

# FONDAMENTI DI TECNOLOGIA DEI MATERIALI

**PATRIZIA CINELLI**

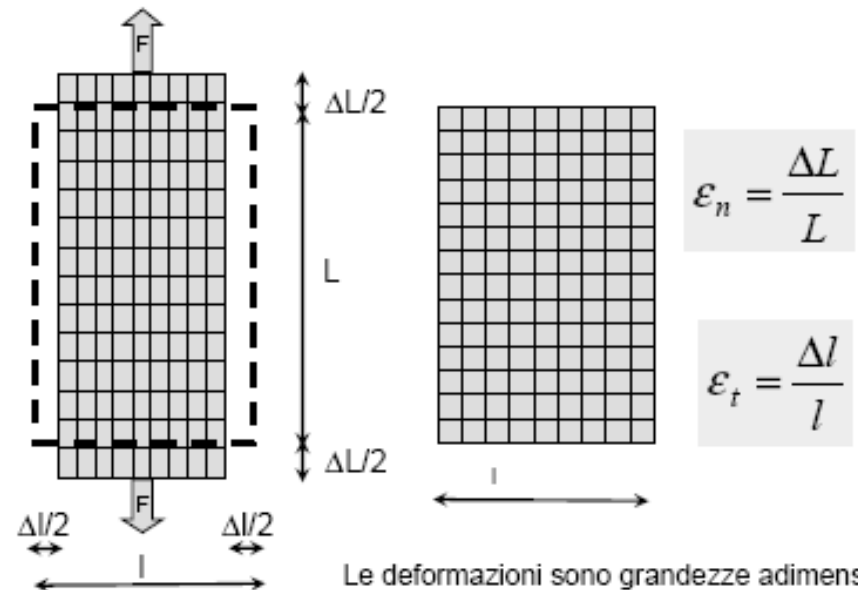
**LEZIONE III-IV**

# Prova di trazione

- È la prova principale per la caratterizzazione dell'acciaio
- Permette la determinazione dei parametri reali del materiale che devono verificare quelli utilizzati dal progettista della struttura (D.M. 14/09/2005)



## Definizione di deformazione



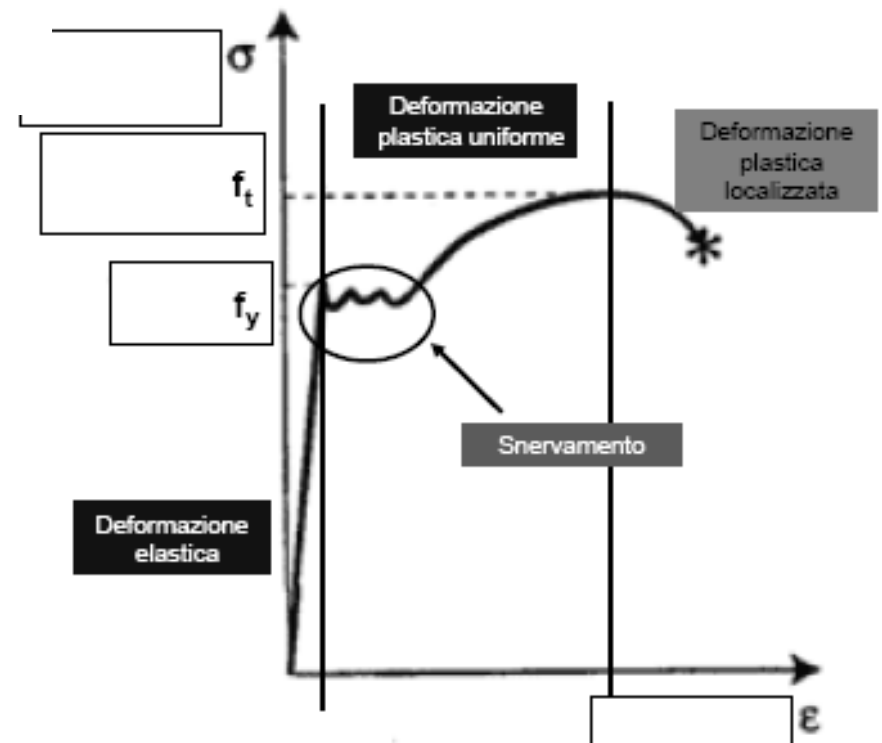
# Prova di trazione

- La prova è eseguita attraverso macchine idrauliche o elettromeccaniche nelle quali sono afferrate le due estremità di un provino metallico a sezione tonda o rettangolare. Durante la trazione il provino è sottoposto ad una deformazione crescente fino alla sua rottura. Sono registrati i valori del carico applicato e dell'allungamento del provino, da cui è possibile ricavare rispettivamente:
  - lo sforzo nominale, dividendo per l'area della sezione iniziale del provino (la sezione minima resistente)
  - la deformazione nominale, calcolata utilizzando la lunghezza iniziale del tratto utile del provino.

# Prova di trazione:

## Curva sforzo - deformazione

- Il comportamento dell'acciaio è di tipo elastoplastico o duttile
- Nel diagramma sono presenti 3 zone ben distinte:
  - Il primo tratto, con andamento lineare, individua il comportamento elastico del materiale.
  - Il secondo tratto è caratterizzato da una deviazione rispetto la proporzionalità diretta: è il campo di deformazione plastica uniforme del materiale metallico
  - Il terzo tratto rappresenta il campo di deformazione plastica localizzata, che prende il nome di strizione, al termine della quale si verifica la rottura duttile del provino



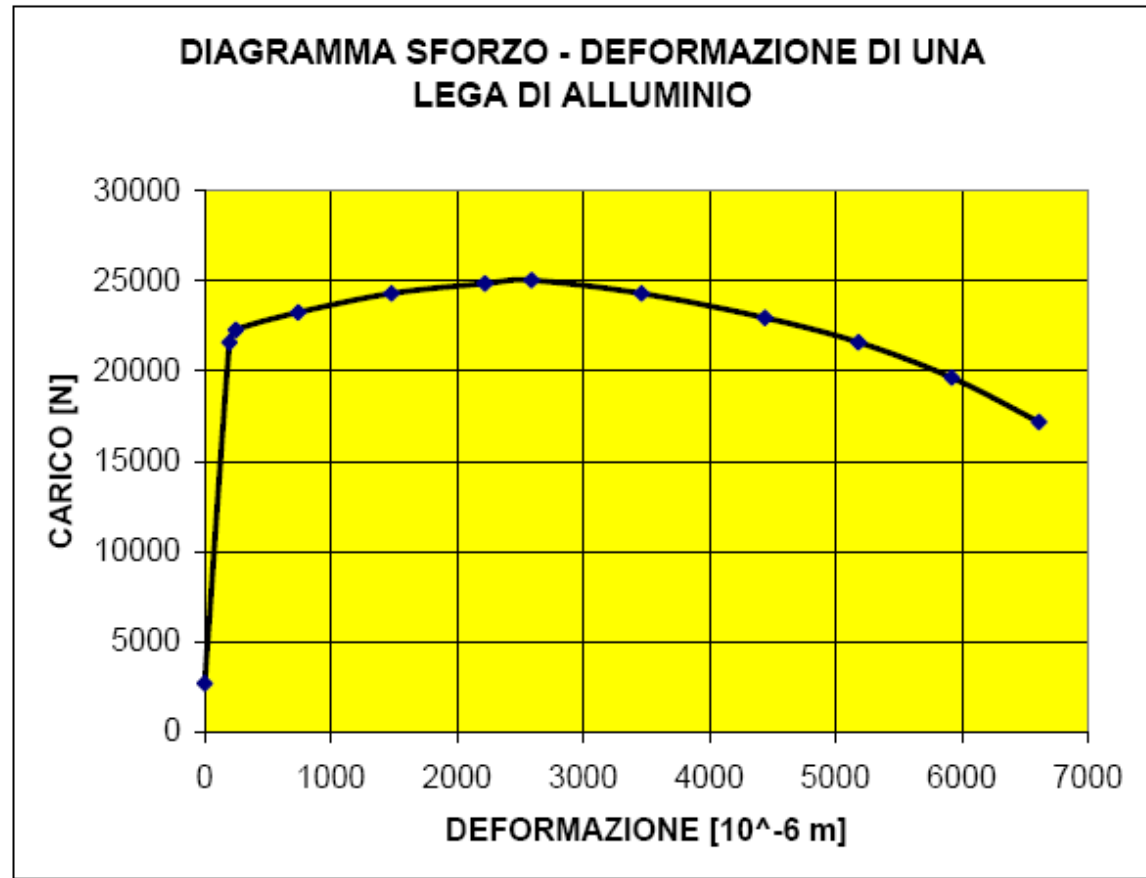
$$\frac{P}{A_0} = \sigma = \frac{E \cdot (\Delta l_e)}{l_0}$$

La prova di trazione che ci si appresta ad analizzare, è relativa ad un provino in lega di alluminio (Si 0,46; Fe 0,19; Cu<0,01; Mn<0,01; Mg 0,48; Cr<0,01; Ni<0,01; Zn<0,01; Ti 0,013), di sezione  $A_0 = 118,99 \text{ mm}^2$  e lunghezza  $l_0 = 50 \text{ mm}$ .

$$\frac{(\Delta l_e)}{l_0} = \varepsilon$$

Il diagramma sperimentale carico - deformazione

$\Delta l$ [ $\mu\text{m}$ ]	P [N]
0,0	2700
197,3	21600
246,7	22275
740,0	23250
1480,0	24300
2220,0	24850
2590,0	25036
3460,7	24300
4440,0	22950
5180,0	21600
5920,0	19636
6610,7	17182



- $P$  Carico
- $A_0$  Sezione iniziale del provino
- $E$  Modulo di Young
- $\Delta l_e$  Allungamento elastico
- $l_0$  Lunghezza iniziale del provino

**N.B.:** L'intersezione della retta del campo elastico con l'asse delle ordinate è un errore, ma ciò è dovuto dal tipo di estensimetro usato e dalle condizioni in cui si effettua la prova di laboratorio.

L'equazione:

$$\frac{P}{A_0} = \frac{E \cdot (\Delta l_e)}{l_0}$$

descrive il campo elastico di un provino sottoposto a trazione.

