immaginando gli atomi di rame come sfere rigide di raggio 0,1278 nm e ricordando che vi sono $0,85 \times 10^{23}$ atomi per Cu per cm^3 , qual è il *fattore di impacchettamento atomico* per il rame? In altri termini qual è la frazione di volume occupata dagli atomi-sfera?

SOLUZIONE

$$\frac{\text{volume degli atomi}}{\text{volume totale}} = \frac{(0,85 \times 10^{23} \text{ atomi})(4\pi/3)(1,278 \times 10^{-8} \text{ cm})^3 / \text{atomo}}{1 \text{ cm}^3} =$$
$$= 0,74 \text{ cm}^3 / \text{cm}^3 = 0,74.$$

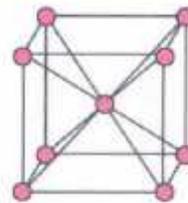
Commento. Il valore 0,74 è il più alto raggiungibile con delle sfere. Il modello a sfere rigide è fedele per il fatto che non è possibile avvicinare due atomi di rame, con i loro nuclei e le loro nubi elettroniche, ad una distanza tra i centri minore di 0,2556 nm. D'altra parte le particelle non cariche, come i neutroni, possono muoversi attraverso questo volume sferico, indicando che rimane dello spazio vuoto all'interno degli atomi.



CELLE ELEMENTARI DEI METALLI PURI

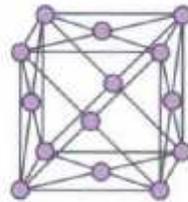
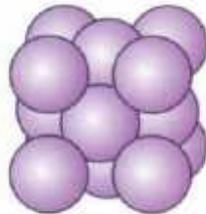
La maggior parte dei metalli puri allo stato solido è costituita da Celle Elementari appartenenti ad uno dei tre tipi fondamentali riportati :

1



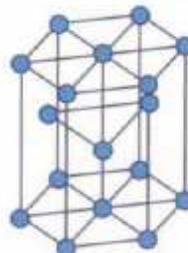
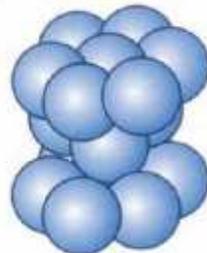
1) CELLA CUBICA A CORPO
CENTRATO (C C C)
(si ha nel W , Cr , Mo , Fe α)

2



2) CELLA CUBICA FACCE
CENTRATE (C F C)
(Au , Ag , Al , Cu , Pb , Fe γ)

3



3) CELLA ESAGONALE (E C P)
COMPATTA
(si ha nello Zn , Mg , Cd , Be)



Metalli a reticolo cubico

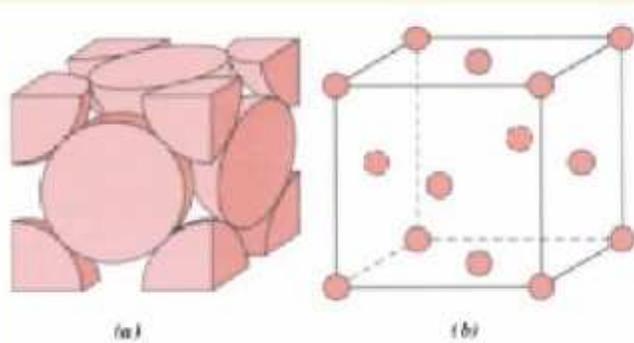
Quando un metallo solidifica, i suoi atomi si dispongono in modo regolare, costituendo un *reticolo cristallino*. Questa disposizione regolare è favorita in quanto dà luogo a legami, tra gli atomi, più stabili di quelli che si avrebbero in una disposizione casuale.

Reticolo cubico a facce centrate

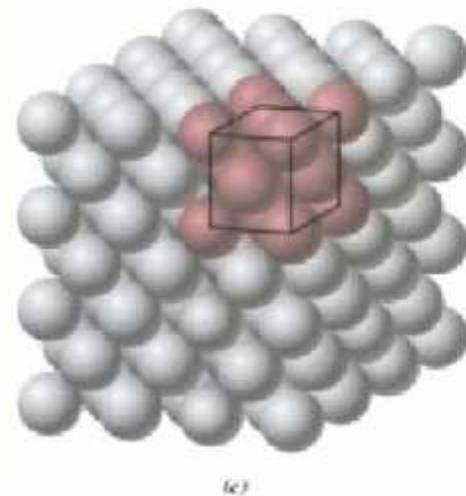
Il legame tra gli atomi sussiste grazie alla loro attrazione reciproca, per cui in molti metalli gli atomi si dispongono in modo da essere in contatto con il maggior numero possibile di altri atomi. In questi metalli si hanno strutture tali per cui ogni atomo 'tocca' o, meglio, è in rapporto di coordinazione con altri 12 atomi; in questo caso si dice che il *numero di coordinazione*, CN, è 12. Questo numero è il massimo immaginabile per un modello a sfere rigide, tutte di ugual raggio (FIG. 18); estendendo in tre dimensioni questa disposizione degli atomi si ottiene la configurazione riportata nella FIG. 19. Esaminando quest'ultima è chiaro perché venga denominata *cubica a facce centrate* (spesso indicata semplicemente come



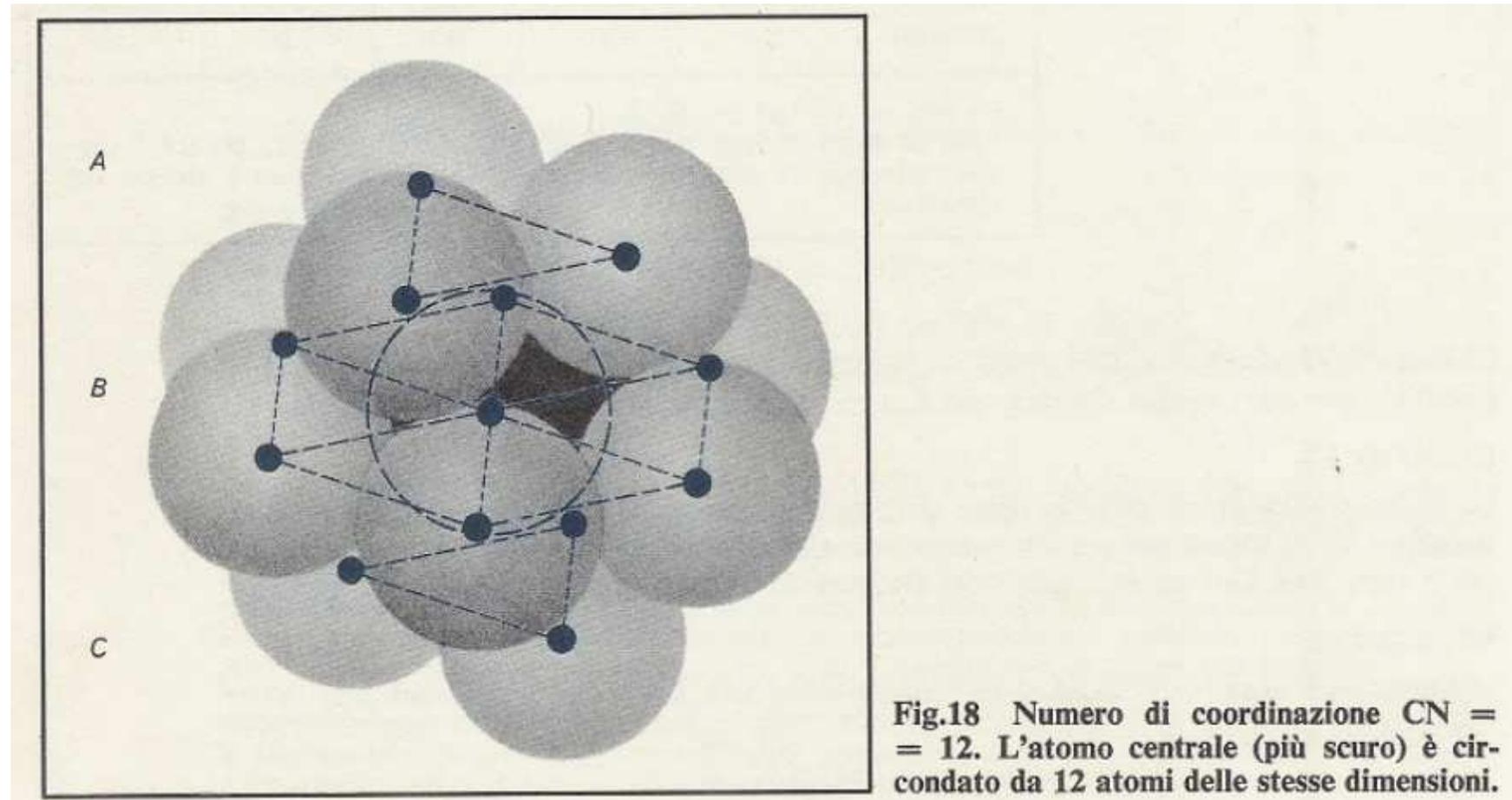
CELLA CUBICA A FACCE CENTRATE



Ha la forma di un cubo a base esagonale ed è composta da 14 atomi ; di cui 8 si trovano ai vertici del cubo e 6 ai centri delle facce del cubo .



E' la struttura tipica dei materiali **più duttili** quali Rame (Cu) Alluminio (Al) , Oro (Au) , Argento (Ag) ; Ferro- γ



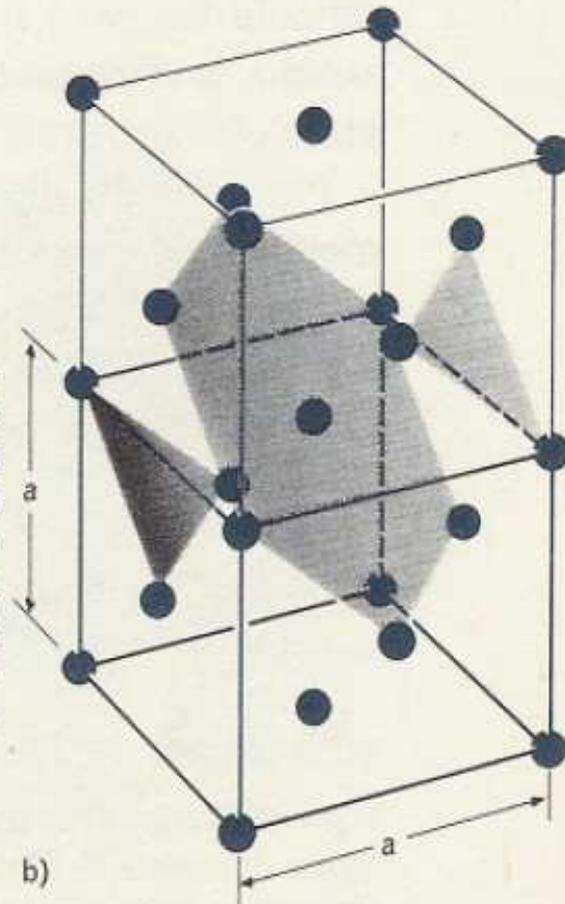


fcc), in quanto gli atomi occupano *posizioni reticolari* del tutto equivalenti nella *cella unitaria*, poste sia ai vertici sia al centro delle facce di un cubo. Come si è detto, molti metalli (alluminio, calcio, ferro ad alta temperatura, nichel, rame, argento, platino, oro, piombo) e altri materiali hanno questo tipo di reticolo altamente simmetrico. Infatti ogni spigolo della cella unitaria (indicato con a in FIG. 19) ha ugual lunghezza e forma angoli di 90° con gli altri spigoli; inoltre, come si è detto, ogni atomo è contornato da altri 12 atomi. Infine il centro di ciascuna faccia e i vertici sono siti reticolari *equivalenti*, nel senso che considerando l'atomo, che nel modello occupa il centro di una faccia, in posizione di vertice si può sviluppare, a partire da questo, una nuova cella elementare cubica a facce centrate uguale alla precedente. Quanto ora detto può essere verificato sviluppando il reticolo della FIG. 19 a) con l'aggiunta di altre celle unitarie in tutte le direzioni, e confrontando il risultato con la FIG. 20.



a)

Fig.19 Sistema cubico a facce centrate (fcc). a) Modello a sfere rigide. Gli atomi si trovano ai vertici e al centro delle facce della cella cubica. Vi sono 4 sfere per cella cubica ($8/8$ ai vertici e $6/2$ al centro delle facce). b) Correlazione fra le Figg. 19 e 18.



b)



Un esame accurato della cella unitaria di FIG. 19 a) rivela che essa contiene l'equivalente di 4 atomi (6 mezzi atomi ai centri delle facce e 8 ottavi di atomo ai vertici). Da ciò è possibile calcolare il volume delle sfere presenti in ogni cella unitaria, rappresentato da $4 \times (4\pi R^3 / 3)$, cioè il volume di quattro sfere. Inoltre lo spigolo a della cella unitaria, definito *costante reticolare*, è uguale a $4R / \sqrt{2}$ e il volume della cella $32 R^3 / \sqrt{2}$, dove R è il raggio atomico (vedi FIG. 20). A questo punto è calcolabile il *fattore di impacchettamento atomico*, come rapporto tra il volume delle sfere rigide presenti nella cella unitaria e il volume totale di quest'ultima; nel caso del reticolo fcc tale rapporto è uguale a $\pi / 3 \sqrt{2}$, che numericamente vale 0,74, riconfermando quanto si è ottenuto per altra via nell'esempio 3.2.

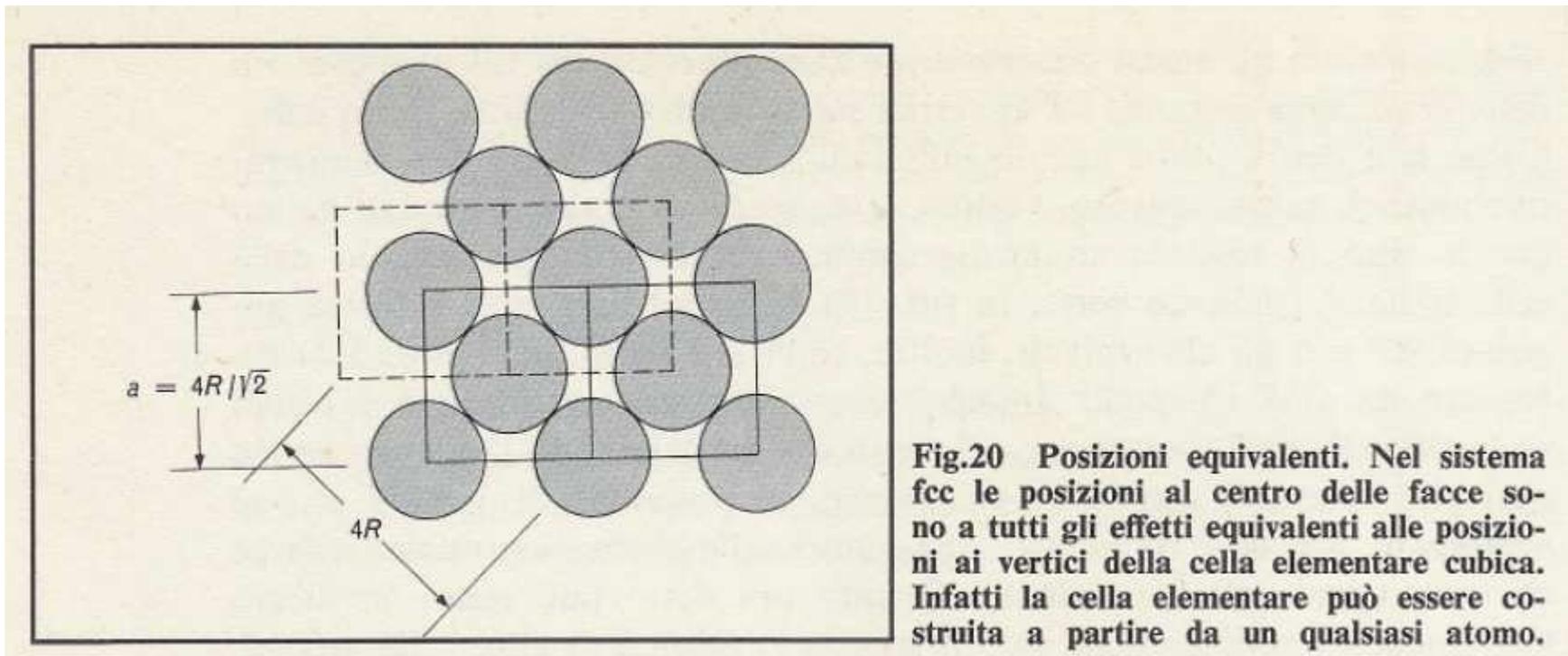


Fig.20 Posizioni equivalenti. Nel sistema fcc le posizioni al centro delle facce sono a tutti gli effetti equivalenti alle posizioni ai vertici della cella elementare cubica. Infatti la cella elementare può essere costruita a partire da un qualsiasi atomo.



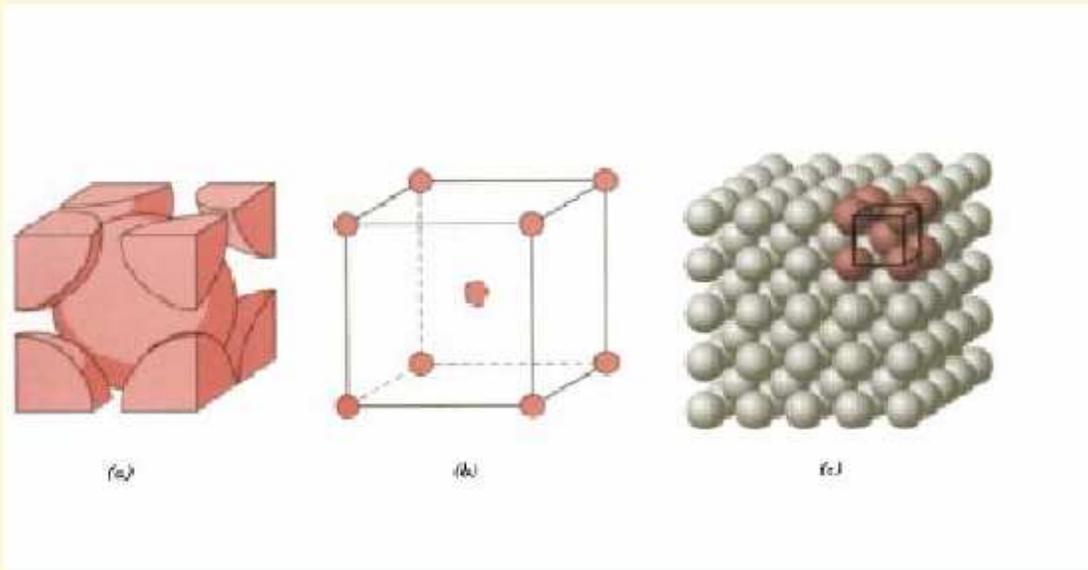
Reticolo cubico a corpo centrato

La FIG. 21 mostra un'altra disposizione degli atomi nel reticolo cristallino, abbastanza diffusa tra i metalli e nota come *cubica a corpo centrato* (spesso indicata con le iniziali *bcc*). Il sodio, il potassio, il titanio (ad alta temperatura), il cromo, il ferro (a temperatura ambiente) e il tungsteno presentano questo tipo di reticolo. Anche in questo caso si tratta di una configurazione molto simmetrica, poiché ogni spigolo della cella unitaria ha ugual lunghezza e forma angoli di 90° con i vicini. A differenza del reticolo fcc però il numero di coordinazione è uguale a 8, in quanto ogni atomo è circondato solo da altri otto atomi; d'altra parte le posizioni atomiche (centrate o di vertice) sono equivalenti anche in questo caso.

Pur essendo meno diffuso del reticolo fcc, il reticolo bcc è presente in metalli tecnologicamente importantissimi. Ne è un esempio probante la presenza nel ferro che, durante il raffreddamento, muta il suo reticolo da fcc a bcc; questo fenomeno sta alla base delle proprietà di molti acciai che verranno illustrate in seguito, interpretandole in termini di struttura.



CELLA CUBICA A CORPO CENTRATO



Ha la forma di un cubo ed è composta da 9 atomi ; di cui 8 stanno ai vertici del cubo ed 1 al centro del cubo

E' la struttura tipica dei materiali più duri quali Tungsteno (W) , Ferro- α Molibdeno (Mo) ,



ESEMPIO

Determinare il fattore di impacchettamento atomico proprio del reticolo cubico a corpo centrato.

SOLUZIONE

Ogni cella unitaria bcc contiene l'equivalente di due atomi, schematizzati come sfere rigide di raggio R . Dalla FIG. 21 appare che la diagonale nella cella unitaria e la costante reticolare sono rispettivamente:

$$\begin{aligned} 4R &= \sqrt{a^2 + a^2 + a^2} \\ a_{\text{bcc}} &= 4R/\sqrt{3}; \end{aligned} \quad (23)$$

per cui il fattore di impacchettamento è

$$\frac{2(4\pi R^3/3)}{(4R/\sqrt{3})^3} = 0,68.$$

Commenti. È interessante notare come il fattore di impacchettamento sia indipendente dal raggio atomico. Inoltre nel reticolo bcc il fattore è minore di quello proprio del reticolo fcc, in quanto ogni atomo è contornato solo da otto atomi, anziché dodici.

Le celle elementari cubiche sono equiassiali in quanto le loro dimensioni sono uguali nelle tre direzioni principali.

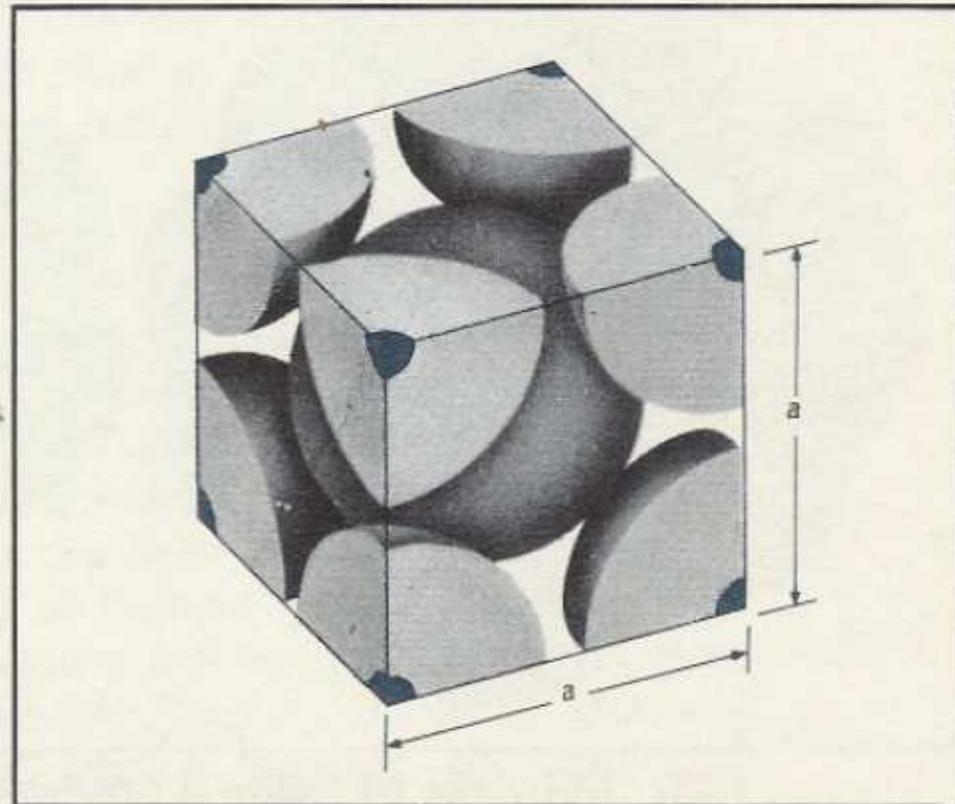


Fig.21 Sistema cubico a corpo centrato, bcc. Modello a sfere rigide della cella elementare cubica. Gli atomi si trovano ai vertici e al centro del cubo. La cella elementare contiene due sfere (1/8 di sfera per ciascuno dei vertici e una sfera al centro).



ESEMPIO

Il nichel ha un reticolo fcc, con un atomo di nichel in ogni sito reticolare. Calcolare la densità del nichel sapendo che il suo peso atomico è 58,71.

