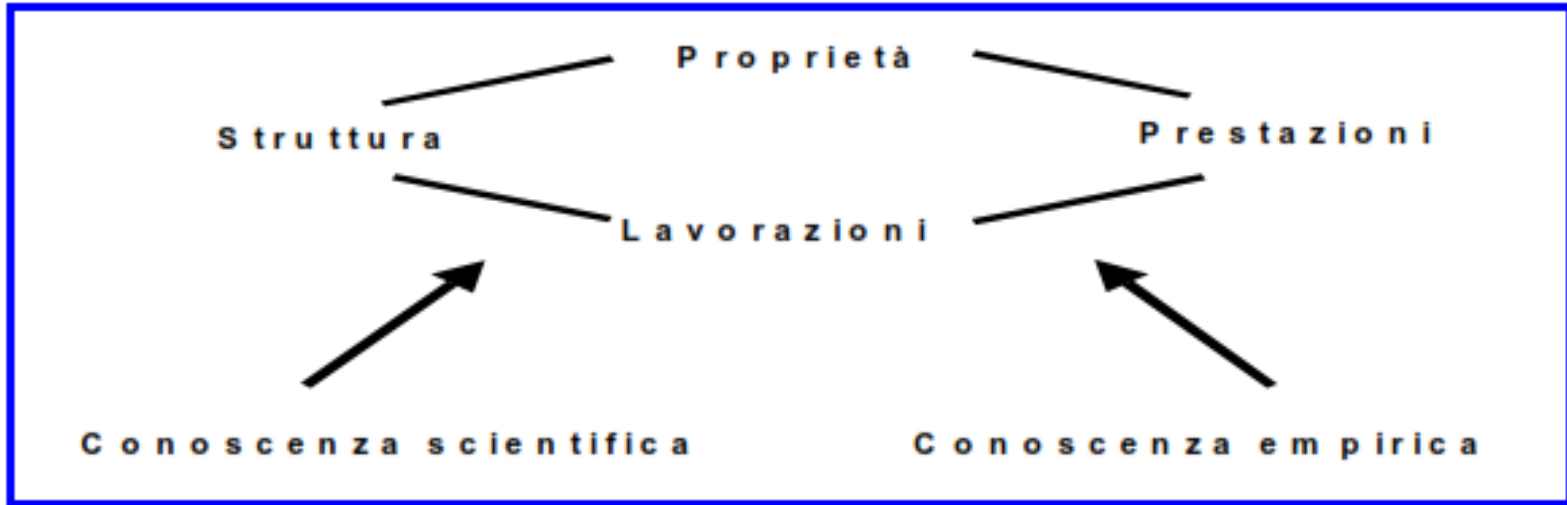


TECNOLOGIA DEI MATERIALI

RIASSUNTO

MATERIALI



“L’ingegnere adatta i materiali ai bisogni della società”

Materiale: materia adatta ad un certo impiego

Caratteristiche di materiali



Struttura Interna

Una possibile classificazione dei materiali è la seguente:

➤ ***METALLI***

Facilmente modellabili, corrodibili, alta conduttività termica ed elettrica.

➤ ***CERAMICI***

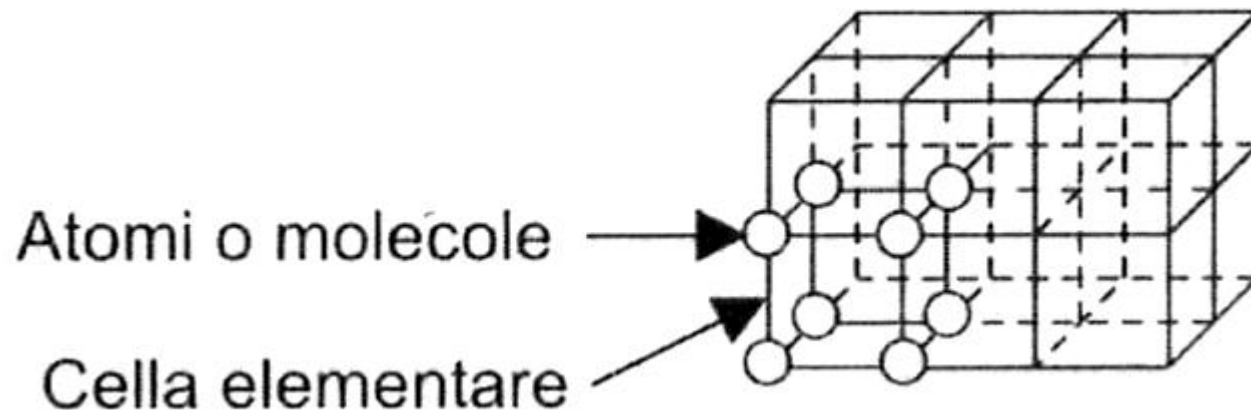
Materiali inorganici non metallici, duri e fragili, non ossidabili, isolanti.

➤ ***POLIMERI***

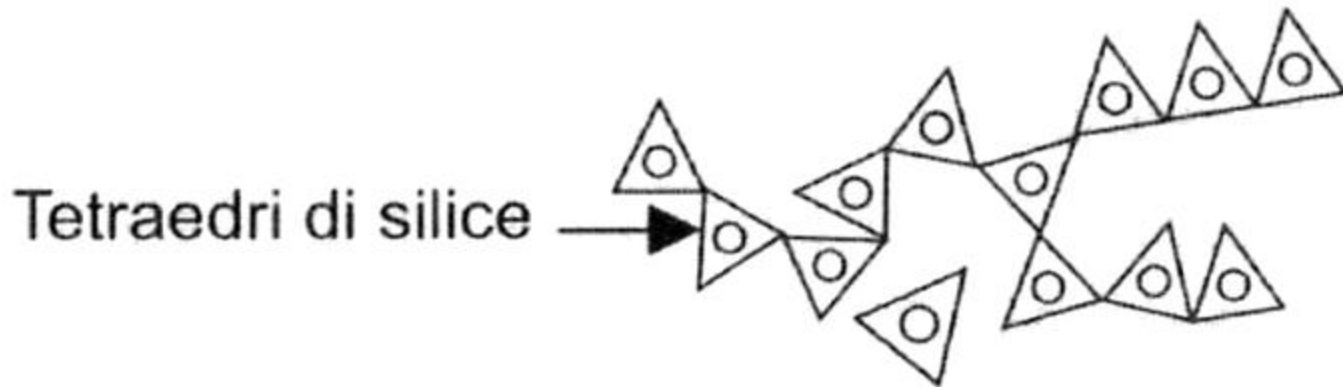
Materiali organici macromolecolari, facilmente modellabili, con scarsa resistenza meccanica, termica e chimica.

I solidi possono essere:

► di tipo **cristallino**, cioè caratterizzati da una struttura ordinata a livello atomico o molecolare (ad esempio il reticolo cristallino dei metalli o di molti materiali ceramici)

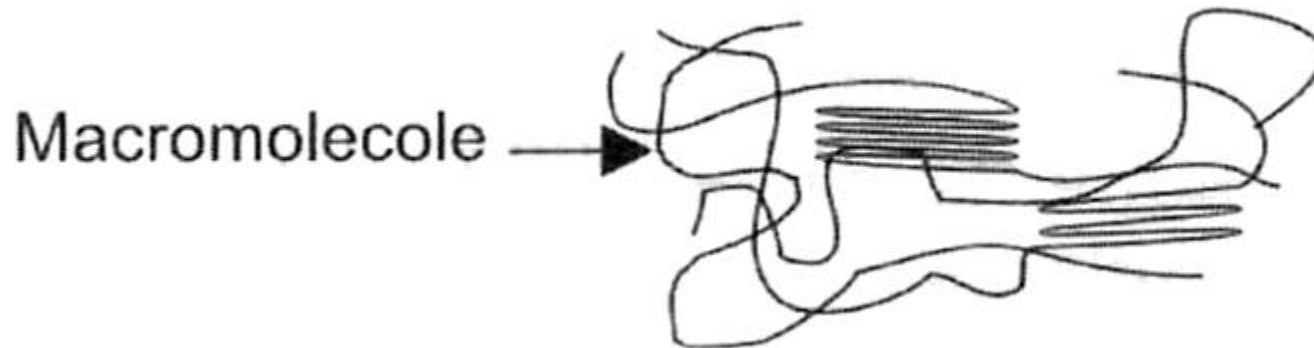


- ▶ di tipo **amorfo**, cioè caratterizzati da una struttura disordinata simile a quella dei liquidi (è il caso, ad esempio, dei vetri nei quali con un raffreddamento rapido si "congela" la struttura amorfa del liquido)



Esistono poi strutture più complesse come:

- ▶ la *semicristallina* normalmente presente in molti materiali polimerici



- ▶ la struttura dei *gel* costituiti da una dispersione in un liquido di particelle molto fini (in generale di dimensioni inferiori al micrometro) legate in una struttura che intrappola il liquido stesso.

Nei gel la contemporanea presenza di una fase liquida e di una fase solida, fa sì che, a seconda del numero e del tipo dei legami tra le particelle, si può avere un comportamento prossimo a quello di un liquido o a quello di un solido (es. la pasta di cemento idratata).

Per comprendere le proprietà di un materiale è necessario conoscere la sua struttura.

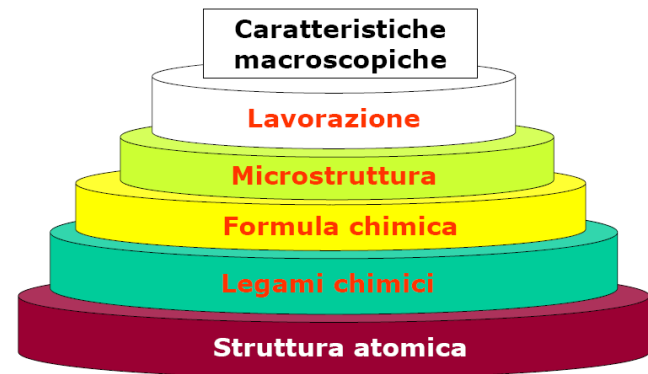
Lo studio della struttura dei materiali viene effettuato con diversi livelli di dettaglio, in genere identificati con l'ordine di grandezza degli elementi considerati.

Macroscopico

Microscopico

Atomico o Molecolare

Caratteristiche di materiali



Ognuno di questi livelli fornisce delle informazioni utili a comprendere o prevedere il comportamento del materiale stesso.

La macrostruttura è la struttura del materiale come si presenta a livello macroscopico cioè a una osservazione a occhio nudo.

A questo livello il materiale è valutato nel suo insieme: viene in genere considerato come *continuo e omogeneo* e si considerano proprietà medie valide in tutto il suo volume.

Se esse sono le medesime in tutte le direzioni, allora il materiale è isotropo; viceversa, se le proprietà dipendono dalla direzione lungo cui vengono valutate, il materiale è anisotropo.

La caratterizzazione di un materiale dal punto di vista **tecnologico**, tramite le prove sperimentali, viene normalmente eseguita a livello macroscopico.

Solidi cristallini e solidi amorfi

Solidi cristallini

- particelle disposte regolarmente nello spazio
- **anisotropia**
- **punto di fusione** ben definito

Solidi amorfi

- disposizione irregolare delle particelle
- **isotropia**
- **punto di fusione** non ben definito

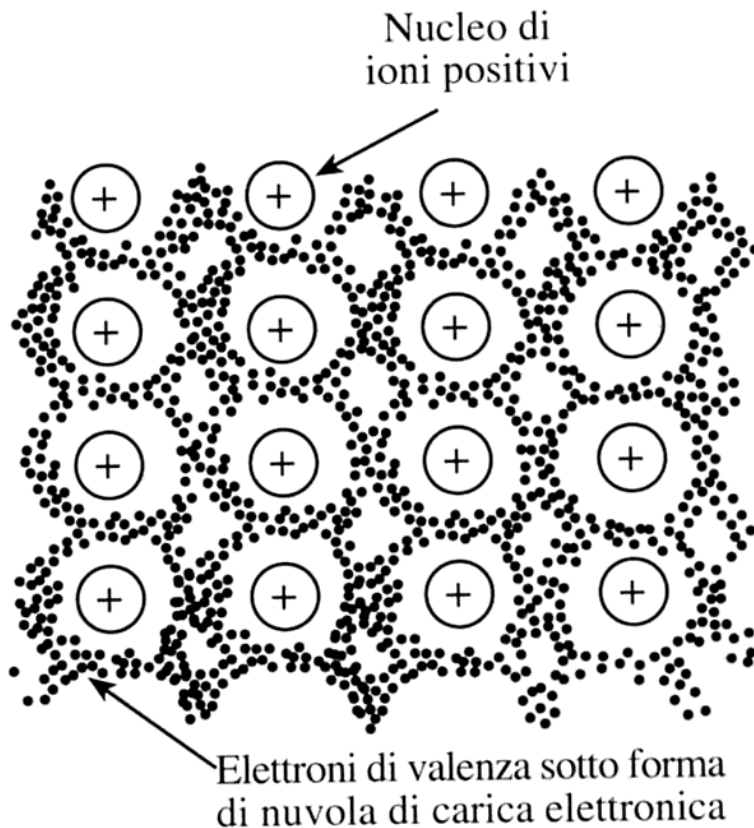
Anisotropia

- Isotropica è una proprietà che è invariante in tutte le direzioni; isotropico è un sistema (o un materiale) che presenta le stesse proprietà in tutte le direzioni. Un campione di gas è isotropo.
- Anisotropo è un sistema (o un materiale) le cui proprietà variano a seconda delle direzioni.
- Un solido si dice anisotropo se le proprietà quali conducibilità elettrica, indice di rifrazione, conducibilità termica, ecc.. sono diverse a seconda della direzione in cui vengono misurate.
- L'anisotropia è conseguenza della asimmetria dei reticoli lungo le tre direzioni dello spazio
- Molti solidi cristallini risultano tuttavia isotropi perché le loro strutture macroscopiche sono costituite da un gran numero di microcristalli disposti casualmente. Per rilevare l'anisotropia occorre fare le misure su monocristalli.

Il legame metallico

Il legame metallico, come il legame covalente, si caratterizza per la messa in comune di elettroni, ma non è direzionale.

In esso gli elettroni che danno luogo al legame non sono localizzati tra gli atomi, come nel legame covalente, o su uno ione, come nel



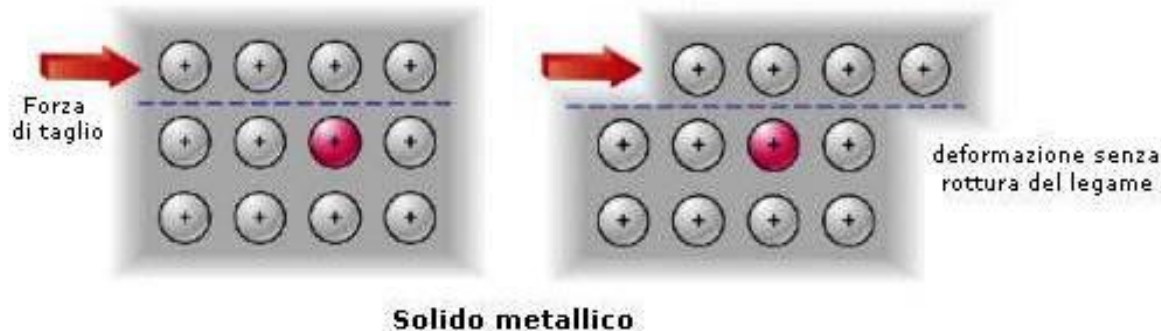
legame ionico, ma sono ripartiti (delocalizzati) nel reticolo degli ioni e dotati di alta mobilità.

Questo perché sono legati debolmente al nucleo dell'atomo di metallo (che generalmente ha bassa elettronegatività).

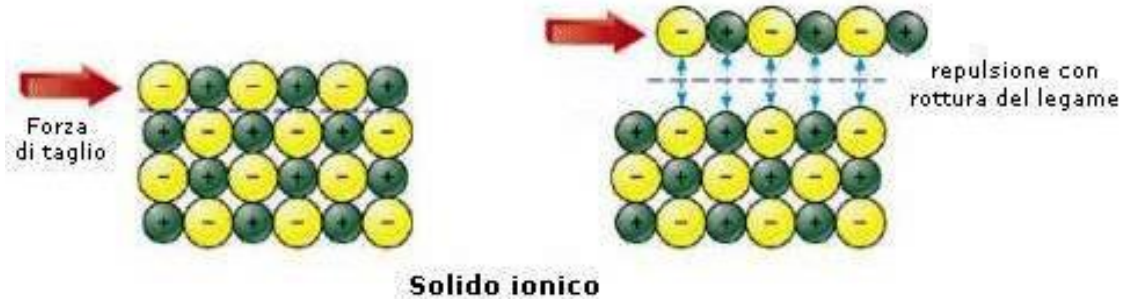
Il legame metallico è quindi costituito da ioni positivi immersi in un "gas" d'elettroni.

Gli atomi che costituiscono un metallo sono tenuti insieme da un tipo di legame chiamato legame metallico. Tra i modelli che descrivono il legame metallico vi è il "**modello a nube elettronica**" di P. Drude (1863- 1906). Secondo questo modello in un metallo gli atomi perdono i loro elettroni di valenza trasformandosi in cationi (ioni positivi). Gli ioni si dispongono in modo da impacchettarsi nel miglior modo possibile (massimo impacchettamento), creando così strutture geometriche ben definite. Gli elettroni di valenza non appartengono più ai singoli atomi, ma sono liberi di muoversi (elettroni delocalizzati) tra i vari cationi. **Possiamo quindi immaginare un cristallo metallico come costituito da un reticolo di ioni positivi immersi in un mare di elettroni che ne costituiscono l'elemento legante.**

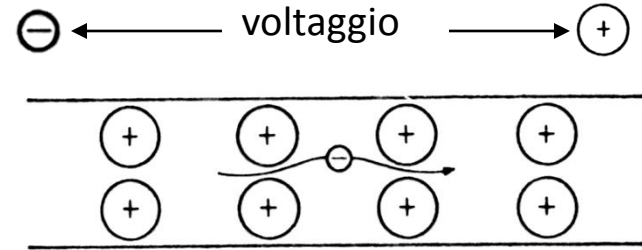
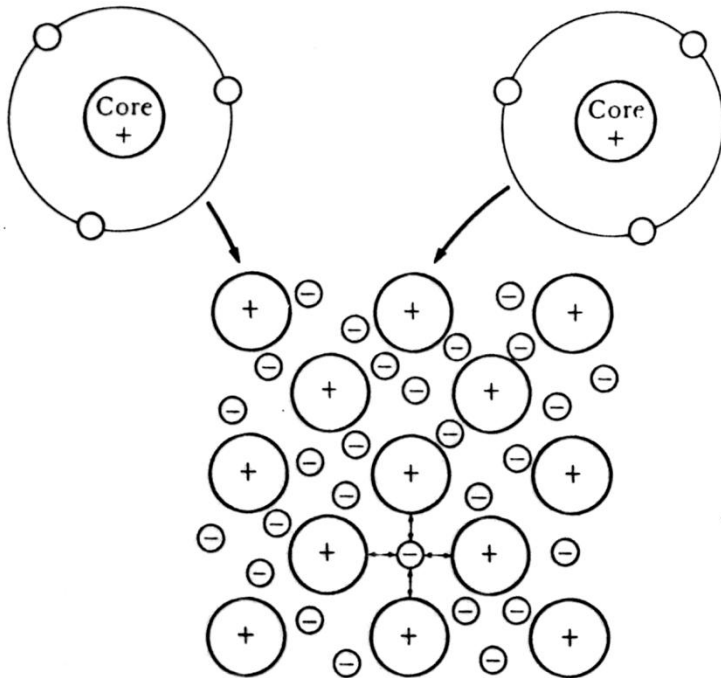
Questo modello spiega alcune proprietà caratteristiche dei metalli: sono **buoni conduttori** infatti gli elettroni sono liberi di muoversi all'interno del reticolo cristallino; sono **duttili**, cioè possono essere trasformati in fili sottili e sono **malleabili** (cioè possono essere ridotti in lamine) infatti gli elettroni mobili permettono agli ioni positivi del metallo di "scivolare" gli uni sugli altri, senza compromettere la compattezza della struttura.



Il comportamento dei metalli è opposto a quello dei solidi ionici. La fragilità dei solidi ionici è dovuta alla presenza in essi delle cariche positive e negative. Una sollecitazione meccanica provoca lo scorrimento dei piani, perciò le cariche uguali vengono a contatto. La notevole repulsione provoca la frattura.

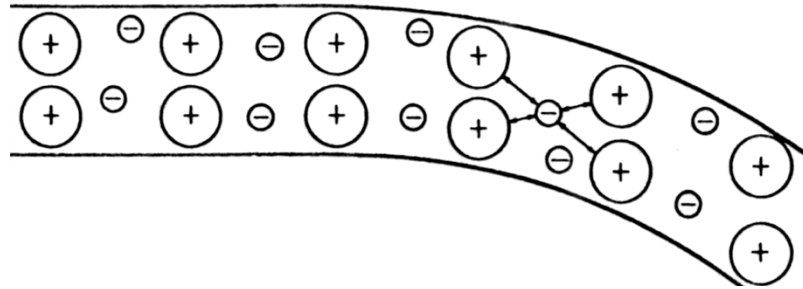


L'elevata **conduttività elettrica** e **termica** dei metalli è spiegata con la presenza di elettroni relativamente liberi di muoversi nella struttura.



Nel caso di legami covalenti, perché un elettrone possa muoversi e trasportare una corrente occorre rompere il legame, cosa che può avvenire ad alta temperatura (sali fusi)

Anche la **duttilità** deriva dalla possibilità che hanno gli atomi di poter variare la loro posizione relativa, quando il metallo è deformato, pur rimanendo legati.



Al contrario i materiali con legami covalenti o legami ionici, non avendo questa possibilità, sono duri e fragili (ad es. i ceramici).

Il legame metallico è quindi un legame forte che si manifesta in tutte le direzioni (isotropo) e che favorisce la formazione di strutture cristalline semplici, di elevata simmetria e molto compatte.

Lo Stato Solido

Lo stato fisico di un materiale è determinato dal bilanciamento tra l'energia di coesione, che avvicina le molecole (o gli atomi), e l'energia termica che tende ad allontanarle

Dal punto di vista della caratterizzazione di un materiale lo **stato solido** è quello di maggior interesse e lo possiamo trovare o cristallino o amorfo.

In un **solido cristallino** ogni atomo occupa nello spazio una posizione ben definita non solo rispetto ai suoi primi vicini, ma anche rispetto a tutti gli altri atomi indipendentemente dalla distanza che li separa.

Essi sono cioè organizzati secondo un reticolo tridimensionale: ogni atomo ha dunque un intorno assolutamente identico a quello degli altri, da questo fatto discende la nozione di **ordine a lungo raggio**.

Conseguenza della disposizione regolare degli atomi nello spazio è l'**anisotropia** di alcune proprietà

STRUTTURE DEI SOLIDI

I materiali di interesse ingegneristico sono allo stato solido; per stato solido si intende uno stato di aggregazione di atomi ioni o molecole, in contrapposizione con gli stati fluidi, liquidi o gassosi. L'aggregazione delle particelle costituenti il solido può condurre a strutture cristalline o amorfe.