Grazie alla formula [1.1] si ottengono per il campo elastico i seguenti valori:

P[N]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta l$ [ $\mu$ m]	$e = \Delta l_e / l_0$
2700	22,69	15,76	0,000315
5400	45,38	31,52	0,000630
8100	68,07	47,27	0,000946
10800	90,76	63,03	0,001261
13500	113,46	78,79	0,001576
16200	135,15	94,55	0,001891
18900	158,84	110,30	0,002206
19636	165,02	114,60	0,002292
21000	176,49	122,56	0,002451

## PROVA DI RESILIENZA

*La prova di resilienza consiste nel misurare l'energia necessaria a rompere in un sol colpo la provetta in esame.*  
La provetta del materiale da esaminare ha forme e dimensioni unificate.

Si definisce resilienza la capacità che ha un materiale di resistere alla rottura a flessione per urto.

### Provette Unificate

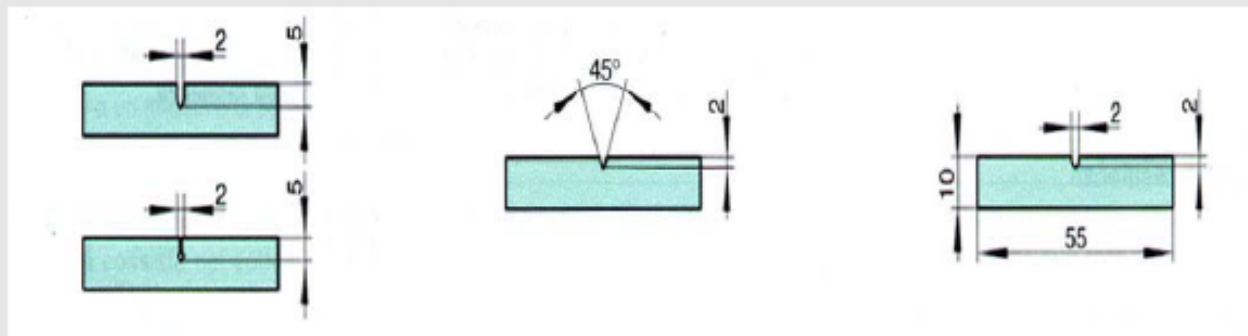
Per rendere attendibile la prova di resilienza è necessario utilizzare provette unificate aventi precise caratteristiche dimensionali e di forma.

Le provette normali hanno sezione quadrata con lato 10 mm e lunghezza di 55 mm; durante il prelievo si deve evitare ogni riscaldamento o raffreddamento che potrebbe alterare le proprietà dell'acciaio.

Le provette hanno un intaglio a "U" e a "buco di chiave" profondi 5 mm, oppure a "V" profondo 2 mm.

Per i materiali non ferrosi si può usare la provetta Mesnager con intaglio a "V" profondo 2 mm.

A secondo del tipo di provetta usata varia il simbolo della resilienza.



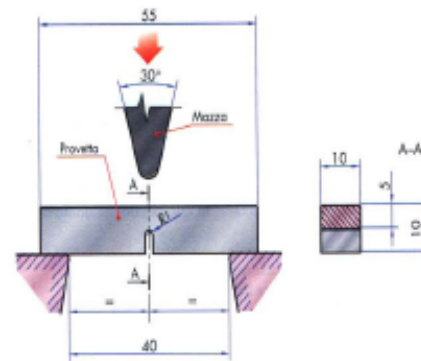
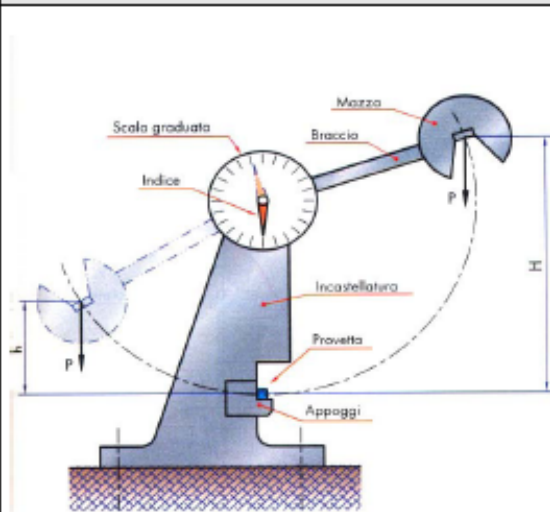
## PENDOLO DI CHARPY

La macchina per eseguire la prova di resilienza è nota con il nome di Pendolo di Charpy .

Il pendolo di Charpy consiste in una pesante mazza che scende per gravità dall'alto, incontra sulla sua traiettoria pendolare una provetta unificata , la rompe e continua la sua corsa oltre la provetta risalendo fino ad una certa quota.

La macchina è tarata per dare immediatamente su un quadrante il valore dell'energia assorbita dalla provetta.

Oltre alla provetta, anche gli appoggi della macchina e la testa della mazza che colpisce la provetta devono possedere forma e dimensioni unificate per garantire alla prova valori attendibili, confrontabili e ripetibili.



## Indice di resilienza

Il lavoro assorbito dalla provetta nell'urto è dato dalla differenza fra l'energia posseduta dal pendolo all'inizio della sua corsa e l'energia posseduta nella posizione finale ,quando è risalito oltre la provetta.

L'energia disponibile prima della caduta è dato dal peso P del pendolo moltiplicato per l'altezza di caduta H .

L'energia posseduta dal pendolo quando risale è dato dal peso P moltiplicato per l'altezza h di risalita.

Quindi il lavoro per rompere la provetta è dato :

$$L = ( P H ) - ( P h )$$

Dividendo L per la sezione  $S_0$  della provetta in corrispondenza del taglio, si ottiene l'indice di resilienza

$$K = L / S_0$$



## Scorrimento viscoso – il creep

Un materiale duttile che lavori sotto carico statico permanente anche inferiore al limite elastico e ad elevata temperatura, si rompe per scorrimento dopo un periodo più o meno lungo. L'andamento del fenomeno è valutato con specifiche prove che consistono nel misurare a differenti temperature e per carichi diversi gli allungamenti subiti nel tempo da provini di forma e dimensioni standardizzate. Le curve che si ottengono sono di forma caratteristica e consentono di conoscere il limite di scorrimento del materiale, il valore cioè del carico massimo che esso può sopportare a una certa temperatura per un tempo determinato senza giungere a rottura.

## Caratteristiche e meccanismi del creep

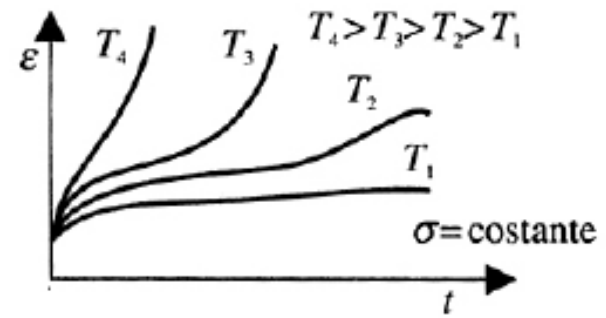
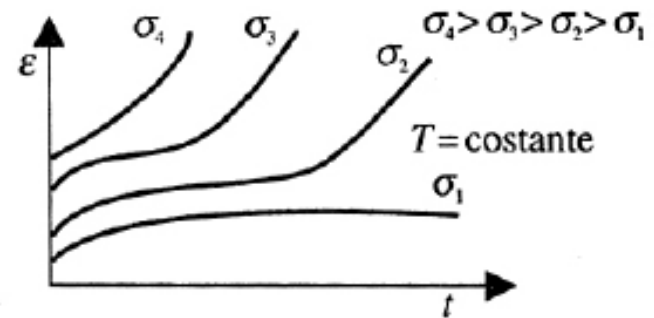
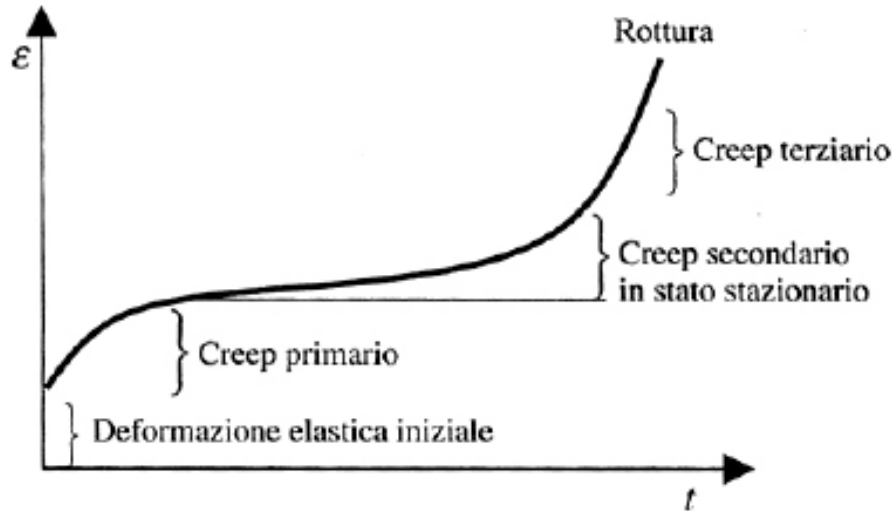
Il Creep è un fenomeno che riveste particolare importanza in sede di progettazione e verifica di strutture meccaniche. Si manifesta come la lenta deformazione di un materiale sotto sforzo risultante in un cambiamento permanente della forma. In generale la velocità di deformazione è inferiore all'1% al minuto in condizioni statiche, mentre può essere superiore in condizioni dinamiche. Tali cambiamenti geometrici derivati dal creep sono generalmente da evitare potendo costituire un limite per la vita operativa del pezzo (per esempio le palette di una turbina possono interferire con le pareti della camera).

La deformazione plastica dipende essenzialmente dalle dislocazioni che muovendosi nel materiale determinano lo slittamento dei piani cristallo grafici. Alla deformazione plastica consegue l'incrudimento che può essere annullato da processi di riassetto, di cui i più importanti sono: lo scorrimento deviato e il salto delle dislocazioni.

La competizione tra i due fenomeni di incrudimento e riassetto determina la velocità del processo di Creep.

Sebbene effettivamente il creep possa verificarsi ad ogni temperatura, gli effetti maggiori si hanno per temperature superiori al 40% della temperatura di fusione; al riguardo si osserva che alle basse temperature prevale lo scorrimento deviato, mentre sopra il 50% della temperatura di fusione diventa significativo anche il "climb" di dislocazione a causa dell'aumentata concentrazione delle vacanze e della velocità di diffusione.