SOLUZIONE

La densità ρ è la massa della unità di volume e si misura in g/cm^3 . Con quattro atomi di nichel per ogni cella unitaria e 6×10^{23} atomi in 58,71 g, ogni cella unitaria contiene $4(58,71 / 6 \times 10^{23})$ g. D'altra parte

$$a_{\text{fcc}} = 4R\sqrt{2}; \quad (24)$$

$R = 0,1246$ nm, come si desume dalla TAB. V, per cui:

$$a_{\text{Ni}} = 0,3525 \text{ nm}$$

$$\rho = \frac{4 \text{ atomi} \times (58,71 \text{ g} / 0,6 \times 10^{24} \text{ atomi})}{(3,525 \times 10^{-8} \text{ cm})^3} = 8,95 \text{ g}/\text{cm}^3.$$

Commento. Le misure sperimentali danno $8,90 \text{ g}/\text{cm}^3$ in ottimo accordo col dato teorico;



ESEMPIO

Il ferro puro cambia reticolo da bcc a fcc a 910 °C. Il ferro subirà una dilatazione o si contrarrà a causa di questo cambiamento? In prima approssimazione il raggio atomico va ritenuto costante per entrambe le strutture.

SOLUZIONE

Prendendo come base 4 atomi si avranno 2 celle unitarie bcc = 1 cella unitaria fcc.

$$V_{\text{bcc}} = 2a_{\text{bcc}}^3 = 2(4R/\sqrt{3})^3 = 24,6 R^3$$

$$V_{\text{fcc}} = (4R/\sqrt{2})^3 = 22,6 R^3$$

$$\text{per cui } V_{\text{fcc}}/V_{\text{bcc}} = 22,6 R^3/24,6 R^3 = 0,92.$$

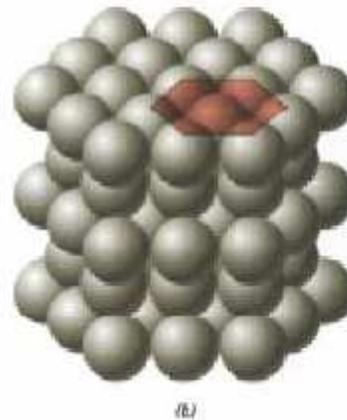
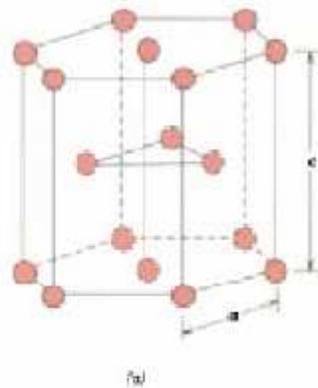
Si avrà quindi una contrazione di volume dell'8% al momento del cambio di reticolo alla temperatura di 910 °C.

Commenti. Questo risultato poteva essere anticipato considerando il fattore di impacchettamento, che è maggiore per il reticolo fcc rispetto al bcc (0,74 contro 0,68).

Misure sperimentali molto accurate mostrano che il ferro bcc ha un raggio atomico leggermente minore del ferro fcc; per questo la contrazione di volume nella realtà è minore dell'8% ora calcolato.



CELLA ESAGONALE COMPATTA



Ha la forma di un prisma retto a base esagonale ed è composta da 17 atomi ; di cui 12 si trovano ai vertici del prisma , 2 ai centri delle basi e 3 all'interno del prisma .

E' la struttura tipica dei materiali fragili quali Zinco (Zn) ,
Magnesio (Mg)



Metalli a reticolo non cubico

Alcuni importanti metalli non hanno un reticolo cubico; fra essi il magnesio, il titanio (a temperatura ambiente), il cobalto, lo zinco, lo zirconio

e il cadmio hanno un reticolo definito *esagonale*, con un fattore di impacchettamento 0,74 uguale a quello del reticolo fcc. Anche il numero di coordinazione è uguale nei due casi ($CN = 12$) e la disposizione degli atomi, già mostrata nella FIG. 18 (e riprodotta per un utile confronto in

FIG. 22 a) si ripete per il reticolo esagonale, con una rotazione di 60° degli atomi presenti sul piano inferiore (FIG. 22 b); è questa differenza che contraddistingue il reticolo esagonale (FIG. 23) dal cubico. Questo genere di reticolo è anche chiamato *esagonale compatto* (spesso indicato con le iniziali inglesi *hcp*), in quanto presenta piani in cui si ha il massimo di adattamento atomico (analogamente il reticolo fcc è talvolta chiamato *cubico compatto*, *ccp*).

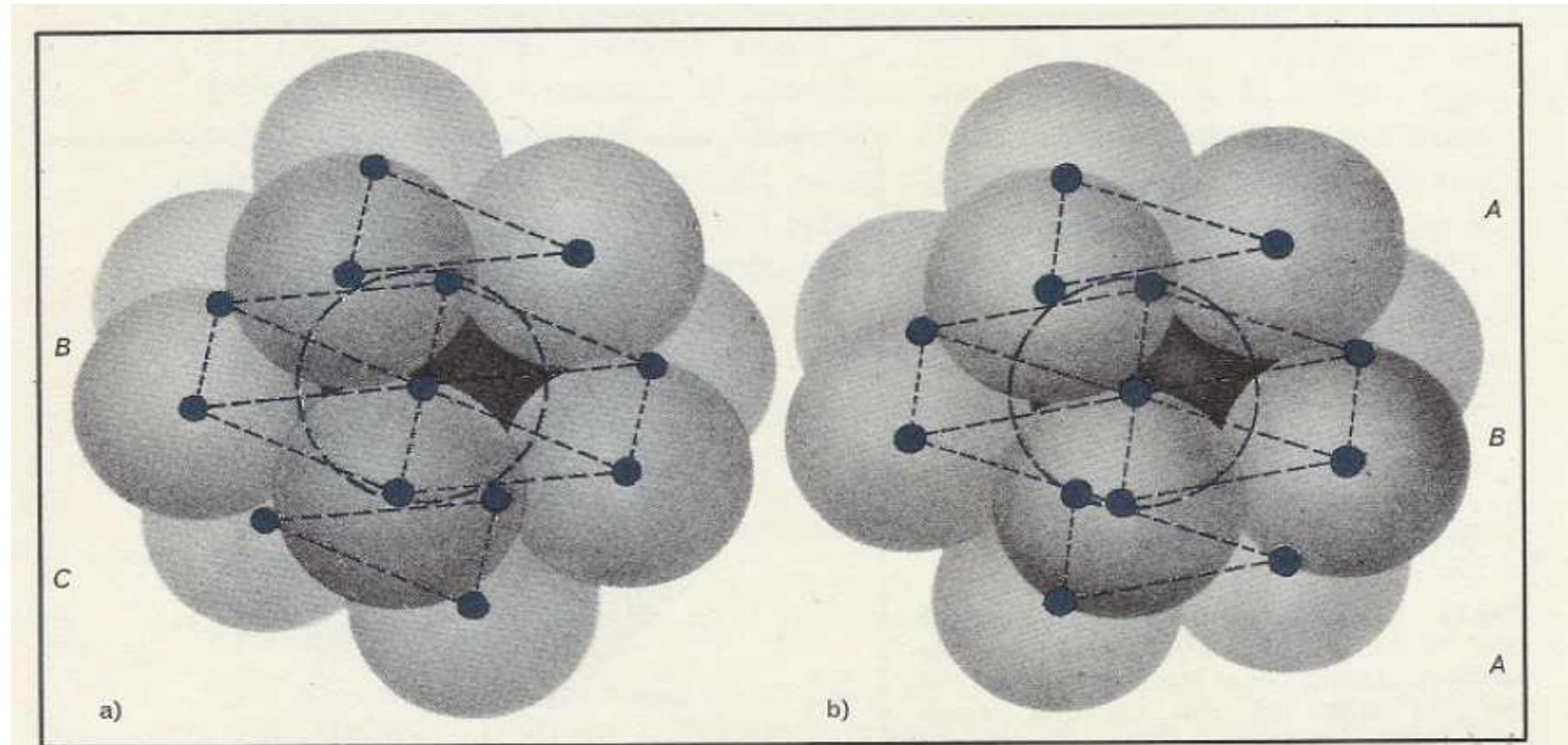


Fig.22 Equivalenza del numero di coordinazione $CN = 12$ nei sistemi: a) fcc; b) ~~bcc~~.

hcp
(ccp)

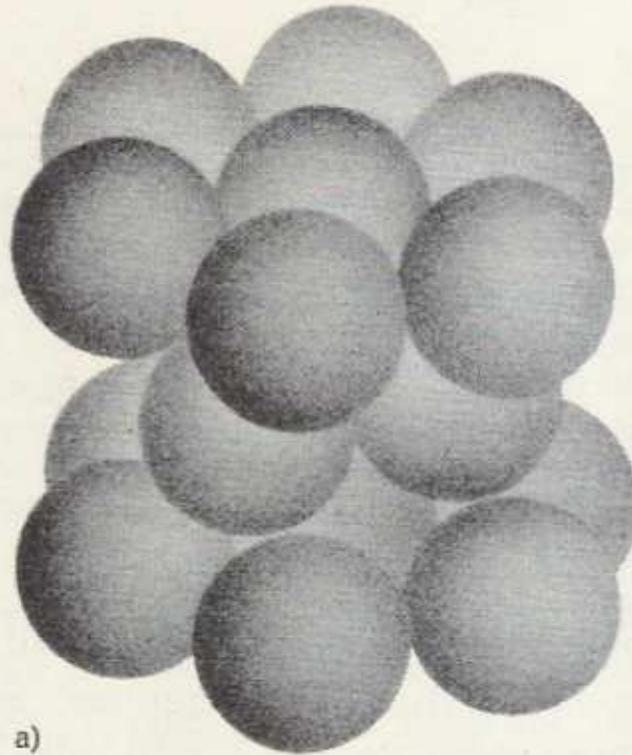
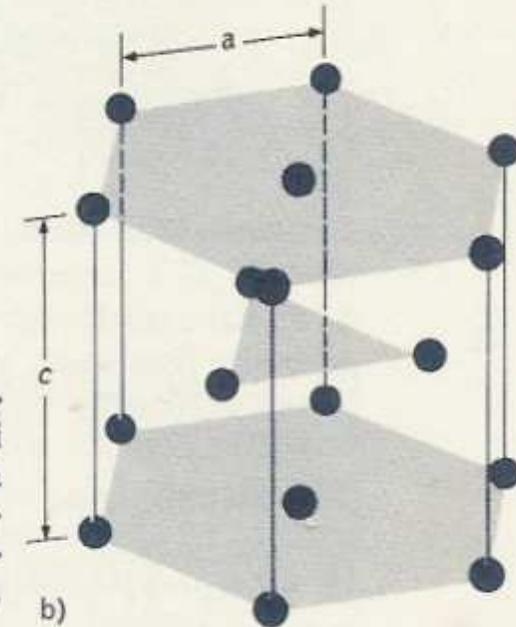


Fig.23 Sistema esagonale compatto, hcp. Ogni atomo è contornato da altri 12 atomi. a) Modello a sfere rigide; b) configurazione semplificata.





La piccola differenza tra i due sistemi hcp e fcc si ripercuote sulle possibilità di subire una deformazione plastica, che si vedrà essere molto più limitata per i metalli a reticolo esagonale. Il magnesio, ad esempio, potrebbe essere impiegato molto più estesamente, sfruttando il suo basso peso specifico ($1,74 \text{ g/cm}^3$), se fosse più agevole trasformarlo in fili, tondi, profilati, ecc. Analogamente, uno dei problemi incontrati nella lavorazione dello zirconio per scopi nucleari deriva dalla limitata plasticità.

I reticoli di alcuni metalli, come ad esempio lo stagno e l'uranio, non sono né cubici né esagonali; comunque è superfluo trattare qui questo argomento, dal momento che gli usi dello stagno e dell'uranio sono assolutamente particolari quando essi vengono impiegati allo stato puro.



ESEMPIO

Il titanio, Ti, che a temperatura ambiente ha un reticolo esagonale, ha raggio atomico di circa 0,146 nm e un fattore di impacchettamento di 0,74. Calcolare la densità ρ del titanio.

SOLUZIONE

Per un atomo:

$$\text{fattore di impacchettamento} = 0,74 = \frac{(4\pi/3)(1,46 \times 10^{-8} \text{ cm})^3}{x \text{ cm}^3},$$

dove x è il 'volume' totale per atomo;

$$x = 17,6 \times 10^{-24} \text{ cm}^3 / \text{atomo};$$

$$\rho = \frac{47,9 \text{ g} / 0,6 \times 10^{-24} \text{ atomi}}{17,6 \times 10^{-24} \text{ cm}^3 / \text{atomi}} = 4,5 \text{ g/cm}^3.$$

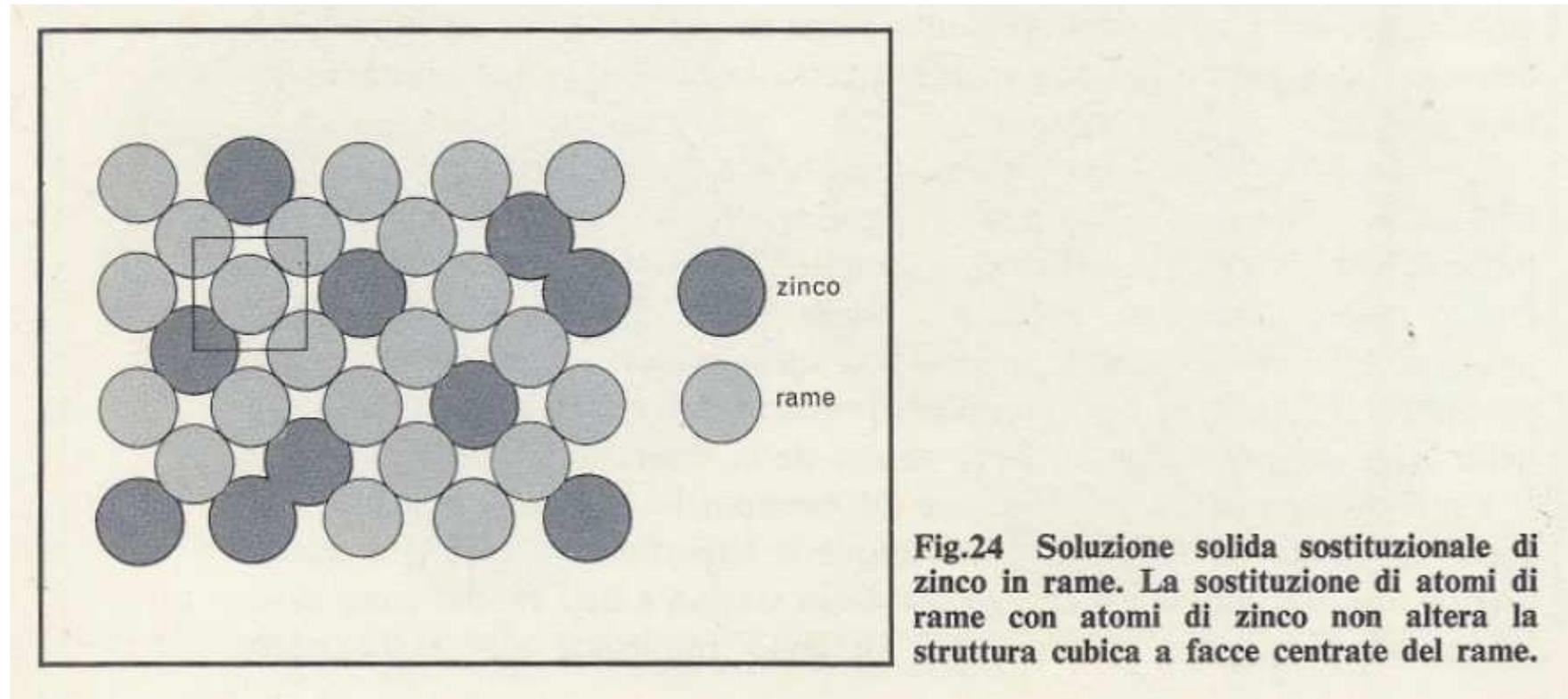
Commenti. Gli atomi dei metalli a reticolo esagonale non sono in genere sferici. Ad esempio Ti è leggermente 'schiacciato' in una direzione, per cui il raggio massimo è di 0,147 nm e quello minimo di 0,145 nm. Eccettuati il magnesio e il titanio, che sono leggermente compressi, gli altri metalli esagonali sono distorti in quanto presentano un allungamento nella direzione del prisma esagonale.

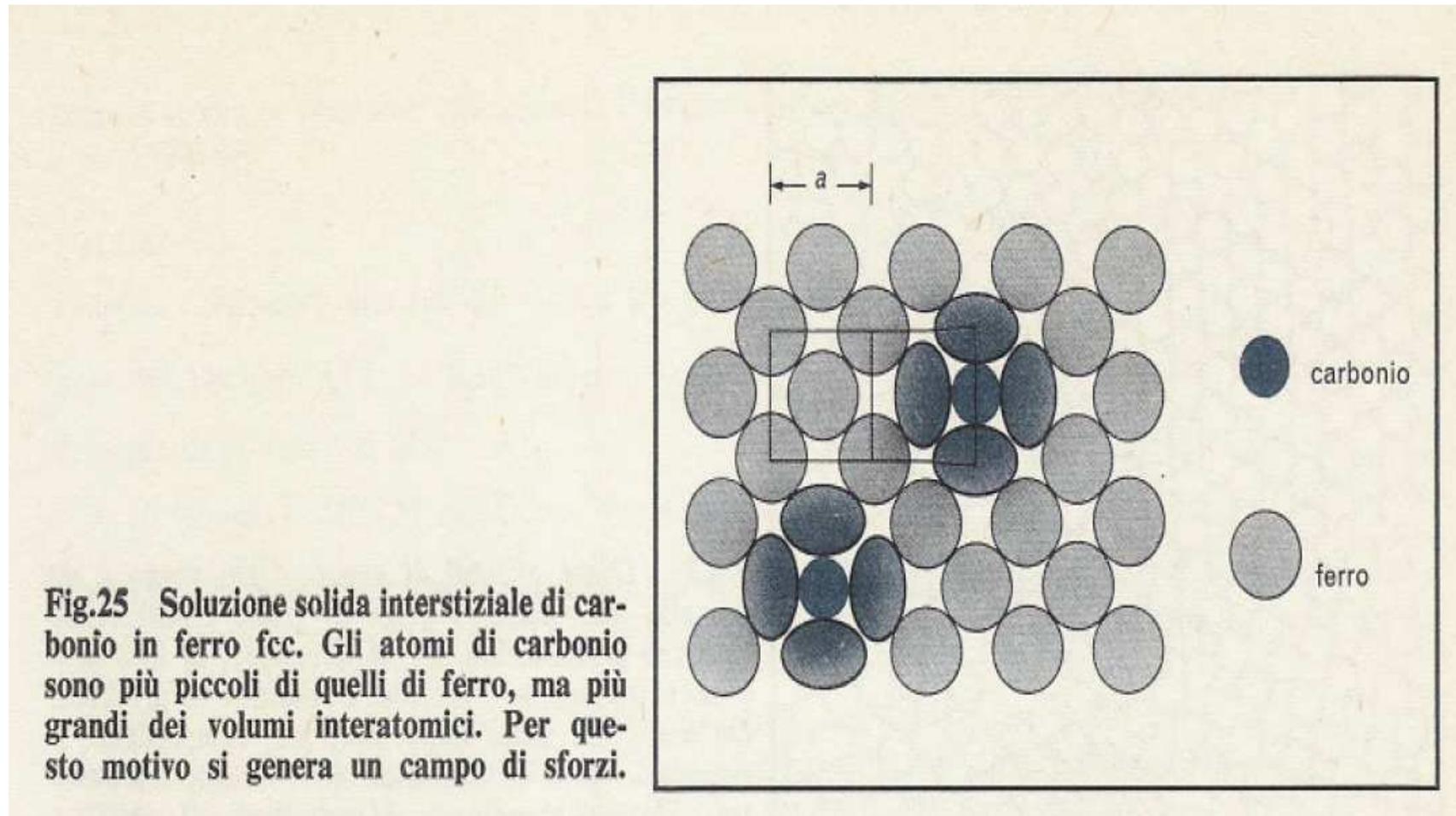


Metalli non puri

In alcuni metalli gli elementi estranei sono indesiderabili, mentre in altri sono aggiunti espressamente come componenti di lega; comunque, nei metalli di purezza commerciale, è sempre presente dallo 0,01 all'1% di atomi estranei.

In questo capitolo sarà esaminato in modo particolare il problema della collocazione degli atomi estranei nel reticolo cristallino e i valori massimi di concentrazione che essi possono raggiungere, mentre, successivamente, nel capitolo V verranno prese dettagliatamente in considerazione le leghe.







Soluzioni solide

La parola *soluzione* è, di norma, subito associata all'idea di un liquido nel quale siano presenti un solvente e un soluto (che perde la sua identità come avviene, ad esempio, per il sale di cucina disciolto nell'acqua). In realtà una situazione analoga può presentarsi per i solidi, anche se questo non è così palese nella vita quotidiana. Si vedrà, nel capitolo IV, che l'ottone è costituito da rame fcc nel quale alcuni atomi (circa il 30%) sono stati sostituiti da atomi di zinco. Come si può rilevare nella FIG. 24 gli atomi di zinco possono collocarsi nelle posizioni reticolari in quanto hanno approssimativamente le stesse dimensioni degli atomi di rame ($R_{Zn} = 0,139$ nm e $R_{Cu} = 0,1278$ nm) e quasi la stessa tendenza a fornire elettroni di legame. Una struttura di questo genere viene chiamata *soluzione solida sostituzionale*. Indicativamente si può ritenere possibile la coesistenza di elementi diversi in una soluzione solida sostituzionale, quando i raggi atomici dei due elementi differiscono di non più del 12-15%.



Un secondo tipo di soluzione solida, definito *soluzione solida interstiziale*, presenta gli atomi dell'elemento disciolto in posizione interstiziale, cioè negli spazi liberi tra gli atomi dell'elemento principale. Naturalmente una simile soluzione è possibile solo qualora gli atomi dell'elemento disciolto siano più piccoli degli altri, come avviene ad esempio per il carbonio disciolto, ad alta temperatura, nel ferro fcc (FIG. 25). Seppur piccoli, gli atomi di carbonio hanno dimensioni sufficienti per deformare il reticolo cristallino originale; ne consegue l'impossibilità di far occupare dal carbonio più del 5-10% delle posizioni interstiziali nel ferro fcc. Quando il ferro, a più bassa temperatura, assume la forma reticolare bcc, si verifica una ulteriore contrazione degli spazi interstiziali, che aumentano di numero ma diminuiscono come dimensioni.



ESEMPIO

Il ferro può ospitare, nel suo reticolo, l'azoto in posizione interstiziale. Se l'analisi di un campione di ferro rivela la presenza dell'azoto, N, nella misura dello 0,05% in peso, qual è la percentuale di atomi di azoto presente?

SOLUZIONE

Prendendo come base 100 000 unità di peso atomico, costituite da 99 950 unità di Fe e 50 unità di N – e ricordando che il peso atomico di Fe è 55,85 e quello di N è 14,01 – possiamo calcolare il numero di atomi di Fe e di N presenti:

$$\frac{99\,950}{55,85} = 1790 \text{ atomi di Fe}$$

e

$$\frac{50}{14,01} = 3,5 \text{ atomi di N.}$$

La percentuale di atomi di N è quindi:

$$N\% = (3,5 / 1793) 100 = 0,2$$

Commenti. Solo il boro, il carbonio, l'azoto e, talvolta, l'ossigeno sono sufficientemente piccoli per disciogliersi in posizione interstiziale nel ferro. Altri elementi, presenti nelle leghe di ferro (nichel, manganese, cromo, silicio, ecc.), sostituiscono gli atomi di quest'ultimo nei reticoli fcc o bcc, formando quindi soluzioni solide sostituzionali.



ESEMPIO

Ritenendo, in prima approssimazione, che non si verifichi alcuna deformazione reticolare nel ferro fcc ad alta temperatura, qual è il massimo valore del raggio che può raggiungere un atomo in posizione interstiziale? Il raggio atomico del ferro ad alta temperatura è di 0,129 nm.

SOLUZIONE

Facendo riferimento alla FIG. 25, dove a è il parametro cristallino:

$$a = 4(0,129 \text{ nm}) / \sqrt{2} = 0,365 \text{ nm};$$

il raggio degli interstizi sarà

$$r = [0,365 \text{ nm} - 2(0,129 \text{ nm})] / 2 = 0,054 \text{ nm}$$

Commenti. Il raggio atomico del carbonio nel ferro è comunemente valutato 0,07 nm; pertanto dovrà presentarsi nel ferro una serie di deformazioni locali attorno agli atomi di carbonio (si veda la FIG. 25).