- **Solido cristallino**
Regolarità della ripetizione delle distanze interatomiche anche oltre i primi vicini
Ordine a lungo raggio
Danno luogo ad un'immagine di diffrazione se irradiati con raggi X
- **Solido amorfo**
Assenza di regolarità nella disposizione tridimensionale degli atomi
Ordine a corto raggio
Non danno luogo ad un'immagine di diffrazione se irradiati con raggi X

METALLI

cristallini

CERAMICI

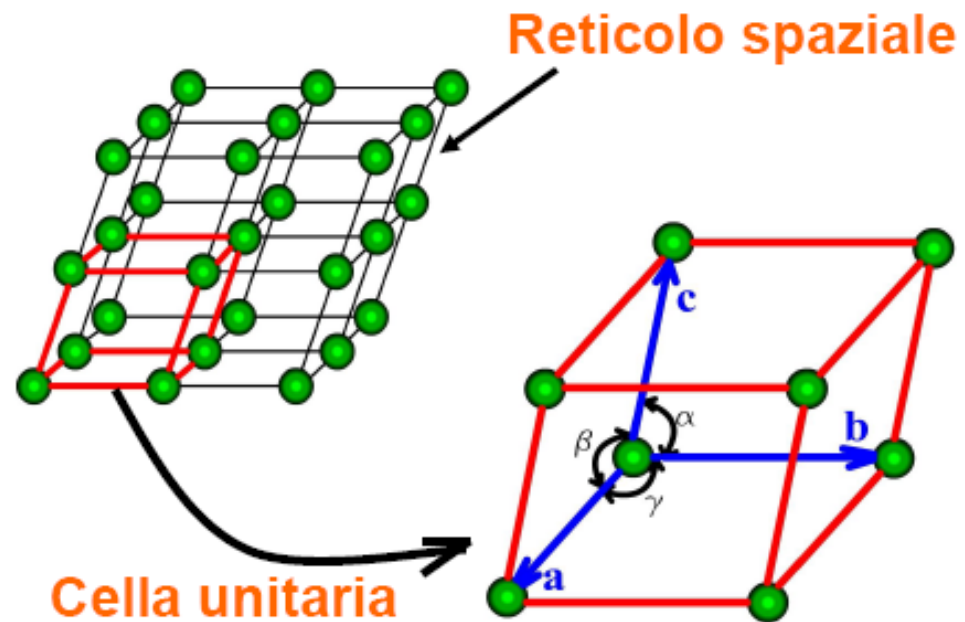
cristallini ed amorfi

POLIMERI

amorfi e semicristallini

- Gli atomi, disposti in configurazioni ripetitive 3D, con ordine a lungo raggio (LRO), danno luogo alla *struttura cristallina*.
- Le proprietà dei solidi dipendono dalla struttura cristallina e dalla forza di legame.
- Una rete immaginaria di linee, con atomi all'intersezione delle linee, che rappresenta la disposizione degli atomi, è detta *reticolo spaziale*.

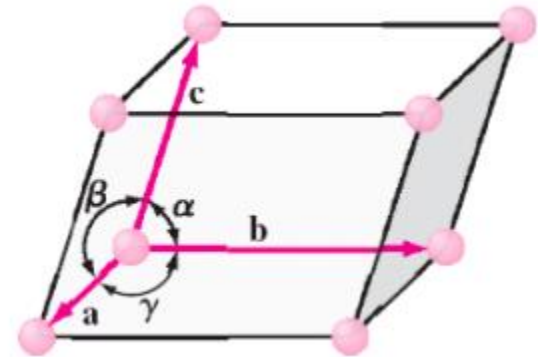
- La *cella unitaria* è quel blocco di atomi che si ripete per formare il reticolo spaziale.
- I materiali con disposizione di ordine a corto raggio sono detti *materiali amorfi*.



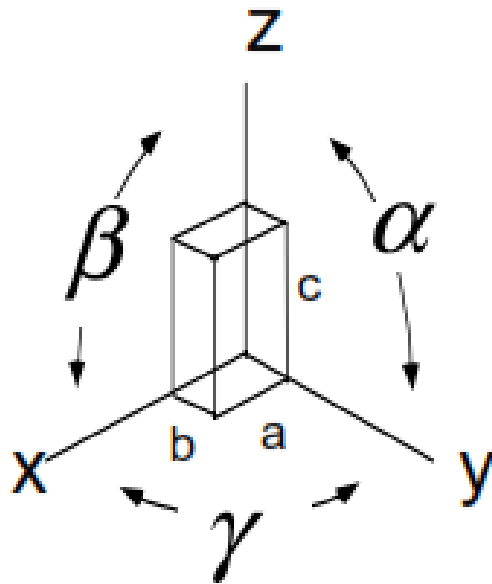
- Solo **sette** diversi tipi di celle unitarie sono necessarie per formare tutti i reticoli.
- In accordo con Bravais (1811-1863), **14 celle unitarie** possono descrivere tutte le possibili reti di reticolo cristallino.
- I quattro tipi fondamentali di celle unitarie sono:
 - **Semplice**
 - **A corpo centrato**
 - **A facce centrate**
 - **A basi centrate**

Disposizioni cristalline

Considerata una generica cella cristallina, Bravais ha individuato in 14 le possibili disposizioni degli atomi, in funzione dei parametri reticolari indicati in figura.



La periodicità tridimensionale può essere realizzata da differenti geometrie riassunte dai sistemi cristallini:



CUBICO	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
TETRAGONALE	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
ORTOROMBICO	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
MONOCLINO	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$
TRICLINO	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$
ESAGONALE	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ \quad \gamma = 120^\circ$
ROMBOEDRICO	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$

Qui di seguito si riportano in maggior dettaglio le tre strutture in cui i metalli cristallizzano più frequentemente.

Gli impaccamenti ordinati producono strutture cristalline caratterizzate da:

**CELLA
UNITARIA**

***La più piccola entità che contiene tutti
gli elementi di simmetria del cristallo***

**NUMERO DI
COORDINAZIONE**

***Numero di atomi adiacenti che
circondano ciascun atomo***

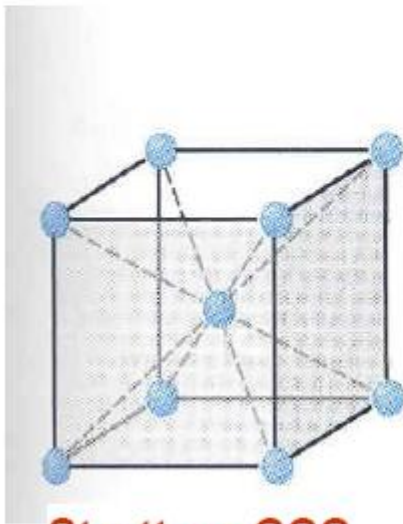
**FATTORE DI
IMPACCAMENTO
(P.F.)**

***Frazione volumetrica di atomi nella cella
unitaria***

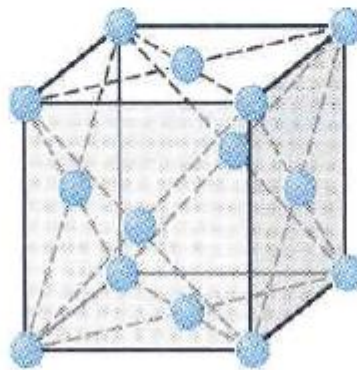
$$\text{P.F.} = \frac{\text{volume di atomi nella cella}}{\text{volume della cella}}$$

Principali Strutture Cristalline Metalliche

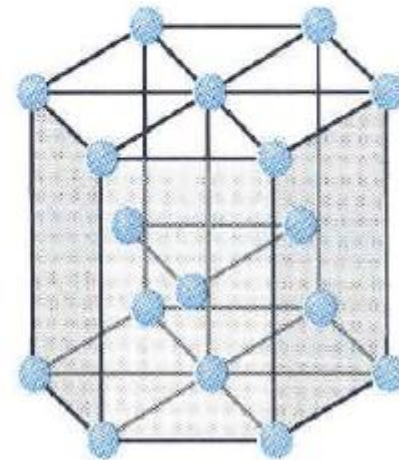
- 90% dei metalli hanno struttura cristallina Cubica a Corpo Centrato (CCC), Cubica a Facce Centrate (CFC) o Esagonale Compatta (EC).
- La struttura EC è la versione più densa della semplice struttura cristallina esagonale.



Struttura CCC



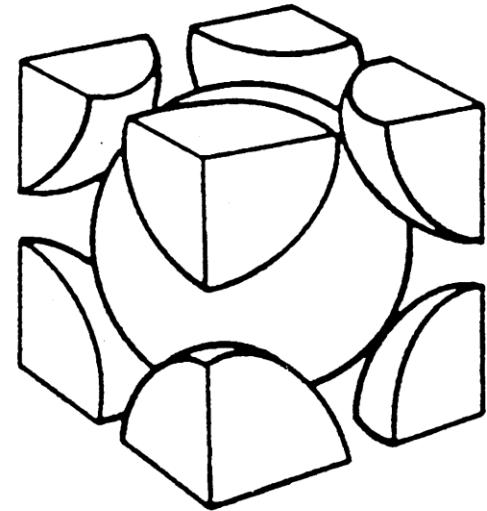
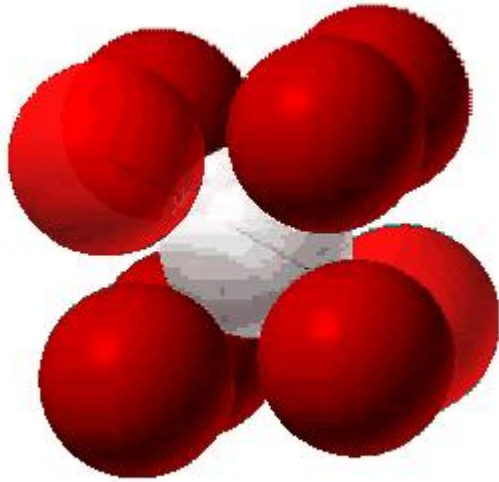
Struttura CFC



Struttura EC

STRUTTURA CUBICA A CORPO CENTRATO (CCC)

- Le direzioni di impaccamento stretto sono le diagonali del cubo.
- Numero di **Coordinazione** = 8
- **Atomi per cella**=2

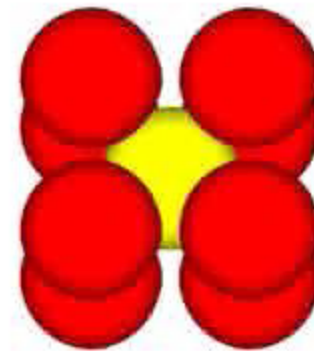
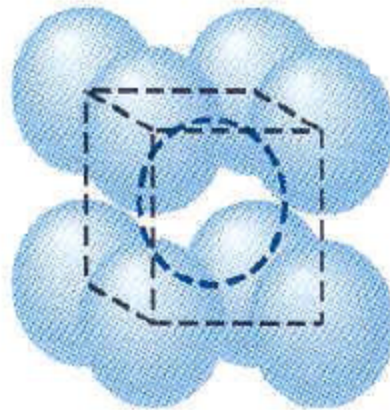
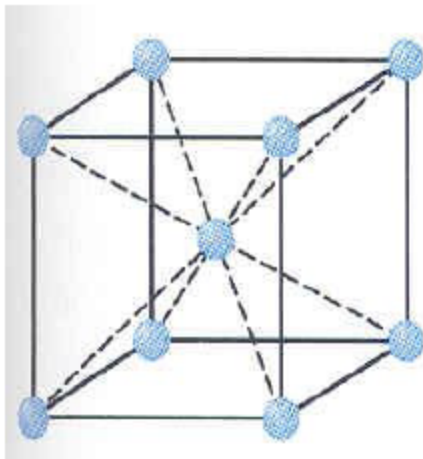


Struttura Cristallina Cubica a Corpo Centrato (CCC)

- Rappresentata da un atomo ad ogni spigolo di un cubo ed uno al centro del cubo.
- Ogni atomo ha 8 atomi vicini.
- Quindi, il *numero di coordinazione* è 8.

Esempi :

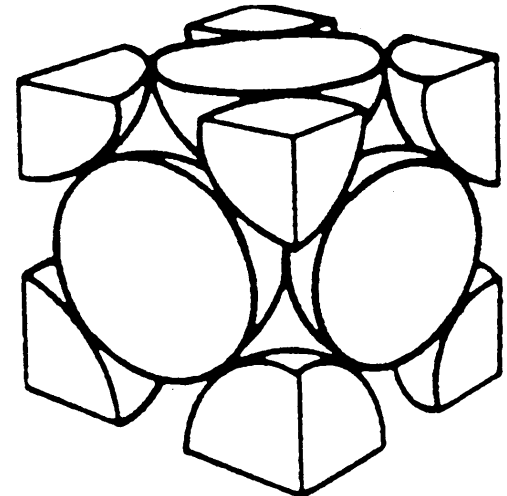
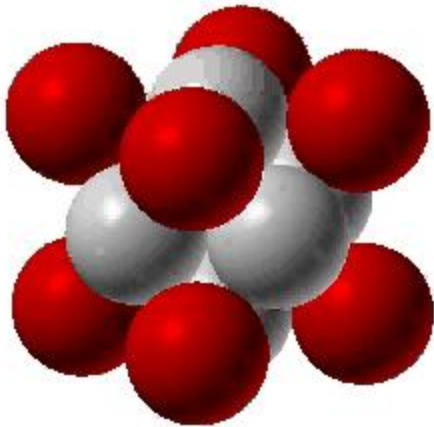
- **Cromo** ($a = 0.289 \text{ nm}$)
- **Ferro** ($a = 0.287 \text{ nm}$)
- **Sodio** ($a = 0.429 \text{ nm}$)



$a =$ costante reticolare

STRUTTURA CUBICA A FACCE CENTRATE (CFC)

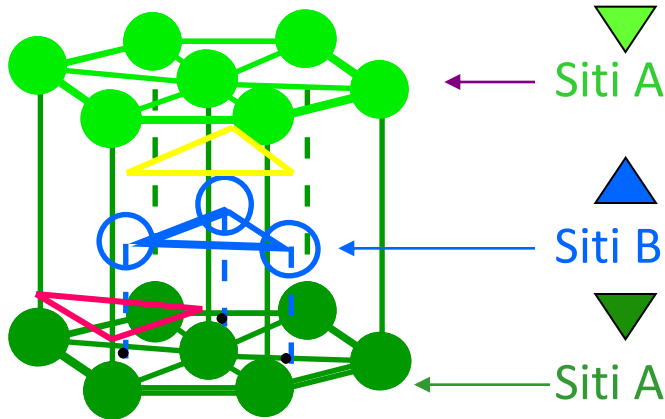
- Le direzioni di impaccamento stretto sono le diagonali delle facce del cubo.
- Numero di **Coordinazione** = 12
- Atomi per cella**= 4



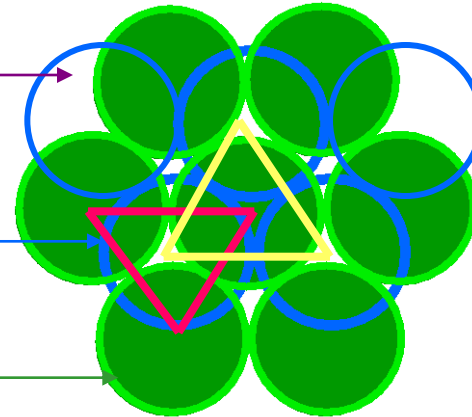
STRUTTURA ESAGONALE COMPATTA (EC)

- Sequenza di ricopertura ABAB...

- **Proiezione 3D**



- **Proiezione 2D**



- Numero di **Coordinazione** = 12
Atomi per cella= 6

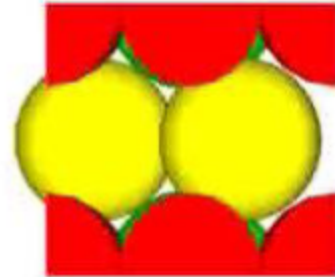
Struttura Cristallina EC

- In ogni cella unitaria EC isolata detta cella primitiva, gli atomi agli otto spigoli contribuiscono per $[(4 \times 1/6) + (4 \times 1/12)] = 1$ atomo, l'atomo centrato all'interno della cella unitaria contribuisce per intero quindi in totale ogni EC ha 2 atomi
- Per convenienza, si può utilizzare come EC la cella più grande che ha

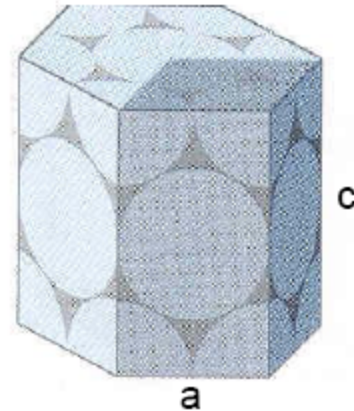
$$(2 \times 6 \times 1/6) + (2 \times 1/2) + 3 = 6 \text{ atomi}$$

- Esempi :

- Zinco ($a = 0.2665 \text{ nm}$, $c/a = 1.85$)
- Cobalto ($a = 0.2507 \text{ nm}$, $c/a = 1.62$)



Rapporto c/a ideale pari a 1.633



Proprietà meccaniche dei materiali

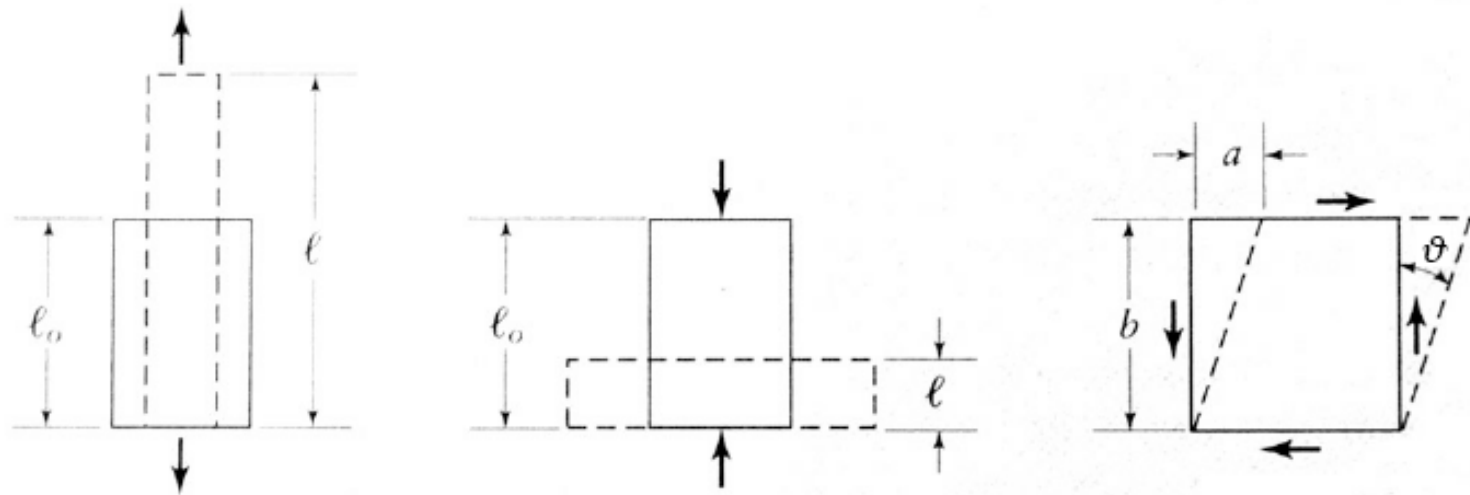
- ✓ *Resistenza*: la capacità di resistere ad una forza applicata senza fratturarsi.
- ✓ *Elasticità*: la capacità di ritornare alle dimensioni proprie.
- ✓ *Plasticità*: la capacità di conservare la forma imposta.
- ✓ *Duttilità*: la capacità di essere tirati in fili.
- ✓ *Malleabilità*: la capacità di essere laminati.
- ✓ *Anelasticità*: deformazione elastica dipendente dal tempo
- ✓ *Scorrimento viscoso*: capacità di deformarsi permanentemente ad un grado dipendente dal tempo di applicazione del carico
- ✓ *Fragilità*: la tendenza a fratturarsi se sottoposto ad un carico, soprattutto se di tipo impulsivo. I materiali fragili non mostrano segni premonitori dell'imminente frattura.
- ✓ *Resilienza*: la capacità di assorbire lavoro per fratturarsi in maniera fragile.
- ✓ *Tenacità*: la capacità di resistere alla frattura con grande deformazione.
- ✓ *Durezza*: resistenza all'abrasione e all'indentazione, in generale alla deformazione plastica.

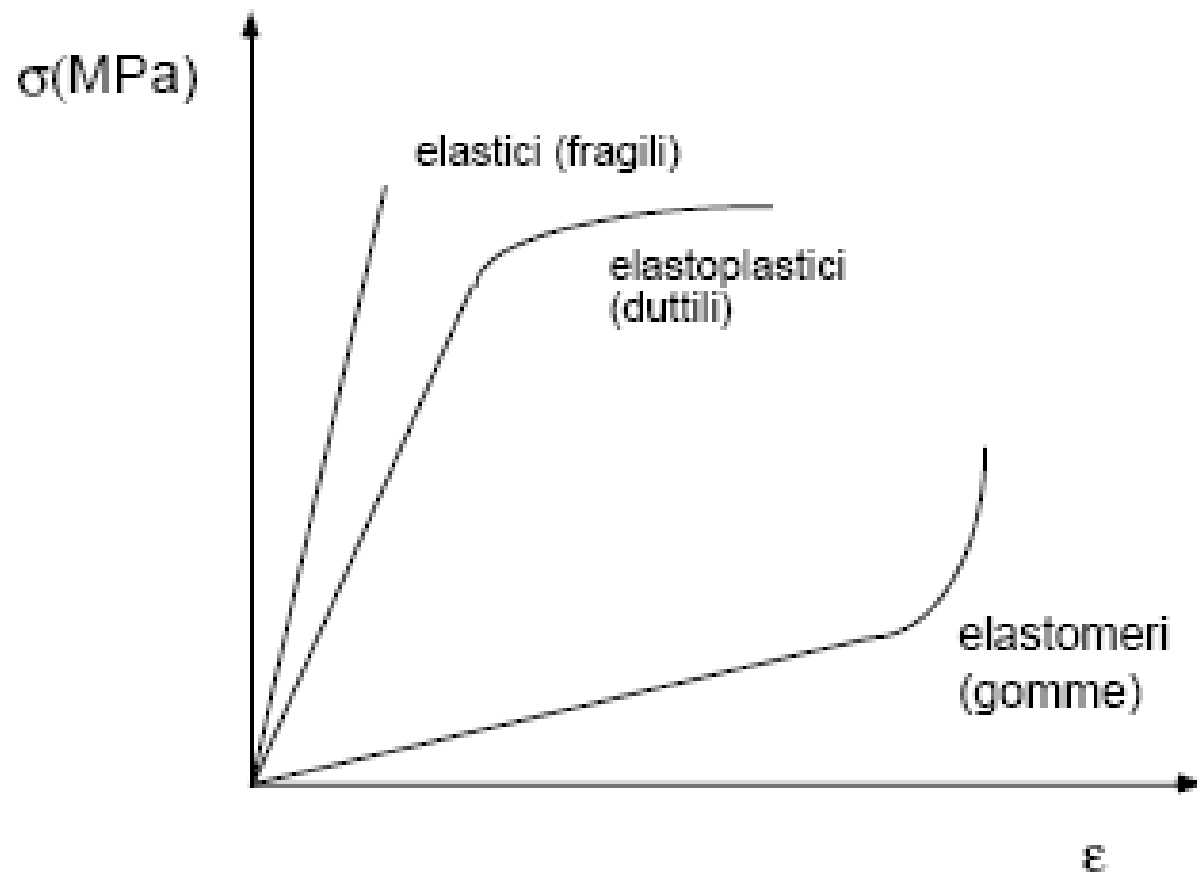
Introduzione al comportamento meccanico

- Conoscere il comportamento meccanico è importante per le lavorazioni per deformazione plastica. Le lavorazioni plastiche comprendono:
 - deformazione pezzi spessi (forgiatura, laminazione, estrusione, trafilatura in barre e fili);
 - deformazione lamiera (piegatura, stiratura, centrifugazione, imbutitura, lavoro di pressa).
- Inoltre è importante conoscere le relazioni sforzo/deformazione/rottura per progettare stampi, scegliere utensili e progettare l'equipaggiamento opportuno.