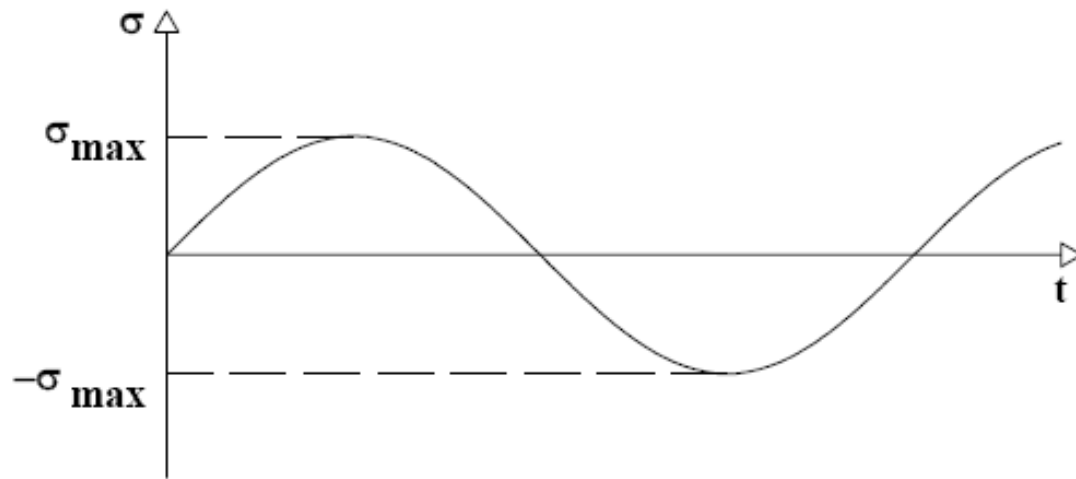
Per quanto riguarda l'aspetto macroscopico, alle basse temperature il fenomeno è generalmente caratterizzato da un valore in diminuzione dello sforzo, mentre alle alte è possibile individuare tre fasi distinte culminanti nella frattura (Creep primario, secondario e terziario). Inizialmente il materiale subisce un'immediata estensione elastica (maggiore alle alte temperature a causa del basso modulo elastico) per poi deformarsi plasticamente ad una velocità molto elevata (fase primaria). Questa va sempre più diminuendo nel creep secondario (velocità costante) per accelerare bruscamente nel creep terziario che porta alla rottura del pezzo.



# La verifica di resistenza a fatica

- Gli elementi delle macchine se soggetti a carichi variabili nel tempo presentano rotture precoci anche per carichi inferiori rispetto a quelli che inducono la plasticizzazione nelle aree più sollecitate.
- Le nucleazione delle cricche di fatica e la successiva velocità di propagazione dipendono da numerosi parametri:
  1. Lo stato di sforzo (composto o meno)
  2. L'ampiezza dei cicli di carico
  3. La dimensione dei grani del materiale (quindi il trattamento termico subito dal materiale)
  4. La presenza di intagli
  5. Lo stato superficiale, ovvero la rugosità superficiale
  6. Le dimensioni del componente stesso

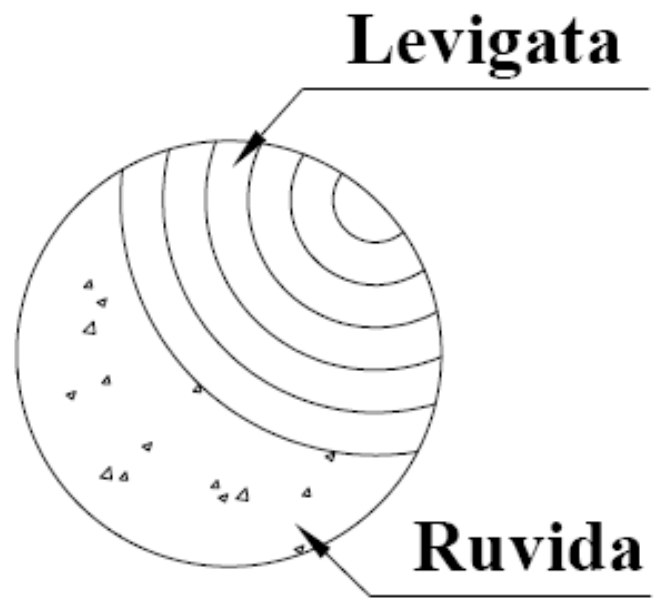
- Le prime indagini relative a cedimenti per fatica furono condotte a partire dalla metà del 1800 su **assali ferroviari** che, nonostante fossero stati dimensionati correttamente dal punto vista statico, presentavano rotture più o meno repentine dopo l'entrata in servizio.
- Negli anni '50 si danneggiarono numerosi **velivoli** civili del modello *Comet* e si accertò che il danno strutturale era indotto dalla nucleazione e successiva propagazione di cricche di fatica in corrispondenza degli spigoli dei finestrini rettangolari ricavati nella fusoliera dell'aereo.
- Gli spigoli vivi localizzati agli angoli dei finestrini rettangolari erano sede di concentrazione di sforzi che, a causa dei cicli di pressurizzazione e depressione cui la fusoliera dei velivoli era sottoposta in esercizio (decollo, permanenza in quota ed atterraggio costituiscono un ciclo di fatica), erano causa di nucleazione e propagazione di cricche di fatica.



Andamento degli sforzi di flessione rispetto al tempo in un punto della sezione dell'albero

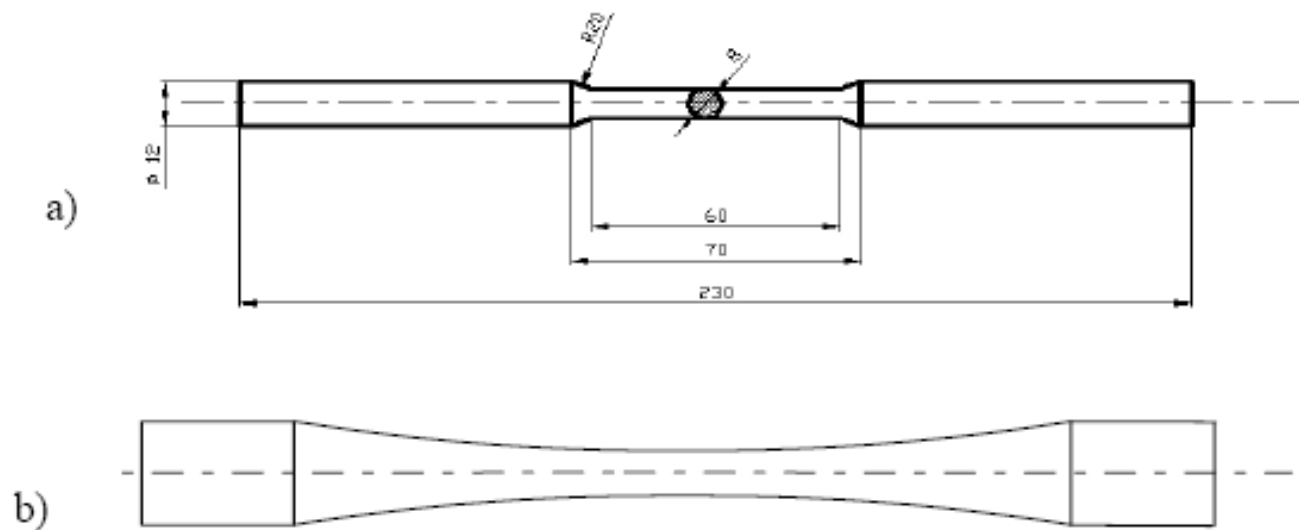
## La rottura per fatica

- Nei casi di “*Flessione rotante*” e “*Flessione alternata*” avviene nel modo seguente:
  1. In uno dei punti periferici "pericolosi" (a causa di scalfitture superficiali, difetti nel materiale, o intagli indotti dal processo di ottenimento alle macchine utensili) si genera una cricca
  2. A causa della sollecitazione ripetuta, la cricca cresce di dimensioni riducendo la sezione resistente
  3. Quando la sezione resistente non è più in grado di sostenere il carico applicato il pezzo cede di schianto.



Esempio di una superficie di frattura per fatica

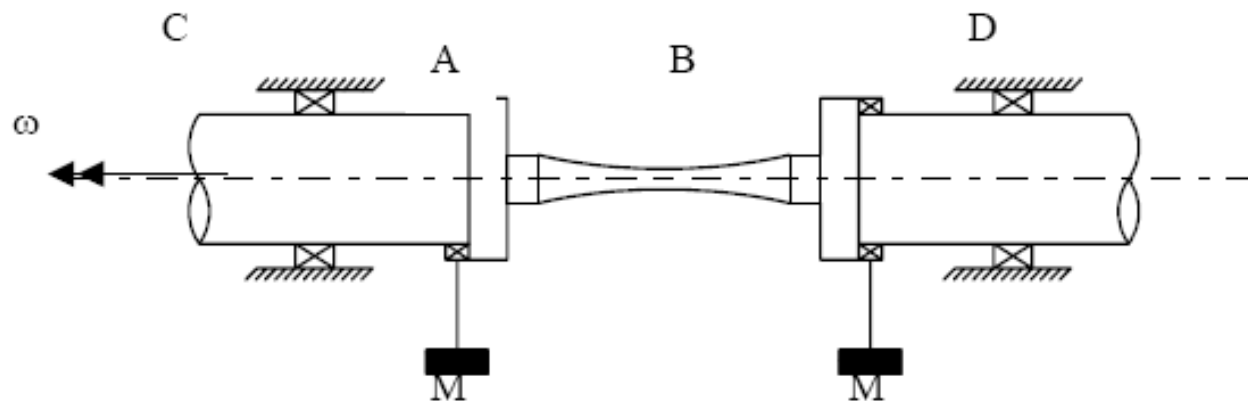




Provino per prove a) di trazione e b) di fatica

- Per le prove di fatica, a differenza delle prove di trazione, si usano provini a *clessidra* con raccordo molto ampio, in modo da avere in esercizio, durante la prova, un coefficiente di intaglio  **$K_t=1$** .

- Il provino ha dimensioni prefissate (il diametro minimo nella zona a “clessidra” non deve essere superiore a **d=10mm**), la superficie dello stesso deve presentare una rugosità tipica da finitura per lucidatura **R<sub>a</sub>=0.3 μm**.