La distanza tra i centri degli atomi (0,258 nm) assunta nell'esempio, è maggiore di quella riportata nella TAB. V, in quanto si verifica una espansione dovuta alla temperatura e al fatto che l'atomo è circondato da altri 12 (fcc) piuttosto che da altri 8 (bcc).

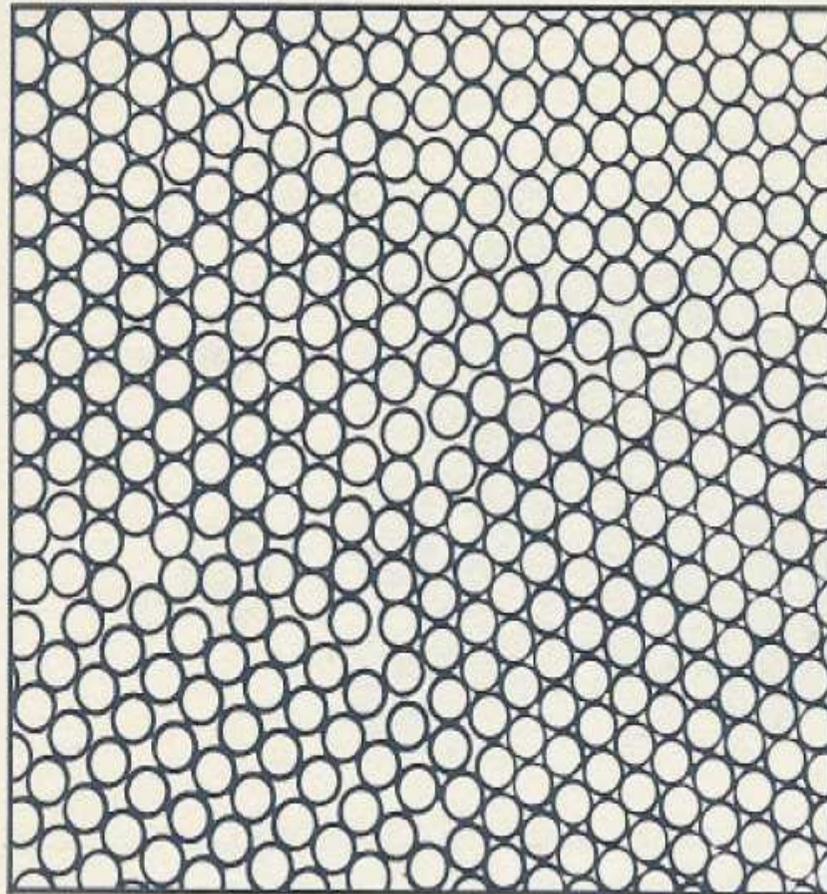


Fig.26 Grani e bordi di grano. Ogni grano è un cristallo individuale. I bordi di grano costituiscono cammini preferenziali per la diffusione; la loro presenza introduce deformazioni e modifica le proprietà dei materiali. Sono importanti per comprendere il comportamento dei materiali (C. Mason, *Introductory physical metallurgy*, Metals Park, O. (1947)).



Grani e bordo del grano

Solo in casi molto particolari i metalli sono costituiti da un unico cristallo; in genere un materiale metallico, come ad esempio un filo di rame, è composto da molti cristalli strettamente impacchettati. Ciascuno di questi, definito *grano*, è costituito da atomi disposti in un reticolo cristallino con una ben precisa orientazione nello spazio. Due grani adiacenti hanno lo stesso tipo di reticolo, ma quest'ultimo ha una diversa orientazione in ogni grano; è quindi inevitabile che la zona di giunzione tra i grani sia sede di una transizione dell'orientazione (FIG. 26). Tale zona è definita *bordo del grano* ed ha una influenza notevole su molte proprietà del metallo.

La maggior parte dei materiali tecnologici è *policristallina*, cioè costituita da molti grani, in quanto al momento della solidificazione si generano molti *nuclei di crescita* e ogni nucleo, dotato di una propria orientazione reticolare, dà luogo ad un grano. Crescendo, i vari grani giungono in reciproco contatto, fino a che si realizza una totale scomparsa del materiale non cristallizzato e una completa congiunzione dei grani (FIG. 27).

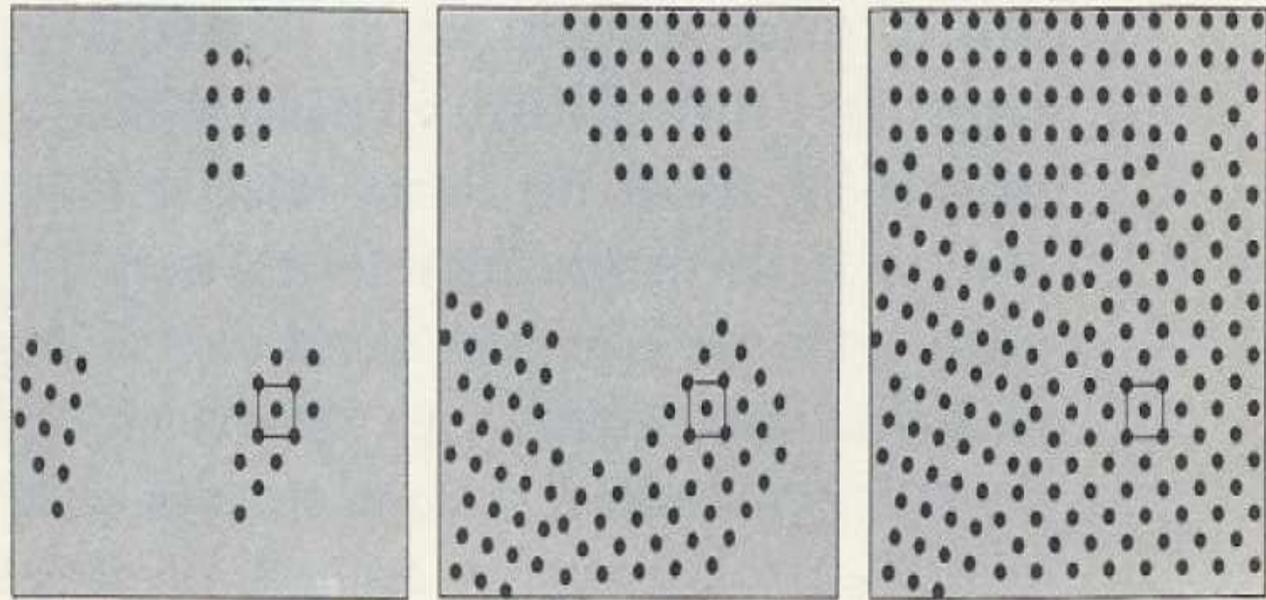


Il bordo del grano, come è ben visibile nello schema di FIG. 26, è una

zona di materiale meno densa di quanto non sia il grano vero e proprio, per cui è facilmente comprensibile come altri elementi presenti (ad esempio il carbonio nel ferro) diffondano più facilmente attraverso il bordo del grano che altrove. A temperatura ambiente i bordi del grano manifestano una influenza anche sulla deformazione plastica e sperimentalmente si è verificato che risulta più resistente un materiale a grano fine (ossia un materiale in cui siano presenti tanti piccoli grani), piuttosto che lo stesso materiale con grossi grani. Ad alta temperatura invece i bordi dei grani facilitano il fenomeno dello scorrimento (noto con il termine di *creep*) e per le applicazioni in queste condizioni (ad esempio nelle palette delle turbine a gas) sono preferibili materiali a grani grossi (FIG. 28).



Fig.27 Crescita dei grani dal liquido. I grani prendono origine da vari nuclei, producendo un bordo, nella zona dove essi vengono a contatto.





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

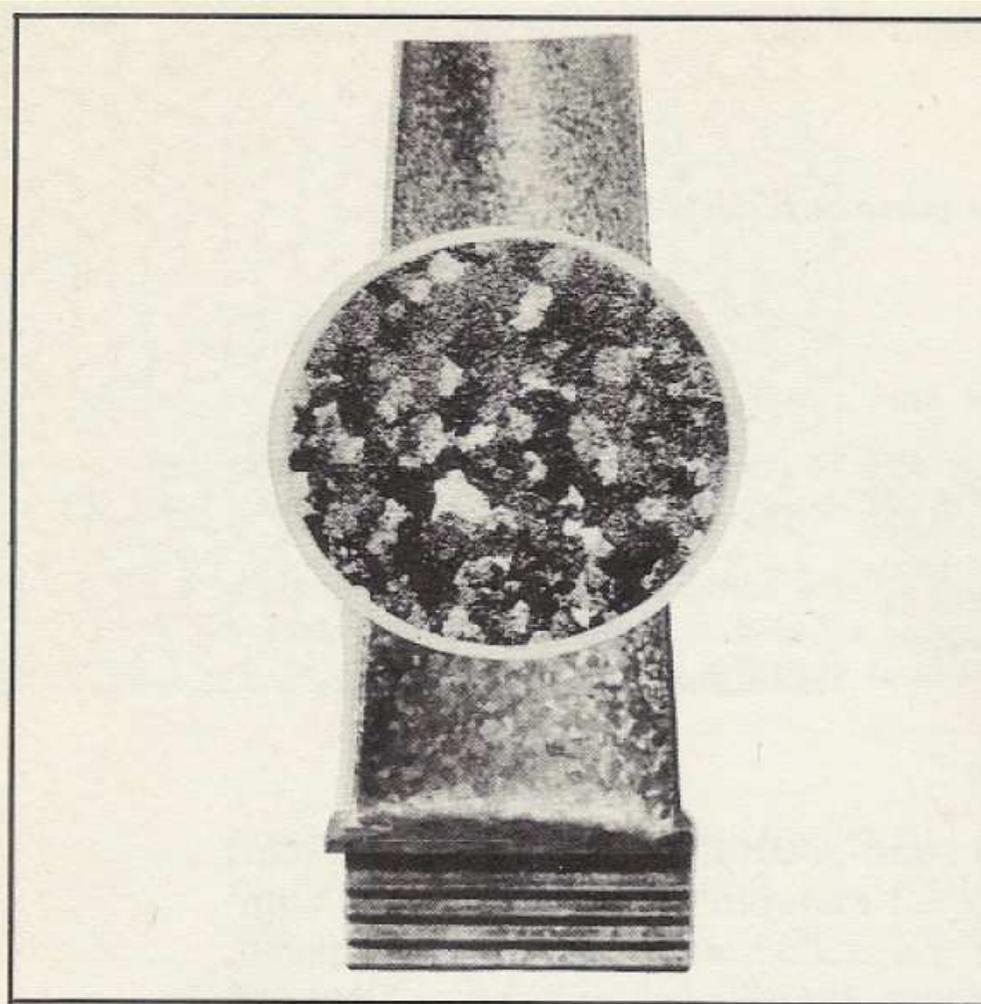


Fig.28 Metallo con grani grossolani in una paletta di turbina. Queste palette vengono impiegate ad alta temperatura e pertanto la superficie dei bordi di grano tende a ridursi a causa dell'ingrossamento dei grani durante l'esercizio. La presenza dei bordi di grano aumenta invece la resistenza meccanica alle temperature più basse (*cortesia di M. E. Shank, Pratt and Whitney*).



Gli atomi presenti al bordo del grano sono contornati da un numero di atomi minore di quanto non sia al centro del grano (FIG. 26) e questo implica che i primi (al bordo del grano) abbiano un contenuto di energia maggiore dei secondi (che l'hanno ceduta in parte al momento di aggregarsi; per meglio comprendere il discorso energetico basta pensare al fatto, intuitivo, che per estrarre un atomo occorre energia e che la quantità necessaria è uguale a quella a suo tempo ceduta dall'atomo per coordinarsi con gli altri). Inoltre al bordo del grano gli atomi non sono strettamente legati, vista la particolare reattività del bordo agli agenti corrosivi.



Dimensioni del grano e superficie del bordo

La FIG. 29 a) mostra la sezione di un metallo, preparata metallograficamente con una lucidatura e un attacco con reattivi chimici. I bordi dei grani aggrediti dai reattivi sono resi evidenti nell'osservazione al microscopio dal fatto che la luce da loro riflessa non può essere raccolta dalle lenti (FIG.



29 b), per cui appaiono come linee scure. L'insieme di questi fenomeni rende possibile valutare le dimensioni dei grani e la superficie totale dei bordi, che sono grandezze di notevole interesse, come si è accennato in precedenza parlando degli effetti della granulometria. Per giungere ad un linguaggio comune è stata curata, soprattutto dall'American Society for Testing and Materials (ASTM), l'elaborazione di reticoli di riferimento del tipo di quelli di FIG. 30, ai quali viene associato un numero convenzionale (GS, dall'inglese *grain size*, che significa dimensioni del grano); l'osservazione al microscopio, per ottenere un corretto paragone con il reticolo, va compiuta a 100 ingrandimenti (vale a dire una distanza lineare reale viene ingrandita cento volte). In seguito si farà più volte riferimento al numero ASTM per illustrare le caratteristiche dei grani e le loro ripercussioni nel comportamento dei materiali.

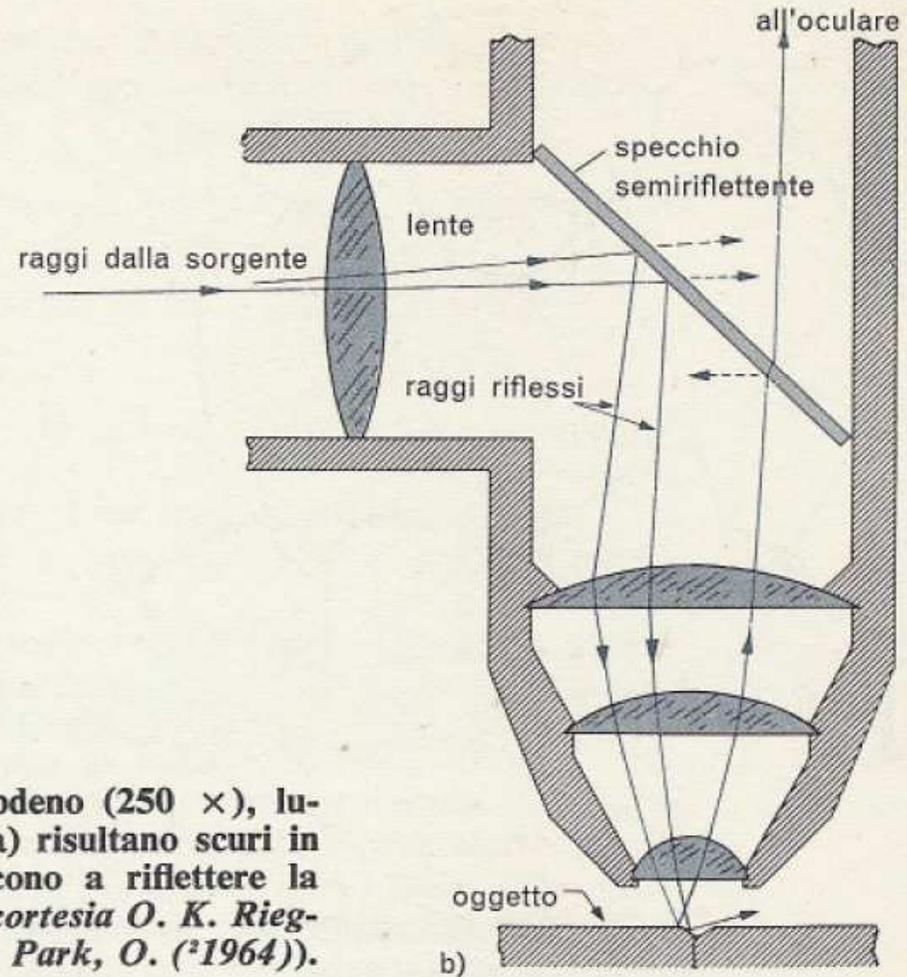
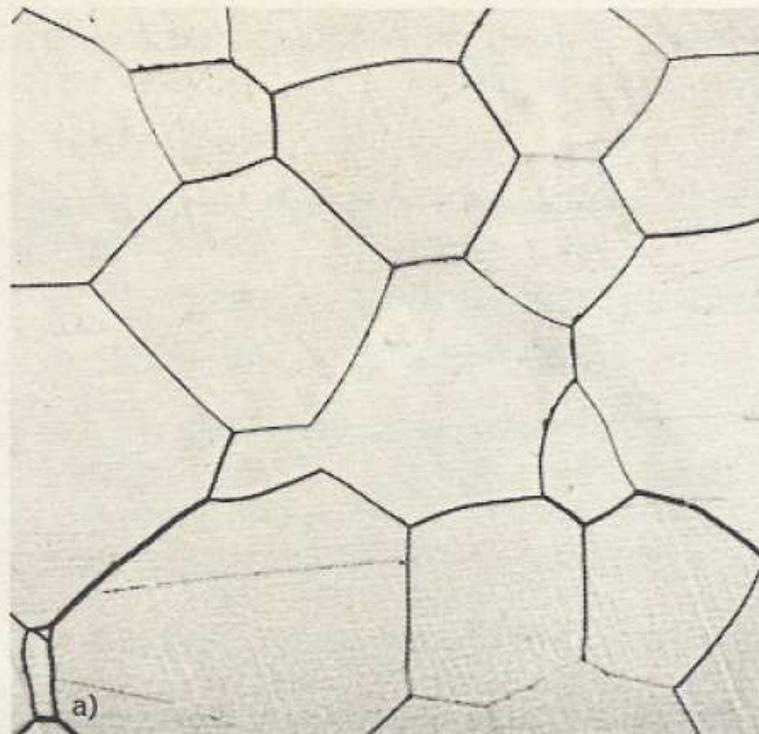
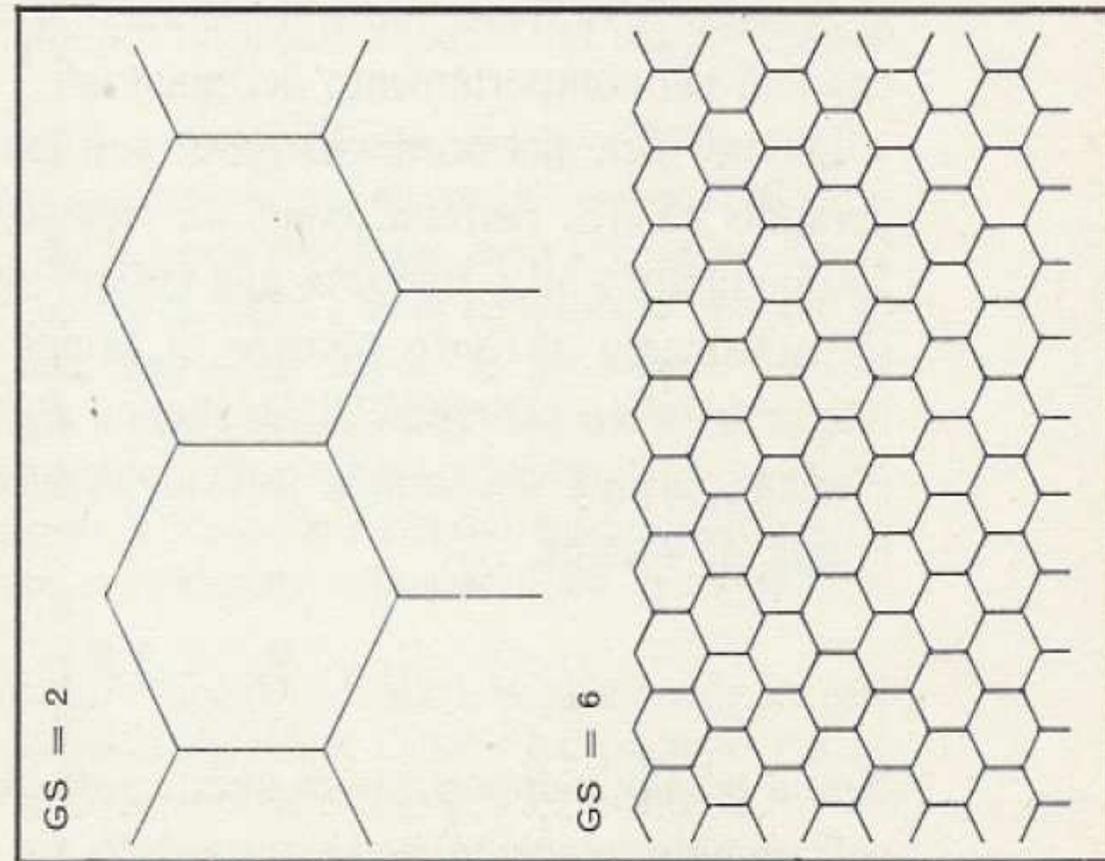


Fig.29 Micrografia di un metallo. a) Molibdeno ($250 \times$), lucidato e attaccato. b) I bordi di grano in a) risultano scuri in quanto, dopo aver subito attacco, non riescono a riflettere la luce, che non viene raccolta dal microscopio (cortesia O. K. Rieger; B. Rogers, *The nature of metals*, Metals Park, O. (²1964)).



Fig.30 Reticoli ASTM per determinare le dimensioni dei grani. GS = 2 indica la presenza di due grani entro 6,45 cm² a 100 ingrandimenti. GS = 6 corrisponde a 32 grani in 6,45 cm² a 100 ingrandimenti. Il numero di grani è conteggiato per in² (1 in² = 6,45 cm²) a 100 ingrandimenti ed è uguale a 2^{n-1} , in cui n corrisponde al numero GS.





La superficie dei bordi dei grani può essere facilmente calcolata considerando un'area ristretta, come ad esempio quella della FIG. 31, in cui a 250 ingrandimenti è tracciata una circonferenza di 0,635 nm. Esaminando statisticamente un certo numero di campi visivi, il numero dei punti di intercettamento per unità di lunghezza, P_L , tra i bordi e la circonferenza è semplicemente uguale alla metà della superficie dei bordi di grano nell'unità di volume, S_V :

$$S_V = 2 P_L. \quad (25)$$

Non è possibile dimostrare in questa sede quanto ora si è detto, comunque nell'esempio seguente verrà impostato un calcolo di queste grandezze.

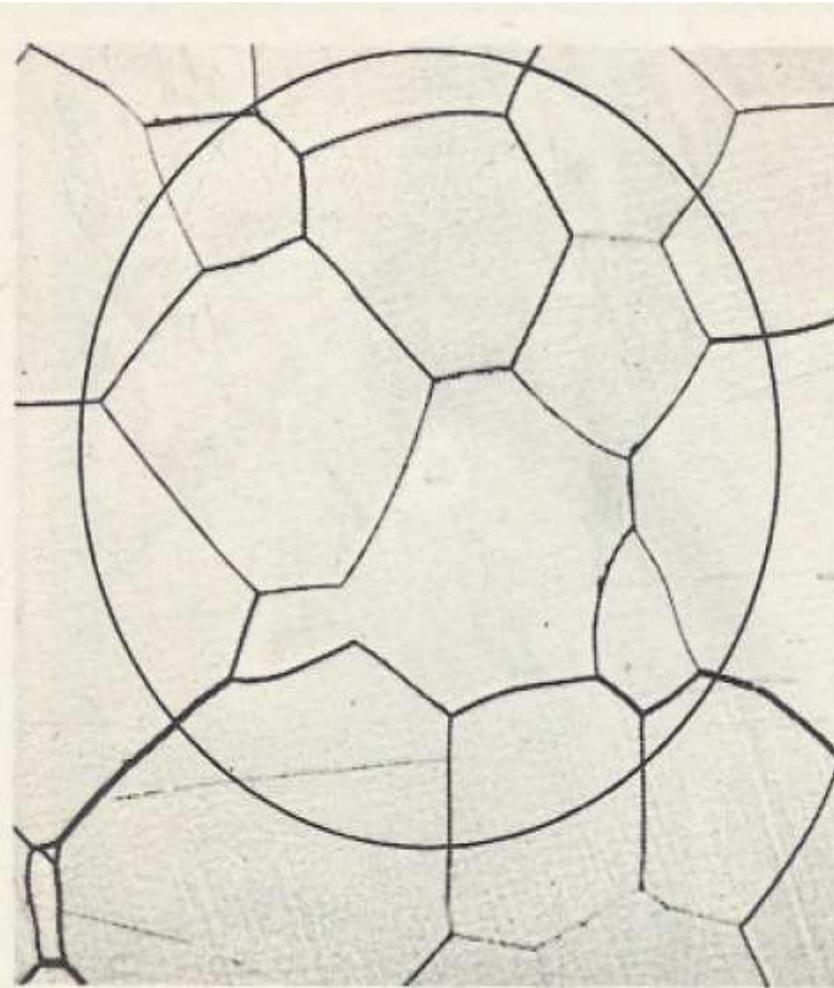


Fig.31 Calcolo dell'area del bordo di grano eseguito su micrografia di molibdeno ($250 \times$) (esempio 3.9).