Aspetti fondamentali

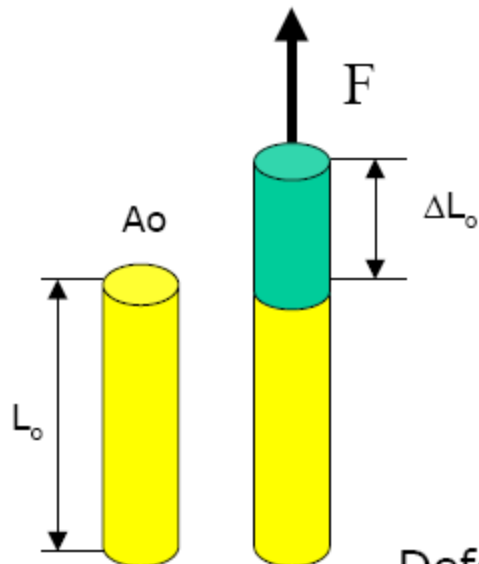
- Tipicamente per produrre un filo mettiamo il materiale in tensione,
- per un albero motore usiamo la compressione,
- per fare un foro per punzonatura, sottoponiamo il materiale a taglio.





Proprietà dei materiali

- Comportamento elastico



Un materiale sottoposto a trazione subisce una deformazione

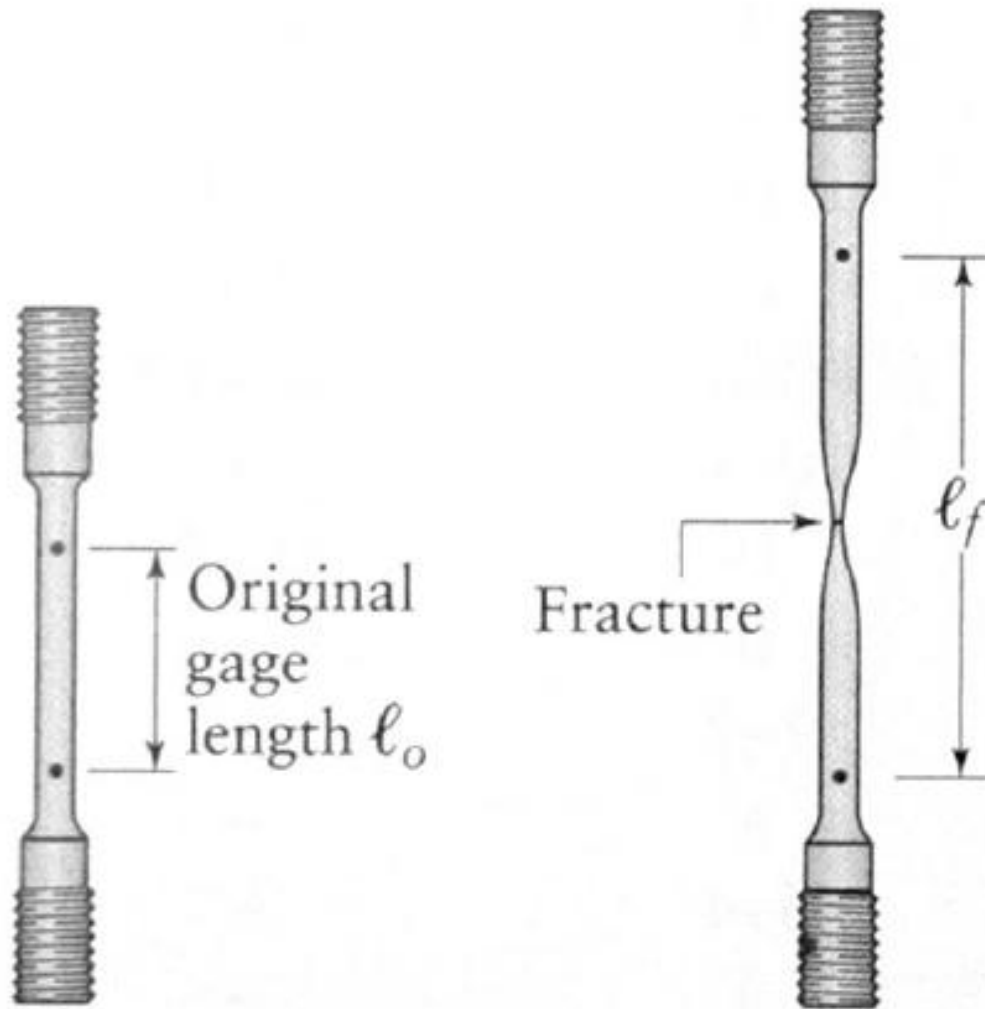
$$\text{Sforzo nominale } \sigma = \frac{F}{A_0} \quad \text{Pa}$$

$$\text{Deformazione nominale } \varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0}$$

Sforzi e deformazioni

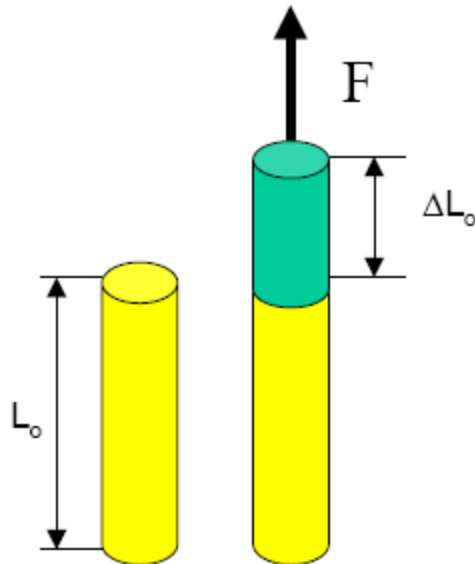
- In meccanica si preferisce usare:
 - sforzi al posto dei carichi
 - deformazioni al posto di allungamenti
- Sforzi e deformazioni e la legge che li lega sono dipendenti dal materiale ma indipendenti dalla forma e dimensioni
- Carichi e allungamenti invece dipendono anche dalla forma e dimensione del pezzo

Test di tensione



Proprietà dei materiali

- Comportamento elastico



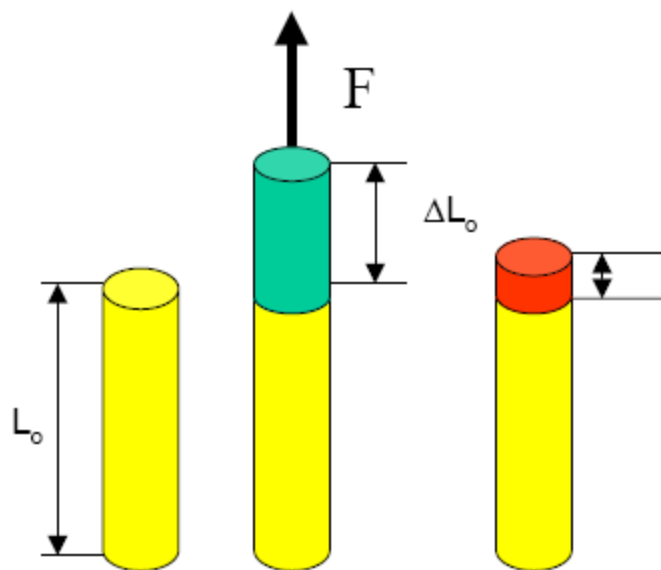
Un materiale sottoposto a trazione subisce una deformazione

Cessata la forza applicata il materiale ritorna alle dimensioni originali

Comportamento Elastico

Proprietà dei materiali

- Comportamento plastico

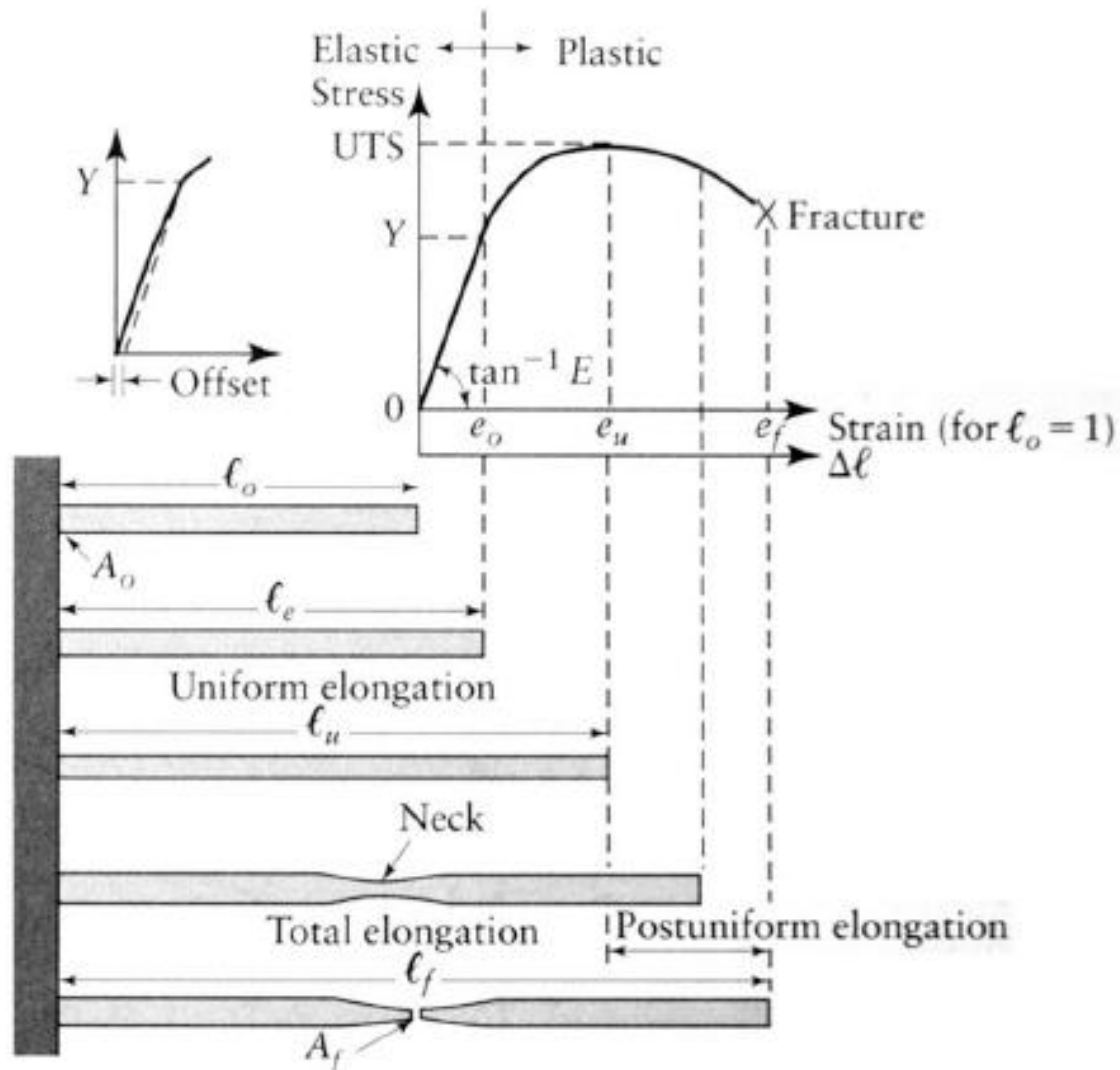


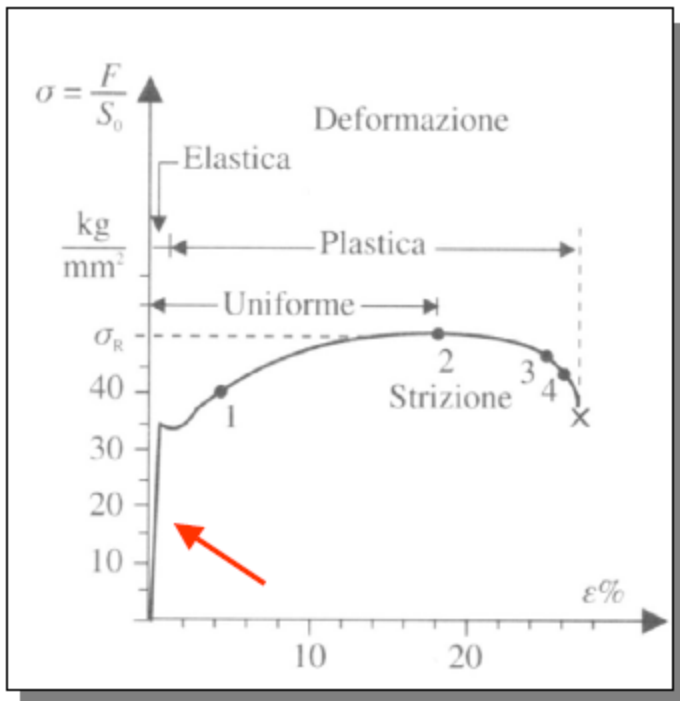
Un materiale sottoposto a trazione subisce una deformazione

Cessata la forza applicata il materiale **NON** ritorna alle dimensioni originali

Comportamento Plastico

Tensione: frattura





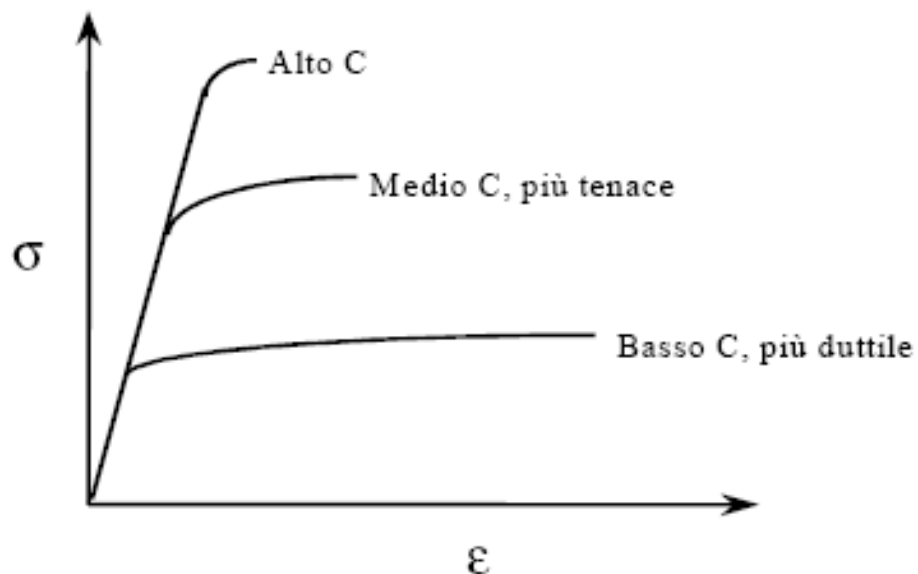
Legge di Hooke

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Pa}$$

E = modulo di Young

E è un parametro che caratterizza la resistenza del solido alla deformazione uniaxiale ed è detto *modulo di Young* o *modulo di elasticità*

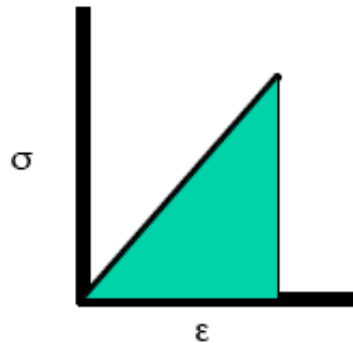
Il modulo elastico risente dell'alligazione, il modulo elastico della lega segue la legge delle miscele. L'aggiunta di piccole frazioni in volume di legante non produce apprezzabili variazioni di modulo di elasticità. Infatti gli acciai al carbonio (C fino a 1.2% in peso) hanno lo stesso modulo elastico e diversa deformabilità (vedi figura seguente).



I materiali anisotropi possiedono più moduli elastici, per ciascuna direzione di misura (ad esempio legno e materiali compositi).

Resilienza

- Capacità del materiale di assorbire energia mentre viene deformato elasticamente



$$U_r = \int_0^{\epsilon_y} \sigma d\epsilon$$

Caso elastico-lineare

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_y \epsilon_y \quad U_r = \frac{Y^2}{2E}$$

materiali resilienti hanno alto snervamento e basso modulo elastico

Proprietà dei materiali

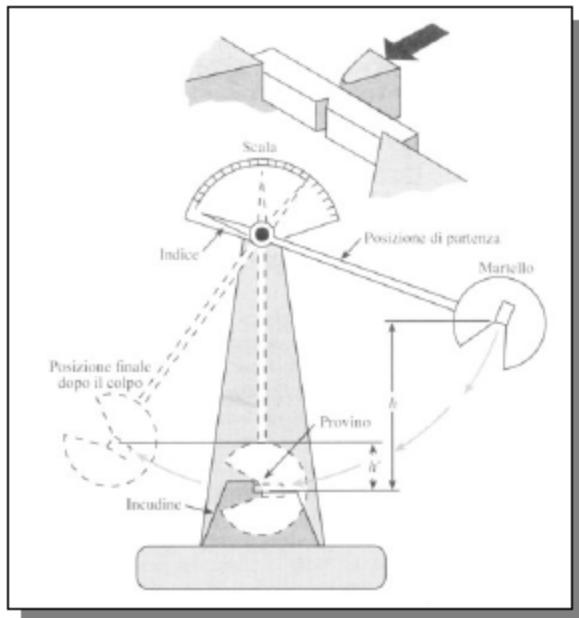
- Resilienza

È la capacità di un materiale di assorbire energia quando è deformato in modo elastico

In pratica è definita dal lavoro occorrente per rompere con un sol colpo un'asta del materiale in esame, riferito all'unità di superficie della sezione in cui si verifica la rottura.

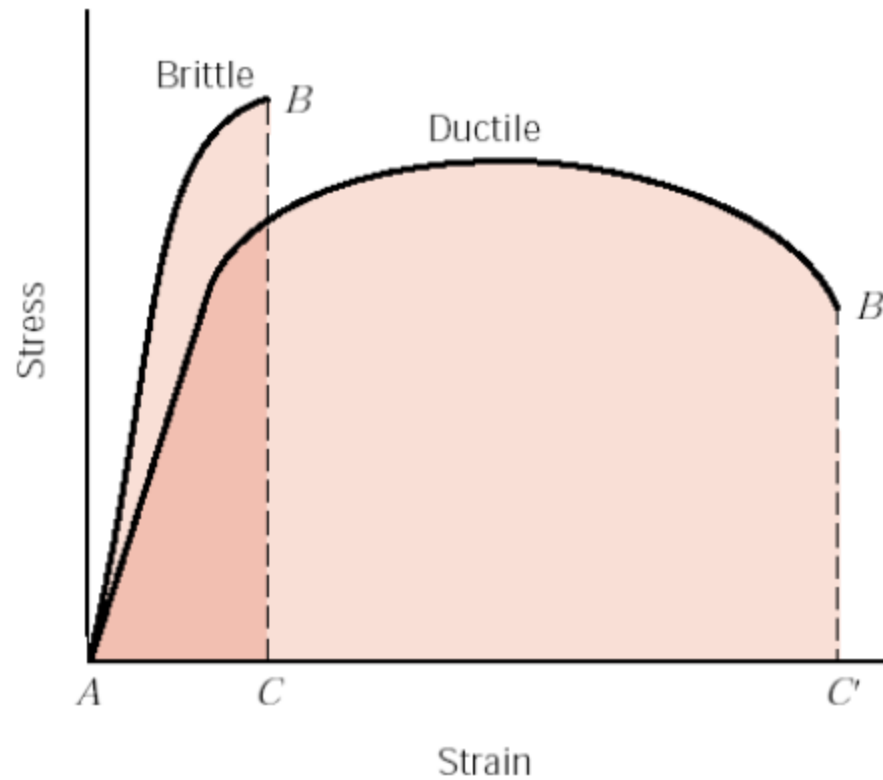
Il reciproco dell'indice di resilienza viene assunto come indice di fragilità.

Materiali di elevata resilienza sono detti tenaci, a differenza di quelli fragili, aventi piccolo valore di resilienza e quindi poco resistenti agli urti.



Pendolo di Charpy

Proprietà dei materiali



Comportamento a trazione di un materiale fragile (Brittle) e di uno duttile (Ductile)

Proprietà dei materiali

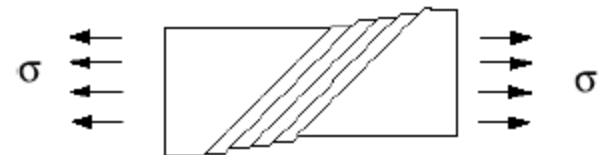
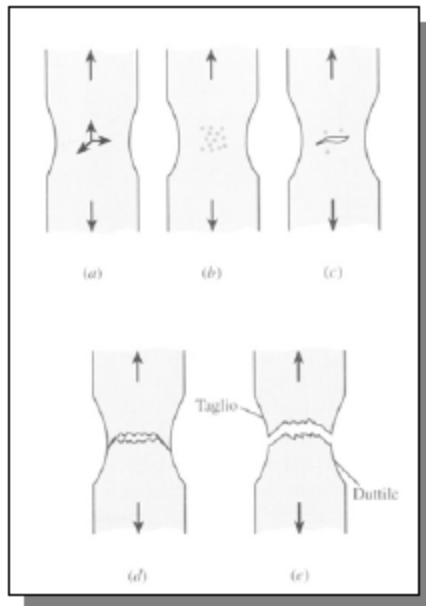
- Comportamento a rottura

Rottura duttile

Rottura che avviene dopo una deformazione plastica.

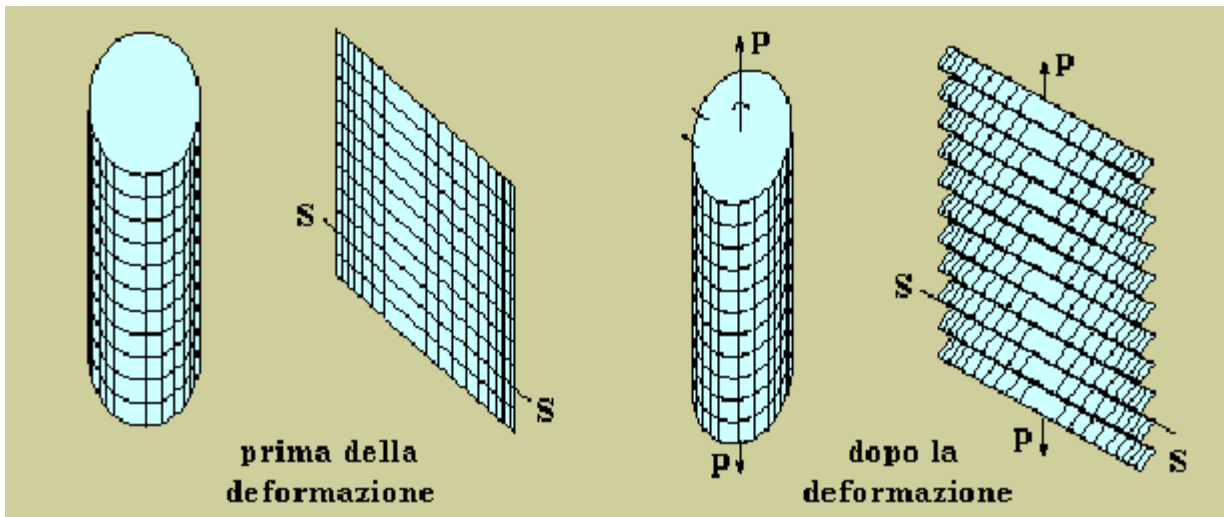
Il cedimento che mette fine al comportamento elastico è causato dallo scorrimento dei piani cristallini, che si verifica su piani inclinati di circa 45° rispetto alla direzione di applicazione della forza dove le tensioni di tipo tangenziale (t) sono massime.