# Metodi per migliorare la resistenza a fatica

## Trattamenti termo-chimici: Cementazione, nitrurazione

- Arricchimento di carbonio o azoto in superficie

## Trattamenti meccanici: Rullatura e pallinatura

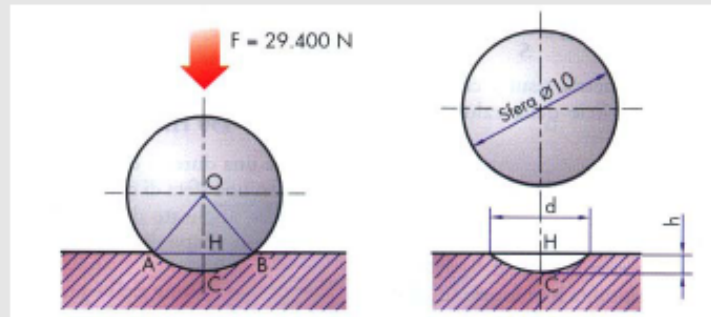
Con questi trattamenti si ottengono principalmente due effetti positivi:

- la superficie risulta avere una migliore rugosità, per effetto della plasticizzazione;
- si genera uno stato di tensione residuo di compressione superficiale, che migliora la resistenza a fatica.

## PROVA DI DUREZZA BRINELL

La durezza è la proprietà che hanno i materiali di resistere alla penetrazione da parte di un materiale più duro di quello che deve essere esaminato.

*La prova di durezza eseguita con il metodo Brinell consiste nel far penetrare nel materiale in esame una sfera di acciaio duro di diametro  $D$ , premuta con forza  $F$  ( Carico di Prova ).*



### Diametri delle sfere e Carichi di Prova

Il diametro delle sfere può avere differenti valori, in relazione ai materiali su cui si deve eseguire la prova.

Il carico di prova si sceglie in relazione al diametro della sfera e al tipo di materiale da testare:

Spessore pezzo [mm]	<1	1+3	3+6	>6
Ø sfera [mm]	1	2,5	5	10

$$F = n D^2 9,81$$

I valori della costante  $n$  sono riportati nella tabella:

Materiali	Acciai e ghise	Leghe di rame e alluminio	Rame, alluminio, zinco, magnesio e sue leghe	Leghe di stagno	Piombo e stagno
$n$	30	10	5	1,25	0,5

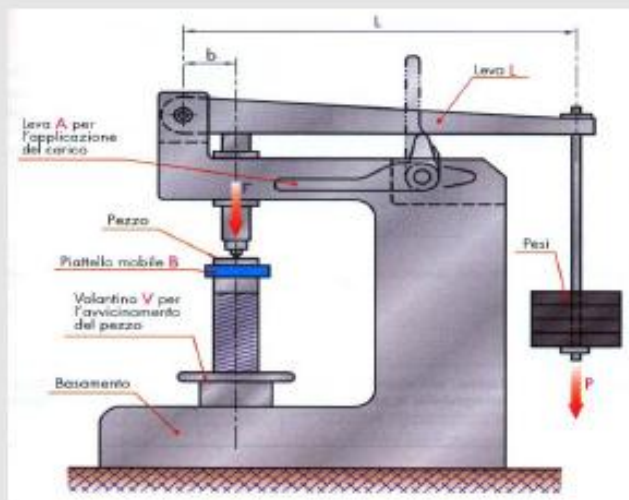
Si definisce durezza Brinell ( HB ) il rapporto tra il carico di prova  $F$  ( espresso in Newton ) e l'area della superficie dell'impronta  $S$  ( espressa in  $\text{mm}^2$  ) moltiplicato per una costante  $n$  ( pari a  $0,102 \text{ N/mm}^2$ . )

$$HB = ( F/S ) n$$

Dalla geometria risulta che l'area  $S$  della superficie della calotta sferica:

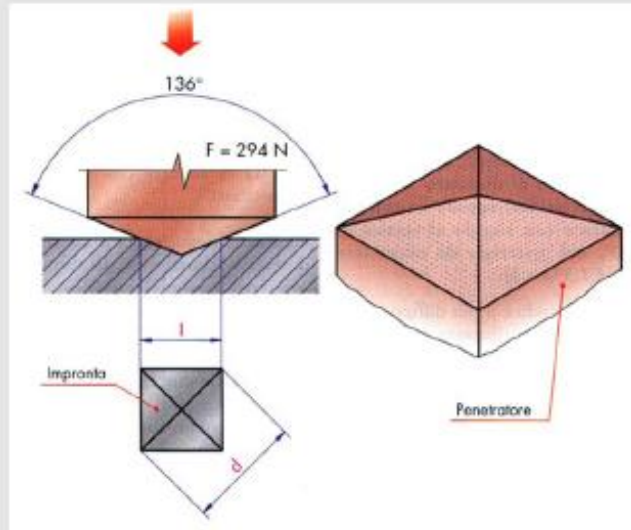
$$S = 3,14 D H \quad (\text{mm}^2)$$

#### DUROMETRO PER L'ESECUZIONE DELLA PROVA BRINELL



## PROVA DI DUREZZA VICKERS

La prova di durezza con il metodo Vickers consiste nel far penetrare nel materiale in esame un diamante avente forma piramidale retta a base quadrata premuta con forza  $F$  di 294 N per un tempo variabile da 10 a 15 secondi.



Si definisce durezza Vickers ( HV ) il rapporto tra il carico di prova  $F$  ( espresso in Newton ) e l'area della superficie  $S$  dell'impronta ( espressa in  $\text{mm}^2$  ); occorre applicare il fattore costante  $n$  .

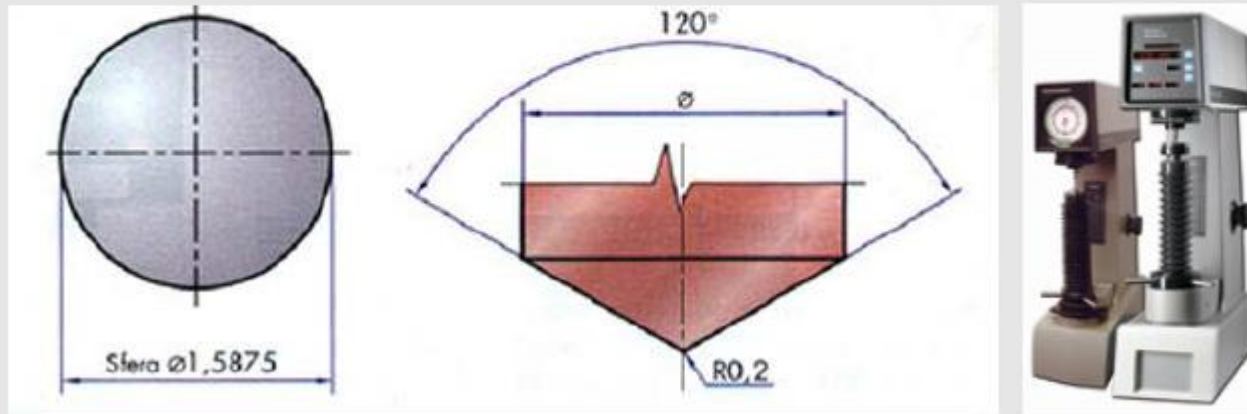
$$HV = n \cdot F / S$$

L'area laterale di una piramide con l'angolo al vertice delle facce uguali a  $136^\circ$  può essere espressa in funzione della diagonale di base  $d$  con la seguente formula:

$$S = 0,539 \cdot d^2 \quad (\text{mm}^2)$$

## PROVA DI DUREZZA ROCKWELL ( HRB e HRC )

La prova di durezza eseguita con il metodo Rockwell consiste nel far penetrare ( in due tempi con un carico prestabilito ) una sfera di acciaio duro di diametro 1,58 mm ( 1/16 di pollice ) oppure un cono di diamante con angolo al vertice di 120°, nel materiale da esaminare.



Questo metodo è il più diffuso per la praticità e l'immediatezza della lettura del valore della durezza.

I parametri della prova cambiano a seconda del penetratore utilizzato e il valore della durezza sarà espresso in funzione della profondità di penetrazione con le seguenti formule:

**HRB = 130 - e** per prove con penetratore sferico

**HRC = 100 - e** per prove con penetratore conico

Dove **e** rappresenta in unità Rockwell ( 1 unità Rockwell = 2 micron -> corrispondenti a 0,002 mm ) la profondità residua dell'impronta ( $f_r$ ), cioè la profondità misurata dopo aver tolto il carico per eliminare la deformazione elastica.

Si utilizza il penetratore a sfera di acciaio duro per materiali meno duri ( durezza < 200 HB ) ed il penetratore a cono di diamante per materiali più duri ( durezza > 200 HB ).

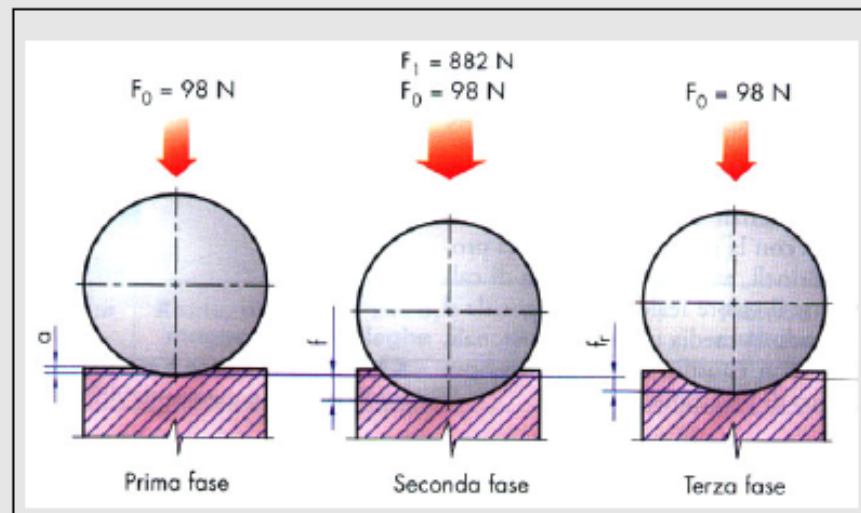
La prova si effettua eseguendo le seguenti fasi :

1. Portare la superficie del pezzo da esaminare a contatto con il penetratore applicando un carico iniziale di ( $F_0 = 98$  Newton), per provocare il suo affondamento di una profondità di assestamento  $a$ .
2. Azzerare l'indice della scala delle profondità.
3. Applicare il carico addizionale  $F_1$  raggiungendo il carico totale  $F_t$ . Questi carichi dipendono dai penetratori e valgono rispettivamente:

per la sfera  $F_1 = 882$  N ;  $F_t = 980$  N

per il cono  $F_1 = 13722$  N ;  $F_t = 1470$  N

4. Attendere 30 secondi con il carico totale  $F_t$  applicato.
5. Togliere il carico addizionale  $F_1$  per permettere al penetratore di escludere la deformazione plastica.
6. Leggere sul quadrante del durometro il valore della durezza o la profondità residua espressa in unità Rockwell e o in micron da cui sarà dedotta la durezza con le formule sopra citate.