ESEMPIO 3.9

Determinare la superficie dei bordi di grano per centimetro cubo nel campione di molibdeno della FIG. 31, e stabilire le dimensioni dei grani, oltre al numero ASTM.

SOLUZIONE

La circonferenza della figura intercetta in 11 punti i bordi di grano, ad un ingrandimento di $250 \times$. Quindi

$$P_L = 11 / (5,08 \pi \text{ cm} / 250) = 173 \text{ intersezioni / cm reale}$$

$$S_V = 2 (173 / \text{cm}) = 346 \text{ cm}^2 / \text{cm}^3.$$

La FIG. 31, che rappresenta un'area di $5,72 \times 5,72 \text{ cm}^2$ a $250 \times$, contiene l'equivalente di 17 grani (4 grani $\times 1/4$ agli angoli + 12 grani $\times 1/2$ sui lati + 10 grani all'interno). 5,72 cm, sulla foto a $250 \times$, corrispondono a 0,023 cm reali; questi ultimi, a $100 \times$, divengono 2,3 cm. Quindi in $2,3 \times 2,3 \text{ cm}^2$, a $100 \times$, sono contenuti 17 grani pari a $17 / (2,3 \times 2,3 \text{ cm}^2) = 3,2 \text{ grani / cm}^2$.

Per il calcolo del numero ASTM, bisogna considerare il numero di grani per pollice², pari a 20; in seguito dalla FIG. 30 si ha che grani/pollice² = 2^{n-1} in cui n = numero ASTM; quindi $20 = 2^{n-1}$, da cui n risulta circa uguale a 5.



Commenti. Il cerchio di FIG. 31 deve essere grande almeno tre volte il grano di massima superficie, per poter dare un numero P_L statisticamente accettabile. Spesso inoltre si parla delle dimensioni del grano in termini di 'diametro'; in questo caso i grani della FIG. 31 hanno un diametro medio di circa 0,07 mm (tenuto conto dell'ingrandimento). Si noti d'altra parte che: a) i grani non sono sferici, b) i grani non hanno tutti lo stesso diametro, per cui in genere il diametro non permette di giungere ad una valutazione soddisfacente della superficie del grano o della superficie dei bordi del grano.



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



SOMMARIO

TRATTAZIONE DETTAGLIATA DI UN METALLO



Esercizi

- 3.1.1 Calcolare il numero di atomi presenti in 1 cm^3 di alluminio.
- 3.1.2 Qual è il fattore di impacchettamento degli atomi di alluminio?
- 3.1.3 a) Calcolare il numero di atomi presenti in 1 cm^3 di cromo. b) Qual è il fattore di impacchettamento atomico?
- 3.2.1 Calcolare la densità del piombo fcc.
- 3.2.2 Calcolare la densità del cromo bcc.
- 3.2.3 Sperimentalmente si è accertato che il ferro fcc può essere raffreddato abbastanza rapidamente da evitare la sua trasformazione in ferro con reticolo bcc; in queste condizioni la costante reticolare a_{fcc} ha un valore di $0,359 \text{ nm}$. Paragonare la densità ρ , che compete a questo tipo di ferro, con quella del normale ferro bcc, che ha un valore di costante reticolare a_{bcc} di $0,2861 \text{ nm}$.
- 3.3.1 Assumendo che la densità del magnesio sia $1,74 \text{ g/cm}^3$, calcolare il volume della cella unitaria del magnesio hcp che contiene 6 atomi.
- 3.3.2 La cella unitaria esagonale dello zinco (FIG. 23a) si sviluppa in altezza per $0,494 \text{ nm}$ e ha il lato della base di $0,2665 \text{ nm}$. a) Quanti atomi sono presenti per cella unitaria? b) Qual è il volume della cella unitaria? c) Calcolare la densità dello zinco.
- 3.4.1 Del rame non puro contiene $0,4 \text{ atomi } \% \text{ di ossigeno}$; qual è il corrispondente peso percentuale dell'ossigeno?
- 3.4.2 Del rame contiene tracce di argento ($0,08 \% \text{ in peso}$); qual è la percentuale atomica di Ag?



3.4.3 Di quanto varia la lunghezza della cella unitaria del ferro bcc se un atomo di carbonio ($r_C = 0,07$ nm) viene forzato in posizione intermedia tra due atomi posti ai vertici ($R_{Fe} = 0,124$ nm).

3.5.1 a) Si presupponga che il reticolo di FIG. 30 rappresenti una sezione planare di un solido cristallino con granulometria corrispondente al numero 6 ASTM; determinare la corrispondente superficie del bordo di grano. b) Ripetere il calcolo per la granulometria numero 2 ASTM.

3.5.2 a) Quanti grani sono presenti (a 100 ingrandimenti) in $6,45$ cm², se il numero ASTM è 8? b) Se il numero è 5? c) Se il numero è 2?



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Microstruttura delle leghe



LEGHE METALLICHE

- Si definisce lega metallica una miscela solida mono o polifasica, composta da 2 o più elementi, di cui almeno uno, il principale, è metallico.
- Esempi : Acciaio, Ghisa, Bronzo , Ottone
- I componenti della lega sono indivisibili e non sono visibili singolarmente .



In un sistema costituito da un bicchiere ripieno di acqua e ghiaccio sono presenti quattro diverse strutture: quella del vetro, quella dell'acqua e quella del ghiaccio (diverse anche se la composizione è la stessa), e infine quella dell'aria (del tutto particolare, vista la bassa densità atomica e la mancanza di coordinazione tra le molecole). Ognuna di queste strutture è definita *fase* e la *superficie di separazione tra le fasi* si rivela come una discontinuità nella struttura e / o nella composizione all'interno di un materiale.

In genere non può mai essere presente più di una fase gassosa, in grado di accogliere uno qualunque e tutti i componenti, che siano dotati di energia termica sufficiente per evaporare.

Possono invece esistere più fasi liquide ogniqualvolta si trovino in contatto liquidi immiscibili tra loro; ad esempio olio ed acqua, mercurio ed acqua, lega brasante liquida e flusso protettivo. Comunque le fasi liquide hanno la possibilità di accogliere notevoli quantità di materiali estranei come soluti entro la propria struttura; questa caratteristica è possibile grazie alla natura non cristallina della struttura liquida che non ha un impacchettamento rigido tipico del reticolo cristallino.



Le fasi solide possono essere molto numerose. Sono state ricordate ed esaminate nei capitoli precedenti alcune tra quelle più comuni: il ferro fcc, il ferro bcc, il titanio hcp, il nichel fcc, il rame fcc, solo per citarne alcune. Esse sono cristalline e praticamente lo sono tutte le fasi solide metalliche.

Il numero delle fasi cristalline possibili è stimabile a diverse migliaia, ma non ha praticamente limite in quanto le soluzioni solide non hanno la 'flessibilità', quanto a composizione, delle soluzioni liquide*. Nelle leghe è quindi comune incontrare almeno due fasi (FIG. 64).

* Gli atomi che non possono alloggiare nel reticolo della fase principale, vanno a costituire strutture cristalline diverse, cioè altre fasi



LEGHE METALLICHE

- Si definisce lega metallica una miscela solida mono o polifasica, composta da 2 o più elementi, di cui almeno uno, il principale, è metallico.
- Esempi : Acciaio, Ghisa, Bronzo , Ottone
- I componenti della lega sono indivisibili e non sono visibili singolarmente .

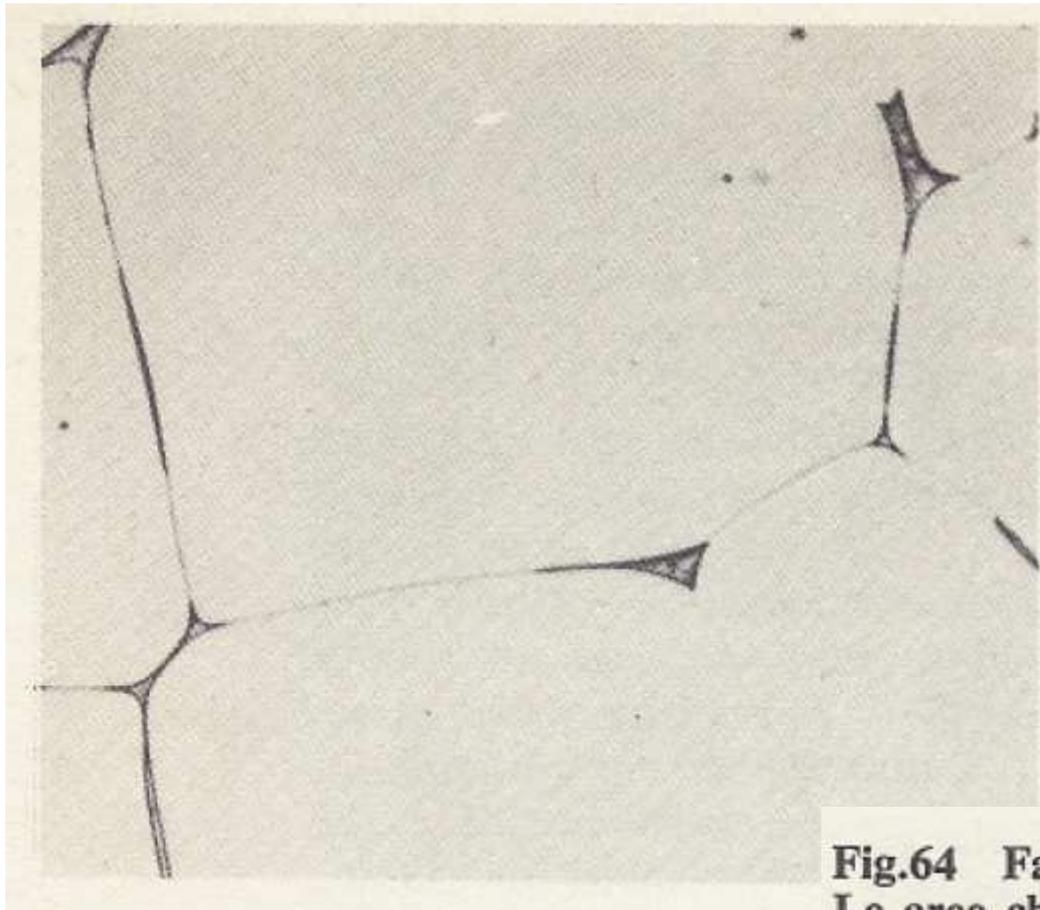


Fig.64 Fasi metalliche: bismuto nel rame (190 ×). Le aree chiare sono grani di rame fcc praticamente puro; le aree intergranulari scure sono ricche di bismuto e corrispondono a materiale rimasto liquido anche ben oltre la temperatura di solidificazione del rame (*micrografia di C. S. Smith, cortesia AIME*).



saranno discussi gli aspetti

salienti delle leghe polifasiche. Tra queste sta in posizione preminente l'acciaio, che contiene quantità e tipi diversi di carburi, ma, per fare a caso altri esempi, vanno ricordate le leghe brasanti, costituite da miscele di fasi ricche rispettivamente in piombo e in stagno; oppure le leghe indurenti di alluminio, nelle quali è presente il rame che si segrega entro una seconda fase durante opportuni trattamenti termici; oppure le *leghe per pressofusione* contenenti zinco come costituente principale e altri composti intermetallici.

Uno dei concetti più importanti da introdurre a questo punto è quello di *limite di solubilità*, che riguarda la quantità massima di ogni componente secondario introducibile senza raggiungere la *soprasaturazione*.



Molte delle

operazioni metallurgiche

mirano ad un *trattamento di solubi-*

lizzazione, costituito da un riscaldamento seguito da un raffreddamento, nel corso del quale il limite di solubilità viene superato dando luogo ad una *precipitazione*, cioè ad una separazione di fasi più o meno rapida.

ESEMPIO

Uno sciroppo può contenere solo il 67% di zucchero (e il 33% di acqua) a 20 °C, mentre a 100 °C lo zucchero è solubile fino all'83%. Si mescoli 1 kg di zucchero e 0,25 kg di acqua e si porti all'ebollizione fino a dissoluzione completa dello zucchero. Durante il raffreddamento viene superato il limite di solubilità dello zucchero e, pertanto, quest'ultimo riprecipita lentamente in fase solida; al punto di equilibrio, a 20 °C, qual è il rapporto in peso tra zucchero e sciroppo?



SOLUZIONE

1 kg di zucchero + 0,25 kg di acqua = 1,25 kg totali.

A 20 °C:

$$\begin{aligned} \text{quantità di sciroppo} &= 0,25 \text{ kg H}_2\text{O} / (0,33 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg sciroppo}) = \\ &= 0,757 \text{ kg sciroppo} \end{aligned}$$

$$1,25 \text{ kg totali} - 0,757 \text{ kg sciroppo} = 0,493 \text{ kg zucchero in eccesso.}$$

Commenti. Tutto lo zucchero si scioglie riscaldando ed è presente un'unica fase, lo sciroppo. Durante il raffreddamento il limite di solubilità per una composizione 80 zucchero - 20 acqua viene raggiunto a 87 °C, ma è molto facile che si verifichi una soprasaturazione prima che il composto in eccesso (lo zucchero) inizi a separarsi come seconda fase. La soprasaturazione può essere così spinta, che lo zucchero inizia a precipitare solo una volta raggiunta la temperatura ambiente. Quanto detto sin qui per lo sciroppo è valido anche per miscele di metalli, naturalmente a temperature e condizioni diverse.



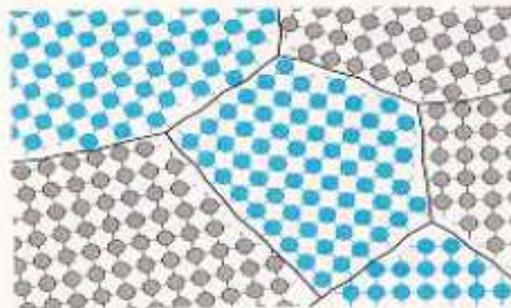
STRUTTURA delle LEGHE METALLICHE

Nelle leghe durante la solidificazione si possono formare vari tipi di grani cristallini ; i tre tipi fondamentali sono :

- ❖ CRISTALLI PURI
- ❖ CRISTALLI MISTI o DI SOLUZIONE SOLIDA
- ❖ CRISTALLI DI COMPOSTI INTERMETALLICI

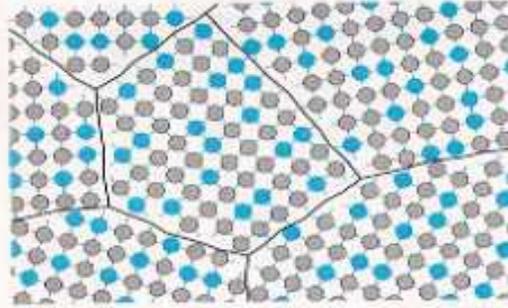


STRUTTURA DELLE LEGHE



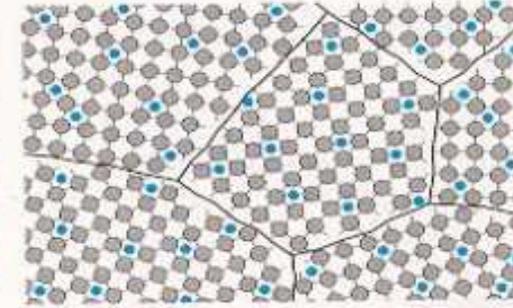
CRISTALLI PURI

Si ha una lega di cristalli puri quando i componenti non sono solubili . Si hanno due tipi di grani cristallini diversi , ognuno formato da un solo atomo



CRISTALLI MISTI

Si ha una lega di cristalli puri quando i componenti sono solubili . Nel reticolo del cristallo sono presenti entrambi gli atomi dei metalli componenti



CRISTALLI di

Composti Intermetallici

Si ha una lega di cristalli puri quando i componenti della lega possono formare composti ben definiti .
La lega è formata da celle tutte uguali



Leghe bifasiche

Il sistema Cu-Ag

Le leghe di rame e argento possono essere prese come esempio per introdurre l'argomento delle leghe bifasiche. L'argento da conio è una lega molto ricca in argento che, secondo il trattamento, può presentare più di una fase; la sua composizione indicativa prevede il 92,5% in peso di argento e il 7,5% di rame (più tracce di altri elementi, soprattutto il piombo) ed è stata scelta a ragion veduta. Innanzitutto la presenza del rame conferisce all'argento una durezza maggiore e un'accresciuta resistenza all'usura (ne migliora cioè le caratteristiche meccaniche come accade per lo zinco negli ottoni). In secondo luogo, la presenza di rame in ragione del 7,5% consente una sua dissoluzione completa in un intervallo di temperatura abbastanza ampio (circa 50 °C). Come si può rilevare nella FIG. 65 a), infatti tra 760 e 810 °C tutto il rame entra nel reticolo fcc dell'argento e l'intervallo è tale da non creare problemi in sede di trattamenti di solubilizzazione

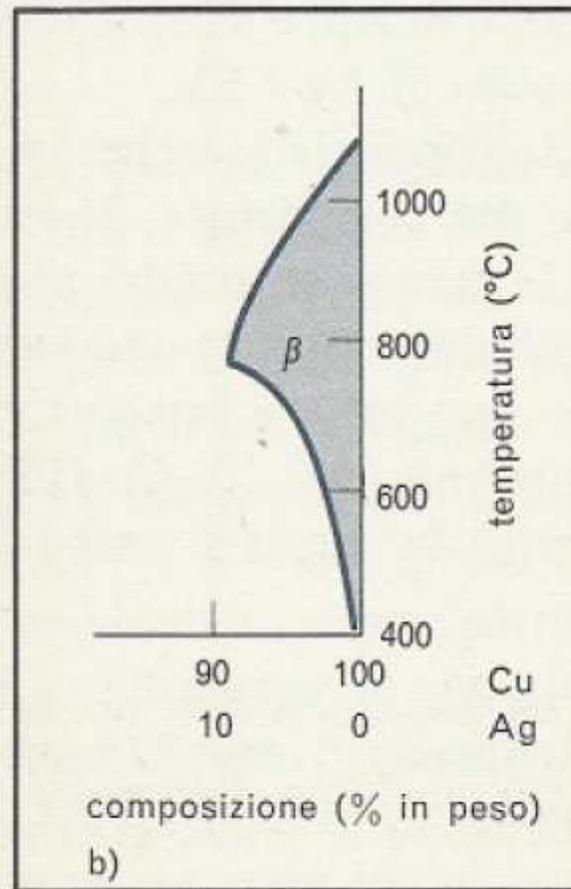
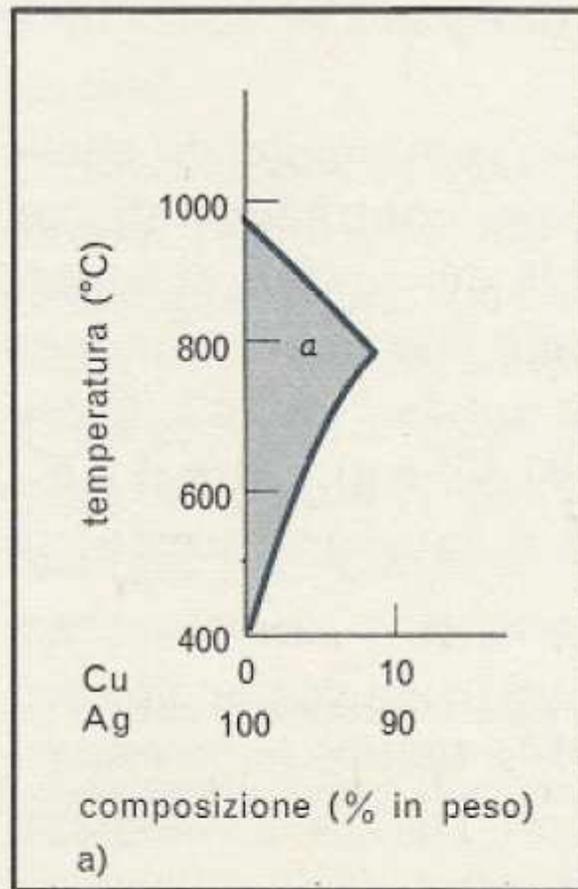


Fig.65 Diagrammi di solubilità allo stato solido. Soluzioni solide di: a) rame in argento; b) argento in rame.



durante la fabbricazione della lega; una maggiore quantità di rame ridurrebbe il margine utile di temperatura.

Se la lega da conio viene raffreddata rapidamente fino a temperatura ambiente, è possibile ottenerla come una soluzione solida di rame nell'argento, in condizioni di soprasaturazione rispetto al rame. D'altra parte, a questa temperatura, la velocità di diffusione degli atomi è estremamente bassa e praticamente il rame non ha modo di uscire dalle posizioni che occupa nel reticolo dell'argento; vi rimane, quindi, e la lega si presenta con una sola fase, anche se, come si è visto, in condizioni di soprasaturazione. Questo è utile sotto un duplice aspetto: da una parte il rame non va ad influire negativamente sulla lucentezza dell'argento e, dall'altra, mantiene il suo effetto rinforzante, proprio delle soluzioni solide.

La stessa situazione esiste per le leghe rame-argento ricche in rame. Il rame non può sciogliere più dell'8% di argento nel suo reticolo fcc (FIG. 65 b) e solo ad alta temperatura. Si vedrà ora, in breve, quali sono i fenomeni che limitano la solubilità reciproca dei due metalli e i principi che stanno alla base della rappresentazione schematica, riportata in FIG. 65.



Innanzitutto va sottolineata la somiglianza tra le FIG. 65 a) e 65 b), anche se l'una appare come l'immagine speculare dell'altra; è chiaro come la solubilità risulti massima, sia per il rame nell'argento, sia per l'argento nel rame, pressoché alla stessa temperatura, appena al di sotto degli 800 °C. Entrambi i metalli hanno un reticolo fcc, ma la differenza di raggio atomico ($r_{\text{Ag}} = 0,1444 \text{ nm}$; $r_{\text{Cu}} = 0,1278 \text{ nm}$) è tale da giustificare l'impossibilità della formazione, a temperatura ambiente, di soluzioni solide in cui l'elemento soluto sia presente in quantità significative. A temperature più alte il limite di solubilità aumenta e si possono ottenere le soluzioni solide, con un massimo di concentrazione dell'alligante attorno all'8-10%. Le fasi così formate sono indicate convenzionalmente con lettere greche, in questo caso α (soluzione di Cu in Ag) e β (soluzione di Ag in Cu), senza indicare una composizione precisa di Ag e Cu.

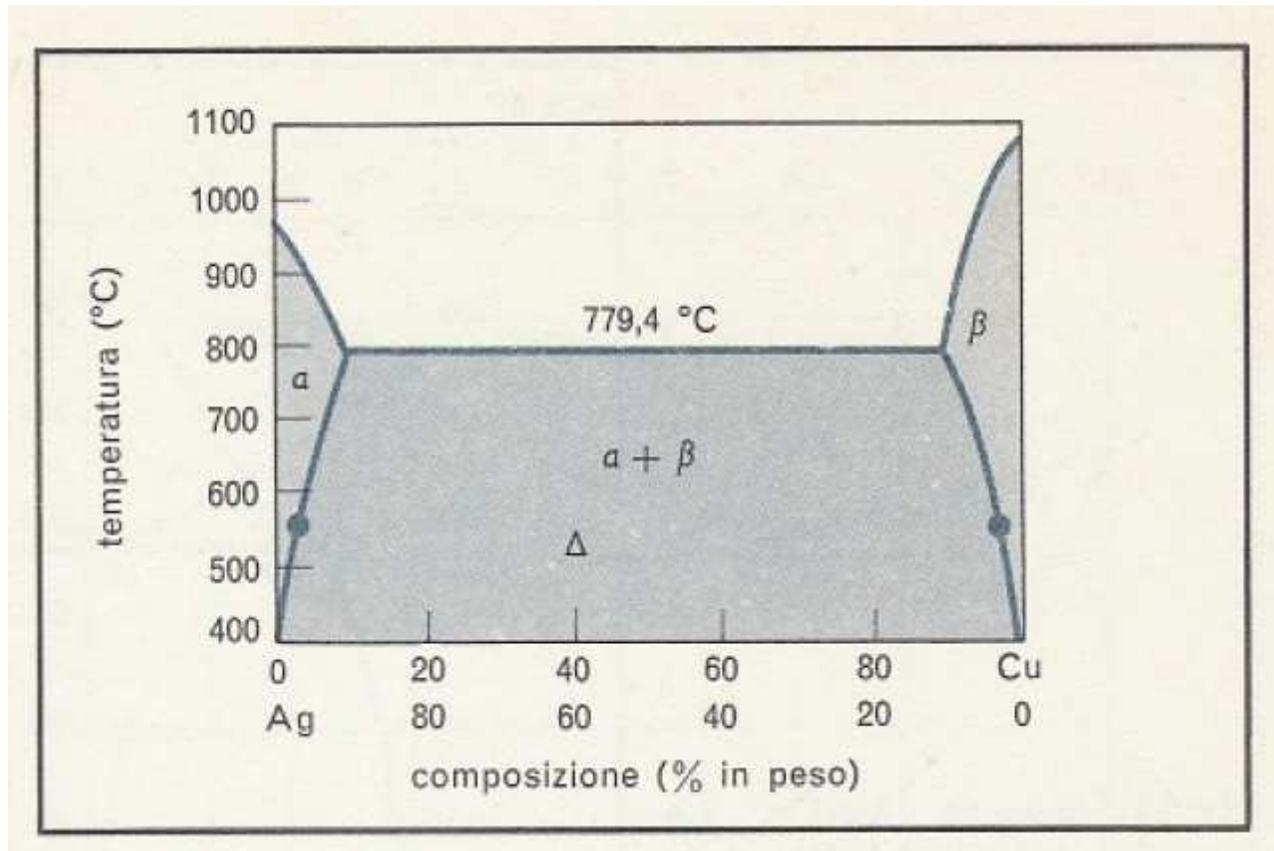


Fig.66 Campi di esistenza delle varie fasi solide per il sistema binario Ag-Cu.