Tipica dei metalli



Deformazione plastica

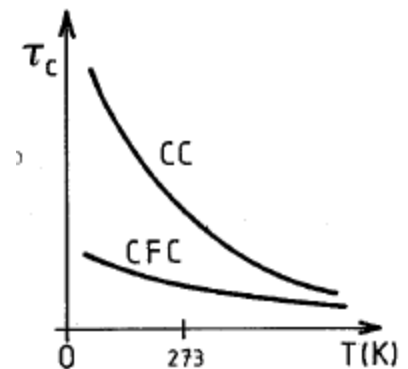
- Il comportamento meccanico dei metalli è legato al fenomeno dello scorrimento
- Un solido soggetto ad uno sforzo si deforma plasticamente
- La deformazione ha luogo sui sistemi di scorrimento, e provoca dei gradini di scorrimento
- L'effetto macroscopico è l'allungamento permanente del pezzo tirato!
- Lo scorrimento spiega perché la resistenza reale dei metalli è molto inferiore di quella teorica calcolabile in base all'energia del legame metallico
- Inoltre, lo scorrimento conferisce duttilità ai materiali metallici



Sforzo critico di taglio

- E' lo sforzo τ_c richiesto per provocare lo scorrimento di un metallo puro monocristallino
- Quando lo sforzo di taglio agente sul piano di scorrimento e nella direzione di scorrimento (tensione risolta) raggiunge il valore τ_c avviene lo scorrimento
- Lo sforzo critico di taglio è molto alto nei metalli CCC

Metallo	struttura	Sforzo critico di taglio (MPa)
Zn	EC	0.18
Mg	EC	0.77
Cd	EC	0.58
Ag	CFC	0.48
Cu	CFC	0.65
Fe	CCC	27.5
Mo	CCC	49.0



Numero di sistemi di scorrimento

- Nei metalli EC ci sono pochi sistemi di scorrimento (3) di conseguenza è difficile che il sistema di scorrimento sia orientato favorevolmente allo scorrimento. I metalli EC sono in genere piuttosto fragili
- Nei metalli CFC ci sono 12 sistemi di scorrimento, e quindi è molto più probabile che un sistema di scorrimento si trovi in posizione tale che gli angoli siano 45° . I metalli CFC sono piuttosto duttili
- Nei metalli CCC ci sono molti sistemi di scorrimento (ad energia di attivazione maggiore) questo conferisce ai metalli CCC buona resistenza meccanica ed anche buona duttilità

MECCANISMI DI RAFFORZAMENTO

Per rafforzamento si intende, nei materiali metallici, l'innalzamento del limite elastico. Questo implica quasi sempre l'intervento di un fenomeno che ostacola lo scorrimento delle dislocazioni; ciò si ottiene in generale mediante un aumento dei difetti della periodicità cristallina, ossia aumentando:

- i difetti puntiformi (vacanze reticolari)
- i difetti lineari (dislocazioni diversamente orientate)
- i difetti superficiali
(estensione dei giunti grano
o grani di una nuova fase, con formazione di precipitato)

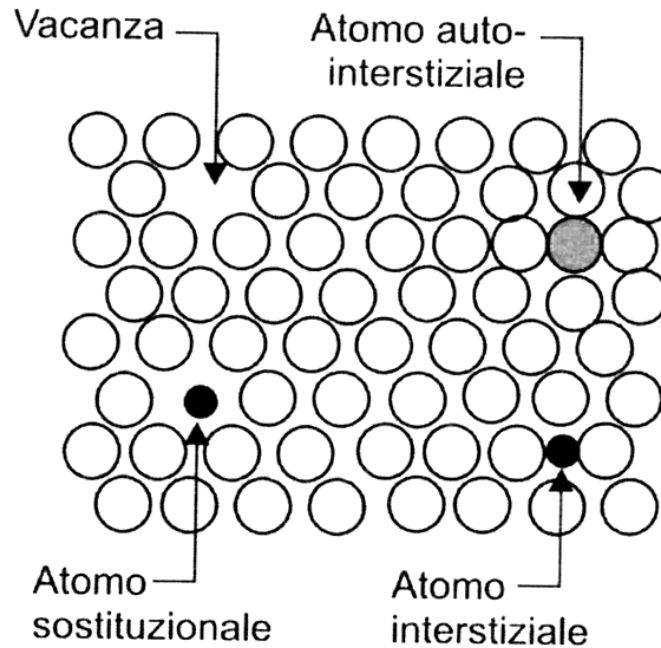
Meccanismi di rafforzamento

- Per migliorare le proprietà di resistenza dei materiali metallici si possono utilizzare uno, o più, dei seguenti meccanismi:
- **INCRUDIMENTO:** Si sottopone il metallo ad una lavorazione plastica a freddo, aumentando in tal modo la densità delle dislocazioni. In tal modo il moto delle dislocazioni incontra un maggiore numero di ostacoli.
- **AFFINAMENTO DEL GRANO** (mediante ricristallizzazione): I bordi grano costituiscono un forte ostacolo al moto delle dislocazioni. Al diminuire della dimensione media dei grani, aumenta la superficie dei bordi grano.
- **ALLIGAZIONE:** Si immette un soluto all'interno del metallo. Gli atomi introdotti deformano il reticolo del solvente, ostacolando il moto delle dislocazioni

DIFETTI PUNTUALI

- Questo tipo di difetto prevede o la mancanza di un atomo nel reticolo (vacanza),
- o la presenza di un atomo più piccolo in posizione interstiziale (interstiziale),
- o un atomo diverso che sostituisce un atomo proprio del reticolo (sostituzionali).

Il **difetto di punto** più semplice è la **vacanza**, costituito da un sito atomico dal quale è assente un atomo:



Analogamente può succedere che qualche atomo si collochi negli spazi tra gli atomi (interstizi) della struttura cristallina, generando in tal modo un difetto **interstiziale**

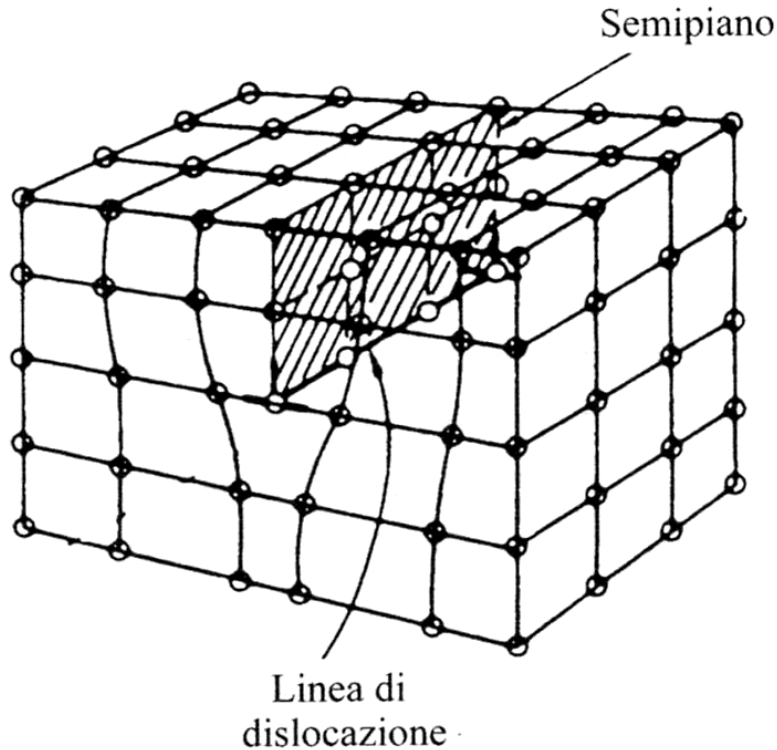
DIFETTI LINEARI: DISLOCAZIONI

- Si tratta di dislocazioni a spigolo o a vite: sono essenziali per la deformazione PLASTICA dei materiali
- In un metallo commerciale (es. Cu) sono presenti circa 10^8 dislocazioni ogni cm^3

Si formano nel materiale metallico durante la solidificazione e per una deformazione plastica

I **difetti di linea** sono rappresentati dalle **dislocazioni**.

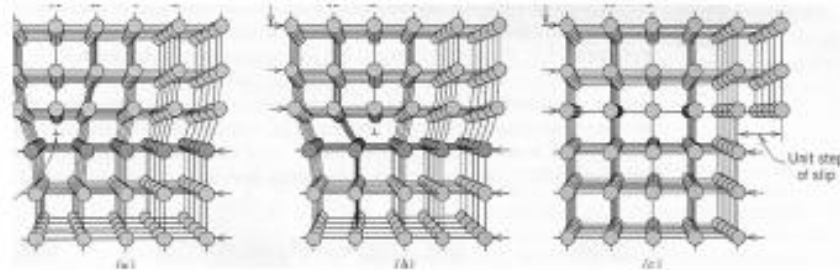
Esse sono dei difetti che causano distorsioni del reticolo concentrate attorno ad una linea e possono formarsi durante la solidificazione o in seguito ad una deformazione plastica.



In figura è schematizzato un esempio di **dislocazione a spigolo**: essa è rappresentata dalla linea sulla quale termina un semipiano atomico aggiuntivo all'interno del cristallo e viene indicata con il simbolo (\perp). Una **dislocazione a vite** è invece associata alla rotazione di una parte del reticolo rispetto al resto

Moto delle dislocazioni

- Produce deformazione plastica,
- Dipende dalla rottura sequenziale dei legami atomici



- Se le dislocazioni non si muovono, la defoemazione plastica non avviene!

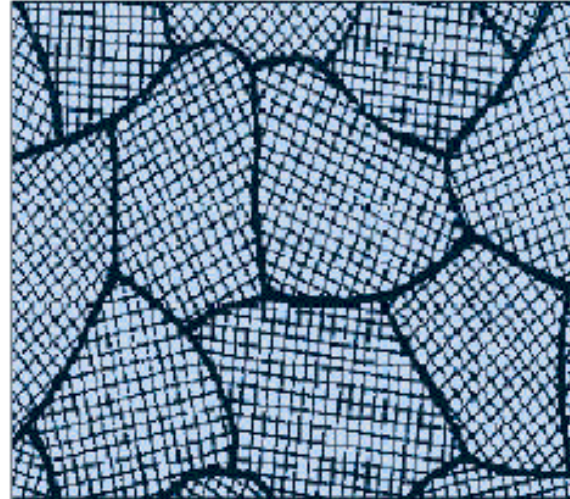


Monocristallo di Zn deformato plasticamente



Difetti superficiali

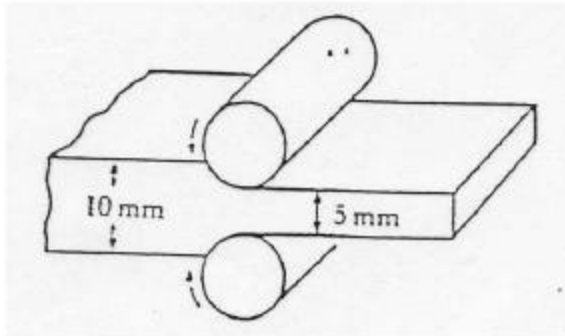
- ❑ I materiali policristallini presentano diverse imperfezioni nelle regioni tra i grani poichè i piani reticolari sono orientati in maniera diversa (materiale isotropo)
- ❑ Le zone di confine vengono dette bordi di grano
- ❑ Durante la solidificazione, i grani crescono simultaneamente e si incontrano tra loro, formando il bordo di grano all'interfaccia
- ❑ Per acciai di impiego industriale, la dimensione media dei grani è di 0.2mm (ogni grano ha ca. 10^{18} atomi)



BORDI DI GRANO

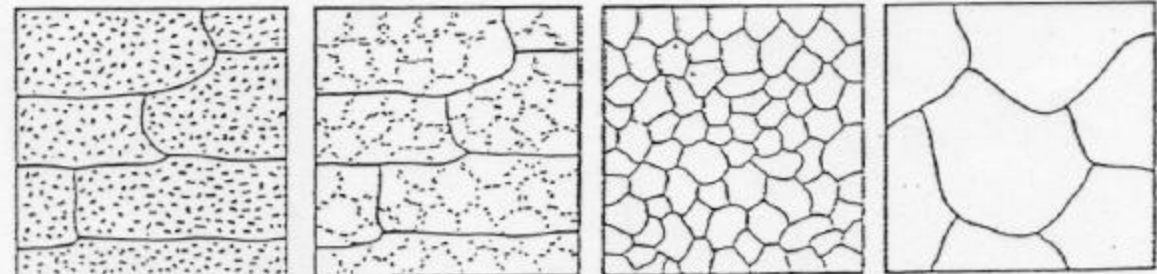
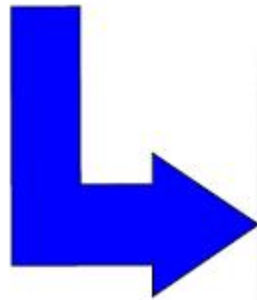
- I BDG sono ricchi di legami distorti, impurezze, dislocazioni, atomi con NC inferiore, ...
- sono zone ad elevata reattività'
- evidenziabili da opportune reazioni chimiche (attacco chimico)

Ricristallizzazione



Deformazione a freddo

Ricottura



(a)

(b)

(c)

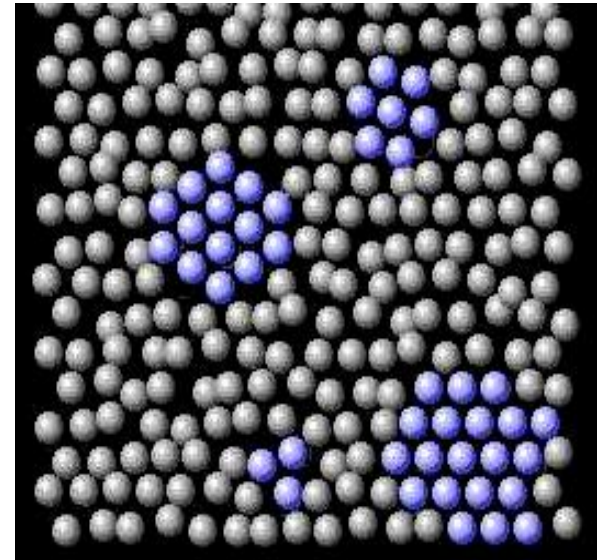
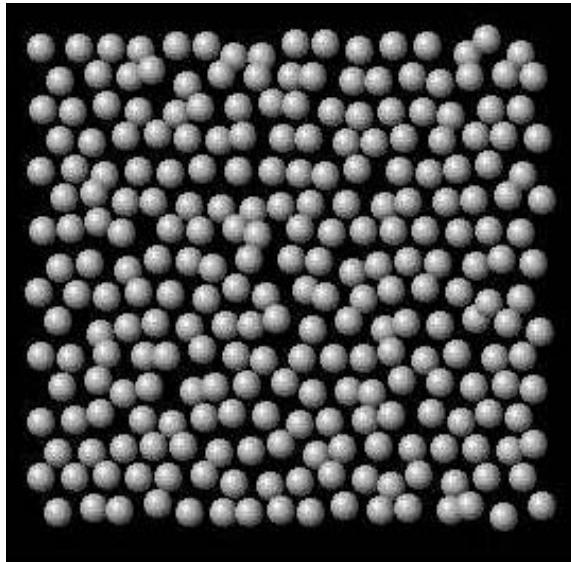
(d)

Effetto della temperatura di ricottura sulla microstruttura di un materiale incrudito. a) Incrudito: si nota la struttura allungata dei grani dopo la laminazione; b) dopo recovery; c) dopo ricristallizzazione; d) dopo ingrossamento del grano.

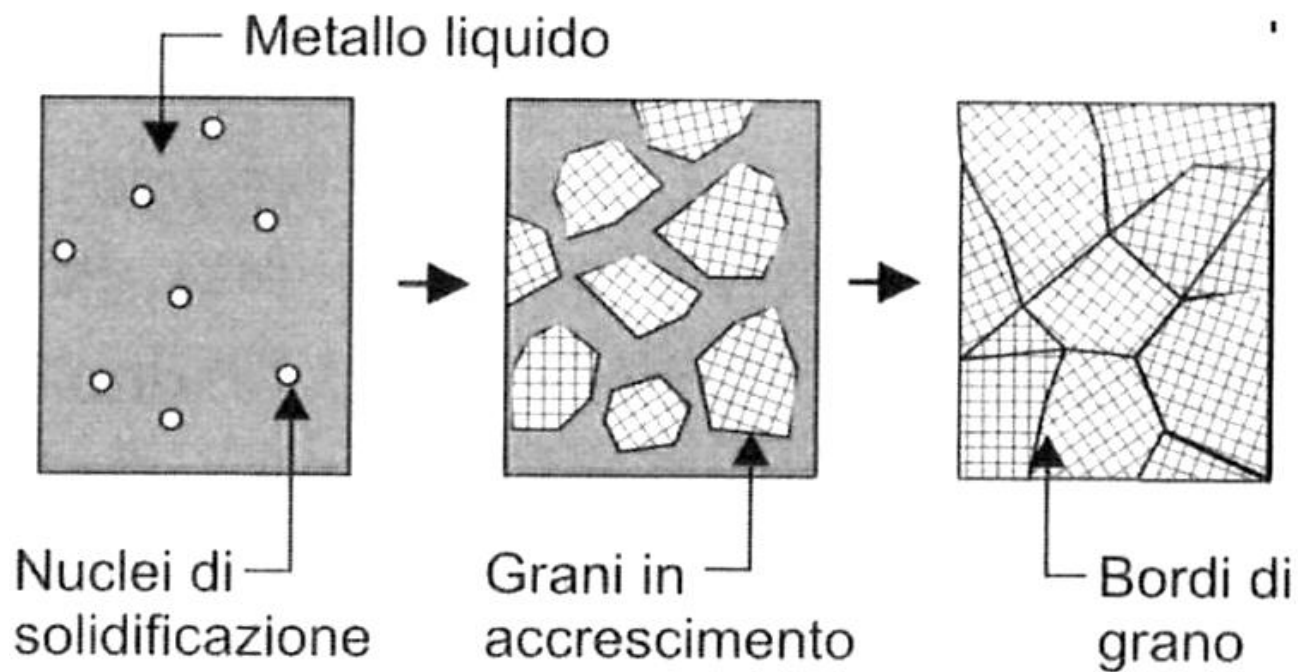
SOLIDIFICAZIONE

Quando un metallo liquido è raffreddato alla temperatura di fusione, T_m , alcuni atomi cominciano casualmente a disporsi in piccoli aggregati con struttura simile a quella cristallina.

Se la temperatura è mantenuta costante, si crea un equilibrio dinamico con continua formazione e successiva scomparsa di tali aggregati.



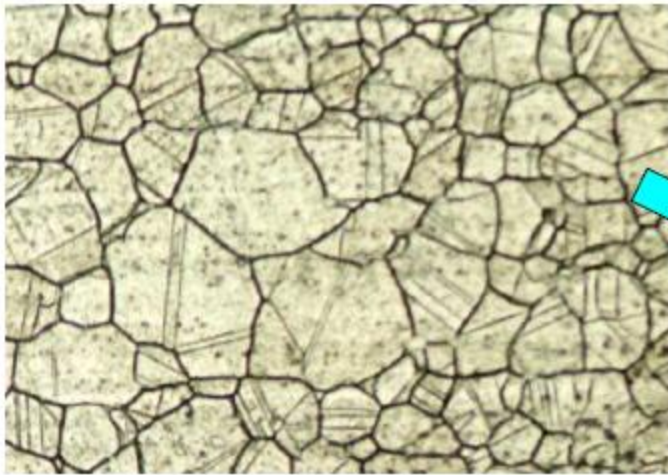
Una volta avvenuta la formazione di nuclei stabili, ciascuno di loro forma dei cristalli che si accrescono con orientamento diverso fra loro; al termine della solidificazione saranno presenti quindi diversi grani cristallini, separati dai “bordi di grano” già visti come difetti cristallini.



Tecnologie di deformazione a freddo

Microstruttura dei metalli lavorati a freddo

Durante la deformazione si produce una microstruttura fibrosa. Il comportamento del metallo diventa anisotropo per orientamento di certi piani cristallini di scorrimento preferenziale con la formazione di tessiture.