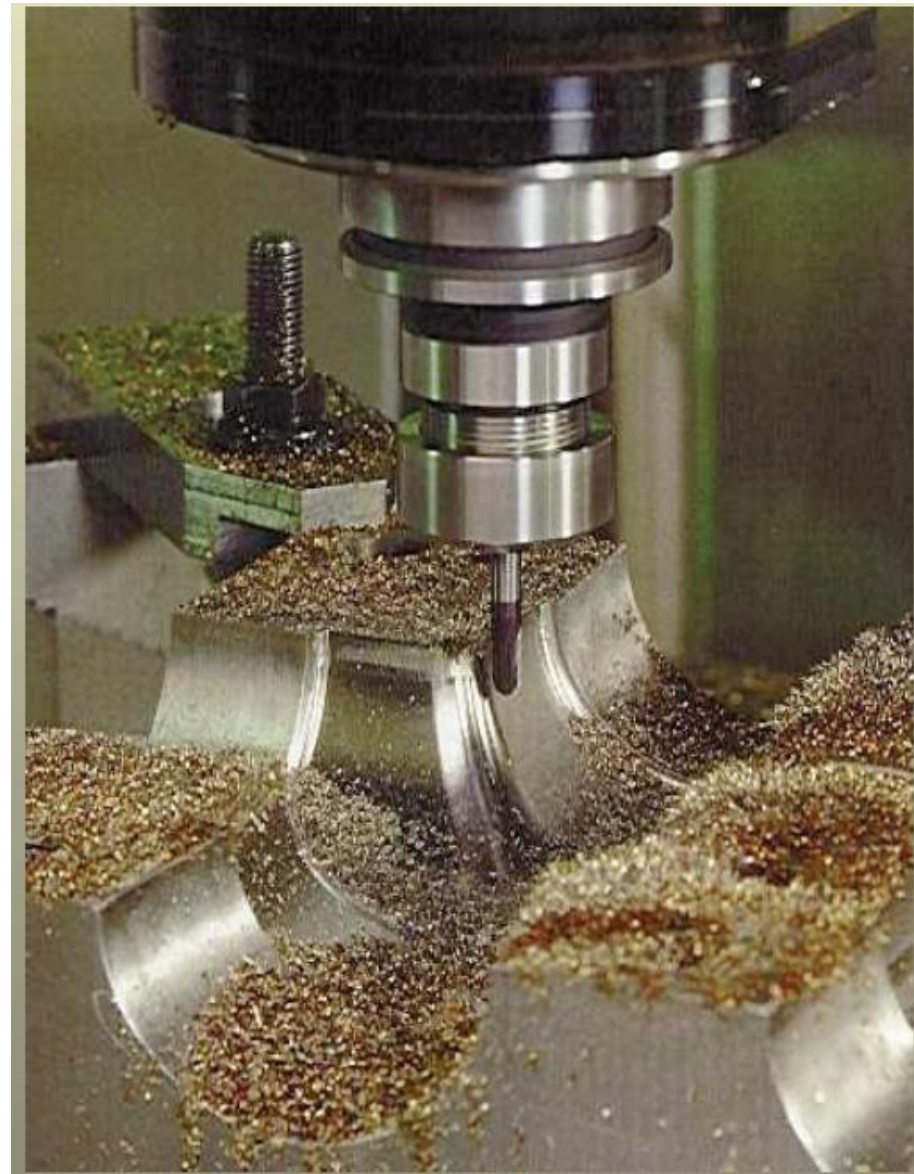
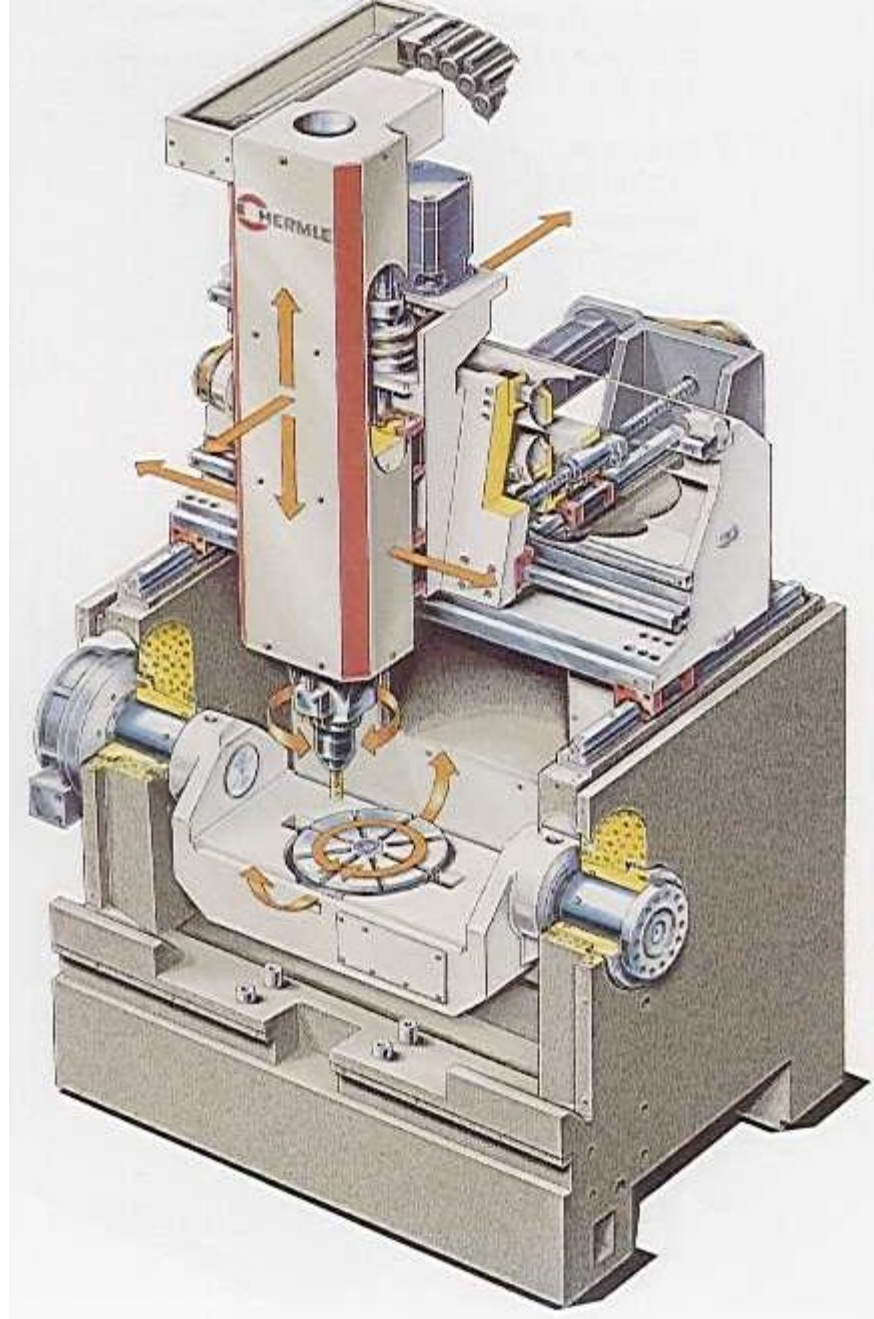




### *Lavorazione all'utensile o asportazione di truciolo*

Questo tipo di lavorazione viene in genere impiegato successivamente ad una delle altre tecniche di produzione già presentate. Il pezzo in forma più o meno definita viene lavorato asportando il materiale dalle zone in cui è presente in eccesso rispetto alla forma finale voluta. Si utilizzano per questo utensili ad elevata durezza. Con tale tecnica viene anche rifinita la superficie per ridurre la rugosità sotto il valore prescritto per l'applicazione. È una tecnica relativamente costosa in quanto si aggiunge alle altre tecniche di produzione utilizzate, il processo non permette elevate velocità di produzione con una macchina sola ed inoltre il materiale scartato costituisce un costo aggiuntivo. Tanto più il pezzo sarà vicino alla forma finale prima di questa lavorazione, tanto più basso sarà il costo aggiuntivo della lavorazione all'utensile.

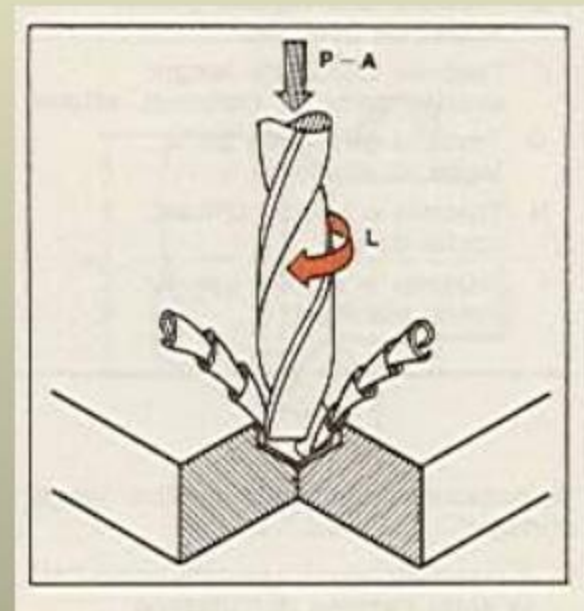




- Utilizzano una serie di movimenti combinati posseduti dall'utensile o dal pezzo o da entrambi : il moto di lavoro o di taglio, il moto di avanzamento ed il moto di appostamento o registrazione
- il moto di taglio esegue l'asportazione del truciolo
- il moto di avanzamento alimenta l'utensile con nuovo materiale da asportare
- il moto di registrazione regola la profondità di passata

- **FORATURA**

- **L** : moto di taglio
- **A**: moto di avanzamento
- **P** : moto di registrazione
  
- il moto di taglio *rotatorio* è posseduto dall'utensile
- il moto di avanzamento *continuo* è posseduto dall'utensile
- il moto di registrazione è posseduto dall'utensile



- **TORNITURA**

- **L** : moto di taglio
- **A**: moto di avanzamento
- **P** : moto di registrazione
  
- il moto di taglio *rotatorio* è posseduto dal pezzo
- il moto di avanzamento *continuo* è posseduto dall'utensile
- il moto di registrazione è posseduto dall'utensile