La FIG. 66 riassume la situazione delle leghe Ag-Cu, comprendendo anche le due parti della FIG. 65, già considerate. Nei campi contraddistinti con α e β esiste un'unica fase, la soluzione solida; al di là dei confini, si supera il limite di solubilità, per cui deve esistere una seconda fase in cui si raduna il rame o l'argento che non può restare in soluzione solida.* A 540 °C esiste la fase α , da sola nell'intervallo 0-2,5% Cu (100-97,5% Ag). Oltre il 2,5% di Cu appare la fase β entro la quale si raccoglie il rame in eccesso; in

queste condizioni la lega è bifasica, $\alpha + \beta$. Quando il rame raggiunge il 98,5% (1,5% di Ag), la lega ritorna monofasica, essendo possibile l'esistenza della sola fase β . D'altra parte, la lega 97,5Ag-2,5Cu, ad esempio è monofasica (α) al di sopra dei 540 °C, bifasica ($\alpha + \beta$) al di sotto di tale temperatura.



Va subito notato che nelle leghe la cui composizione ricade nel campo $\alpha + \beta$, è presente più rame di quanto possa ospitarne la fase α e più argento di quanto possa collocarsi nella fase β . Entrambe le fasi hanno quindi le composizioni corrispondenti ai rispettivi limiti di solubilità. Se ne può trarre la regola generale per cui: *ogniquale volta due fasi sono in equilibrio entro un campo bifasico di un diagramma composizione-temperatura, le due curve relative ai limiti di solubilità ne definiscono le rispettive composizioni.* La lega 60Ag-40Cu (indicata con Δ in FIG. 66) a 540 °C ha una struttura con le due fasi α e β aventi la composizione corrispondente ai due punti indicati sulle curve di solubilità.



Eutettici

Una soluzione di NaCl in H₂O rimane liquida, nel corso di un raffreddamento, fino a che non solidifica attorno a 0 °C – punto di congelamento dell'acqua – pur essendo ben al di sotto del punto di solidificazione di NaCl (800 °C). Analogamente una lega Ag-Cu può rimanere liquida anche a temperature inferiori a quelle di solidificazione dell'argento puro (960 °C) e del rame puro (1083 °C). La più bassa temperatura di solidificazione (o di fusione) per una lega Ag-Cu (779 °C) è propria di una ben determinata composizione, chiamata *composizione eutettica*; tale temperatura è definita *temperatura di eutettico*. La composizione eutettica, per il sistema argento-rame, corrisponde a 71,9Ag-28,1Cu e questo dato, unito a quello della temperatura, permette di completare il *diagramma di stato* o *diagramma di fase* (FIG. 67; il diagramma era stato già abbozzato nelle FIGG. 65 e 66).

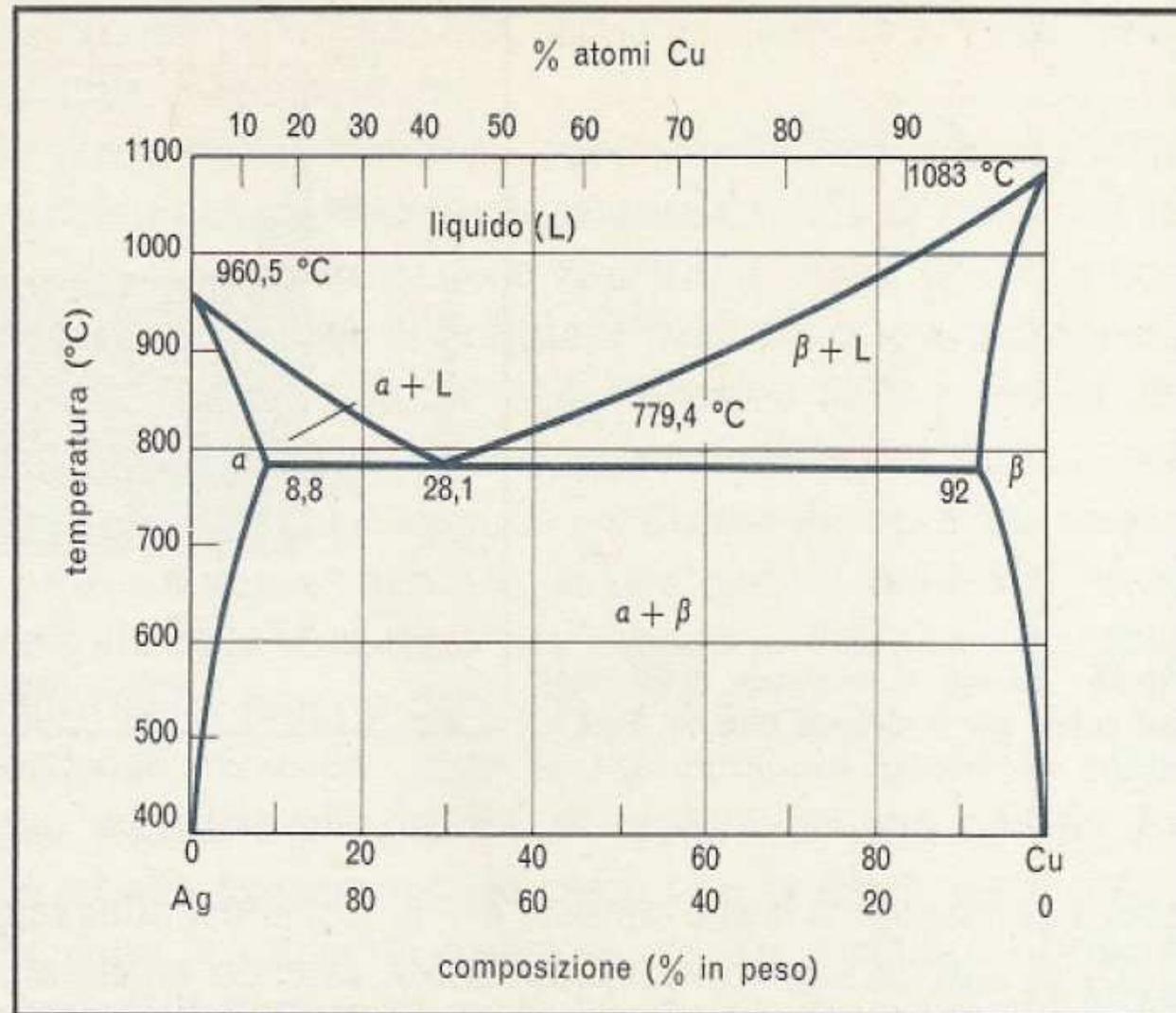
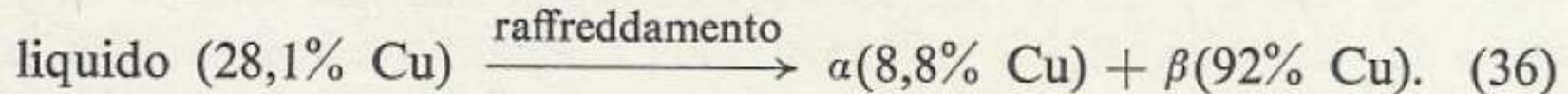


Fig.67 Sistema Ag-Cu. La maggior solubilità allo stato solido si verifica alla temperatura che viene definita eutettica (ASM (American Society for Metals), Handbook of metals, Metals Park, O. (1948)).



Prima di discutere gli aspetti quantitativi del diagramma di stato, è necessario soffermarsi ancora sulla comparsa dell'eutettico nei diagrammi di stato. Una lega fusa con la composizione eutettica solidifica dando luogo a due fasi solide; nel caso di Ag-Cu si può così schematizzare il processo:



Nel diagramma l'eutettico appare come una caratteristica depressione, a forma di V, nella parte inferiore del campo di esistenza del liquido, al di sopra del campo del solido bifasico (si vedano in FIG. 67 il punto 71,9 Ag-28,1Cu a 779 °C; in FIG. 68 il punto 38,1Pb-61,9Sn a 183 °C; in FIG. 74 il punto 95,7Fe-4,3C a 1130 °C; in FIG. 89 il punto 32Al-68Mg a 437 °C). Nel composto eutettico, le due fasi solide sono intimamente mescolate, in quanto si nucleano contemporaneamente dal liquido, in quello che viene definito *miscuglio eutettico*.



Diagrammi di stato

Da quanto si è detto è evidente l'utilità dei diagrammi di stato per il metallurgista e per il tecnologo. Nel caso del piombo e dello stagno il diagramma è riportato in FIG. 68; è possibile, come per Ag-Cu, individuarvi le fasi stabili (ad ogni temperatura e per ogni composizione) e le loro composizioni. In un campo monofasico l'esame del diagramma dà contemporaneamente la composizione della fase e della lega (che in questo caso coincidono), ad esempio 90Pb-10Sn a 200 °C; in un campo bifasico le composizioni delle fasi sono invece definite dalle curve limite di solubilità. Come si

vedrà nel paragrafo seguente, è possibile determinare anche le reciproche quantità d'equilibrio delle fasi.



La brasatura consiste nel collegare pezzi metallici con l'ausilio di un metallo d'apporto senza la fusione dei pezzi da assemblare. Il metallo d'apporto penetra per capillarità fra i pezzi da assemblare. *La brasatura è un procedimento molto antico per l'unione di parti metalliche, conosciuto già dai Fenici e dagli Etruschi. È un procedimento molto diffuso ancora oggi ed applicato, sia dall'industria sia nell'artigianato.*

La brasatura è impiegata specialmente quando:

In funzione della temperatura di fusione del metallo d'apporto, possono essere utilizzati diversi mezzi di riscaldamento. La brasatura può essere effettuata sia con mezzi simili a quelli utilizzati per la saldatura ossiacetilenica (brasatura al cannello), sia con riscaldamento elettrico (tipiche le saldobrasature utilizzate in elettronica), sia in forno sotto vuoto o in atmosfera controllata, per ottenere giunti di qualità più elevata e più controllabile

La temperatura di fusione della lega brasante determina poi la brasatura dolce o la brasatura forte.

Senza citare tutti i campi di applicazione, ricordiamo i più importanti, quali:

I fenomeni fisici attraverso i quali si realizza la brasatura sono la penetrazione capillare, la bagnatura e la diffusione atomica della lega brasante nel pezzo da brasare. La prima si realizza creando adeguati meati tra i componenti da unire; la seconda invece sfrutta la capacità che ha un metallo liquido di appoggiarsi su una superficie con piccoli angoli di contatto. La terza realizza, tramite scambio atomico fra la lega brasante ed il metallo base, l'unione metallurgica.

Le leghe brasanti sono generalmente composti eutettici di due metalli. Le brasature dolci sono effettuate usando come materiale brasante leghe di stagno, piombo e (o) antimonio. Per le brasature forti si usano leghe di argento, oro, palladio, rame e nickel. Spesso per le brasature che devono essere effettuate a temperature superiori a 1000 °C si utilizza il nickel, solo o in lega binaria o ternaria.

Le caratteristiche fondamentali della lega brasante sono almeno due: A) in grado di bagnare il metallo o i metalli base, e B) poter salire per capillarità entro meati molto stretti (le dimensioni tipiche di un meato per brasatura sono attorno a 1/10 di mm).

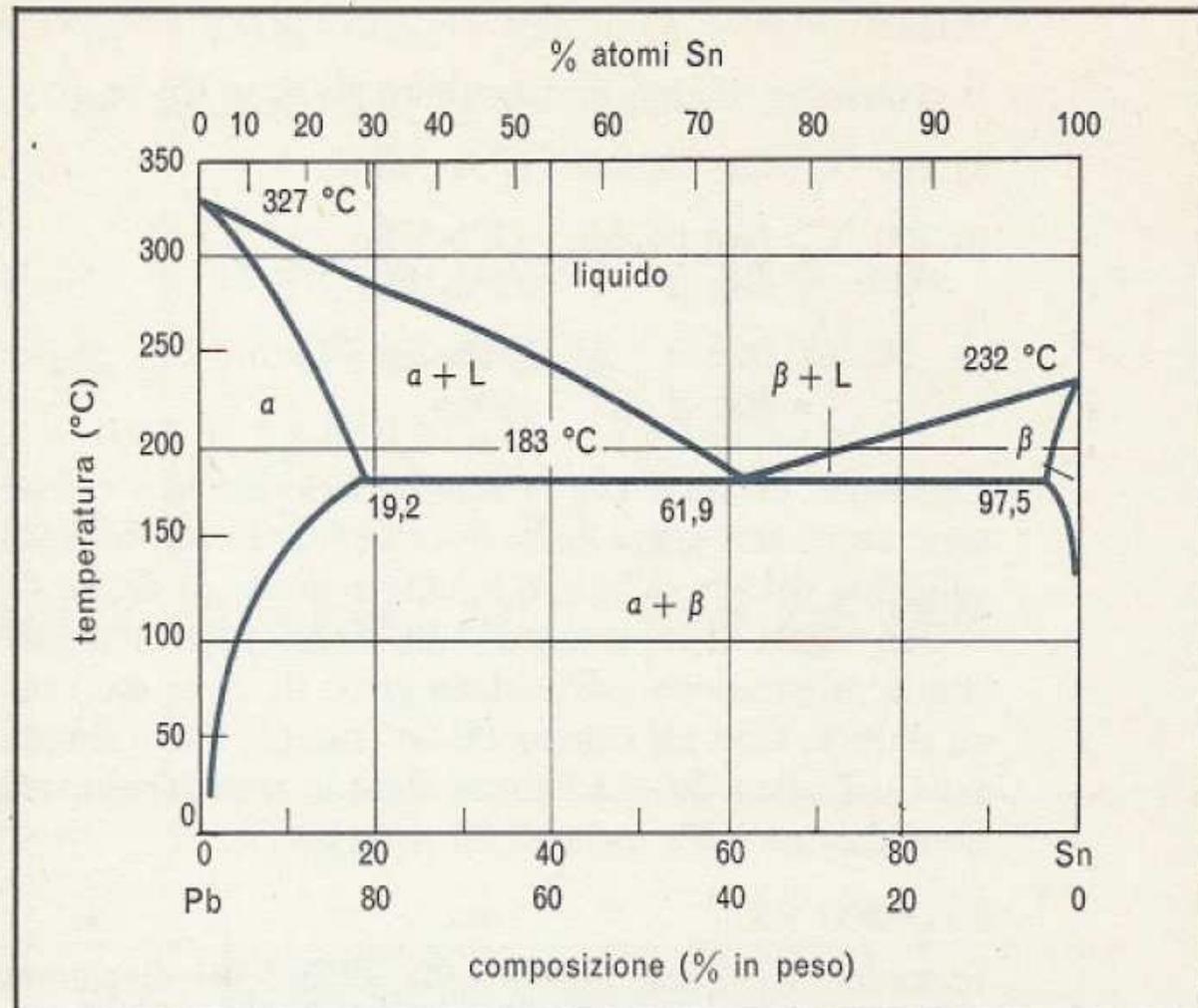


Fig.68 Sistema Pb-Sn. La lega con composizione eutettica (approssimativamente espressa da 60Sn-40Pb) è usata come lega per saldatura a bassa temperatura (*ASM, Handbook of metals, Metals Park, O. (1948)*).



Una lega brasante ha composizione 60Pb-40Sn e viene: a) fusa a 300 °C e successivamente raffreddata: b) in parte fino a 200 °C e c) in parte fino a 50 °C.

Individuare le fasi in equilibrio alle tre temperature e le loro rispettive composizioni.

SOLUZIONE

È necessario riferirsi al diagramma di stato Pb-Sn (FIG. 69).

- a) 300 °C : fase liquida 60Pb-40Sn
- b) 200 °C : fase liquida 43Pb-57Sn
e fase α 82Pb-18Sn
- c) 50 °C : fase α 98Pb-2Sn
e fase β 100Sn

Commenti. Le curve che limitano inferiormente il campo di esistenza della fase liquida sono anche esse curve limite di solubilità; in FIG. 68, quella di sinistra indica il limite di solubilità del Pb nella fase liquida e quella di destra l'analogo per Sn.

Una regola molto comune – ma d'altra parte non generale – porta ad indicare le fasi con la progressione dell'alfabeto greco (α , β , γ , ecc.) sul diagramma di stato, partendo da sinistra. Così nel sistema Pb-Sn (FIG. 68) con α si indica la fase ricca in Pb; nel sistema Cu-Zn (FIG. 70) α è l'ottone ricco in rame. Questo metodo talvolta ingenera confusione a causa della molteplicità della fase α .

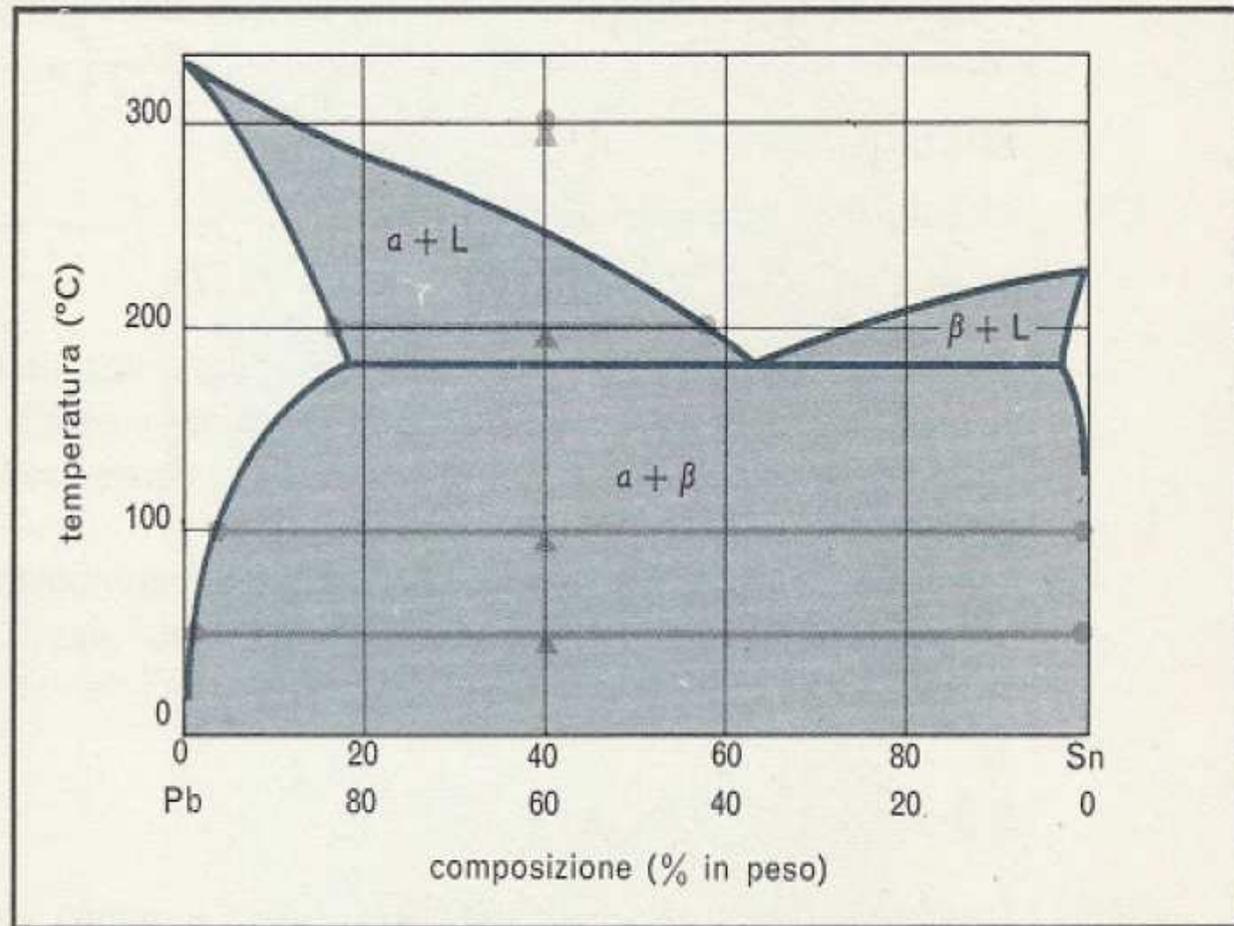


Fig.69 Diagramma di stato Pb-Sn con le temperature e le composizioni all'esempio 5.2.

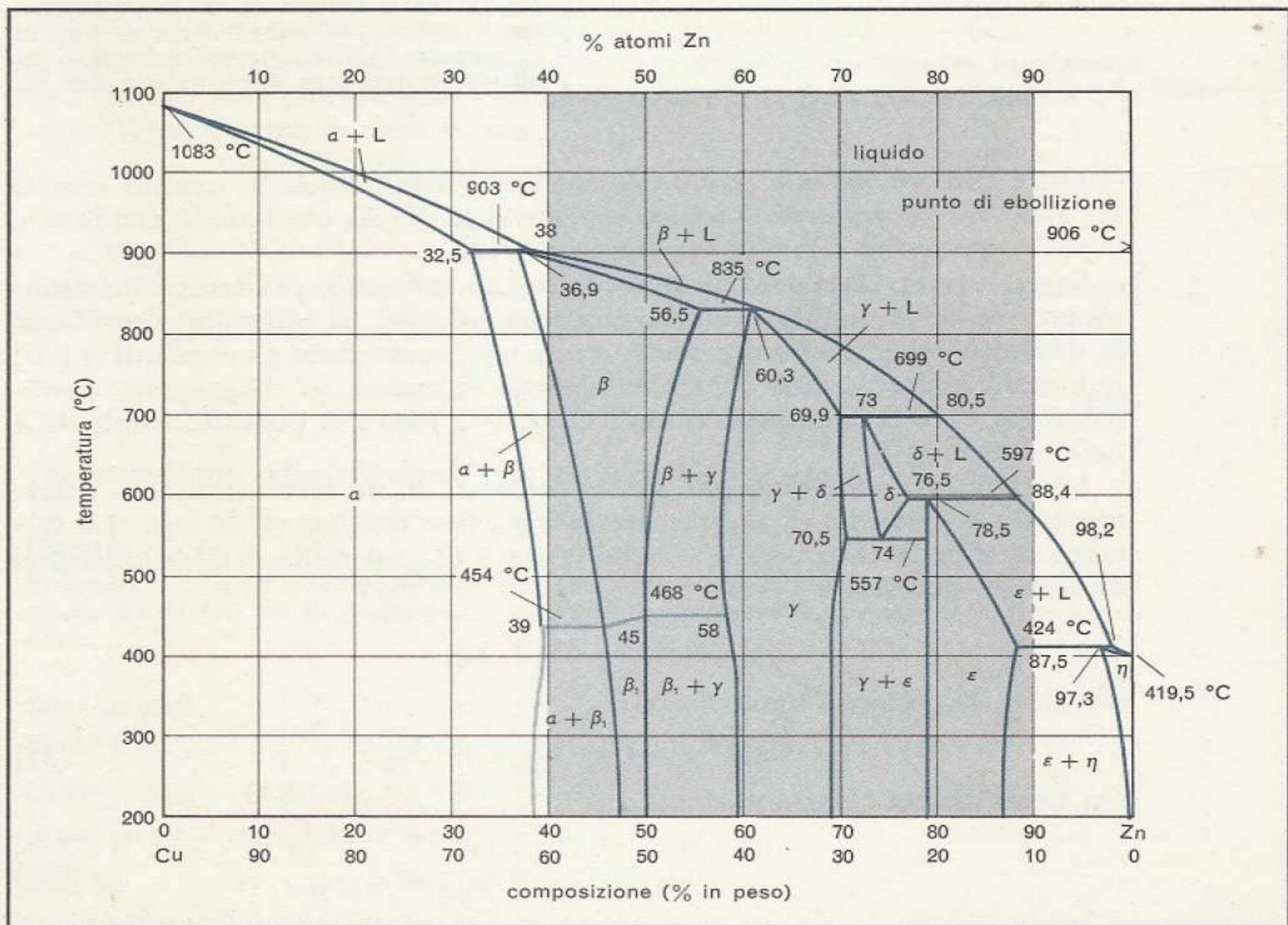


Fig.70 Sistema Cu-Zn. La composizione della maggior parte delle leghe commerciali, ottoni a struttura monofase α , cade entro la zona chiara (ASM, Handbook of metals, Metals Park, O. (1948)).