*Struttura dei grani **prima** della laminazione.*



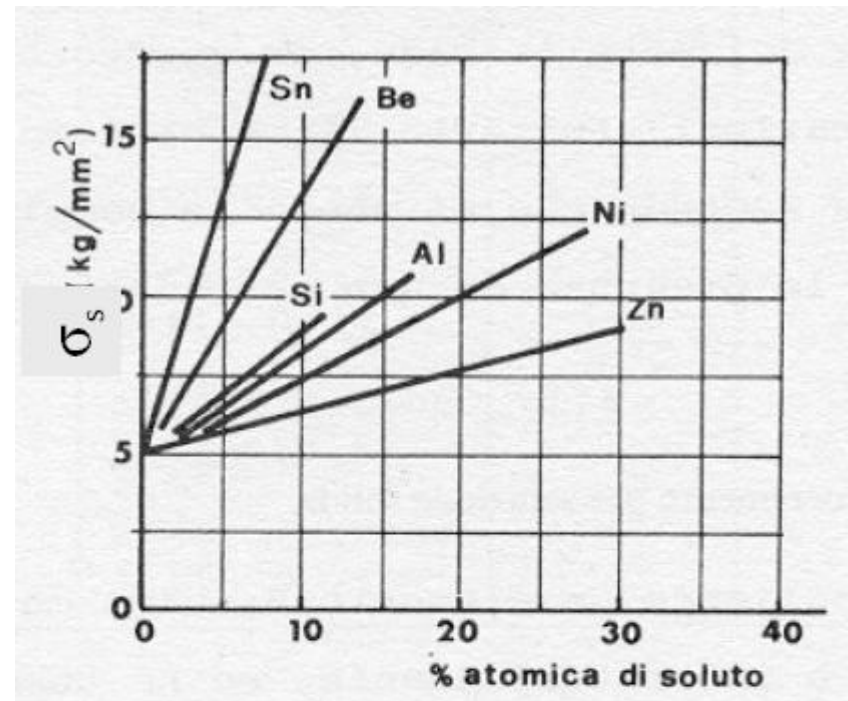
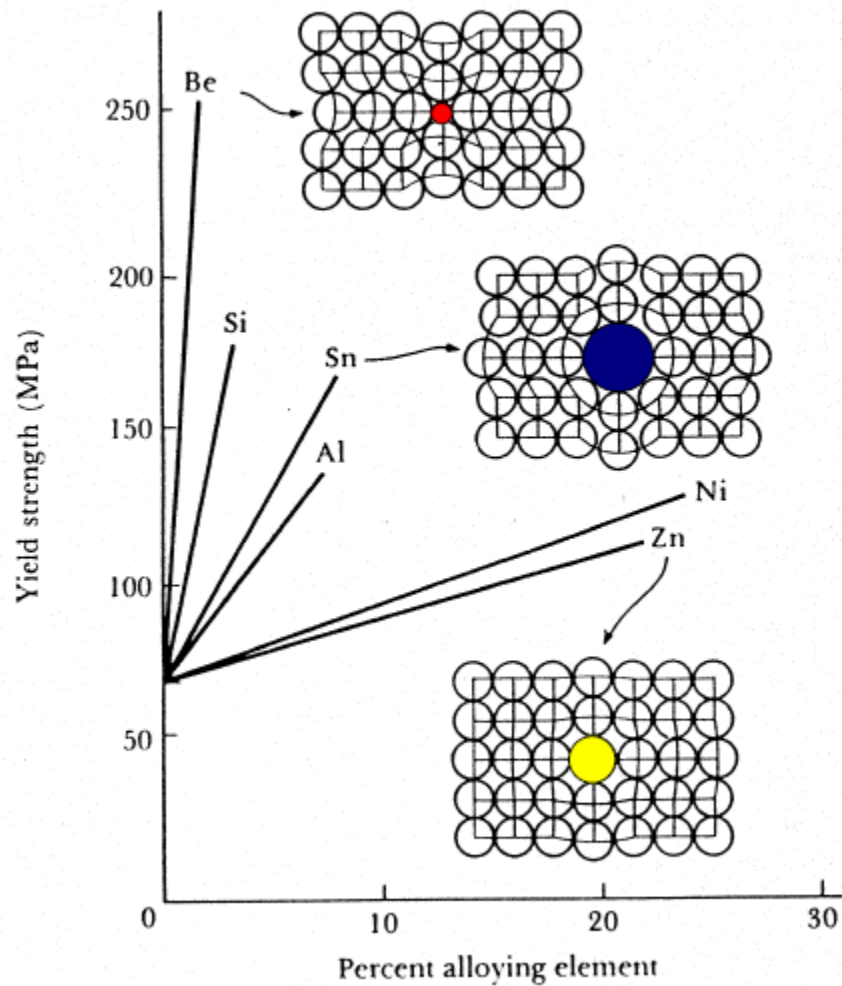
*Struttura dei grani **dopo** laminazione.*

RICRISTALLIZZAZIONE

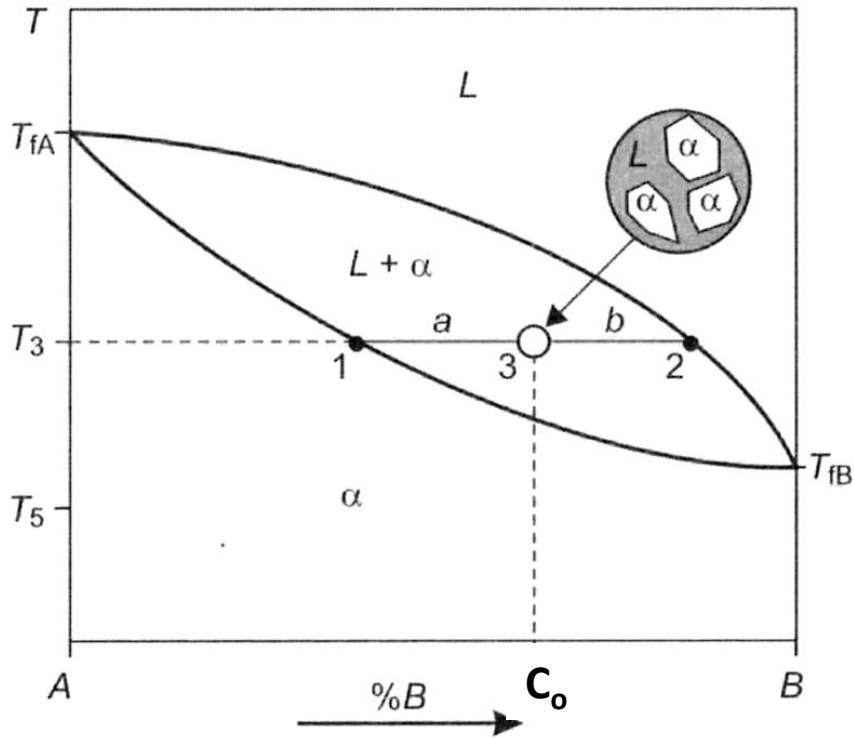
L'energia libera di un materiale deformato è maggiore di quella di un metallo ricotto di una quantità approssimativamente uguale all'energia di deformazione accumulata.

Il materiale deformato si trova in uno stato di equilibrio metastabile e cercherà di evolvere verso lo stato stabile riorganizzandosi, prima in una configurazione di minore energia ed in un secondo tempo riducendo, in diversi stadi, la densità di difetti per unità di volume.

Il processo a T ambiente è lentissimo per cui viene condotto ad una temperatura pari a circa 0,4 la temperatura assoluta di fusione del metallo.



Effetto di elementi in lega solubili sul limite di snervamento (all'1% di deformazione permanente) in rame policristallino a T ambiente.



I diagrammi di fase indicano non solo il tipo di fasi presenti ad una certa temperatura, ma anche le proporzioni relative. Ciò si ottiene dalla così detta

Regola della Leva

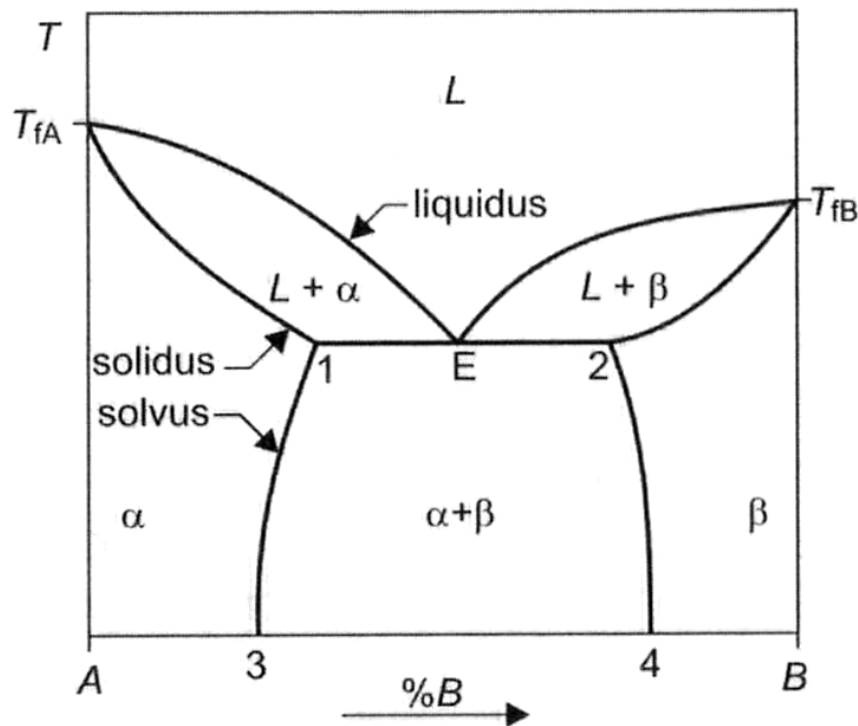
Facendo riferimento alla Fig., le composizioni del liquido (C_L) e del solido (C_α) in equilibrio sono date dai punti di intersezione dell'isoterma

per T con le linee del liquidus (2) e del solidus (1) .

Le quantità in peso delle due fasi sono proporzionali alla lunghezza dei segmenti **a** e **b**.

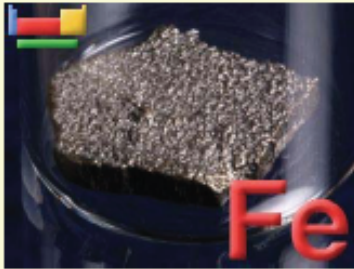
Tale relazione deriva da un bilancio di materia

Nella maggioranza dei casi gli elementi di una lega sono solo **parzialmente miscibili** allo stato solido (non sono rispettati tutti i requisiti di Hume-Rothery). In questo caso le curve di energia libera hanno forma complessa ed il corrispondente diagramma assume l'aspetto in Fig.

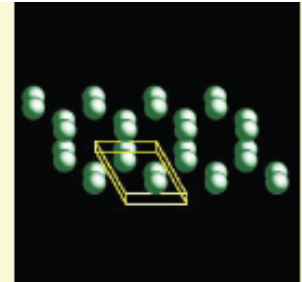


1. Esistono due soluzioni solide, α e β rispettivamente ricche in A e B e con lo stesso reticolo del solvente.
2. La solubilità B in A e di A in B varia secondo le linee 1-3 e 2-4 (solvus) ed è massima nei punti 1 e 2.
3. Il punto E (varianza zero) indica la trasformazione **Eutettica**, caratteristica di questi sistemi, a cui corrisponde una lega che fonde a temperatura più bassa dei due elementi base.

4. Nella zona compresa tra i punti 1, 2, 3 e 4, la lega è bifasica con α e β le fasi in equilibrio.



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:

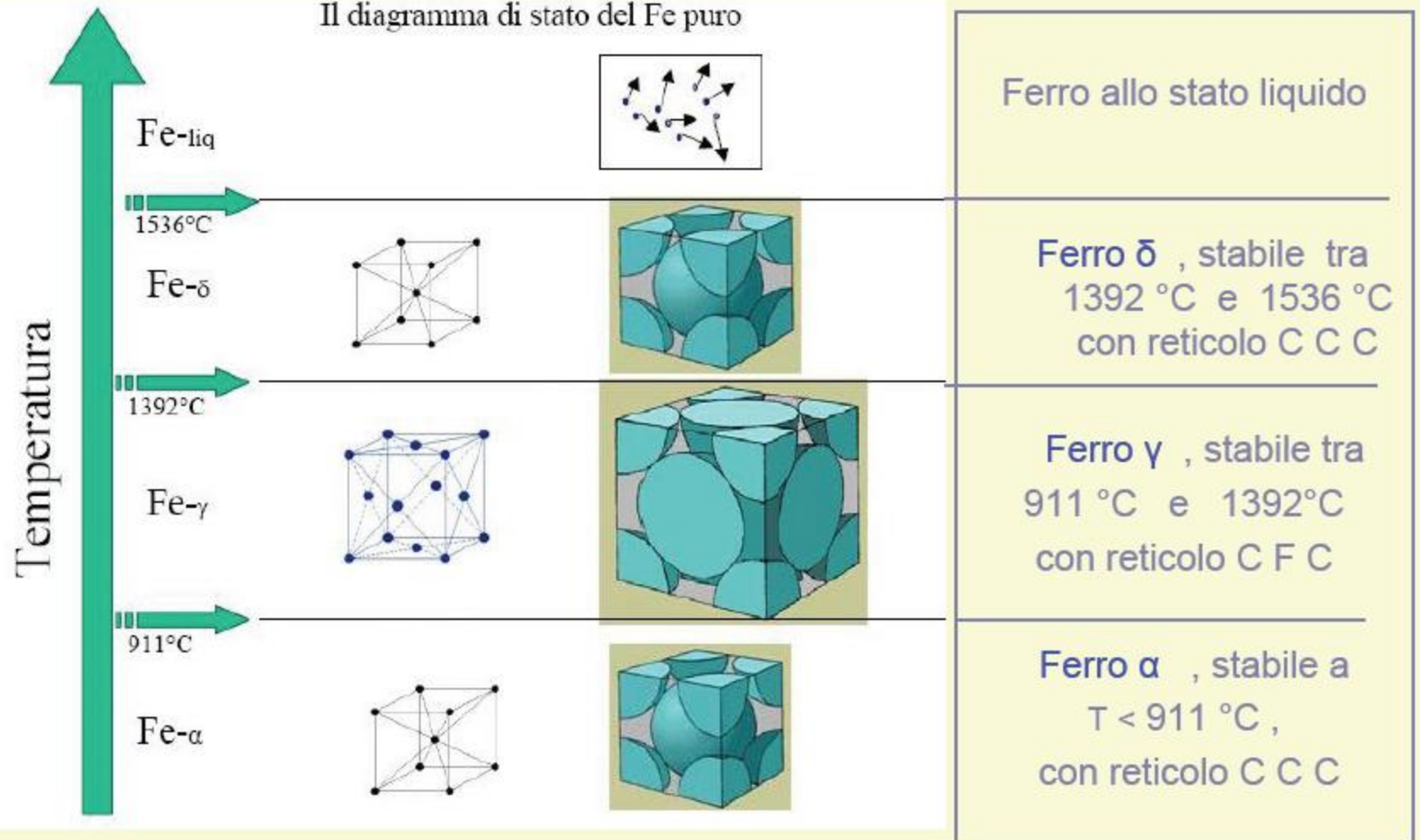
- ferro α , stabile a temperature inferiori a $769\text{ }^{\circ}\text{C}$, con reticolo C C C;
- ferro β , stabile tra $769\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $911\text{ }^{\circ}\text{C}$, con reticolo C C C
- ferro γ , stabile tra $911\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $1392\text{ }^{\circ}\text{C}$, con reticolo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

Il diagramma di stato del Fe puro



Leghe del Ferro

Convenzionalmente le leghe del ferro si distinguono in **acciai** e **ghise** in funzione del tenore di carbonio, rispettivamente minore o maggiore di 2.06%

La **Ghisa** è una lega **ferro-carbonio** contenente anche altri elementi, come silicio, manganese, zolfo, fosforo, in percentuali varie, caratterizzata da un tenore di carbonio compreso fra l'2,06% e il 6,67%. Le leghe ferro-carbonio contenenti una quantità di carbonio inferiore all'2,06% costituiscono i diversi tipi di acciaio.

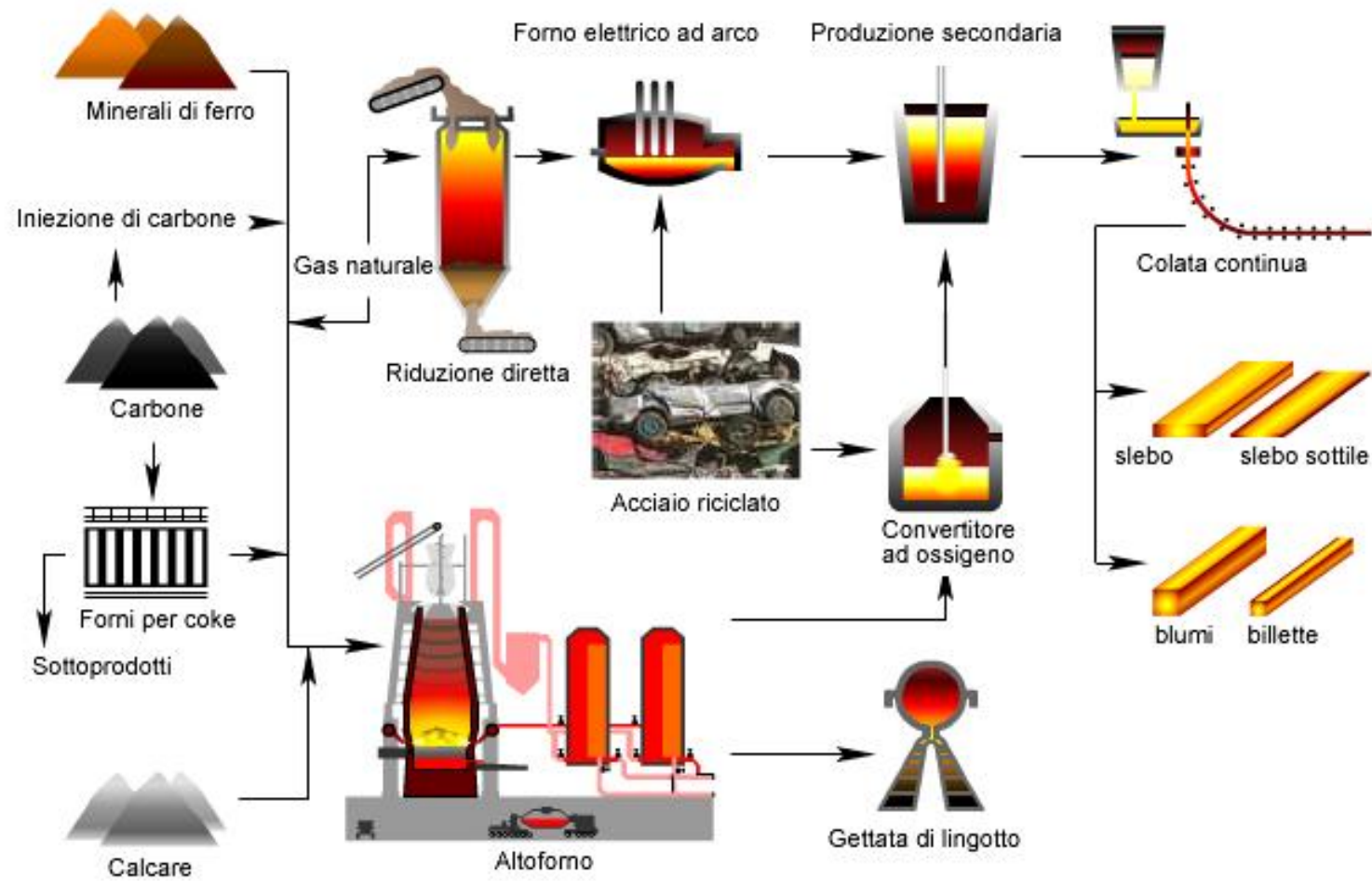


Illustrazione schematica del ciclo siderurgico

Le materie prime per la produzione dell'acciaio sono:

1. la ghisa greggia, proveniente dall'altoforno che viene affinata (riduzione della percentuale del carbonio e delle impurità) e che è la materia prima principale;
2. il rottame di ferro, derivato da recuperi civili e industriali
3. le ferroleghie, che sono leghe di ferro particolari, che non hanno impiego autonomo ma vengono appunto preparate per essere usate nella produzione di acciai e ghise speciali; contengono una percentuale di carbonio generalmente molto bassa (dallo 0,1% all'1%), con massiccia presenza (che può superare l'80%) di altri elementi come silicio, manganese, cromo, nichel, cobalto ecc... che vengono aggiunte agli acciai per migliorarne le caratteristiche.

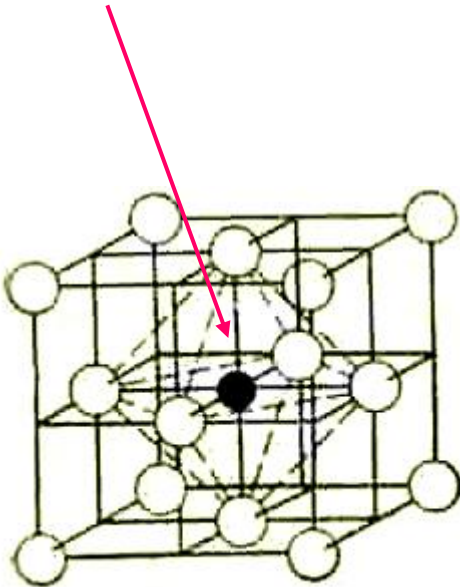
La differente solubilità, da 0,02 a 2,06 (cioè circa da 1 a 100) è dovuta alle differenti dimensioni dei vuoti interstiziali i cui diametri sono:

vuoto $\alpha = 0.72 \text{ \AA}$

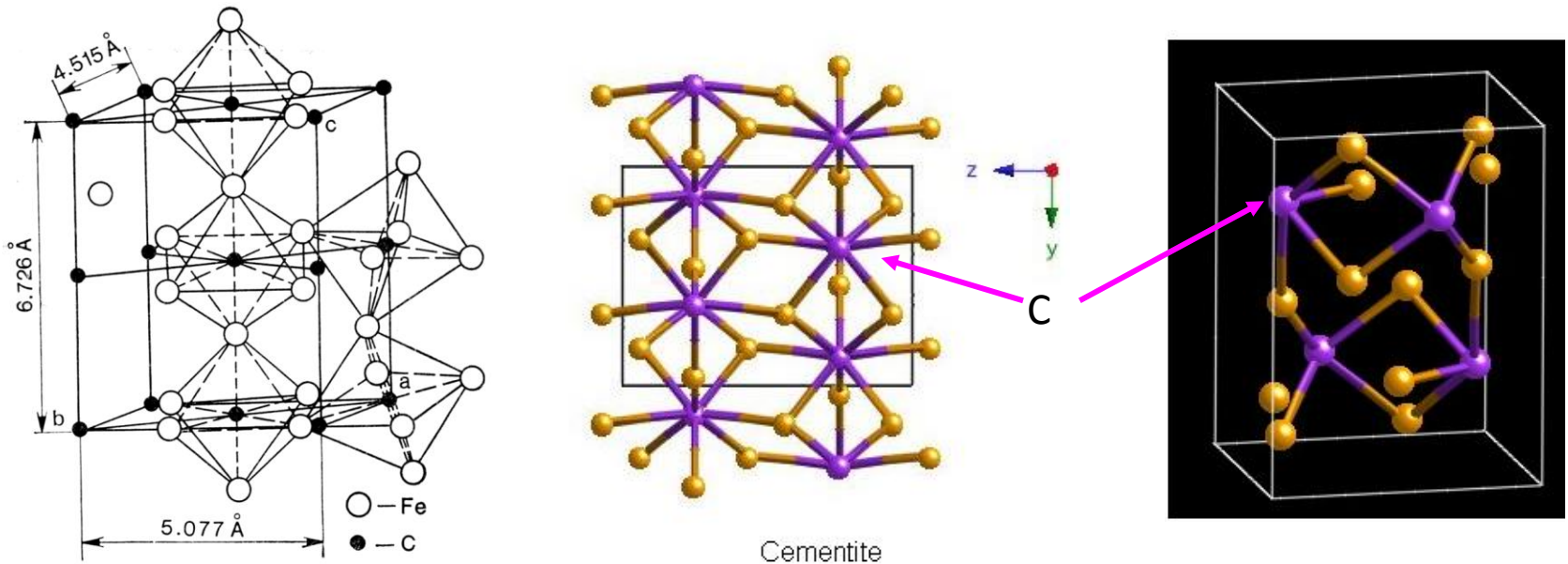
vuoto $\delta = 0.74 \text{ \AA}$

vuoto $\gamma = 1.06 \text{ \AA}$

Diametro atomo C = 1.54 \text{ \AA}



La **Cementite** è un composto intermetallico di formula Fe_3C , cioè un carburo di ferro, corrispondente alla composizione di 6,67% di C. Ha un **reticolo ortorombico** con 12 atomi di Fe e 4 atomi di C per cella.