- **PIALLATURA con LIMATRICE**

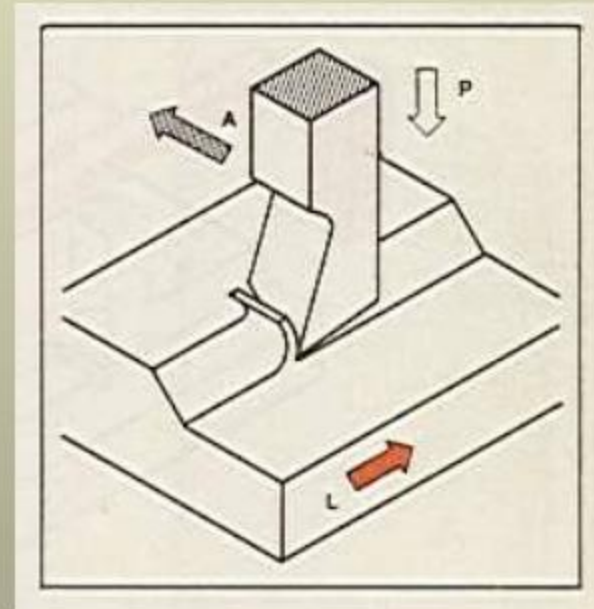
- L : moto di taglio
- A: moto di avanzamento
- P : moto di registrazione

- il moto di taglio *rettilineo alternativo* è posseduto dall'utensile
- il moto di avanzamento *intermittente* è posseduto dal pezzo
- il moto di registrazione è posseduto dall'utensile



- **PIALLATURA con**  
**PIALLATRICE**

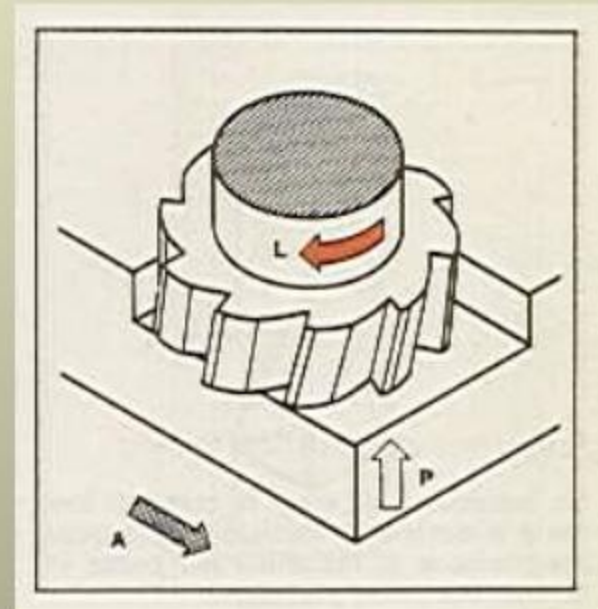
- **L** : moto di taglio
- **A**: moto di avanzamento
- **P** : moto di registrazione
  
- il moto di taglio *rettilineo alternativo* è posseduto dal pezzo
- il moto di avanzamento *intermittente* è posseduto dall'utensile
- il moto di registrazione è posseduto dall'utensile



- **FRESATURA**

- **L** : moto di taglio
- **A**: moto di avanzamento
- **P** : moto di registrazione

- il moto di taglio *rotatorio* è posseduto dall'utensile
- il moto di avanzamento *continuo* è posseduto generalmente dal pezzo
- il moto di registrazione è posseduto dal pezzo





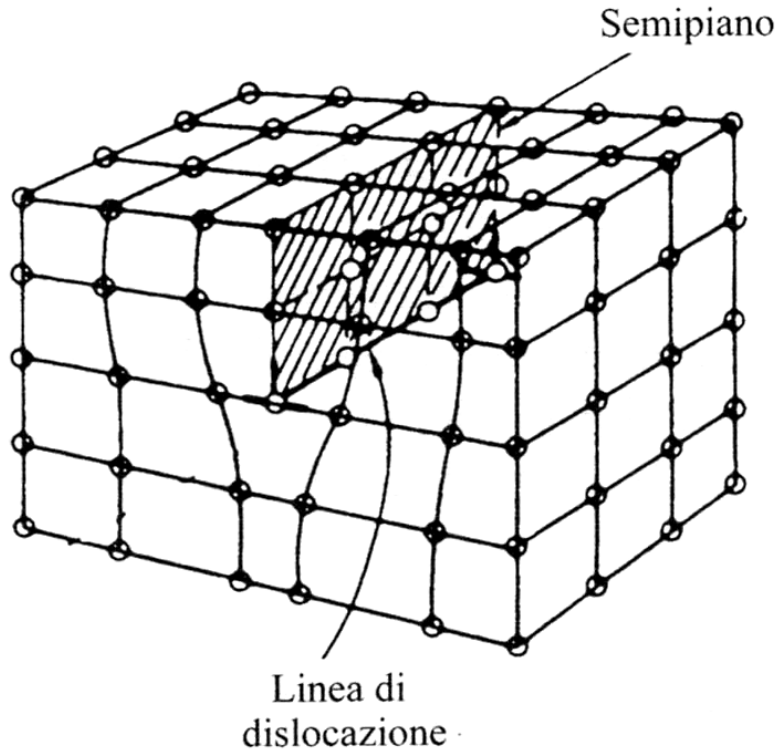
# DIFETTI LINEARI: DISLOCAZIONI

- 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  $\text{cm}^3$

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

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

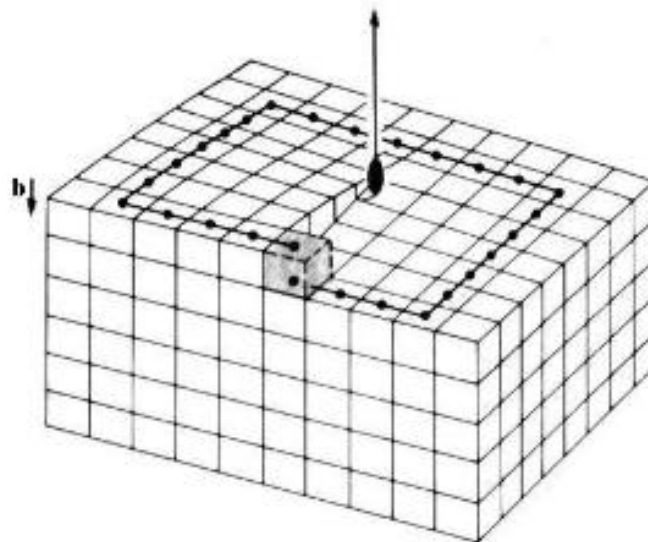
Esse sono dei difetti che causano distorsioni del reticolo concentrate attorno ad una linea e possono formarsi durante la solidificazione o in seguito ad una deformazione plastica.



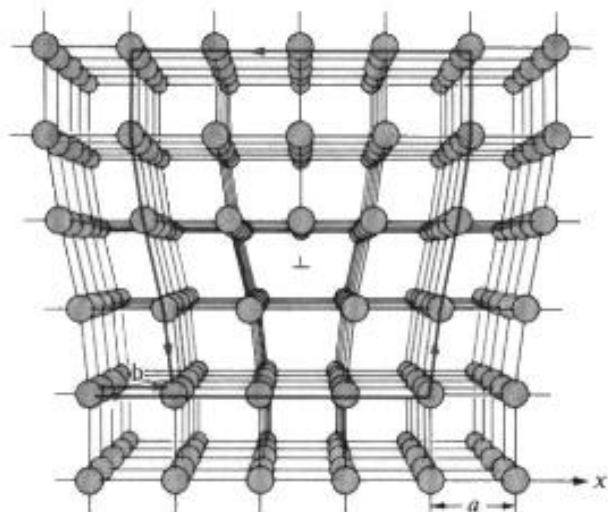
In figura è schematizzato un esempio di **dislocazione a spigolo**: essa è rappresentata dalla linea sulla quale termina un semipiano atomico aggiuntivo all'interno del cristallo e viene indicata con il simbolo ( $\perp$ ). Una **dislocazione a vite** è invece associata alla rotazione di una parte del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

## *Difetti di linea*

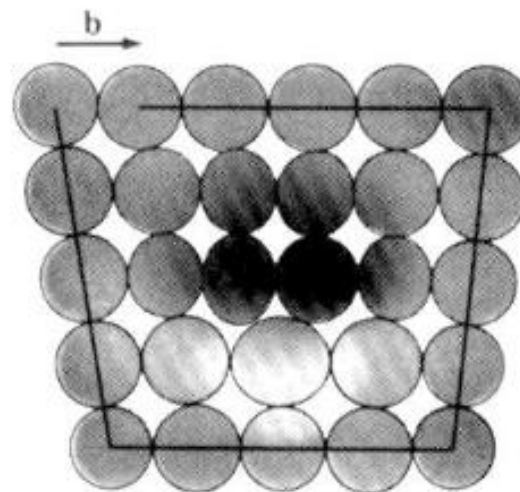
La dislocazione è un difetto dovuto ad una perturbazione delle strutture centrate attorno ad una linea di atomi. Questi ultimi avranno un numero di coordinazione (NC+1) maggiore rispetto agli atomi imperturbati



*Dislocazione a vite.*



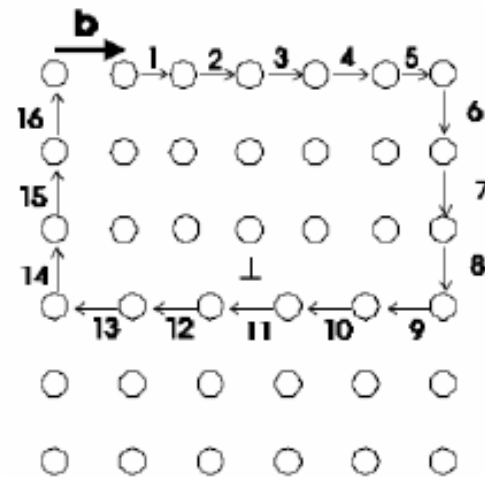
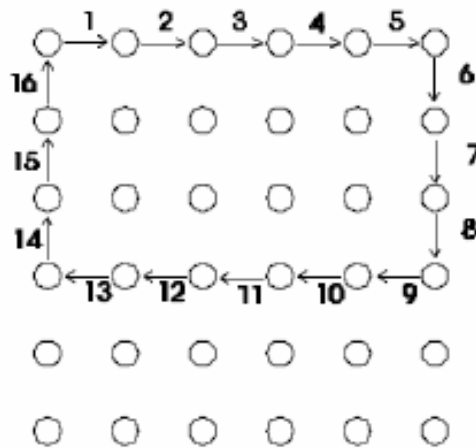
*Dislocazione a cuneo.  $\perp$*