Facendo riferimento alla FIG. 70, si noti nel diagramma Cu-Zn che la composizione 70 Cu-30 Zn corrisponde a un ottone α , monofasico a tutte le temperature al di sotto dei 925 °C. La sua struttura cristallina, trattandosi di una soluzione solida ricca in rame e senza curve limite che la separino dal rame puro, sarà la fcc propria del rame.

Citare le fasi in equilibrio e la loro composizione per una lega 26 Cu-74 Zn: a) a 600 °C e b): a 525 °C.

SOLUZIONE

a) solo fase δ ; perciò: 26Cu-74Zn

b) fase γ : 30Cu-70Zn e fase ϵ : 21,5Cu-78,5Zn

Commenti. L'apparente complessità del diagramma di stato non deve impressionare. Il problema vuol appunto dimostrare come sia possibile orientarsi, appuntando subito l'attenzione solo sulla zona di interesse in cui diviene semplice indicare le fasi e la composizione.

Nel caso Cu-Zn, d'altra parte, le leghe usate comunemente si collocano nelle zone di più semplice lettura del diagramma. Sono infatti molto usati gli ottoni ma non certo la lega 26Cu-74Zn.



LEGHE FERROSE

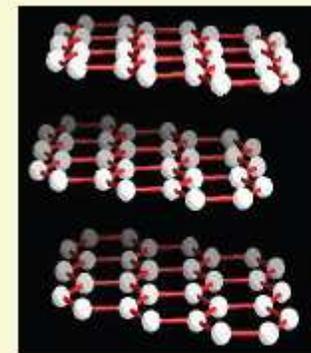
Sono formate da un metallo , il Ferro (simbolo Fe) e da un non metallo , il Carbonio (simbolo C) .
Sono chiamate anche leghe Ferro-Carbonio

In base al tenore di carbonio si dividono in :

- ❖ **ACCIAIO** : tenore carbonio %C da 0,06 a 2,06
- ❖ **GHISA** : tenore carbonio % C da 2,06 a 6,67



CARBONIO



- Dal latino carbo (carbone).
- Elemento di simbolo C, di peso atomico 12,011; numero atomico 6 ; densità 2,26 g/cm³.
- Esiste libero in natura sotto diverse forme allotropiche (diamante e grafite), è il costituente principale del carbone ed è parte essenziale di tutti i composti organici, delle rocce calcaree e di tutti gli organismi viventi.

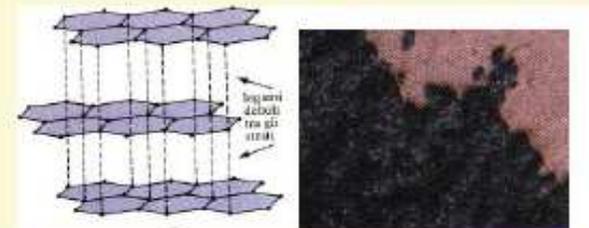
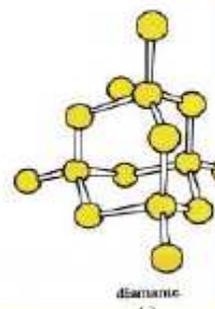


ALLOTROPIA DEL CARBONIO

- Se uno stesso elemento dà origine a cristalli diversi si parla di **ALLOTROPIA**.
- Ad esempio il carbonio si trova sotto forma di **diamante** (struttura c f c) o di **grafite** (struttura a strati).
- Pressione e temperatura determinano le condizioni di stabilità di una fase o dell'altra.



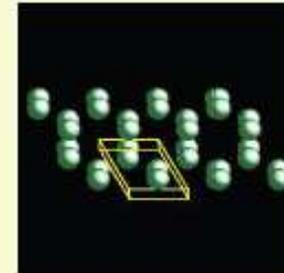
Diamante



Grafite



IL FERRO



- Elemento chimico di simbolo Fe, di peso atomico 55,84 ; numero atomico 26.
- Il ferro metallico chimicamente puro è un metallo di colore bianco e lucente. Fonde a ca. 1540 °C e bolle a 3070 °C; il suo peso specifico è di 7,87 g/cmc. Il ferro è polimorfo: a temperatura ambiente e fino a 769 °C è stabile la forma α , ferromagnetica, con un reticolo cristallino cubico centrato ; tra 769 e 910 °C è stabile la forma β , che ha lo stesso reticolo ma non è più ferromagnetica; tra 910 e 1390 °C è stabile la forma γ con reticolo cubico a facce centrate e tra 1390 °C e il punto di fusione è stabile la forma δ , con reticolo simile a quello della forma α .
- Inoltre il ferro ha la proprietà di magnetizzarsi quando è sottoposto ad un campo magnetico.



ALLOTROPIA DEL FERRO

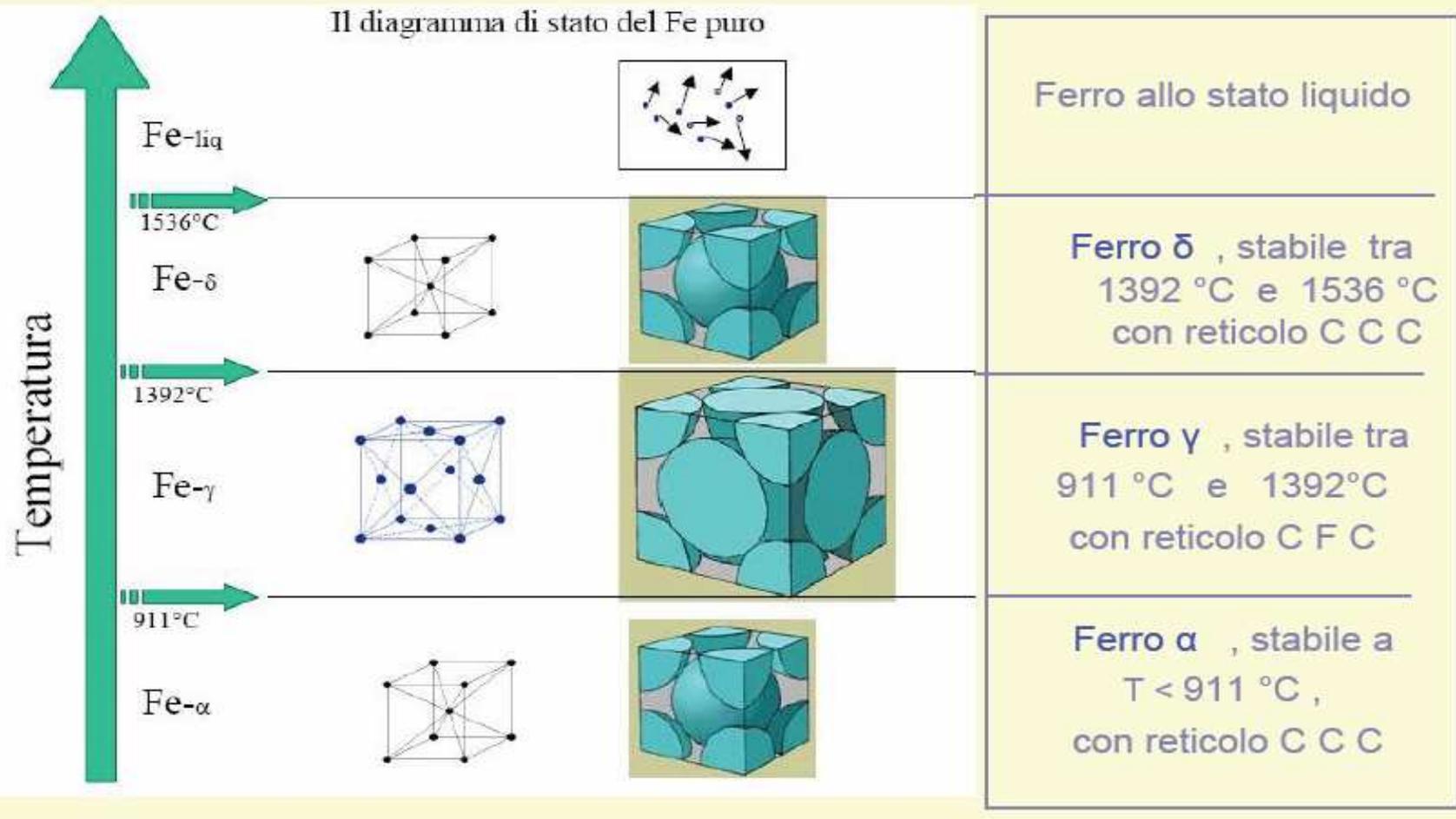
Il ferro puro, al variare della temperatura, si presenta in quattro forme allotropiche, diverse per la disposizione degli atomi nel reticolo cristallino:

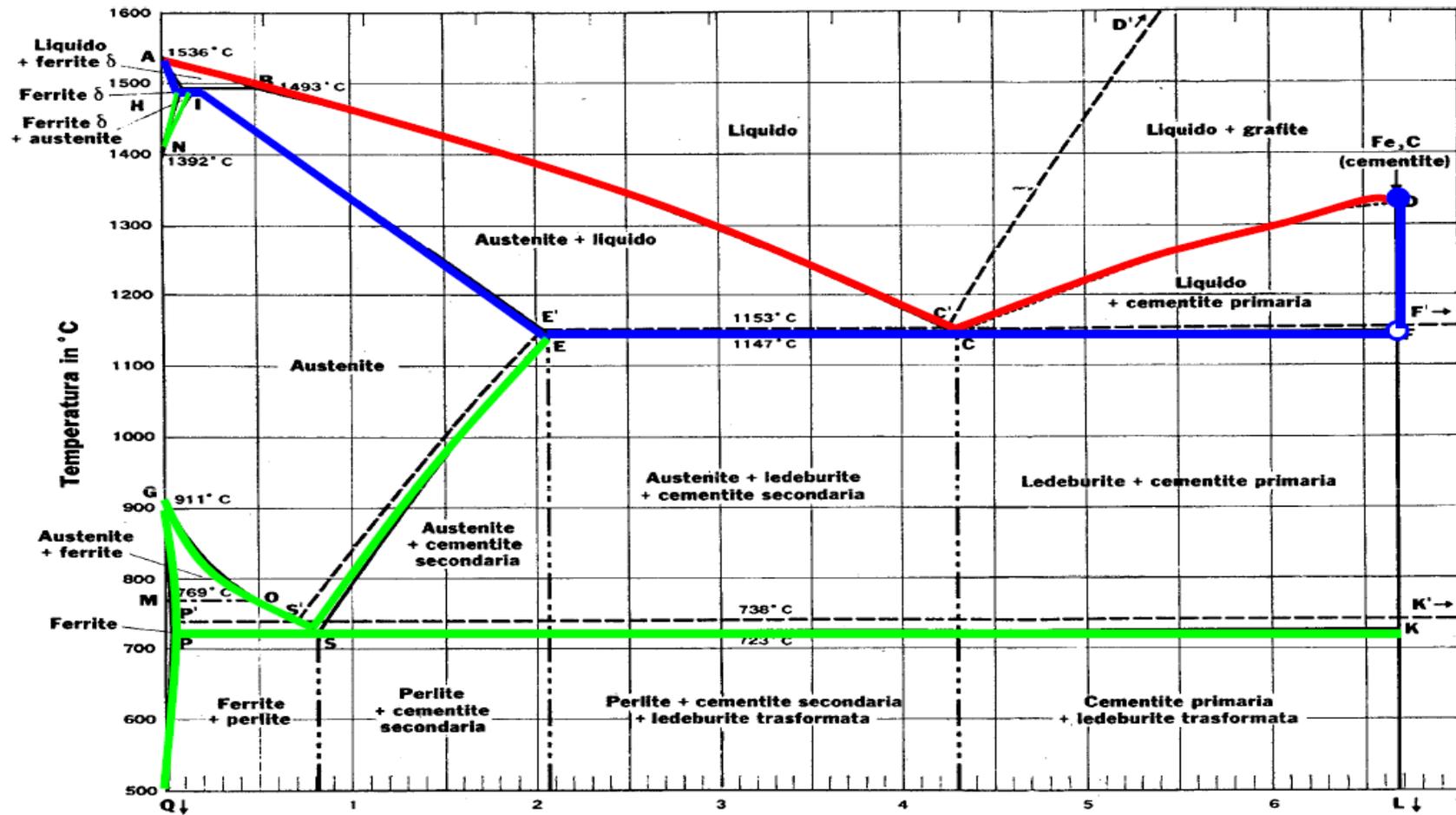
- ferro α , stabile a temperature inferiori a $769\text{ }^{\circ}\text{C}$, con reticolo C C C;
- ferro β , stabile tra $769\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $911\text{ }^{\circ}\text{C}$, con reticolo C C C
- ferro γ , stabile tra $911\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $1392\text{ }^{\circ}\text{C}$, con reticolo C F C
- ferro δ , stabile a temperature da $1392\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1536\text{ }^{\circ}\text{C}$ con reticolo C C C

La capacità del ferro di accogliere nel suo reticolo atomi di carbonio rende possibile la fabbricazione delle cosiddette leghe ferrose ossia della ghisa e dell'acciaio, note fin dall'antichità.

Intervallo Temperatura	Forma Stabile	Tipo Cella	Caratteristiche
$20 < t < 911\text{ }^{\circ}\text{C}$	ferro α ferro β	C C C	Solubilità per il Carbonio Molto bassa
$911 < t < 1392\text{ }^{\circ}\text{C}$	ferro γ	C F C	Solubilità per il Carbonio Elevata
$1392 < t < 1536\text{ }^{\circ}\text{C}$	ferro δ	C C C	Solubilità per il Carbonio Bassa

Diagramma di stato del Fe





In rosso la curva del liquidus, in blu la curva del solidus, in verde le curve di saturazione



Il diagramma di stato delle leghe ferro-carbonio merita uno studio approfondito, in quanto fornisce le conoscenze di base sulla struttura interna degli acciai. È però indispensabile premettere alcune considerazioni sul ferro.

Ferrite (fase α)

Alla temperatura ambiente il ferro ha una struttura bcc e pertanto può alloggiare nel reticolo – in posizione interstiziale – quantità molto piccole di carbonio (capitolo III), mentre per sostituzione può accogliere quantità significative di cromo, silicio, tungsteno, molibdeno. Questa fase del ferro è chiamata, indifferentemente, *ferrite* o α .

Austenite (fase γ)

Ad alta temperatura il reticolo del ferro è fcc. In queste condizioni è possibile disciogliere, come interstiziale, una quantità di carbonio notevolmente maggiore di quella possibile nel reticolo bcc (FIG. 73). È pure possibile la presenza, per sostituzione, di notevoli quantità di nichel e manganese, elementi che molto bene si adattano alla struttura fcc. Questa fase del ferro è chiamata *austenite* o γ .

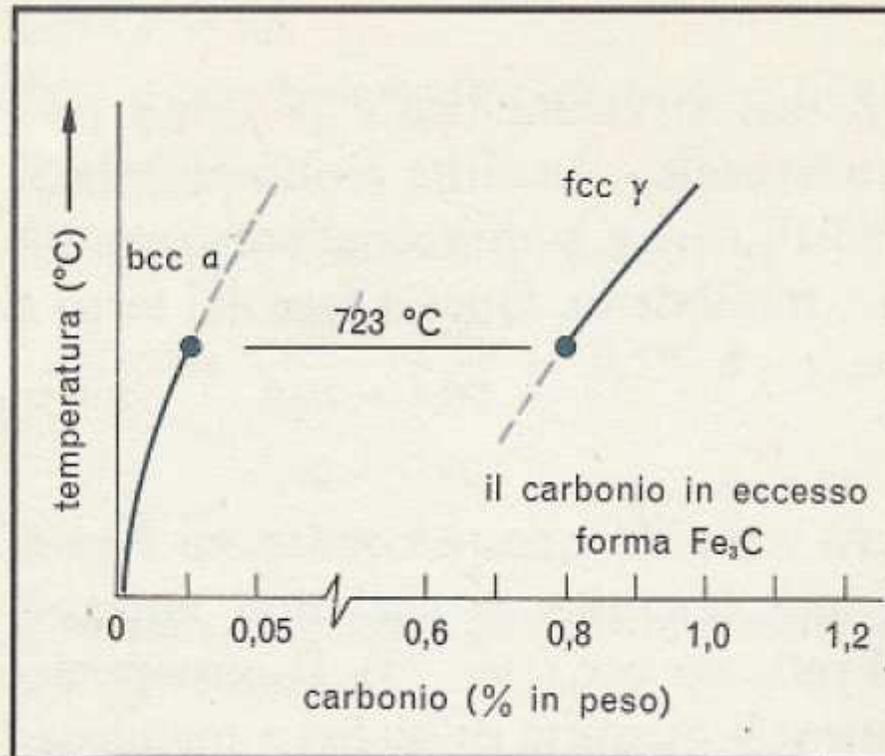


Fig.73 Solubilità del carbonio nella ferrite (bcc) e nell'austenite (fcc). L'austenite ha un fattore di impacchettamento maggiore e gli spazi interstiziali sono più grandi, ma in minor numero che nella ferrite.



Carburi

Il ferro e il carbonio formano il composto Fe_3C (93,33% in peso di Fe-6,67% di C), noto come *cementite*. Questo composto, duro e fragile, gioca un ruolo molto importante nella struttura degli acciai. Altri elementi, come Cr, Mo, Mn, in genere presenti negli acciai come alliganti minori, possono entrare nel reticolo della cementite; comunque quest'ultima può essere considerata, con buona approssimazione, come Fe_3C puro. In seguito verrà indicata come *carburo*, abbreviata col simbolo **C**.

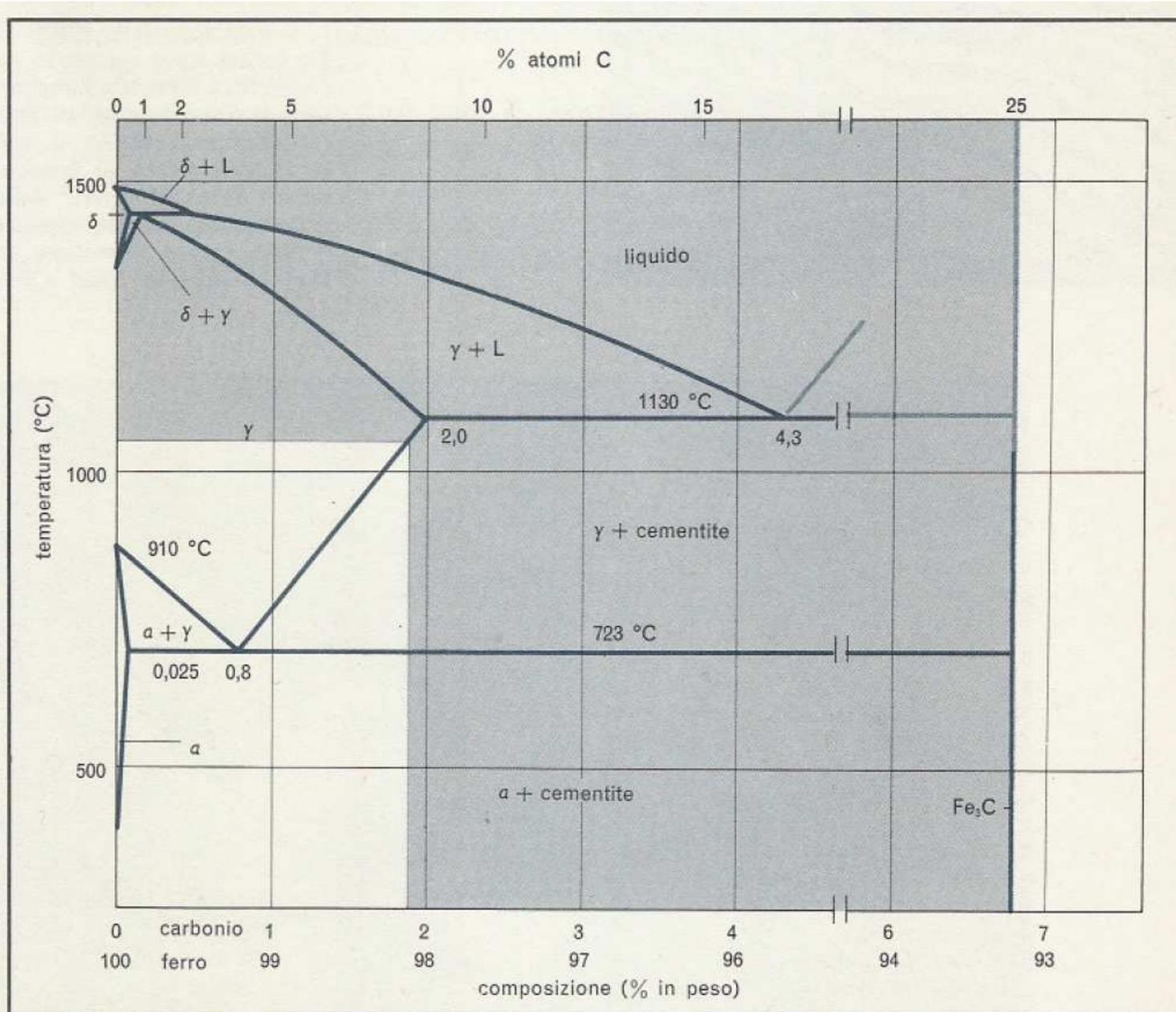
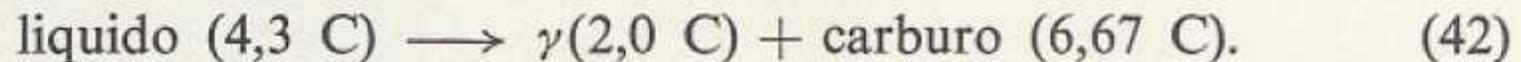


Fig.74 Il sistema Fe-C. La zona chiara nel diagramma di fase è quella di maggior interesse tecnologico; si noti come la lega eutettoide abbia una composizione 99,2Fe-0,8C e la temperatura sia 723 °C.

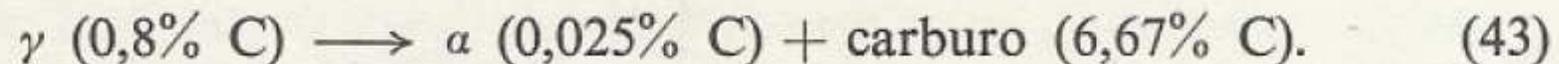


Il diagramma di Fe-Fe₃C*

Il sistema Fe-C ha un eutettico, con punto di solidificazione a 1130 °C e composizione 95,7Fe-4,3C (FIG. 74). Poiché l'austenite, che è la fase ricca in ferro stabile a queste temperature, può disciogliere carbonio fino al 2% del suo peso, si verificherà la seguente reazione eutettica:



Il ferro bcc, puro, si trasforma in austenite durante il riscaldamento alla temperatura di 910 °C, ma la presenza di carbonio provoca un abbassamento della temperatura necessaria al passaggio di fase, che può ridursi a soli 723 °C (FIG. 74). Questo minimo nella temperatura di trasformazione si ha nel punto di incontro della curva di solubilità del C in γ con la curva di solubilità del ferro α in γ , corrispondente alla composizione 99,2 Fe-0,8 C. Un acciaio di questo tipo si trasforma, nel corso del raffreddamento, secondo la reazione seguente:

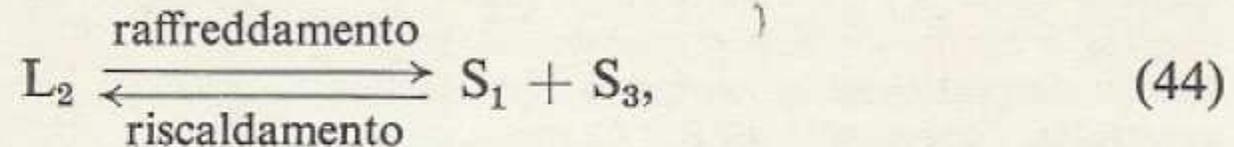




Reazioni eutettoidi

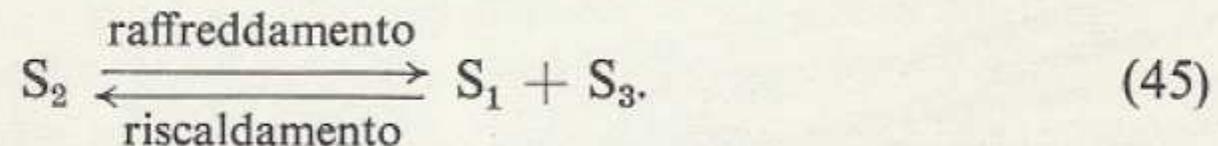
Tutte le reazioni definite eutettiche implicano la presenza di una fase liquida e di due fasi solide.