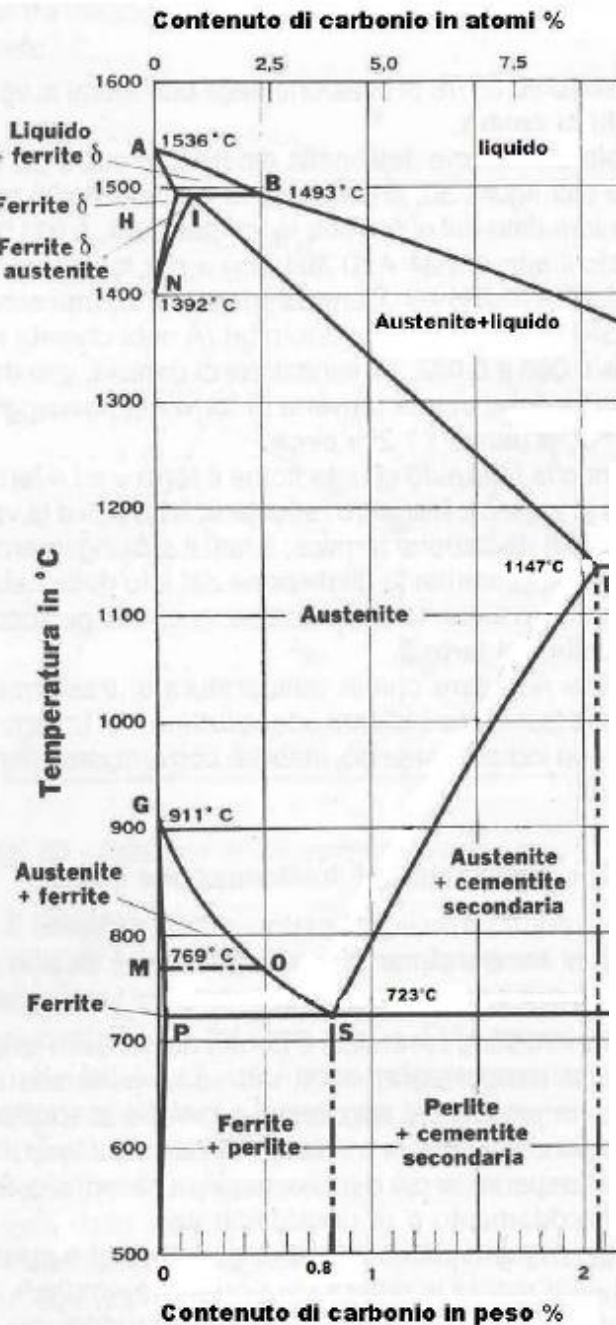


Ciascun atomo di C è circondato da **otto** di Fe, ciascuno dei quali è a sua volta collegato a **tre** atomi di C.

La complicata struttura cristallina conferisce alla cementite una durezza molto alta (graffia facilmente il vetro) ma riduce praticamente a zero la duttilità

Le fasi sono :

1. fase liquida (o liquido)
2. fase δ , γ , α o cristalli di Fe δ , γ , α
3. fase Fe_3C



I costituenti strutturali (fondamentali) sono :

Ferrite (o Ferrite α)

Soluzione solida del carbonio nel Fe α

Austenite

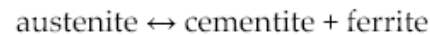
Soluzione solida del carbonio nel Fe γ

Cementite o (cementite secondaria)

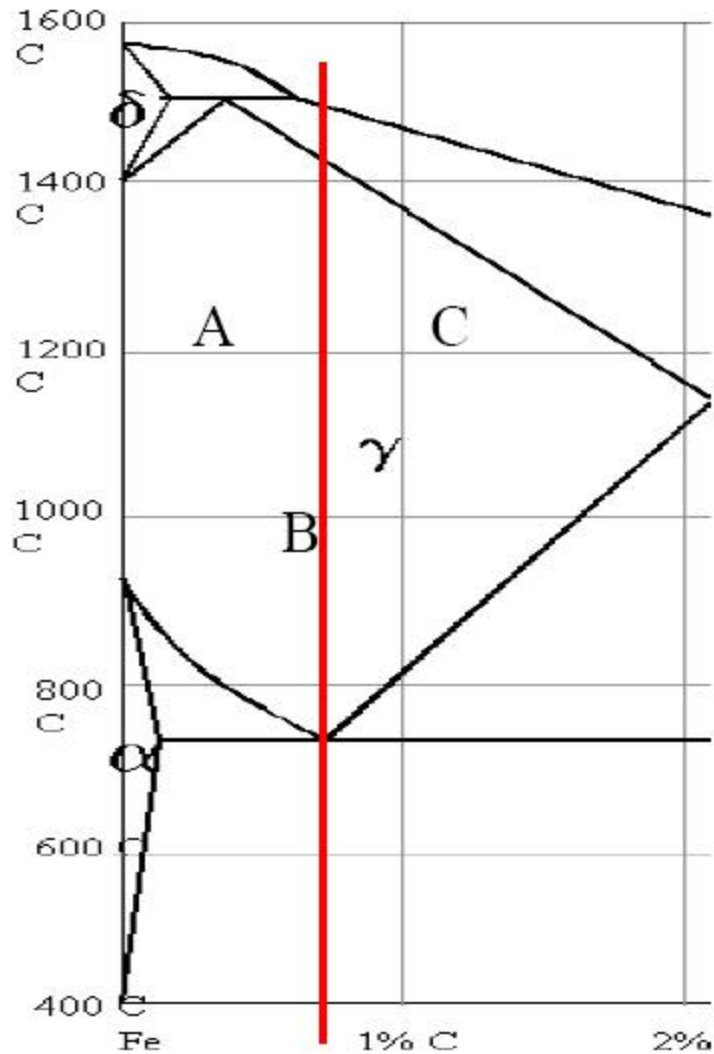
Carburo di ferro interstiziale di formula chimica Fe_3C , si forma per smiscelamento dall'austenite

Perlite

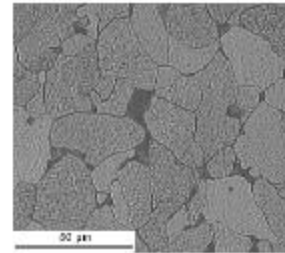
Formata da laminette alternate di ferrite (tenera e duttile) e cementite (dura e fragile). Si forma raffreddando con opportuna velocità l'acciaio oltre la temperatura eutettoidica (723 °C) attraverso la seguente reazione :



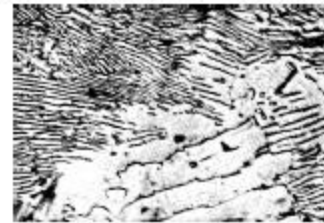
Tipologie di leghe



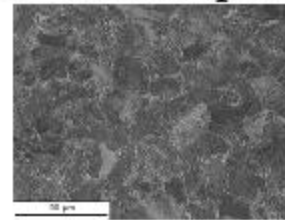
A – Acciai ipo-eutettoidici: $< 0.8\% \text{ C}$

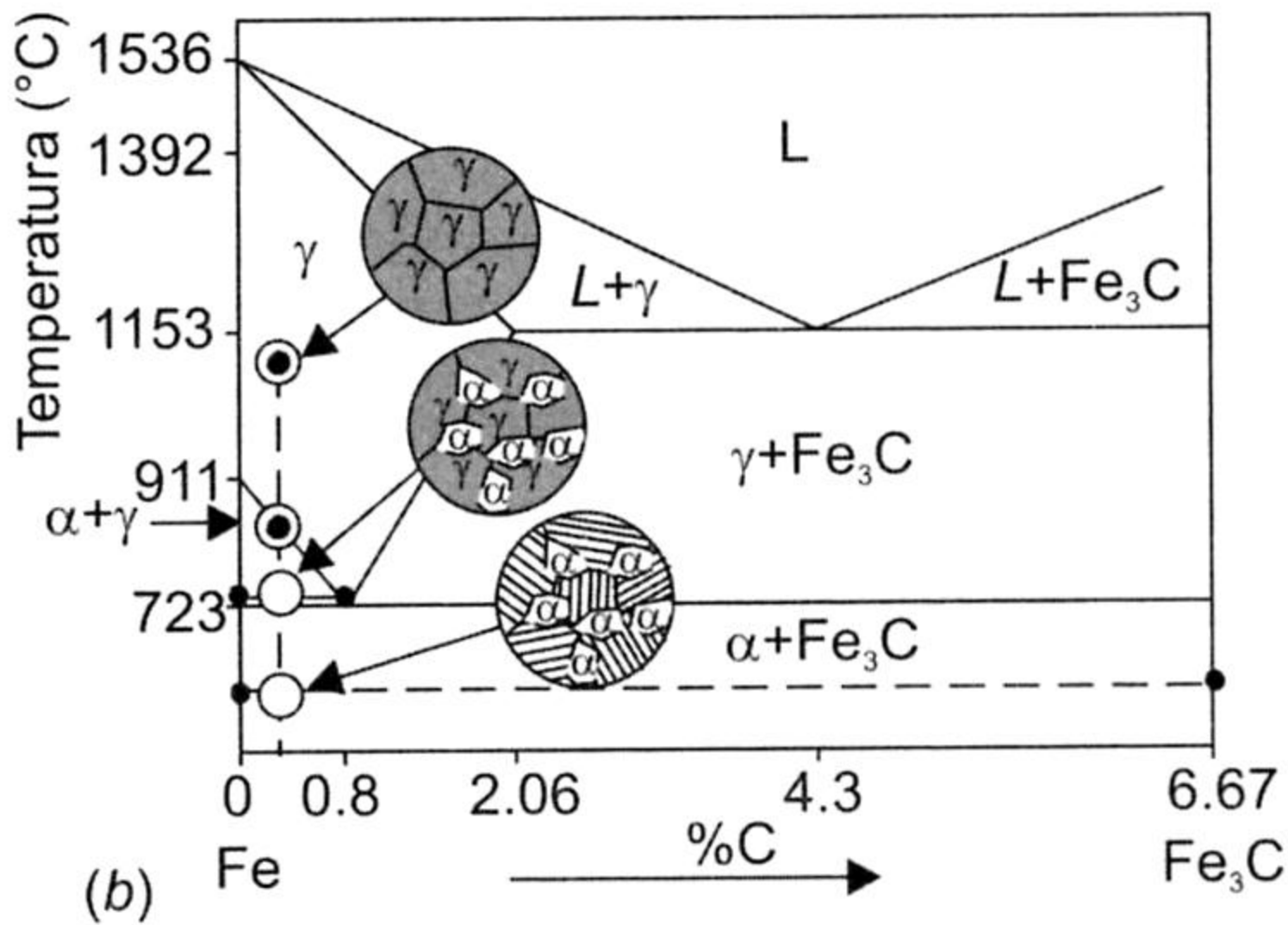


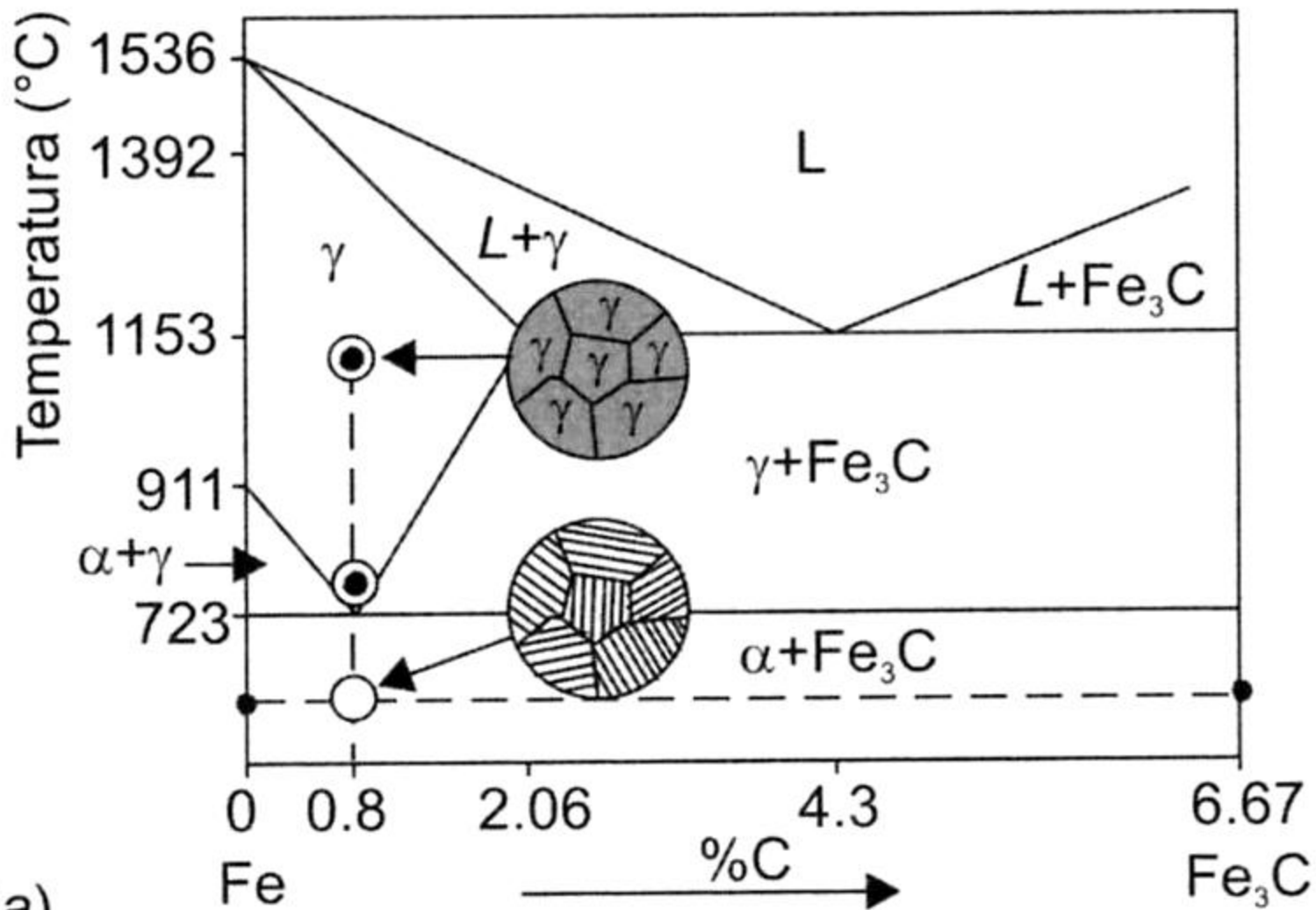
B - Acciai eutettoidici: $0.8\% \text{ C}$



C - Acciai iper-eutettoidici: $> 0.8\% \text{ C}$



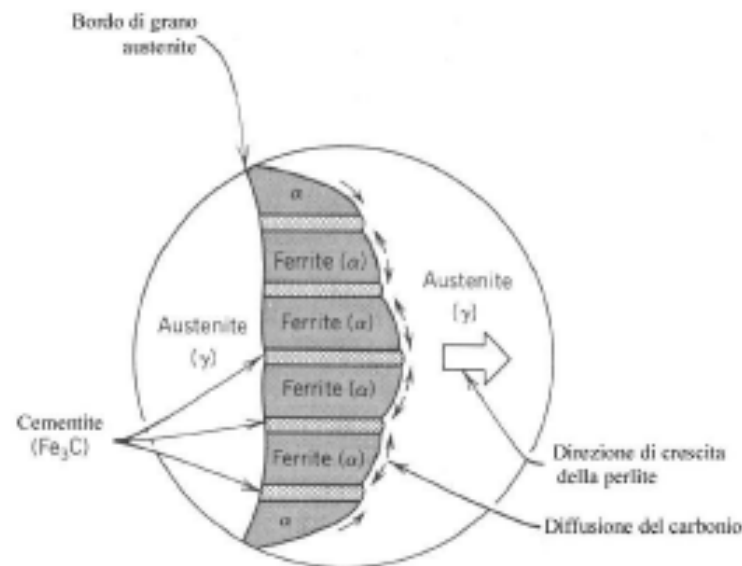




(a)

Microstrutture degli acciai al carbonio

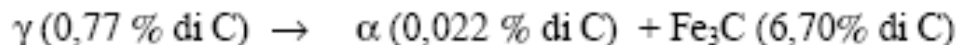
Le microstrutture e dunque le proprietà che gli acciai al carbonio mostrano a temperatura ambiente dipendono dal raffreddamento subito durante il processo di produzione. Guardando il diagramma di fasi si evince che durante il raffreddamento, trascurando la fase δ , il liquido forma l'austenite o fase γ . Questa per raffreddamento ulteriore si trasforma in ferrite (α) e cementite (Fe_3C). Questo mescolamento si produce grazie alla diffusione del carbonio secondo un meccanismo schematizzato nella figura a fianco.



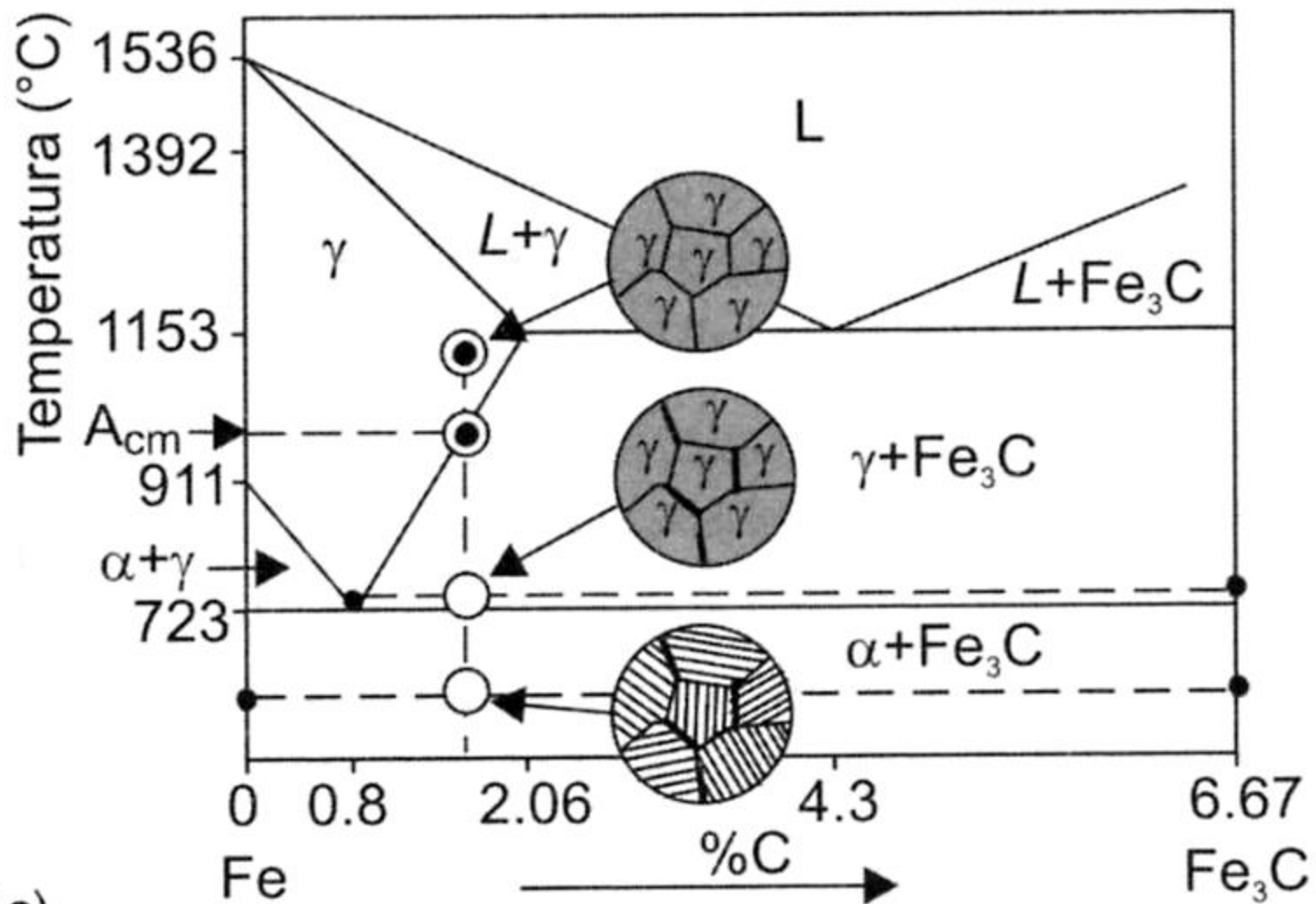
Rappresentazione schematica della formazione di perlite dall'austenite; le frecce indicano la direzione di diffusione del carbonio.

Quando il raffreddamento è sufficientemente lento i grani di cementite e ferrite si accrescono dando luogo ad una microstruttura lamellare (lamelle molto strette e lunghe a causa della diffusione a corto raggio degli atomi di carbonio) detta **perlite**, perché vista al microscopio fa pensare alla madreperla. La formazione di perlite presuppone il raffreddamento dell'austenite al di sotto della temperatura (727°C) di trasformazione

eutettoide.



Questo è ciò che esattamente avviene per una miscela di composizione nominale di $0,77\%$ in peso di carbonio. Essa sarà costituita da austenite di composizione $0,77\% \text{C}$ fino alla trasformazione. Subito dopo la trasformazione le composizioni di ferrite e cementite saranno rispettivamente $0,022$ e $6,70\% \text{C}$. Raffreddando ulteriormente si accrescerà, seppur di poco, la percentuale di cementite in quanto la solubilità del carbonio nella ferrite decrescerà fino all' $0,008\% \text{C}$ a temperatura ambiente, come si ricava dalla curva di solubilità sulla sinistra. Quindi la microstruttura che il sistema avrà acquisito appena al di sotto della temperatura eutettoide rimarrà praticamente inalterata per ulteriore raffreddamento lento fino alla temperatura ambiente.



(c)

Processi termici condotti sugli acciai al carbonio

- Rinvenimento: distensione delle tensioni residue dopo lavorazione a freddo, lascia la microstruttura deformata dalla lavorazione.
- Ricristallizzazione: si esegue su manufatti lavorati a freddo, raggiungendo temperature prossime a quella eutettoidica.
- Ricottura: si esegue su manufatti di cui si vuole modificare la microstruttura. La temperatura raggiunta dipende dal quantitativo di C. Scopo del trattamento è assicurare la scomparsa della ferrite e formare perlite grossa per raffreddamento lento (in forno).
- Normalizzazione: questo processo è più drastico in quanto la microstruttura del manufatto è annullata. Infatti il pezzo viene condotto ad una temperatura per la quale si formi solo austenite. Dopo l'austenizzazione segue il raffreddamento in aria che consente l'ottenimento di perlite fine.
- Tempra: raffreddamento veloce che induce la trasformazione a martensite (struttura tetragonale a corpo centrato) fase metastabile. La trasformazione è istantanea (velocità del suono) senza diffusione né accrescimento. Ossia produce gli aggiustamenti per ridurre le tensioni dovute al fatto che la soluzione γ -FCC risulta soprassatura di carbonio a temperature basse. La reazione di trasformazione martensitica avviene durante le tempre solo se il sottoraffreddamento è grande. Ossia bisogna raggiungere una temperatura detta T_{ms} , il cui valore dipende dal contenuto di carbonio nella lega.

Variando la velocità di raffreddamento di un acciaio, allontanandosi quindi dalle condizioni di raffreddamento infinitesimo dei diagrammi di stato, è possibile ottenere a temperatura ambiente costituenti strutturali fuori equilibrio come la bainite e la martensite.

Martensite

La martensite è una soluzione solida metastabile sovrassatura di carbonio nel Fe α , possiede elevata durezza e fragilità, di conseguenza deve sempre essere sottoposta ad un trattamento di rinvenimento (di distensione o di addolcimento) a temperature inferiori ad A_{c1} per aumentarne la tenacità, a scapito di una perdita di durezza. La martensite rinvenuta sopra i 550 ° C è detta **sorbite**, mentre quella rinvenuta sotto i 550 ° C è detta **martensite rinvenuta**.