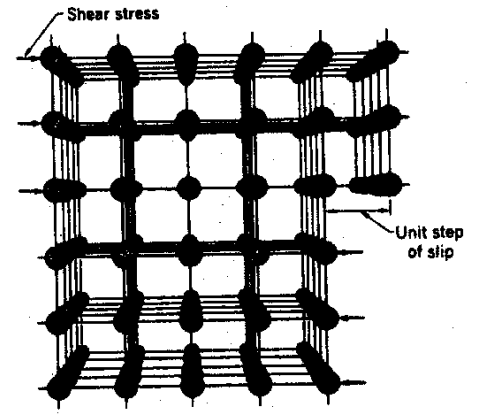
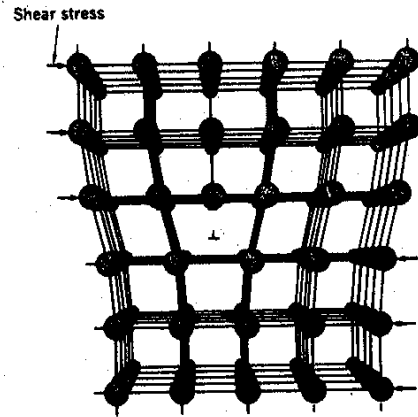
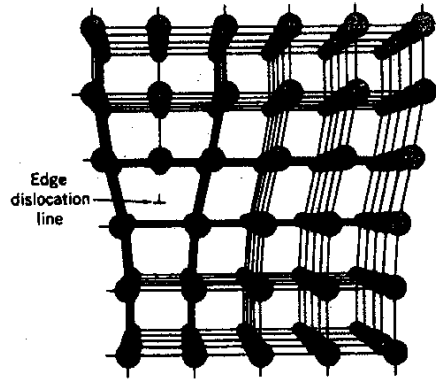
*Stato tensionale nell'interno della dislocazione.  
Gli atomi adiacenti alla dislocazione sono in stato di compressione (più scuri) o di tensione (più chiari).*

## Vettore di Burgers

- indica la più piccola distanza di spostamento degli atomi attorno alla dislocazione ed è perpendicolare alla linea di dislocazione

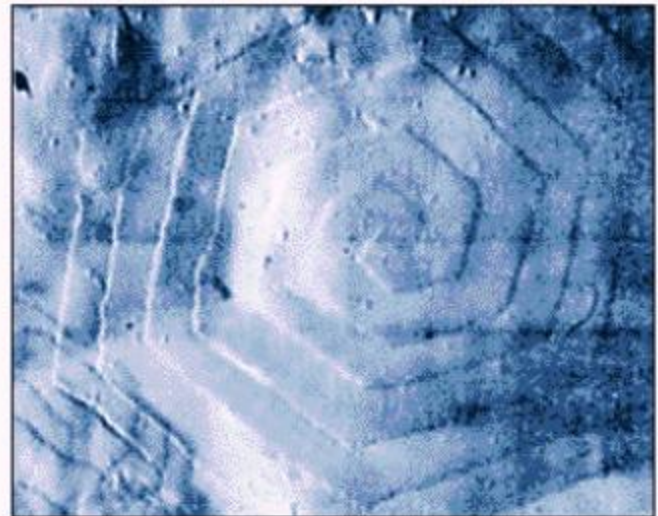
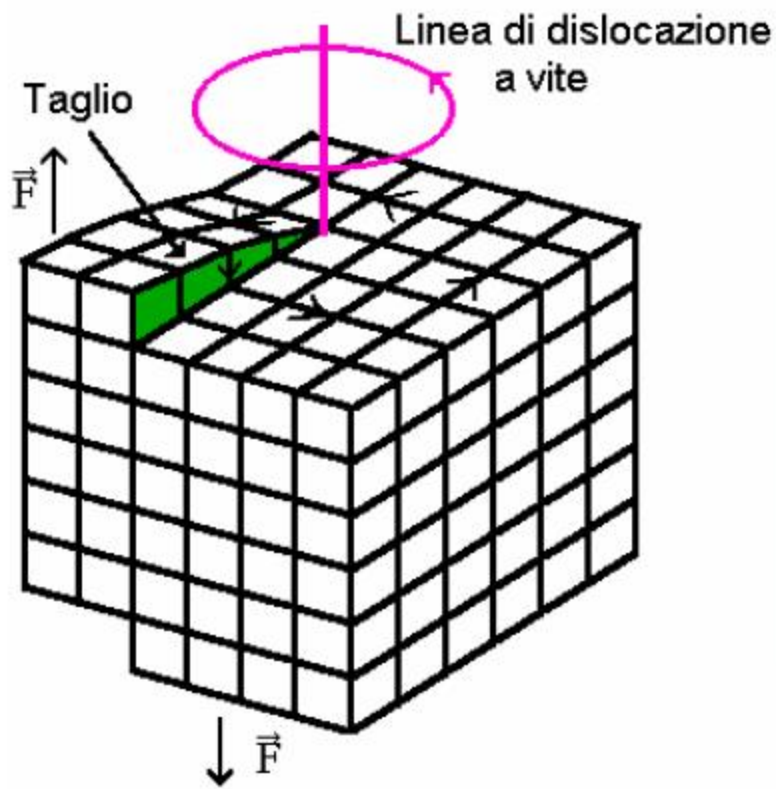


# dislocazione a spigolo



## Dislocazioni a vite

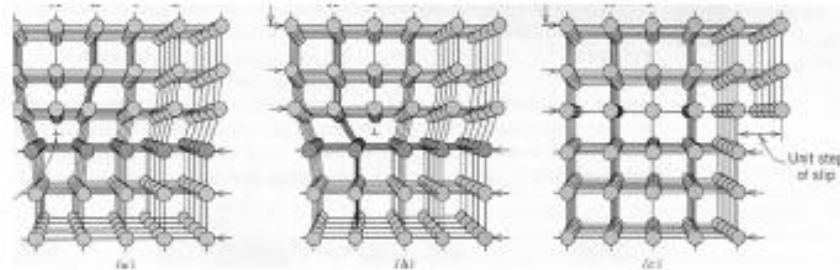
Una rampa a spirale di atomi spostati rispetto alla posizione del reticolo perfetto. Dovuta all'applicazione di sforzi di taglio.



*Superficie di un cristallo organico: in evidenza la spirale dovuta all'accrescimento del cristallo per la presenza di una dislocazione a vite.*

# 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 DI SUPERFICIE

- **SUPERFICIE**

la superficie è un difetto poiché gli atomi che ne fanno parte hanno numero di coordinazione inferiore agli altri e sono più reattivi (es.: i fenomeni di ossidazione e corrosione sono superficiali)

- **BORDI DI GRANO**

atomi legati fra loro da legami distorti, situati al confine fra le aree monocristalline (grani) di un materiale policristallino, si chiamano bordi di grano (BDG)



I **difetti di superficie** sono rappresentati dai **bordi di grano**.

Un materiale metallico non è mai formato da un unico cristallo, ma da numerosissimi piccoli cristalli, detti grani cristallini, orientati in modo diverso rispetto a quelli adiacenti.

Tra i grani cristallini si formano comunque dei legami, in quanto gli atomi sulla zona di separazione tendono ad adattarsi a entrambi i reticoli. Queste zone di separazione sono quindi dei difetti di superficie e sono chiamate **bordi di grano**.

Le dimensioni dei grani cristallini possono variare da diverse decine di  $\mu m$  (grani grossolani) a frazioni di  $\mu m$  (grani fini).

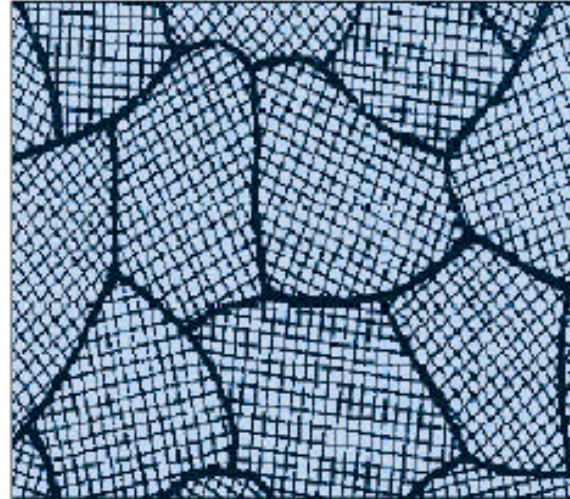
La dimensione dei grani ed il loro orientamento reciproco, cioè la struttura della superficie di separazione, determinano alcune proprietà meccaniche del materiale.

Così a temperatura ambiente i bordi di grano sono in genere più resistenti del cuore, per cui l'eventuale frattura passa attraverso il grano, mentre a temperature elevate è il contrario, e quindi la frattura si propaga lungo le superfici di separazione dei grani;

## 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)



# I difetti planari

## BORDI GRANO

I solidi cristallini sono costituiti da un gran numero di GRANI separati da bordi.

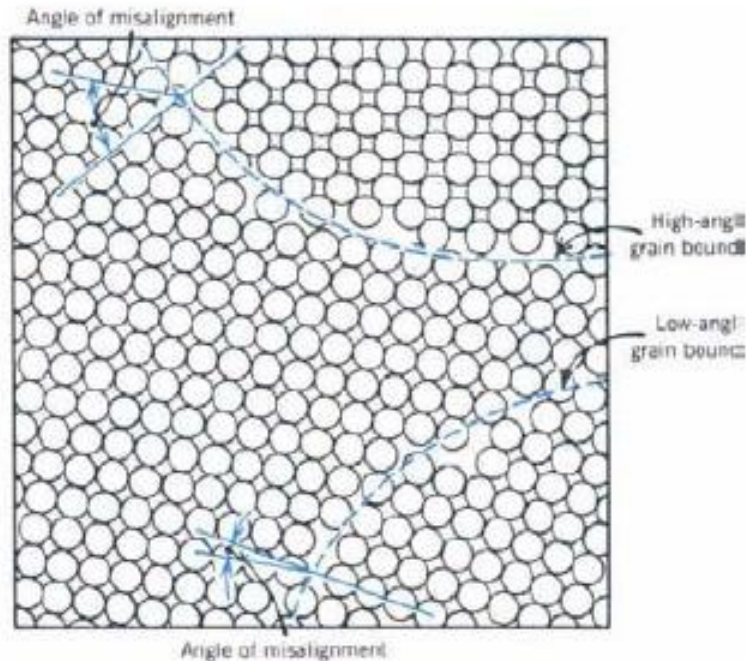
Quando la differenza di orientazione tra un grano ed un altro adiacente è minima abbiamo il difetto

## BORDO A PICCOLO ANGOLO

se invece la differenza di orientazione è grande abbiamo i normali bordi grano.