Le relazioni (36) e (42) possono essere generalizzate nel modo seguente:



nella quale si intende che la composizione della fase liquida, L, è intermedia (di qui la scelta degli indici) tra quelle delle due fasi solide, S.

La reazione presentata nell'equazione (43) è simile ad una reazione eutettica salvo nel fatto che tutte le fasi presenti sono solide:



Questo tipo di reazione viene definita *euttettoide* e presenta il caratteristico



minimo a forma di V nel diagramma di stato; la fase singola, stabile ad alta temperatura, ha anche in questo caso composizione intermedia tra quelle delle fasi stabili a temperatura minore. La reazione eutettoide è la principale tra quelle che si verificano durante i trattamenti termici degli acciai; per questo va considerata in modo particolare la zona chiara nella FIG. 74.

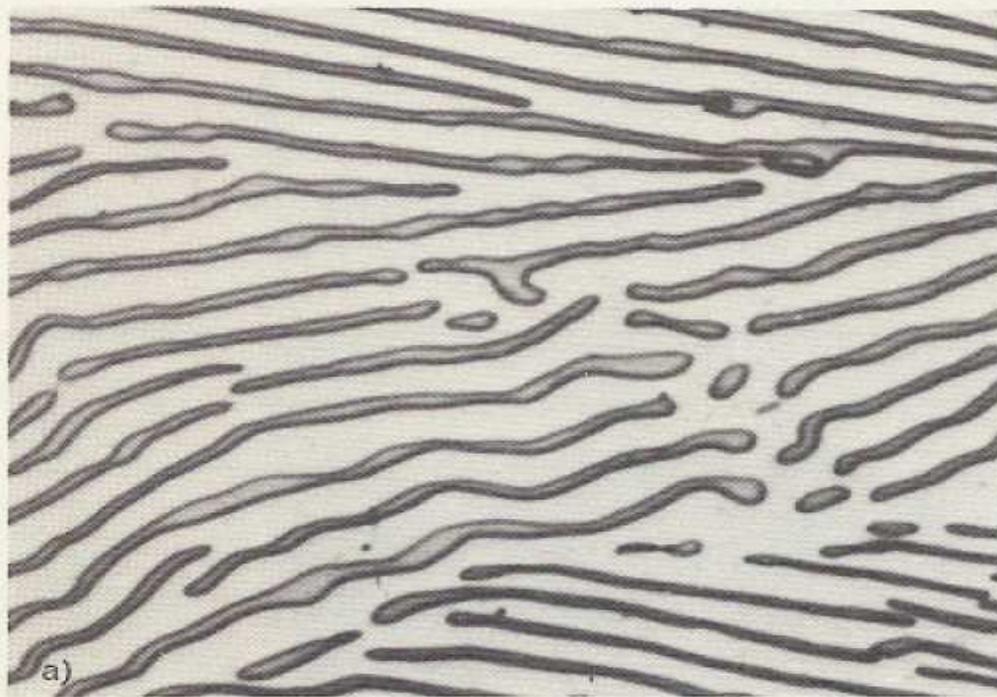


Fig.75 Perlite. a) La struttura lamellare ($2550 \times$) con ferrite (zone più chiare) e carburo (zone più scure) si forma da austenite di composizione eutettoide, contenente cioè 0,8 C; mentre è diversa la struttura delle perlitite che derivano da miscele ferrite-carburo la cui composizione non è eutettoide (*U. S. Steel Corporation*).

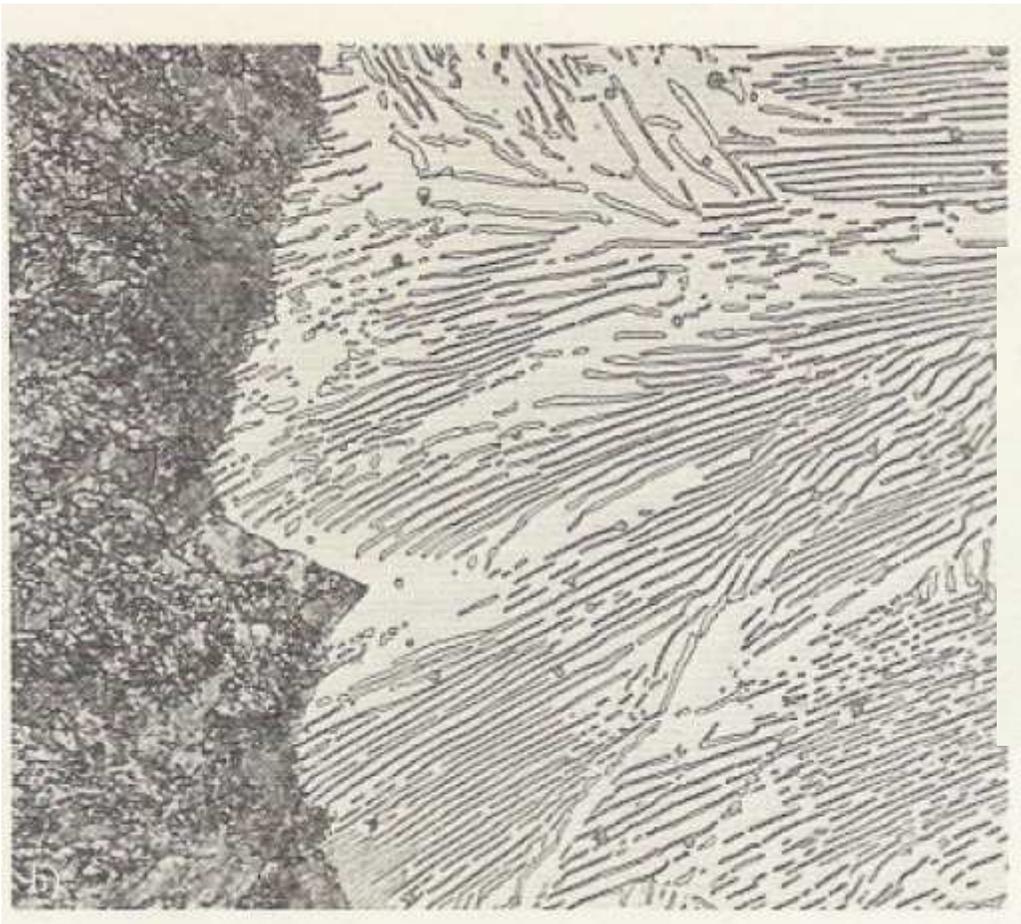


Perlite

La reazione eutettoide porta, nel sistema Fe-C, alla formazione contemporanea della ferrite e del carburo, per trasformazione dell'austenite avente la composizione dell'eutettoide. La formazione contemporanea di α e C porta ad una morfologia caratteristica, costituita da lamelle intercalate, nota come *perlite* (FIG. 75). Questa miscela bifasica si forma in quasi tutti gli acciai che vengono raffreddati lentamente, dalla temperatura propria dell'austenite alla temperatura propria del campo (ferrite + carburo).

Si è ora esaminata la formazione di perlite lamellare per reazione eutettoide, ma va subito aggiunto che una miscela ($\alpha + C$) può derivare anche da altre reazioni. In questo caso però la morfologia dell'acciaio non sarà di tipo lamellare e le proprietà saranno corrispondentemente diverse.

La perlite ha origine dall'austenite di composizione eutettoide, pertanto la quantità di perlite presente è uguale alla quantità di austenite trasformata. La FIG. 76 a) mostra appunto un acciaio contenente lo 0,20% di carbonio,



b) Formazione della perlite (1500 ×). La perlite stava crescendo, con la caratteristica struttura lamellare, da destra a sinistra sotto un gradiente di temperatura, quando è sopravvenuto il trattamento di tempra. Il carbonio deve diffondere dalla ferrite (fase α), che ne può ospitare solo lo 0,025%, verso il carburo (o cemen-tite) (*Bethlehem Steel Corporation*).

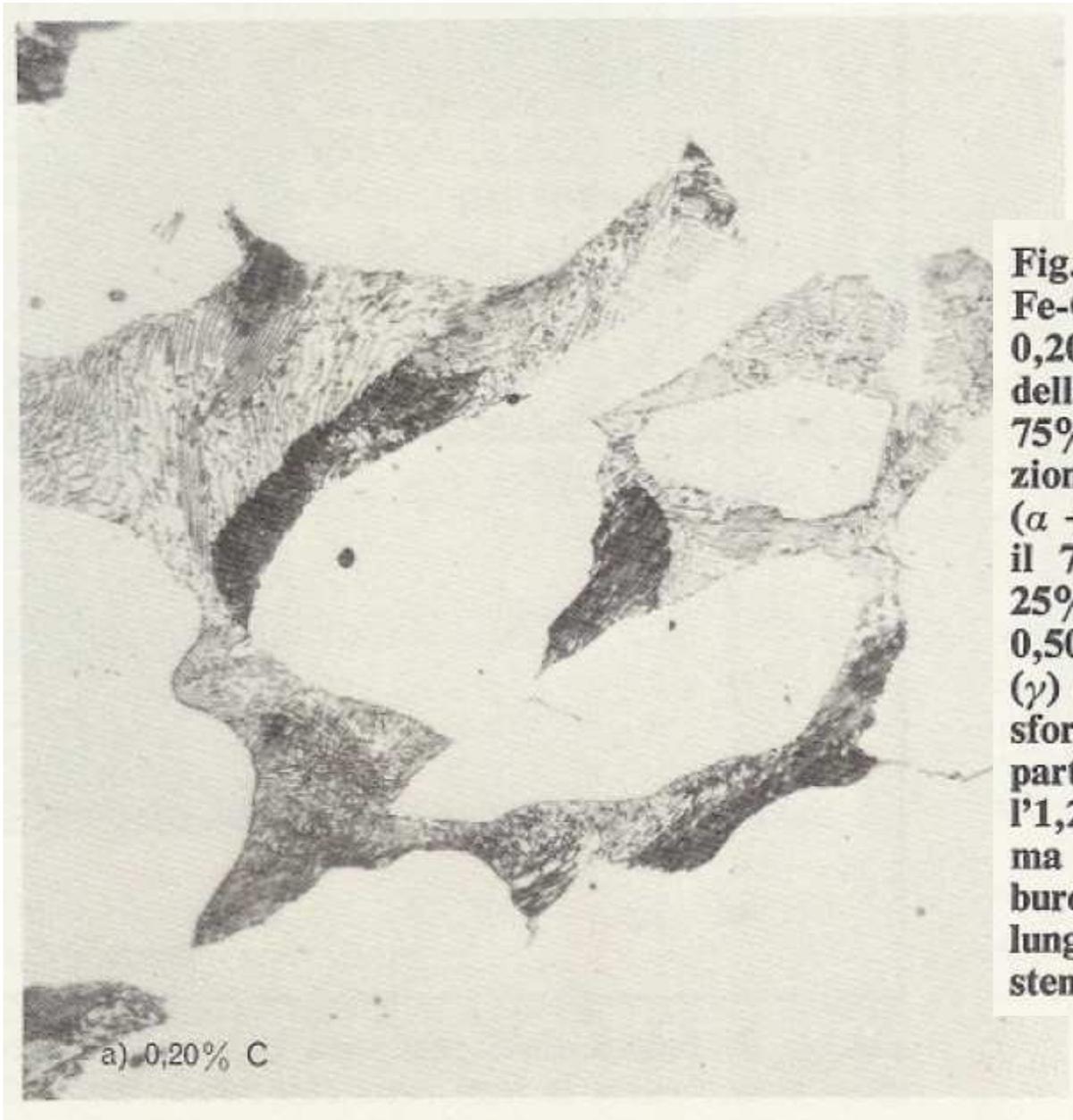
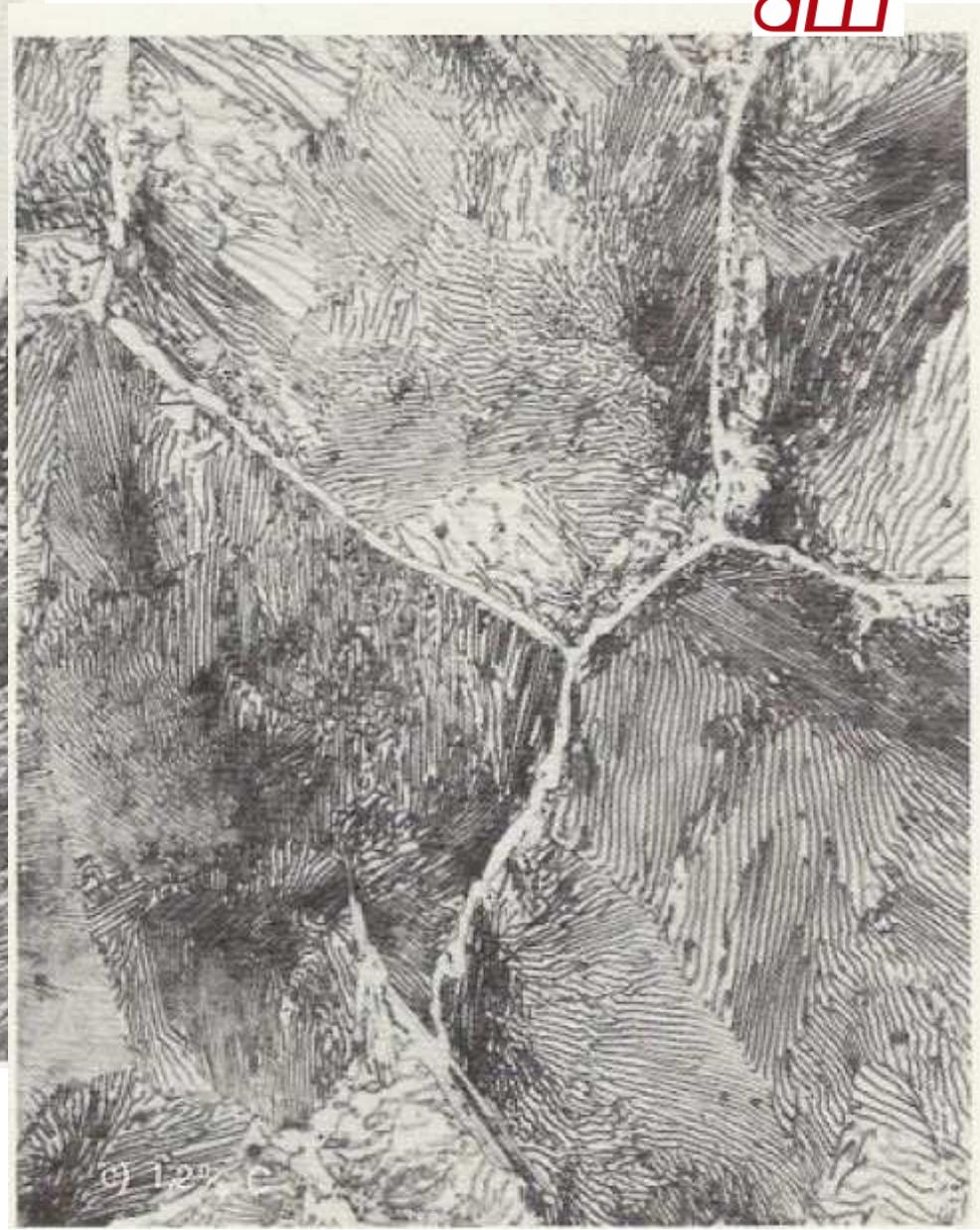


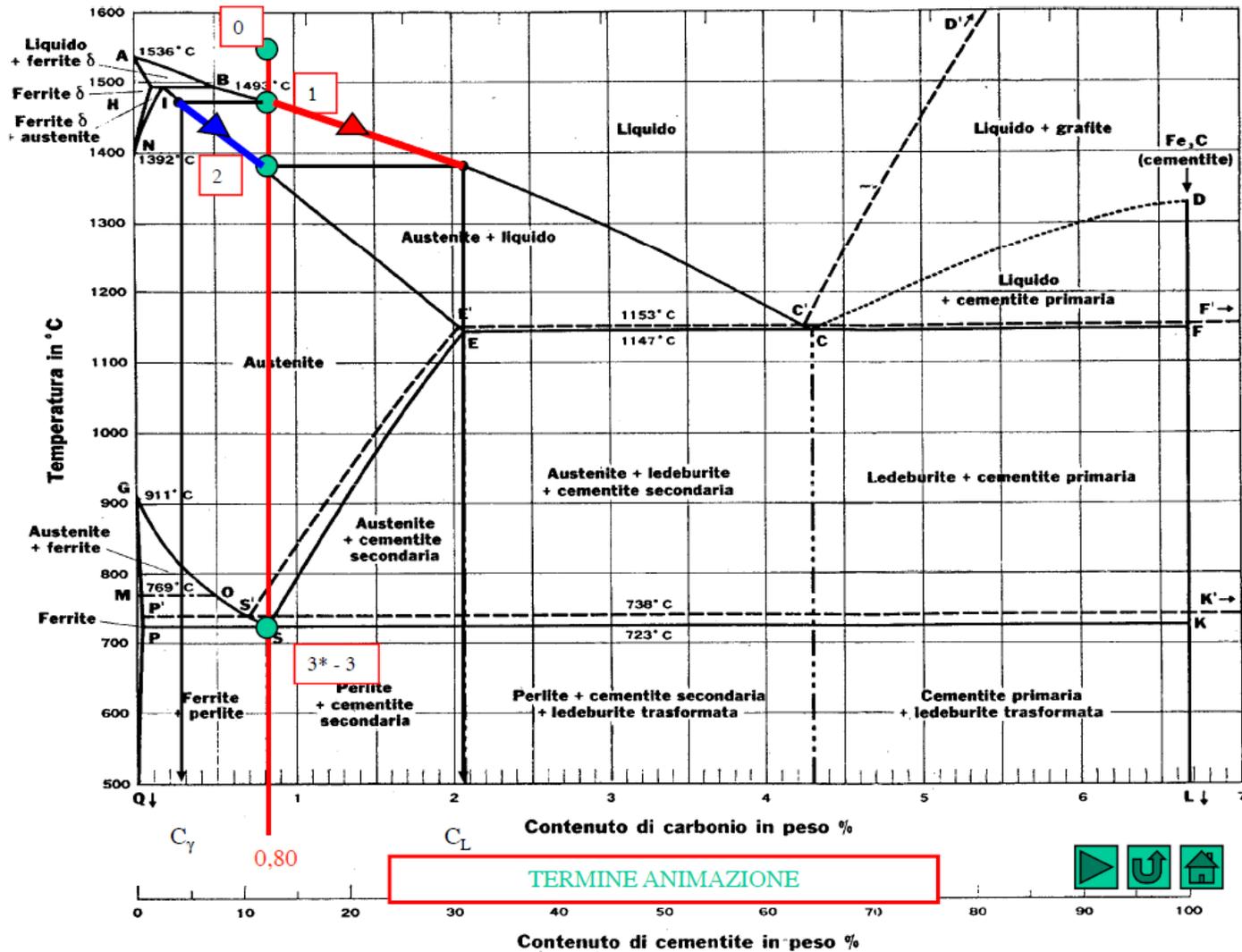
Fig.76 Ferrite più perlite in leghe Fe-C (500 ×). a) Una lega con lo 0,20% di C immediatamente prima della trasformazione contiene circa 75% α + 25% γ . Dopo la trasformazione l'austenite si è mutata in perlite (α + carburo), per cui sarà presente il 75% di ferrite proeutettoide e il 25% di perlite. b) Una lega con lo 0,50% di C, che aveva più austenite (γ) che ferrite (α), risulta dopo la trasformazione costituita per la maggior parte da perlite. c) Una lega con l'1,2% di C, contiene carburo già prima della trasformazione; questo carburo proeutettoide risulta localizzato lungo i bordi dei vecchi grani di austenite (U. S. Steel Corporation).

a) 0,20% C



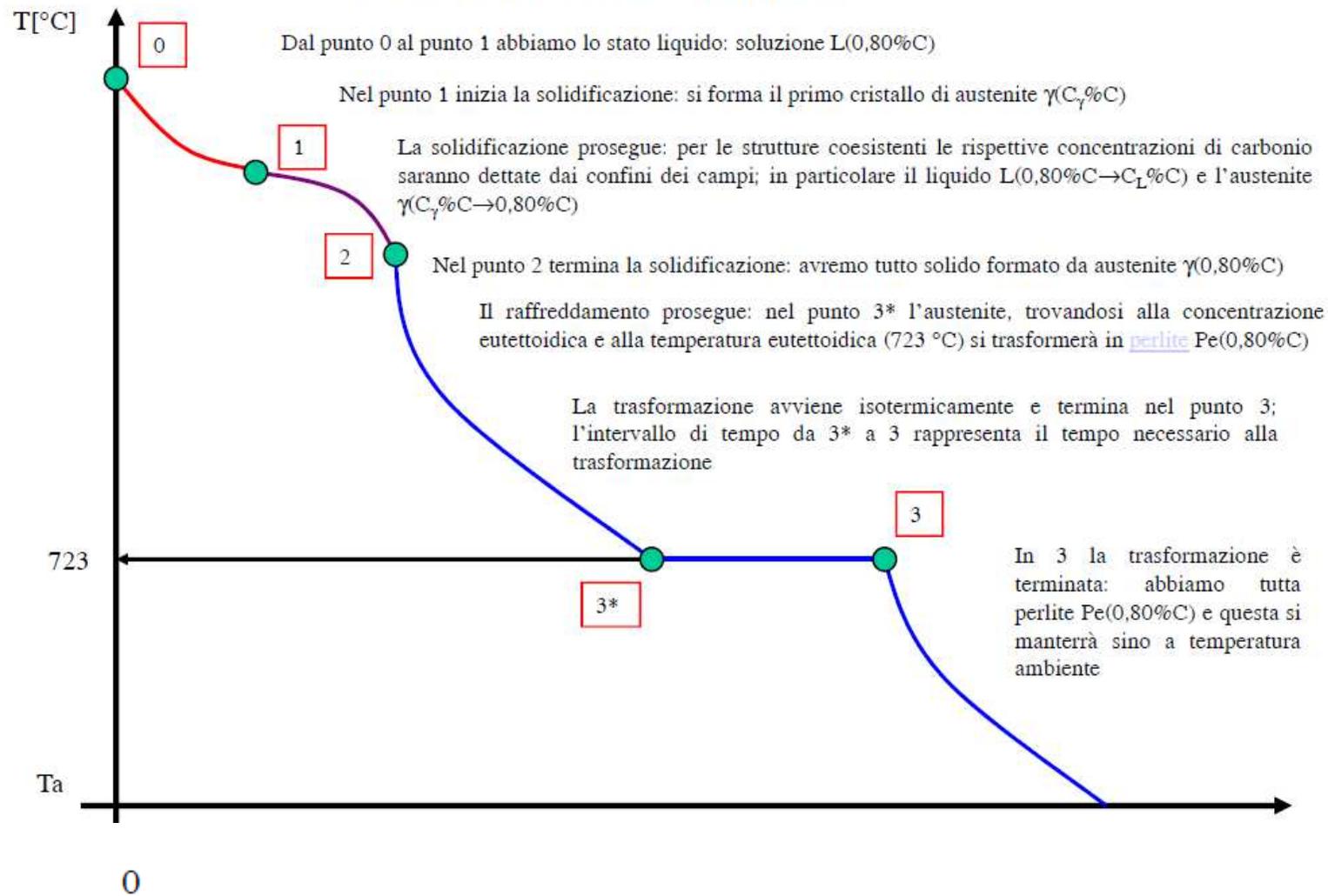


che risulta costituito per $3/4$ da ferrite (chiara in figura) e per $1/4$ da perlite (grigia con lamelle molto fini, mal risolvibili anche a 500 ingrandimenti). Un acciaio con $0,50\%$ di carbonio invece (FIG. 76 b) contiene molto più perlite in quanto ad alta temperatura, prima della reazione eutettoide, è costituito per circa il 60% di austenite.