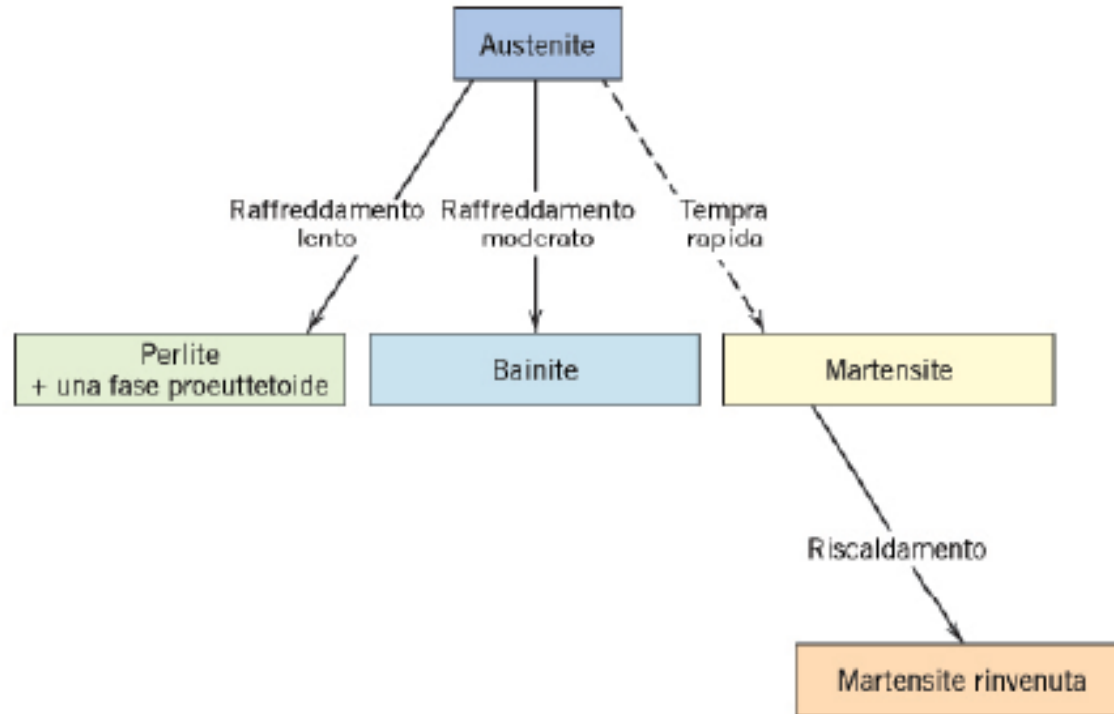
Bainite

La bainite è formata essenzialmente da ferrite e cementite. Può possedere un morfologia aciculare (**bainite superiore** ed **inferiore**), che la rende in generale resistente come la perlite ma più tenace, o granulare. La bainite può ottenersi sia nelle trasformazioni isotermitiche che in trasformazioni a raffreddamento continuo.

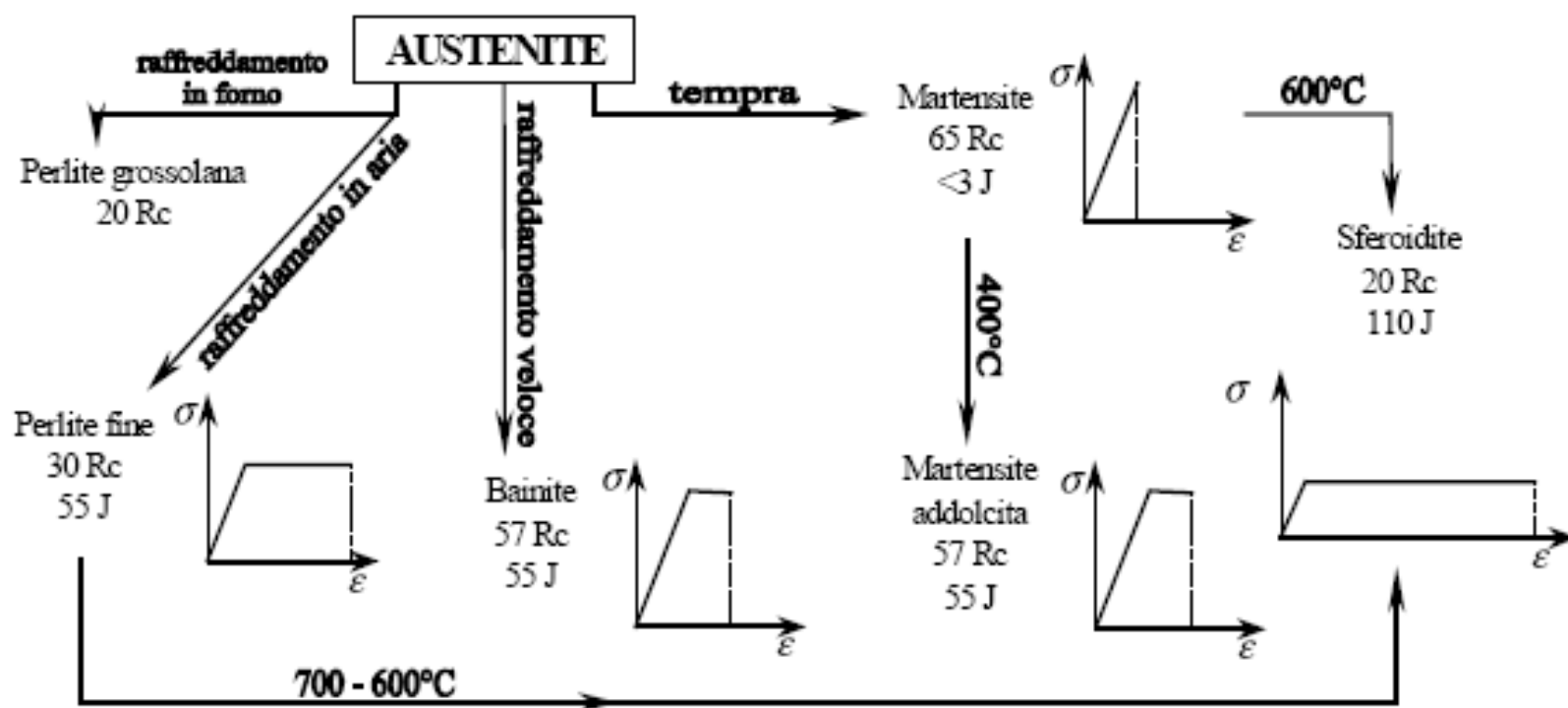
Riepilogo delle trasformazioni

Figura 10.36

Le trasformazioni possibili basate sulla decomposizione dell'austenite. Le frecce in tratto continuo riguardano le trasformazioni con diffusione, mentre le frecce tratteggiate le trasformazioni senza diffusione.



I trattamenti termici sugli acciai al carbonio e le microstrutture conseguenti con i relativi valori di durezza Rockwell (R_c) e tenacità possono essere così riassunti:



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.)

Tipi di acciai

A basso contenuto di carbonio (%C in peso < 0.25): questi acciai non formano martensite per trattamento termico, ma possono essere induriti per lavorazione meccanica. Sono costituiti da ferrite e perlite e quindi sono molto duttili e lavorabili (acciai ipoeutetoidici). La tipica applicazione include la produzione di scocche di automobili, tubazioni per basse pressioni e carpenteria in quanto possono essere facilmente saldati.

A medio contenuto di carbonio (%C in peso tra circa 0.25 e 0.70): queste leghe possono essere trattate termicamente per incrementare le proprietà meccaniche e generalmente sono utilizzate dopo tempra. L'utilizzo principale riguarda la costruzione di rotaie (acciai ipoeutetoidici).

Ad alto contenuto di carbonio (%C in peso tra circa 0.70 e 1.2): queste leghe sono le più dure e le meno duttili (acciai ipereutetoidici). Possono essere ulteriormente indurite per tempra. Le tipiche applicazioni sono come utensili per il taglio, lo scavo, i trafori.

Acciai basso legati ed alto legati: tutti gli acciai al carbonio possono essere legati con quantità più o meno consistenti di altri elementi tra cui V, W, Mo, Cr, che generalmente ne incrementano le proprietà meccaniche in quanto danno luogo a carburi molto resistenti. Essi variano anche la possibilità di trattamenti termici e la microstruttura conseguenti, cosicché si possono ottenere svariati tipi di acciai con combinazioni specifiche di resistenza, resistenza ad usura e tenacità.

Acciai inox: sono acciai che contengono almeno l'11% in peso di Cr. Infatti tale elemento forma, a causa della sua affinità con l'ossigeno, un ossido (Cr_2O_3 = cromia) molto protettivo. La formazione dello strato di cromia consente un'elevata resistenza alla corrosione acquosa a temperatura ambiente ed alla corrosione a secco fino a temperature di 700°C . Tale proprietà può essere incrementata con l'aggiunta di nichel (Ni). Il nichel forma preferenzialmente rispetto al cromo dei carburi e quindi la sua presenza evita che il cromo a sua volta ne formi a scapito di cromia protettiva. La presenza di Cr, Ni ed anche Mo altera in maniera significativa il diagramma delle fasi e quindi si possono ottenere acciai inox martensitici, ferritici o austenitici dipendentemente dalla fase prevalente. Anche in questo caso si possono ottenere acciai con svariate microstrutture che ne cambiano resistenza, tenacità e resistenza a corrosione rendendolo un materiale estremamente versatile.

Tipologie

Acciai speciali

Acciai binari (leghe di due soli elementi ferro e carbonio)

Acciai legati (o acciai speciali)

└─ Acciai ottenuti per aggiunta di altri elementi

└─ acciai ternari

└─ acciai quaternari

└─ acciai complessi

└─ acciai debolmente legati

ogni elemento in lega non supera il 5%

└─ acciai fortemente legati

almeno un elemento presente in lega supera il tenore del 5%

UNI EN 10027

Designazione alfanumerica. Si basa sulla suddivisione degli acciai in **due gruppi**.

Il primo in base all'impiego e alle caratteristiche meccaniche. La sigla inizia con una lettera indicate l'impiego seguita da numeri o lettere. A= Impieghi strutturali; P=opere in pressione; L=tubi e condutture; E=costruzioni meccaniche; B=barre per cls armato (segue il carico unitario di snervamento in MPa); Y=acciaio per precompressione; R=acciaio per rotaie; H=laminati a freddo. Ad es. B500 indica un acciaio per armature con snervamento caratteristico di 500 Mpa.

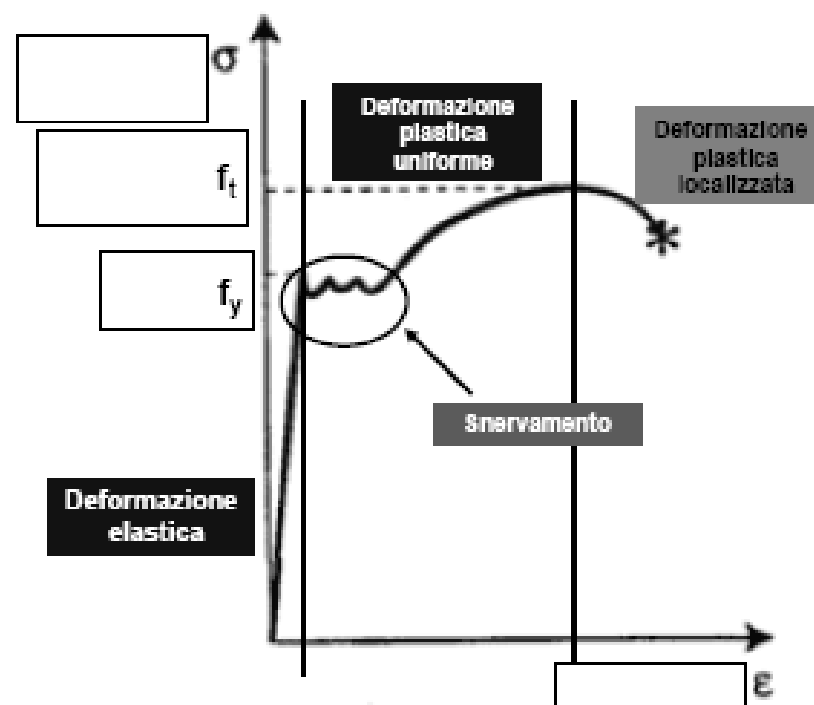
Nel secondo rientrano gli acciai designati in base alla composizione chimica. Vengono divisi in: a) C: acciai non legati con tenore di Mn<1% (es. GC acciai per getti) seguito da tenore di carbonio x 100; b) acciai non legati con tenore di Mn>1%, acciai legati con nessun elemento >5% designati allo stesso modo di UNI EU 27; c) acciai legati con un elemento >5% designati allo stesso modo di UNI EU 27; d) acciai rapidi designati con HS seguito da indicazioni sulla composizione.

La designazione numerica. Sequenza di numeri del tipo: 1.XXYY, 1 è attribuito agli acciai, da 2 a 9 altri materiali; XX il gruppo degli acciai (es. 00 acciai di base, 01 acciai per impieghi strutturali, 43 per acciai inossidabili con Ni>2.5% senza Mo, Nb, Ti, YY numero sequenziale per gli acciai dello stesso gruppo.

Acciai per CEMENTO ARMATO

Sono ammessi solo acciai saldabili qualificati e ottenuti attraverso 2 processi produttivi diversi:

- Laminazione a caldo
- Trafilatura a Freddo



Acciai per calcestruzzo (cls) armato

Norme europee: Eurocodice2. "Progettazione delle strutture in cls e CEB-FIP Model code 1990
In Italia è in vigore il **D.M. LL.PP. 9-1-1996** "Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione e il collaudo delle strutture in cls" che in parte recepisce Eurocodice2.

La norma **UNI EN 10080** è dedicata alle armature saldabili per il cls.

Per definire le proprietà meccaniche degli acciai per armature si utilizzano le seguenti grandezze:

f_t = tensione di rottura a trazione

f_s = tensione di snervamento (0.2%)

ϵ_p = deformazione totale corrispondente al carico max.

I valori caratteristici sono indicati con gli stessi simboli a cui viene aggiunto l'indice k.

Nazione	Denominazione	Norma	f_{yk} (MPa)	f_{tk} (MPa)	A%*
Francia	Fc E 500	AFNOR A35-016 1986	500	550	12
Germania	BST 500S	DIN 488 1984	500	550	10
Gran Bretagna	STR 460	BS 4449 1988	460	-	12
Italia	Fe B 44k	D.M. 9-1-1996	430	540	12
Spagna	AEH 500s	IRANOR UNE36 1981	600	660	8
Svizzera	162 S 500	SIA 162/I 1989	500	550	14

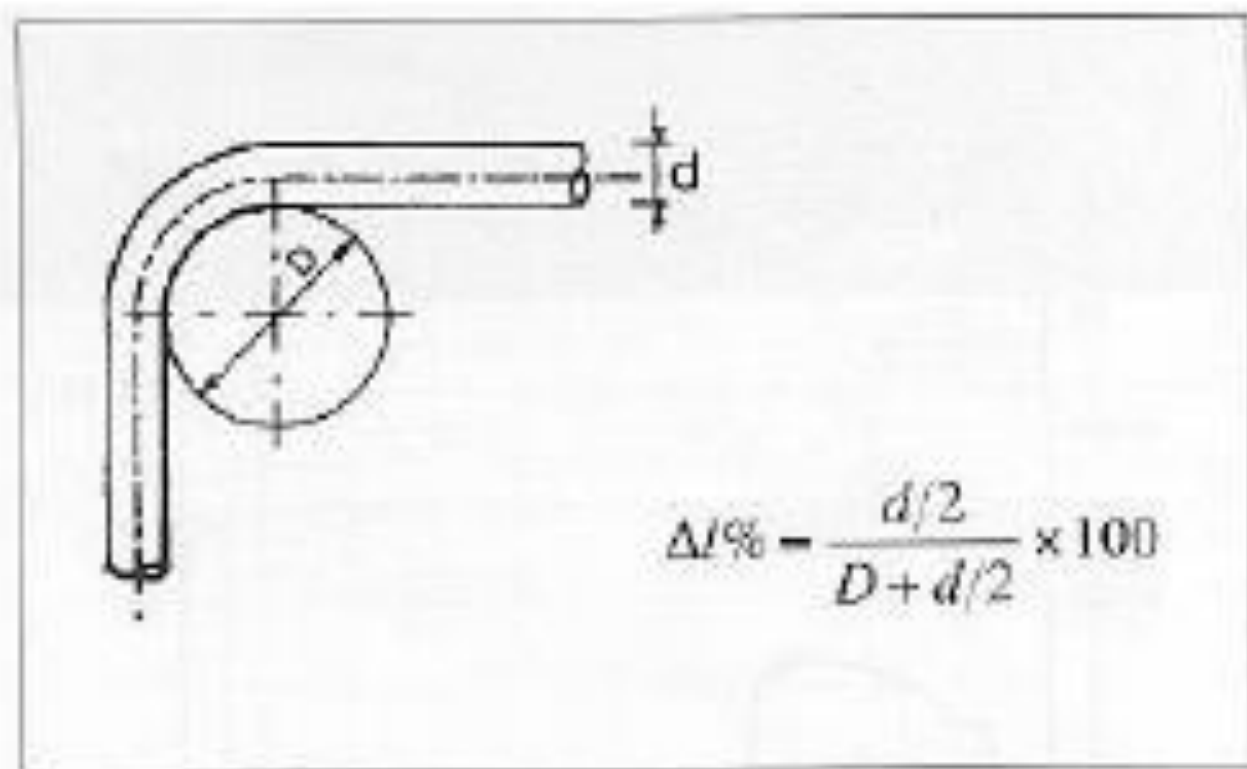
* calcolato con un tratto utile pari a 5 diametri (10 diametri per norma tedesca).

Confronto requisiti previsti da alcune normative nazionali europee per gli acciai da armature

Accertamento delle proprietà meccaniche

- La prova di piegatura a 90° si esegue a temperatura ambiente (circa 20°C) piegando la provetta a 90° . La si porta poi a 100°C circa per 30 minuti e successivamente al suo raffreddamento in aria si procede al raddrizzamento per almeno 20° . Al termine di quest'ultima operazione si verifica che sulla superficie laterale del provino non si siano formate cricche.

Prove di piega a 90°

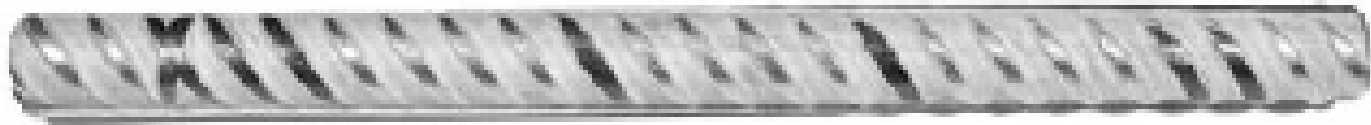


CONFRONTI

	Acciaio laminato a caldo	Acciaio trafilato a freddo
Nomenclatura	B450C	B450A
$f_{yk} \geq f_{y \text{ nom}}$	$\geq 450 \text{ MPa}$	$\geq 450 \text{ MPa}$
$f_{tk} \geq f_{t \text{ nom}}$	$\geq 540 \text{ MPa}$	$\geq 540 \text{ MPa}$
$(f_u/f_y)_k$	$1.15 \leq (f_u/f_y)_k \leq 1.35$	≥ 1.05
$(f_y/f_{y \text{ nom}})_k$	≤ 1.25	≤ 1.25
Allungamento a rottura (%)	maggiore o uguale al 7.5%	maggiore o uguale al 2.5%
Prova di piegatura a 90°	Esito positivo	Esito positivo

Caratteristiche dimensionali

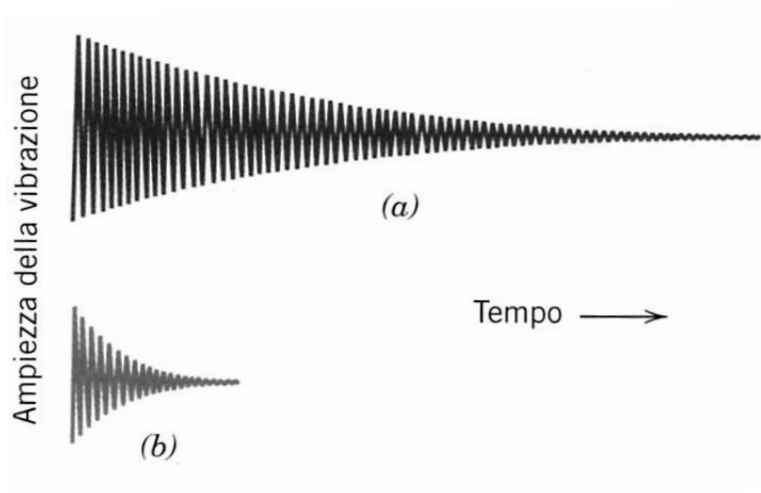
- Tutti gli acciai per cemento armato devono essere ad aderenza migliorata, cioè dotati di nervature trasversali sulla superficie laterale, distribuite su tutta la lunghezza. Queste nervature favoriscono l'aderenza fra acciaio e conglomerato cementizio.



GHISE

Le ghise differiscono dagli acciai per:

1. Più alto contenuto in Carbonio che, all'equilibrio, è sotto forma di grafite
2. Migliore colabilità
3. Maggiore economicità
4. Minore deformabilità plastica



5. Maggiore capacità di smorzamento delle vibrazioni.

In figura il confronto tra:

- a) Acciaio b) Ghisa

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 “

La presenza delle lamelle di grafite rende la ghisa fragile e praticamente senza deformazione plastica, soprattutto a trazione.

Si sono quindi trovati dei trattamenti per rendere gli aggregati di grafite di forma sferoidale

Tipo	Rottura MPa	Snervamento MPa	Allungamento %
Grigia	100	---	
Malleabile	350	--	4
Sferoidale o duttile	370	230	17
Acciaio base	320	200	12

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

Modalità di giunzione

Le saldature utilizzate per i collegamenti portanti e per l'assemblaggio sono:

- Saldatura di testa con preparazione del cianfrino
- Saldatura con giunti a sovrapposizione e a copri giunto
- Saldatura con giunti a croce

Parametri di saldatura

In funzione del tipo di giunto, dell'elettrodo, della resistenza da ottenere esistono parametri che influenzano la saldatura. I principali sono:

- N° di passate
- Diametro dell'elettrodo
- Classe dell'elettrodo
- Intensità di corrente e tensione
- Velocità filo

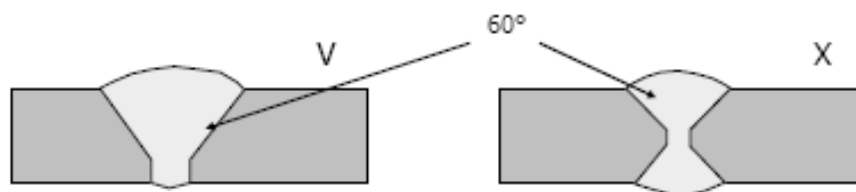
Saldatura di testa con preparazione del cianfrino

Richiede diametri ≥ 20 mm.

Gli estremi degli elementi da collegare devono essere essere "cianfrinati", ovvero tagliati a forma di scalpello.