CURVA DI RAFFREDDAMENTO DEL C80





TIPI DI GHISA

- ❖ **GHISA di 1^a fusione** : si ottiene dall'altoforno e contiene elevate percentuali di carbonio (%C da 4 a 6 %)
- ❖ **GHISA di 2^a fusione** : si ottiene rifondendo in apposito forno , la ghisa di prima fusione , con aggiunta di rottami di ferro ed altri elementi ; si possono ottenere vari tipi ghisa

GHISA BIANCA : il carbonio è sotto forma di Cementite Fe_3C

GHISA LAMELLARE : il carbonio è sotto forma di Grafite Lamellare

GHISA SFEROIDALE : il carbonio è sotto forma di Grafite Sferoidale



CLASSIFICAZIONE DELLE GHISE

In base al modo in cui si presenta il carbonio, le ghise possono essere divise in :

- Ghise bianche : il carbonio è sotto forma di cementite Fe_3C
- Ghise grigie : il carbonio è sotto forma di grafite lamellare o sferoidale
- Ghise malleabili : il carbonio si presenta sotto forma di “ fiocchi “

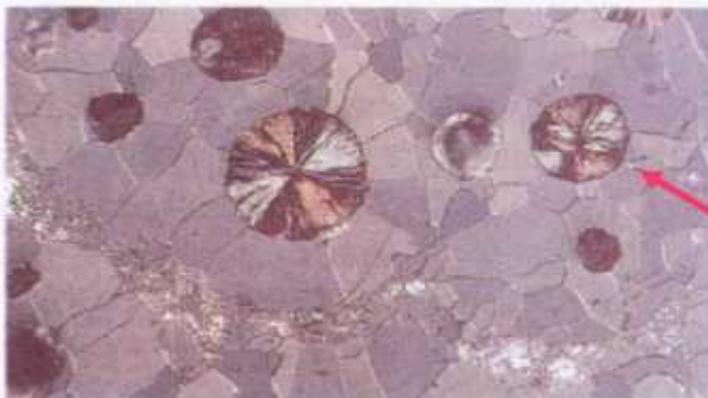


MICROGRAFIE DELLA GHISA



GHISA LAMELLARE

Nota le lamelle di grafite

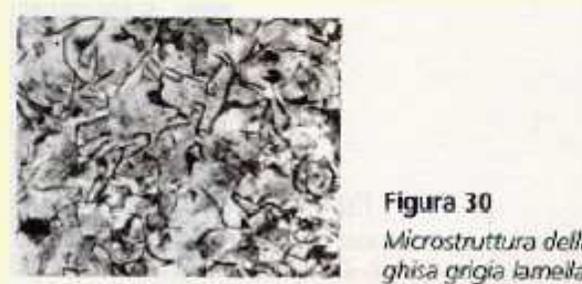


GHISA SFEROIDALE

Nota le sfere di grafite



MICROGRAFIA DELLA GHISA



Sfere di
grafite

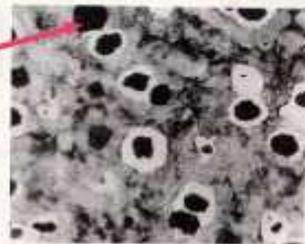


Figura 31
Microstruttura della ghisa sferoidale.

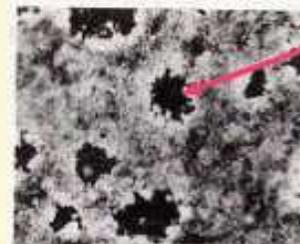


Figura 32
Microstruttura della ghisa malleabile.

Fiocchi di
grafite



PROPRIETA' DELLA GHISA

- Elevata durezza
- Resistenza all'usura ed all'ossidazione
- Elevata resistenza a compressione
- Ottima colabilità
- Elevata fragilità
- Bassa resilienza
- Non può subire lavorazioni plastiche
- Può essere lavorata alle M.U.



PROPRIETA' DELLA GHISA

● Temp . di fusione	1300 °C
● Resistenza a trazione	100-800 N/mm ²
● Resistenza a compres.	400-900 N/mm ²
● Durezza Brinnell	150-400 HB
● Allungamento a rottura	nullo
● Resilienza	bassa



Ghisa grigia a grafite sferoidale UNI 4544-79

- Tale ghisa grigia ha la caratteristica di avere la grafite in forma sferoidale che determina capacità di deformazione plastica, anche se minima. Data la sua tenacità e resistenza all'usura è adatta a produrre ruote dentate, guide di macchine utensili e bielle per motori.
- La designazione inizia con le lettere GS (Ghisa Sferoidale) seguita da un primo numero che rappresenta il carico minimo garantito alla rottura per trazione, e un secondo numero che rappresenta il valore della deformazione plastica che può subire
- **GS 400-12**
ghisa sferoidale (GS) con carico di rottura minimo garantito di 400 N/mm² e allungamento percentuale A pari al 12%.
- **GS 600-2**
ghisa sferoidale (GS) con carico di rottura minimo garantito di 600 N/mm² e allungamento percentuale A pari 2 %



Ghisa grigia per getti ordinari UNI 5007-69

- E' una ghisa grigia, di largo impiego , avente le seguenti caratteristiche
 - la sezione di frattura di colore grigio per la presenza di grafite in forma lamellare;
 - non è soggetta a deformazione plastica;
 - è in grado di assorbire le vibrazioni.
- Per tali caratteristiche serve nella produzione di basamenti di macchine utensili, scatole per riduttori e cambi. La designazione inizia con la lettera G (Ghisa) seguita da un numero che rappresenta il carico minimo garantito alla rottura per trazione.
- **G 100**
ghisa grigia (G) con carico di rottura minimo garantito di 100 N/mm².
- **G 245**
ghisa grigia (G) con carico di rottura minimo garantito di 245 N/mm².



Ghisa grigia non legata per uso automobilistico UNI 5330-69

- La ghisa grigia non legata serve nella produzione di parti di motori a combustione interna come i cilindri e organi soggetti a sbalzi di temperatura.
- La designazione inizia con le lettere Gh (Ghisa hard-ness = durezza) seguite da un numero che rappresenta la durezza Brinell minima garantita.
- **Gh 130**
ghisa per uso automobilistico (Gh) con durezza Brinell minima garantita pari a 130 punti.
- **Gh 210**
ghisa per uso automobilistico (Gh) con durezza Brinell minima garantita pari a 210 punti.



Ghise malleabili UNI 3779-69

- Le ghise malleabili sono molto simili all'acciaio e sono impiegate nella produzione di manicotti e raccordi di tubazioni per acqua, alberi a gomito per motori a combustione interna etc. Sono ottenute con due processi particolari, quello europeo e quello americano.
- Il processo europeo ha lo scopo di decarburare la ghisa privandola di carbonio, cosicché la sezione di frattura risulta di colore bianco. Le ghise ottenute con il processo europeo si dicono ghise malleabili bianche.
- Il processo americano ha lo scopo di decomporre il carburo di ferro della ghisa di partenza, in grafite. La sezione di frattura risultante sarà di colore nero. Le ghise ottenute con il processo americano, si dicono ghise malleabili nere.
- GMB 450**
ghisa malleabile a cuore bianco con carico di rottura minimo garantito di 450 N/mm².
- GMN 350**
ghisa malleabile a cuore nero con carico di rottura minimo garantito di 350 N/mm².



TIPI DI ACCIAIO

- ❖ **ACCIAI SEMPLICI** : Fe + C (%C da 0,06% a 2,06 %)
- ❖ **ACCIAI SPECIALI** : acciaio semplice + altri elementi alliganti
 - **ACCIAI DEBOLMENTE LEGATI** : la percentuale di ogni elemento non supera il 5%
 - **ACCIAI LEGATI** : la percentuale di almeno uno degli elementi alliganti supera il 5%



CLASSIFICAZIONE degli ACCIAI

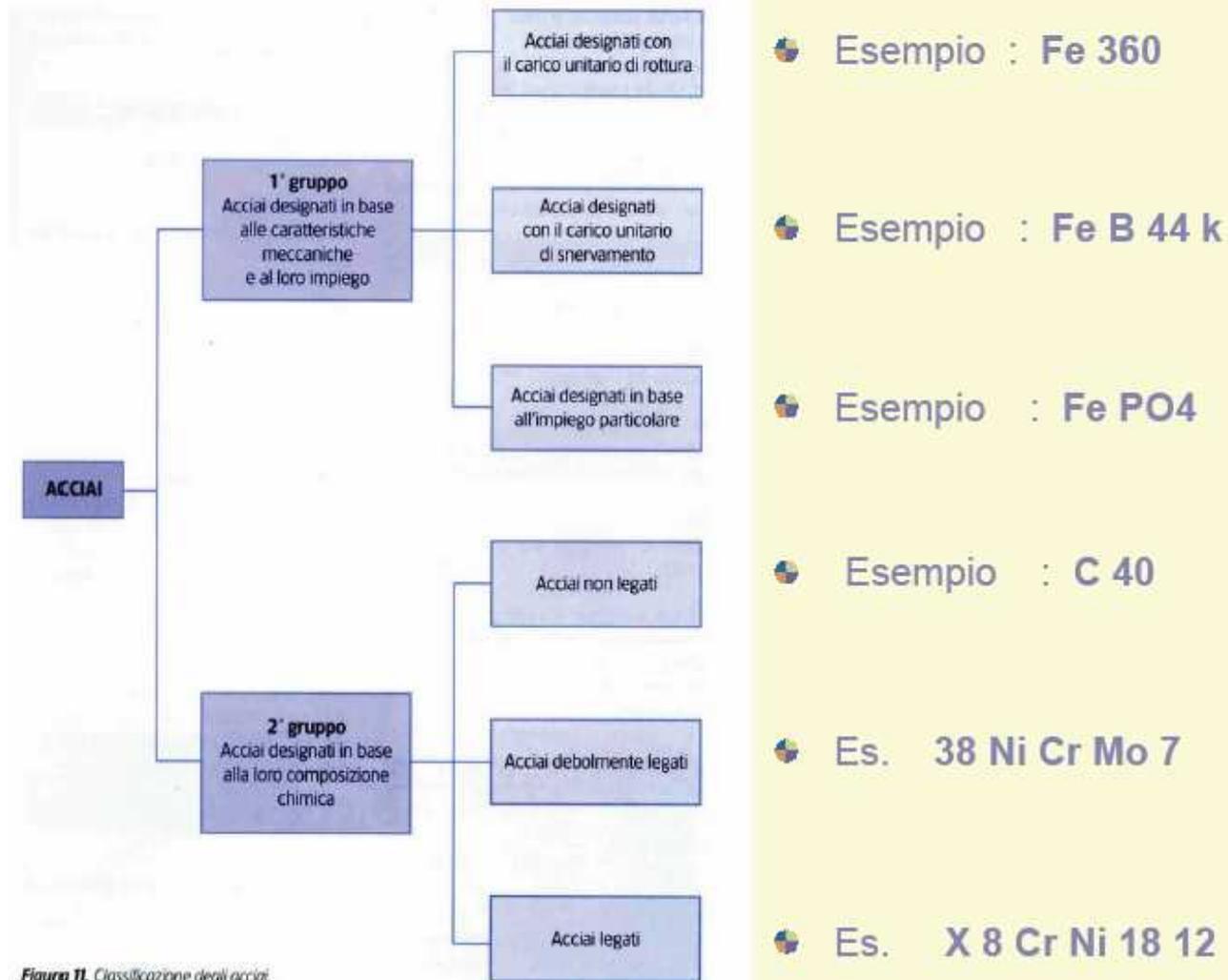


Figura 11. Classificazione degli acciai.



PROPRIETA' DEGLI ACCIAI

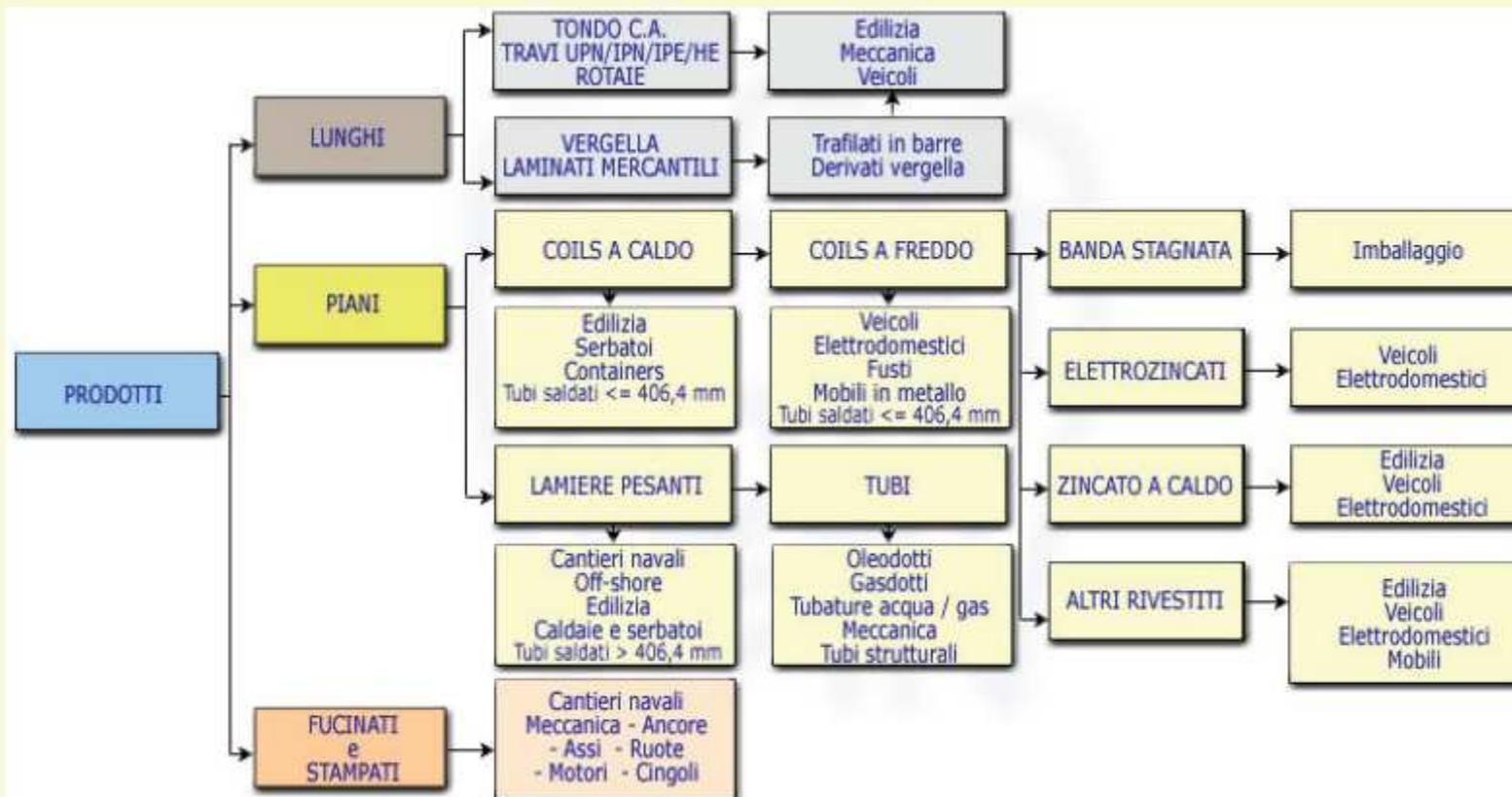
- ELEVATA RESISTENZA A TRAZIONE E COMPRESSIONE
- BUONA RESILIENZA
- DISCRETA COLABILITA'
- OTTIMA LAVORABILITA alle macchine utensili
- OTTIMA PLASTICITA'
- OTTIMA SALDABILITA'

Occorre notare che le proprietà di un acciaio dipendono da molti fattori quali percentuale di carbonio , trattamenti termici , altri elementi di lega . In pratica si fabbricano numerosi tipi di acciai , ognuno adatto per un particolare scopo (acciaio inox, acciaio per molle, acciaio per utensili , acciaio per cuscinetti , ecc.)



I SEMILAVORATI DI ACCIAIO

I prodotti acciaio reperibili in commercio si possono dividere in :
Lunghi ; Piani ; Fucinati e Stampati





ACCIAI PER L'INDUSTRIA

- Acciai per strutture metalliche
- Acciai da bonifica
- Acciai da cementazione
- Acciai da nitrurazione
- Acciai per cuscinetti
- Acciai automatici
- Acciai superrapidi da utensili
- Acciai inossidabili



Acciaio da bonifica UNI EN 10083

- Questi acciai servono alla costruzione di ruote dentate, alberi di trasmissione, alberi a gomito, perni, rulli, assali etc. Contengono dallo 0,25% allo 0,6% in peso di carbonio
- Dopo aver subito un particolare trattamento termico essi presentano una struttura interna capace di conferire all'acciaio le migliori caratteristiche di tenacità.
- Sono usati per costruire organi meccanici sottoposti a sollecitazioni dinamiche e soprattutto di fatica.
- **C 40**
acciaio al solo carbonio o non legato con 0,4% in peso di carbonio; ciò significa che 100 Kg di questo acciaio contengono 0,4 Kg di carbonio . Usato per pezzi di piccola taglia.
- **39 Ni Cr Mo 3**
acciaio debolmente legato con lo 0,39% in peso di carbonio , 0,75% (3/4) in peso di nichel (Ni), non meno dello 0,25% in peso di cromo (Cr) e non meno dello 0,10% in peso di molibdeno (Mo). Usato per pezzi di media e grande taglia.



Acciai da cementazione UNI 7846-78

- Il termine cementazione non è molto corretto anche se ormai universalmente accettato; per essere precisi si dovrebbe usare il termine "carbocementazione" o "cementazione carburante". Questi acciai servono a costruire ruote dentate, alberi di distribuzione, perni, rulli, boccole, spinotti etc.
- Dato che contengono meno dello 0,2% in peso di carbonio essi possono accogliere altro carbonio nella loro superficie per una profondità fino a 2 mm.
- Dopo aver subito un particolare trattamento termico essi presentano una superficie indurita mentre il cuore dell'acciaio mantiene ancora caratteristiche di tenacità. La superficie indurita resiste bene all'usura e all'azione di forze concentrate.
- **C 16**
acciaio al solo carbonio o non legato con lo 0,16% in peso di carbonio; ciò significa che 100 Kg di questo acciaio contengono 0,16 Kg di carbonio. Usato per pezzi di piccola taglia.
- **18 Ni Cr Mo 5**
acciaio debolmente legato con 0,18% in peso di carbonio, 1,25% (5/4) in peso di nichel (Ni), non meno dello 0,25% in peso di cromo (Cr) e non meno dello 0,10% in peso di molibdeno (Mo). Usato per pezzi di media e grande taglia.



Acciai da nitrurazione UNI 8077-80

- Questi acciai sono impiegati per costruire ruote dentate, alberi di distribuzione, perni, rulli, boccole, spinotti, alberi a camme etc. Dato che contengono circa lo 0,4% in peso di carbonio essi sono sostanzialmente degli acciai da bonifica. Riescono ad accogliere, nella loro superficie, azoto per una profondità fino a 0,5 mm.
- L'azoto reagisce con l'alluminio (Al) il cromo (Cr) e il ferro (Fe) producendo dei composti superficiali molto duri chiamati nitruri od azoturi. Dopo aver subito questo trattamento termochimico tali acciai presentano una superficie indurita mentre nel cuore mantengono ancora caratteristiche di tenacità.
- La superficie indurita resiste molto meglio all'usura della superficie degli acciai carbocementati, ma non resiste altrettanto bene all'azione di forze concentrate.
- **30 Cr Mo 12**
acciaio debolmente legato con lo 0,30% in peso di carbonio, il 3% (12/4) in peso di cromo (Cr) e non meno dello 0,10% in peso di molibdeno (Mo).
- **41 Cr Al Mo 7**
acciaio debolmente legato con lo 0,41% in peso di carbonio, l'1,75% (7/4) in peso di cromo (Cr), non meno dello 1% in peso di alluminio (Al) e non meno dello 0,10% in peso di (Mo).



Acciai per cuscinetti UNI 3097-75

- Questi acciai sono realizzati per costruire cuscinetti a rotolamento a sfera e a rulli conici e cilindrici.
- **100 Cr 6**
acciaio debolmente legato con l'1% in peso di carbonio, ciò significa che 100 Kg di questo acciaio contengono 1 Kg di carbonio e l'1,5% (6/4) in peso di cromo (Cr). Usato per cuscinetti di piccola taglia.
- **100 Cr Mn 4**
acciaio debolmente legato con l'1% in peso di carbonio, l'1% (4/4) in peso di cromo (Cr) e non meno dell' 1 % in peso di manganese (Mn). Usato per cuscinetti di media e grande taglia.



Acciai automatici UNI 5105-63

- Questi acciai si usano per le lavorazioni meccaniche ad alta velocità alle macchine utensili perchè contengono piombo (Pb) e zolfo (S).
- Il piombo infatti riduce l'attrito di scorrimento del truciolo sul petto dell'utensile poiché fonde, a causa della temperatura raggiunta durante la lavorazione, mentre lo zolfo frammenta il truciolo evitando l'intervento dell'operatore. Se il truciolo non si frammentasse, l'operatore dovrebbe liberare il mandrino autocentrante e il pezzo in lavorazione dai trucioli che vi si aggrovigliano attorno.
- **9 S Mn 23**
acciaio debolmente legato con lo 0,09% in peso di carbonio, lo 0,23% (23/100) in peso di zolfo (S), non meno dell' 1% in peso di manganese (Mn).
- **18 S Mn Pb 10**
acciaio debolmente legato con lo 0,18% in peso di carbonio, lo 0,1% (10/100) in peso di zolfo (S), non meno dello 1% in peso di manganese (Mn) e non meno dello 0,15% in peso di piombo (Pb).



Acciai superrapidi UNI 2955-82

- Questi acciai si chiamano superrapidi perchè contengono cobalto (Co) e sono impiegati per produrre utensili atti alla lavorazione con macchine utensili come frese e punte a forare con **alte velocità di taglio**. Sono acciai legati e perciò la loro sigla inizia con la lettera X .
- **X 80 W Co V 18 10 1 KU**
acciaio legato con lo 0,80% in peso di carbonio, il 18% in peso di tungsteno (W), il 10% in peso di cobalto (Co) ed 1 % in peso di vanadio (V) , con attitudine (K) a formare utensili (U).
- **X 148 W V Co Mo 12 05 05 1 KU**
acciaio legato con l' 1,48% in peso di carbonio, il 12% in peso di tungsteno (W), il 5% in peso di vanadio (V), il 5% in peso di cobalto (Co) ed 1 % in peso di molibdeno (Mo) , con attitudine (K) a formare utensili (U).



Acciai inossidabili UNI 8317-81

- Questi acciai trovano impiego nella produzione di pentolame, posateria, ferri chirurgici e nell'industria alimentare. La inossidabilità deriva dalla presenza di almeno il 12% di cromo (Cr). Infatti il cromo reagisce con l'ossigeno dell'aria formando una pellicola superficiale di ossido di cromo; questa pellicola è molto compatta e protegge da ulteriore ossidazione il materiale sottostante.
- Pertanto si capisce che non è corretto dire che questi acciai non sono attaccati dall'ossigeno ; quindi l'esatta definizione di questi acciai è: acciai resistenti al calore e alla corrosione e non acciai inossidabili, anche se quest'ultima dicitura è oramai universalmente utilizzata.
Sono acciai legati poiché la loro sigla inizia con la lettera X.
- **X 5 Cr Ni 18 10**
acciaio legato con lo 0,05% in peso di carbonio, il 18% in peso di cromo (Cr), il 10% in peso di nichel (Ni). Sulla posateria ed il pentolame questo acciaio viene indicato con la sigla 18/10.
- **X 8 Cr Ni 18 12**
acciaio legato con lo 0,08% in peso di carbonio, il 18% in peso di cromo (Cr), il 12% in peso di nichel (Ni). Sulla posateria ed il pentolame questo acciaio viene indicato con la sigla 18/12



Buon lavoro