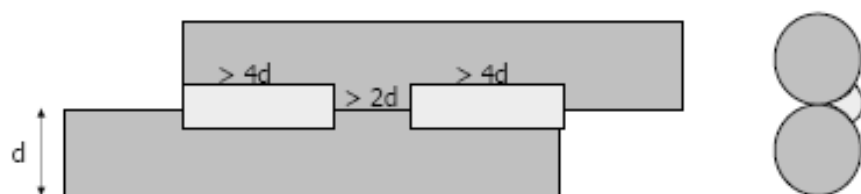
Il deposito del materiale d'apporto deve essere effettuato in più passate.

Viene realizzata secondo uno schema a V o a doppia V (detto anche ad X).



Saldatura con giunti per sovrapposizione

È la giunzione tipica delle strutture portanti. Ne esistono diverse varianti, tra le quali la più efficace risulta essere la tecnica a coprigiunto a rinforzi laterali.



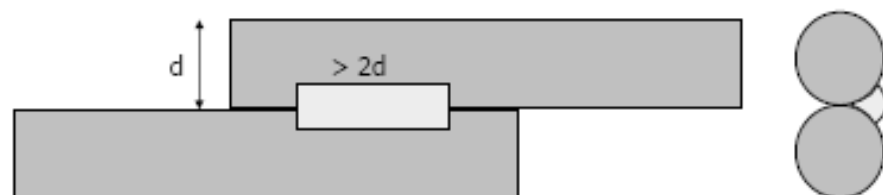
Saldatura con giunti a croce

Non richiede particolari operazioni preliminari e ciò la rende ampiamente utilizzata sia per le strutture portanti che per semplici assemblaggi. La saldatura è realizzata con un unico cordone e l'arco è innescato sulla barra non portante.



Saldatura con giunti per sovrapposizione

Schema caratteristico per le strutture assemblate, non portanti:

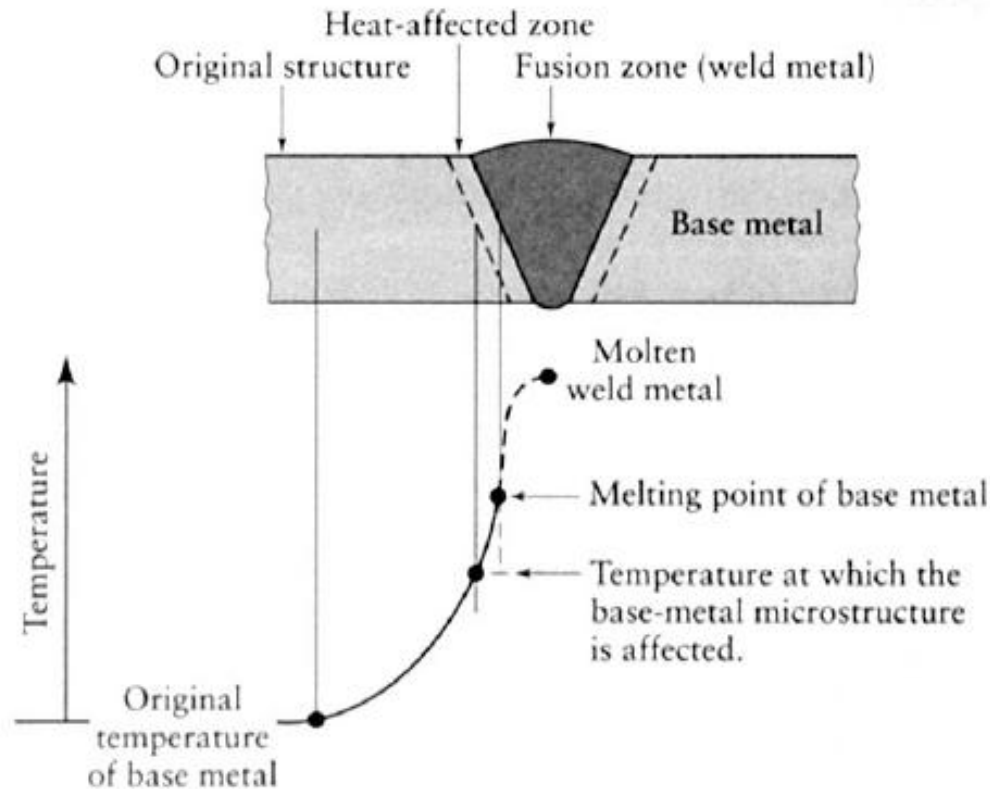


Il giunto saldato per fusione

- Caratteristiche del giunto:



1. La zona di completa fusione
2. La zona termicamente alterata
3. Il metallo base inalterato



La ZTA

Problemi derivanti dal surriscaldamento:

- Microstruttura ingrossata e formazione di strutture dure
- Diminuzione della resistenza a trazione
- Infragilimento e formazione di precipitati

Saldabilità

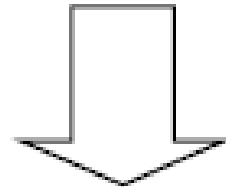
- Leghe alluminio: saldabili con apporto di calore elevato, non saldabili quelle con zinco o rame
- Ghise: generalmente saldabili
- leghe rame: come leghe Al
- piombo: facile da saldare
- leghe magnesio: saldabili con gas e fondenti protettivi
- Molibdeno: saldabile in condizioni controllate
- Leghe Ni: saldabili, vari processi
- Nb: saldabili in condizioni controllate
- Acciai inox: saldabili, vari processi
- Acciai galvanizzati: meno saldabili per la presenza dello Zn

Processo produttivo dell'acciaio

- Fonderia:
 - Metallo fuso
 - Solidificazione in stampi dei getti
 - Lavorazione di finitura superficiale del prodotto intermedio

Processo produttivo dell'acciaio

- **Solidificazione e successiva deformazione**
 - Deformazione del semilavorato a caldo o a freddo



Diverse proprietà meccaniche

Laminazione a caldo

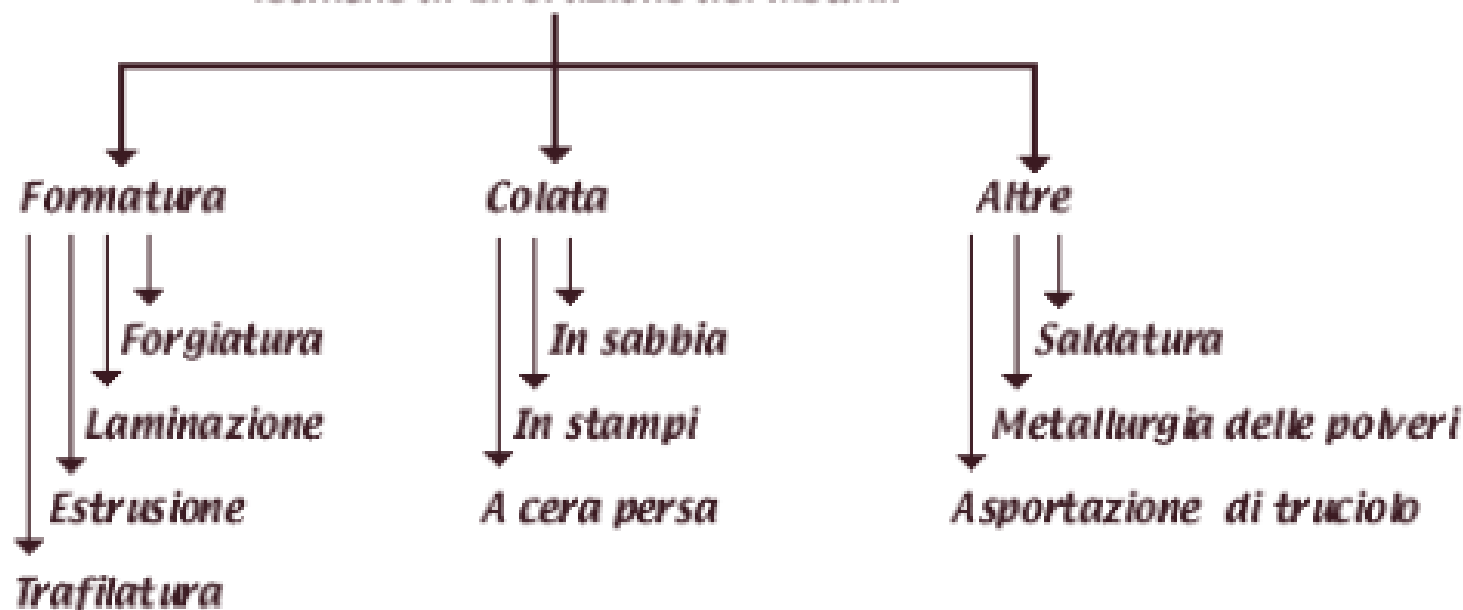
- Processo di deformazione plastica effettuato a circa 1200-1300 °C
- Necessario per cambiare forma al semilavorato derivante da lingotto o dalla laminazione continua
- Treno di laminazione composto da cilindri sagomati
- Ottenimento di numerose tipologie di prodotti per uso strutturale (tondo per ca)

LAVORAZIONE METALLI

Per lavorazione dei metalli si intendono tutte le tecniche tramite le quali un metallo viene trasformato nel pezzo della forma desiderata. Quando consideriamo l'applicabilità di un certo metallo o lega è importante considerare, non solo le proprietà intrinseche di tale materiale, ma anche la possibilità di produrre il pezzo finito nella forma desiderata e il costo di tale produzione. Uno schema delle varie tecniche di produzione è riportato in figura.

Schema di classificazione delle tecniche di lavorazione dei metalli.

Tecniche di lavorazione dei metalli



METALLI NON FERROSI

I metalli non ferrosi sono usati in misura molto minore rispetto all' acciaio. Il loro impiego cresce continuamente perche' offrono proprieta' diverse dagli acciai quali:

- facile ed economica formatura
- buona resistenza alla corrosione,
- alta conducibilita' termica ed elettrica,
- ridotto peso specifico.

Le proprietà meccaniche e, in alcuni casi, la saldabilità sono però inferiori.

Come per il ferro anche per i metalli non ferrosi esistono varie leghe che ne migliorano le caratteristiche.

Tra le leghe più pesanti degli acciai quelle di Cu e di Ni sono le più usate.

Tra le leghe più leggere utilizzabili come strutturali, le più importanti sono quelle di Al, Mg, Be e Ti.

LEGHE DEL RAME

Il rame e le sue leghe sono state utilizzate fin dall'antichità per la buona combinazione delle loro proprietà. Il rame viene ottenuto da vari minerali: solfuro (calcopirite), ossido (cuprite), carbonato (malachite). Durante l'arrostimento in aria i solfuri ed i carbonati si trasformano in ossidi che vengono poi mescolati con carbone e ridotti in forno a rame metallico (metallina). La metallina viene affinata (purificata) seguendo diversi procedimenti, dipendentemente dalla purezza desiderata. Per ottenere rame ultrapuro per cavi elettrici si procede per elettrolisi. Il rame ha una struttura FCC con una densità pari a 8.92 gr/cm³. È molto resistente alla corrosione anche in ambienti marini o industriali. Possiede una duttilità notevole, tale da renderne addirittura difficile la lavorazione all'utensile in forma non legata con altri elementi.

Le proprietà meccaniche del rame puro possono venir incrementate (durezza, resistenza a snervamento) tramite incrudimento per lavorazione a freddo. Tipicamente in un laminato si passa dai 69 MPa per la σ_s (snervamento) e 220 MPa per la σ_u (sforzo ultimo di rottura) per un ricotto a 310 e 345 MPa rispettivamente per un incrudito. Il rame viene indurito soprattutto per alligazione.

Circa la metà della produzione di rame viene impiegata per costruzioni civili ed una classificazione del rame e sue leghe secondo l'applicazione può venire esemplificata come segue:

- ✓ Laminati di Cu: coperture, rivestimenti esterni, grondaie, compluvi, serbatoi...
- ✓ Tubi di Cu: distribuzione acqua potabile, acqua calda, gas, scarichi, termoconvettori...
Importante in questo settore è l'elevata duttilità del rame che permette una facile posa in opera ed adattamento all'ambiente delle tubazioni da parte del montatore senza il bisogno di ricorrere a pezzi particolari quali curve, derivazioni.. con un notevole risparmio compensante il maggior costo del rame.
- ✓ Fili, corde, piattine in Cu: impianti elettrici, telefonici, illuminazione, motori elettrici, generatori...
- ✓ Ottone: valvole termiche, organi di controllo, rubinetteria, accessori...
- ✓ Tubo ottone: accessori da bagno, costruzioni navali.
- ✓ Laminati ottone: infissi, serramenti, elementi pavimento...
- ✓ Getti di ottone: maniglie, serrature.

LEGHE DI ALLUMINIO

Osservazioni generali sull' alluminio e le sue leghe.

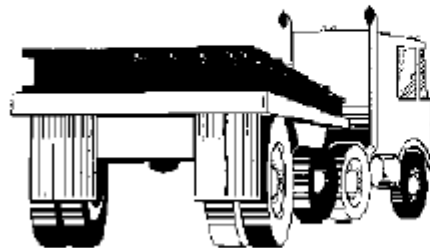
L' Alluminio e' il metallo piu' abbondante sulla crosta terrestre seguito a notevole distanza dal ferro. Ogni argilla ne contiene circa l' 8%, valore molto elevato, ma non disponibile come sorgente a buon mercato in quanto l' estrazione dell'alluminio richiede l'uso di una notevole quantita' di energia.

Per questo motivo la produzione e' economicamente conveniente solo se si puo' disporre di energia idroelettrica e/o nucleare a buon mercato.

Elementi di metallurgia delle leghe di alluminio

- la struttura cristallina e il legame che unisce atomi metallici allo stato solido;
- le proprietà metallurgiche di una soluzione solida e gli effetti indotti dal limite di solubilità;
- i fenomeni microstrutturali che spiegano i meccanismi di rafforzamento attivi nelle leghe ed il loro comportamento meccanico;
- l'evoluzione del processo di solidificazione di una lega, che spesso risulta decisivo nel determinarne le caratteristiche microstrutturali.

- L'alluminio ha densità bassa $2,7 \text{ g/cm}^3$, (la sua densità è un terzo di quella dell'acciaio).



A full load of steel, by weight.



An equal load of aluminum, by weight.

Tabella 1 • Principali caratteristiche fisiche dell'alluminio puro

Numero atomico	13
Massa atomica	26,9815 kg/kmol
Struttura cristallina	Cubica a facce centrate
Parametro reticolare	4,04 Å
Densità a 20 °C	2,70 kg/dm ³
Temperatura di fusione	659,9 °C
Temperatura di ebollizione	2.270 °C
Calore specifico	93,9 kJ/(kg K)
Calore latente di fusione	394,5 kJ/kg

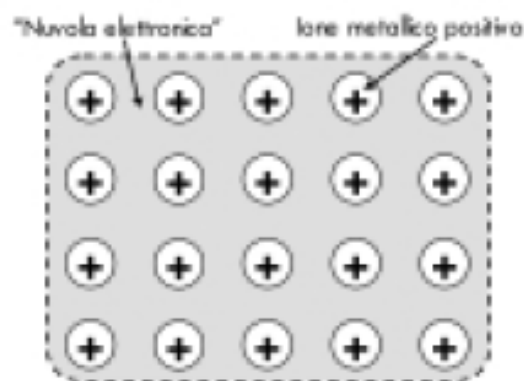


Figura 1 - Schematizzazione del legame metallico.

- La conducibilità elettrica è buona ($37,7 \text{ m}/\Omega \text{ mm}^2$)
È pari al 65% di quella del Cu a parità di volume
ma è il 200% in peso.
- La conducibilità termica è ottima (242 W/m K),
superata solo da Ag, Au e Cu ($\text{Fe}=79 \text{ W/m K}$)
- Il coefficiente di dilatazione, ($23 \times 10^{-6} /\text{K}$) due volte
quello del ferro, dà inconvenienti durante la
fusione e le saldature.

- La conducibilità elettrica è buona ($37,7 \text{ m}/\Omega \text{ mm}^2$)
È pari al 65% di quella del Cu a parità di volume
ma è il 200% in peso.
- La conducibilità termica è ottima (242 W/m K),
superata solo da Ag, Au e Cu ($\text{Fe}=79 \text{ W/m K}$)
- Il coefficiente di dilatazione, ($23 \times 10^{-6} /\text{K}$) due volte
quello del ferro, dà inconvenienti durante la
fusione e le saldature.

- Il punto di fusione e' di 660° C il che rende l'alluminio e ancora di piu' le sue leghe lavorabili per fusione.
- E' molto resistente alla corrosione dovuta ai normali agenti perché si ricopre di uno strato di ossido aderente e non poroso (protettivo). L' Al_2O_3 e' chimicamente stabile tra $\text{pH} = 4 - 8$
- L'elevata resistenza alla corrosione fa si che la sua riciclabilita' sia molto alta
- Non e' magnetico (sopporta elevati voltaggi ed e' ottimo quindi in elettronica)
- Il rapporto σ/ρ e' superiore a quello dell' acciaio.
- La durezza pero' e' bassa

NOMENCLATURA LEGHE ALLUMINIO

Attualmente esiste un grandissimo numero di leghe dell' alluminio destinate a migliorarne le proprietà meccaniche, a limitarne il coefficiente di dilatazione termica.

Nelle leghe però la conducibilità elettrica e la resistenza alla corrosione sono inferiori a quelle del metallo puro.

Le leghe dell'alluminio si suddividono in leghe da lavorazione plastica e leghe da fonderia.

Con il termine "*da fonderia*" si intendono le leghe particolarmente adatte alla realizzazione di getti e quindi ad essere colate allo stato liquido e a solidificare in una forma che riproduce l' oggetto da realizzare

Le leghe da "*lavorazione plastica*" rappresentano la frazione più importante delle leghe leggere sia in termini numerici che di applicazioni. Sono quelle il cui utilizzo avviene allo stato di semilavorati (estrusi, laminati etc.) ottenuti mediante processi di trasformazione plastica di prodotti primari denominati billette o placche.

- L' alluminio e le sue leghe non presentano fenomeni di fragilita' alle basse temperature; da cui ne consegue la piena idoneita' di questi materiali per applicazioni criogeniche (fino a -200 -250 °C)

- Una delle principali caratteristiche delle leghe di Al e' l'elevata resistenza alla corrosione (presenza di uno strato di Al₂O₃)

Il metallo e' tanto piu' resistente alla corrosione quanto piu' e' puro. Ogni alligante ha pero' un suo effetto particolare:

Fe, Si, Mn effetti ridotti e al massimo favoriscono deboli fenomeni di alterazione localizzata

Cu esercita un effetto negativo se e' l'alligante principale (serie 2000), comunque dipende molto dalle condizioni di invecchiamento.

Zn effetto molto negativo

Mg queste leghe presentano la migliore combinazione possibile tra resistenza alla corrosione e caratteristiche meccaniche, al punto che sono quelle usate in ambiente marino.

Lo stimolo per lo studio del **TITANIO** e delle sue leghe nei passati quarant'anni venne inizialmente dall'industria aerospaziale, in quanto nacque l'esigenza di avere un materiale con un buon rapporto resistenza peso specifico ad elevate temperature. L'alto punto di fusione del titanio (**1678 C**) prevedeva una buona resistenza allo scorrimento viscoso a temperature piu' elevate di quelle degli acciai.

Benche' le successive ricerche rivelassero che il campo di esercizio risultava piu' stretto del previsto, oggi il titanio occupa una posizione di fondamentale importanza in questo settore per la buona resistenza alla fatica, al creep e per la buona tenacita' alla frattura, infatti l'80 - 90% del suo utilizzo e' tutt'ora nell'industria aerospaziale.

L'alto costo e' principalmente il risultato della sua alta reattivita' ed affinita' per i componenti interstiziali come l'ossigeno, l'azoto, l'idrogeno ed il carbonio. Cio' nonostante questo metallo compete in molte aree con i piu' comuni materiali per le sue speciali proprieta'.

Inoltre il titanio e le sue leghe mostrano una notevole resistenza alla corrosione in generale e ai fluidi corporei in particolare, la quale e' superiore agli acciai inossidabili. Questo fattore insieme alla buona resistenza allo "stress corrosion", alle gia' citate proprieta' meccaniche e alla tolleranza accettabile da parte dei tessuti umani ne fa un leader dei biomateriali, tanto che viene usato per la realizzazione delle protesi ossee, placche, viti, valvole cardiache etc.



La resistenza del titanio all'acqua di mare e' paragonabile a quella del platino, la resistenza all'erosione e' anche altissima (acqua di mare ad alta velocita' e vapore in pressione), 20 volte quella delle leghe Cu-Ni.

Il titanio e le sue leghe sono quindi materiali ingegneristicamente nuovi e costosi, infatti nonostante il titanio sia il quarto metallo per abbondanza sulla crosta terrestre, l' estrazione del minerale e' stata messa a punto solo recentemente e la sua produzione e' ancora oggi complessa.

Proprieta'

Il titanio puro e' polimorfo esistendo in due modificazioni:

1. il titanio α , a reticolo esagonale compatto stabile fino a 882 C
2. il titanio β , cubico a corpo centrato stabile tra 882 C e la temperatura di fusione che e' di 1678 C.

Le proprieta' del titanio a temperatura ambiente sono notevoli

3. densita' = 4,51 g/cm³

4. $\sigma_y = 460$ MPa e $\sigma_T = 560$ MPa $\epsilon = 22\%$, HB = 200 -

220

5. se pero' viene laminato $\sigma_T = 800 \text{ MPa}$ e $\varepsilon = 8\%$

6. modulo di Young = **114 GPa**

7. non e' **magnetico**

8. Conducibilita' termica = 19 W/m C

9. Coefficiente di espansione termica = $8,4 \times 10^{-6} \text{ C}$

Dal punto di vista della resistenza alla corrosione il titanio ha un ottimo comportamento in molti ambienti paragonabile a quello di un acciaio inossidabile 18/8.

Quale elemento puro viene introdotto (1 - 3%) in leghe refrattarie austenitiche per palette di turbine (forma composti interstiziali e intermetallici che migliorano le caratteristiche di resistenza al creep.

Puo' essere laminato a freddo a temperatura ambiente e si ha una riduzione fino il 90% in spessore senza l'insorgere di cricche critiche.

La fortuna del titanio è dovuta alle sue straordinarie caratteristiche fisiche, meccaniche e di resistenza alla corrosione, ed alla facilità con cui lo si lavora e lo si mette in opera.

Questo metallo ha infatti elevato punto di fusione (1650 °C), bassa densità (4,5 g/cm³ contro 7,9 g/cm³ dell'acciaio), basso coefficiente di dilatazione termica (la metà di quello degli acciai inossidabili, pressappoco uguale a quello del vetro o del calcestruzzo). Non è magnetico. Ha un tempo di dimezzamento radioattivo molto ridotto, notevoli capacità di attenuare il rumore.

La sua resistenza meccanica è comparabile con quella dell'acciaio al carbonio, ma il rapporto resistenza meccanica/densità è molto più elevato. Se si considerano le sue leghe, in particolare quella più diffusa con vanadio (4%) e alluminio (6%), questo rapporto migliora ulteriormente. Anzi, nell'intervallo di temperatura compreso tra 200 e 500 °C, che è di grande interesse per l'industria aeronautica, i materiali a base di titanio sono nettamente superiori ai loro concorrenti. In aggiunta, il titanio è duttile e tenace, non infragilisce neppure a temperature molto basse, possiede un modulo elastico inferiore a quello dell'acciaio (1.300.000 MPa contro 2.000.000 MPa) e per alcune applicazioni anche questo può essere un vantaggio.