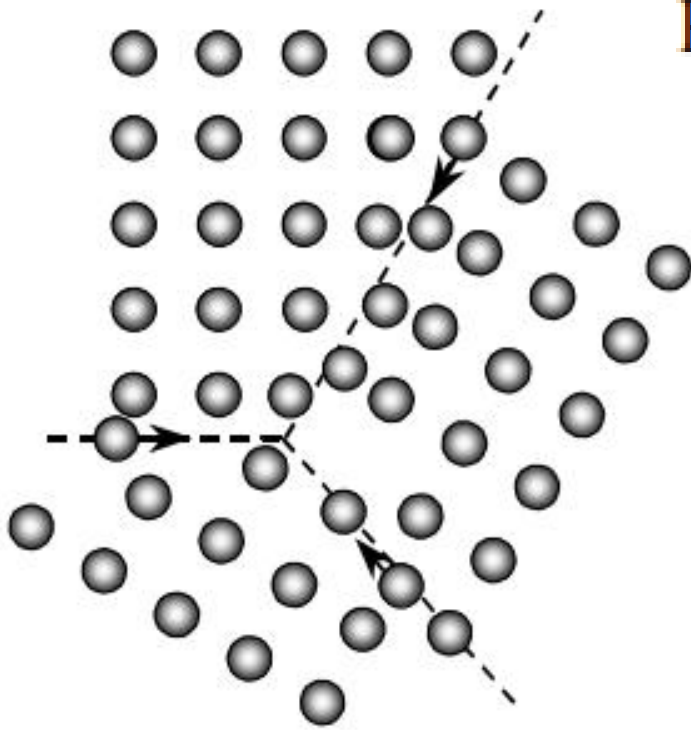
# Energia dei difetti superficiali

- L'energia associata al bordo del grano è maggiore nel caso di bordi di grano a grande angolo.

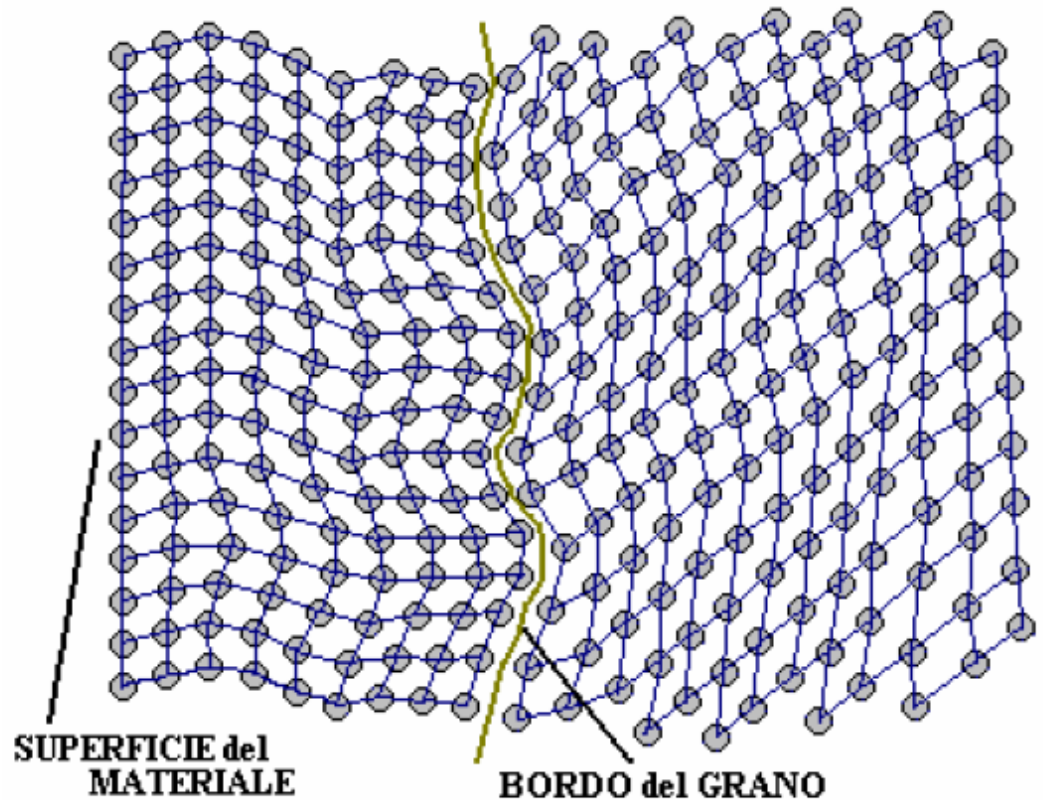


## Bordo di grano

Temperature medio-  
alte  
ricristallizzazione



## DIFETTI DI SUPERFICIE



## BORDI DI GRANO

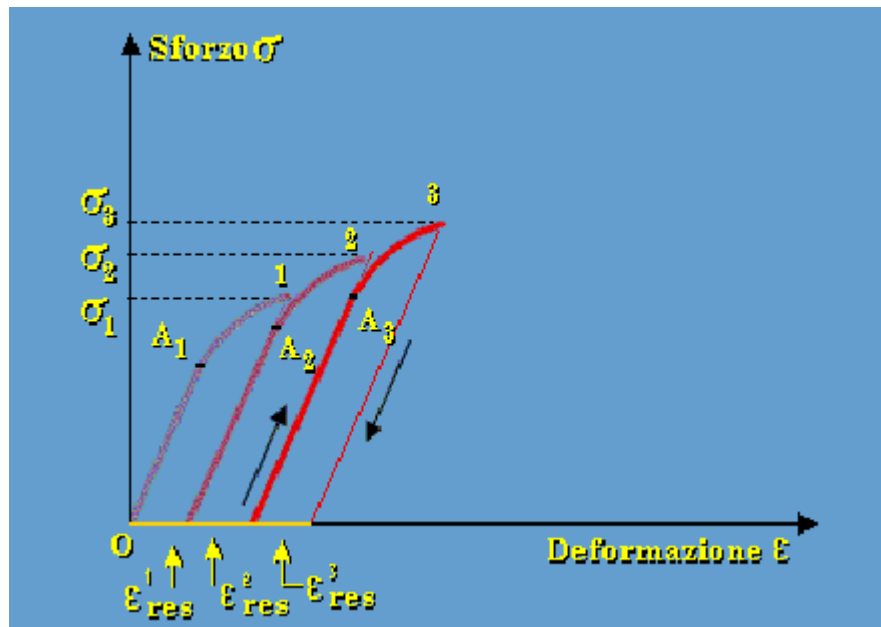
- I BDG sono ricchi di legami distorti, impurezze, dislocazioni, atomi con NC inferiore, ...
- sono zone ad elevata reattività'
- evidenziabili da opportune reazioni chimiche (attacco chimico)

# 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

# Incrudimento

- Il processo di deformazione plastica viene adoperato per impartire al materiale maggiore resistenza e minore deformabilità
- Questo processo viene detto incrudimento
- Applicando sforzi crescenti al materiale, il suo limite alla deformazione plastica viene aumentato per gli effetti di moltiplicazione delle dislocazioni





- Rafforzamento mediante difetti puntuali
  - Rafforzamento mediante difetti lineari (dislocazioni)
  - Rafforzamento mediante difetti superficiali
  - Rafforzamento per alligazione
  - Altri tipi di rafforzamento
- 
- Tecnologie di deformazione a freddo
  
  - Incrudimento e Ricristallizzazione

## MECCANISMI DI RAFFORZAMENTO

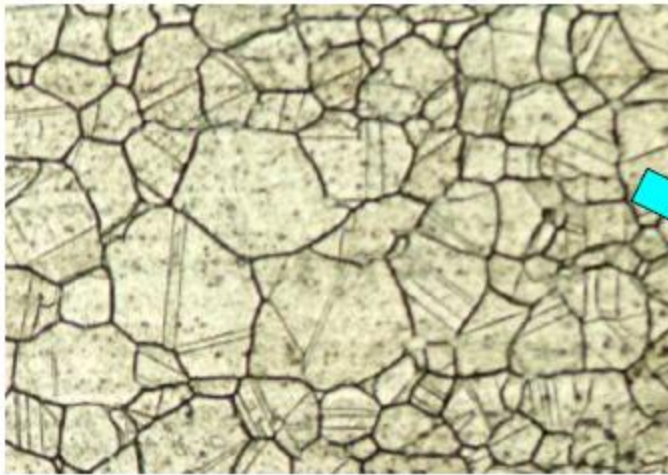
Per rafforzamento si intende, nei materiali metallici, l'innalzamento del limite elastico. Questo implica quasi sempre l'intervento di un fenomeno che ostacola lo scorrimento delle dislocazioni; ciò si ottiene in generale mediante un aumento dei difetti della periodicità cristallina, ossia aumentando:

- 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)

## 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.

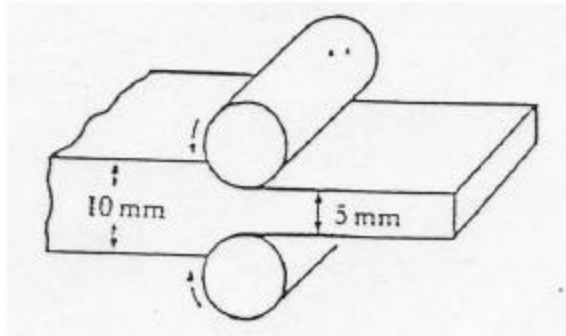
## Ricristallizzazione

Metal	Melting Temperature (°C)	Recrystallization Temperature (°C)
Sn	232	< Room temperature
Cd	321	< Room temperature
Pb	327	< Room temperature
Zn	420	< Room temperature
Al	660	150
Mg	650	200
Ag	962	200
Au	1064	200
Cu	1085	200
Fe	1538	450
Pt	1769	450
Ni	1453	600
Mo	2610	900
Ta	2996	1000
W	3410	1200

Adapted from R. Brick, A. Pense, and R. Gordon, *Structure and Properties of Engineering Materials*, McGraw-Hill, 1977.

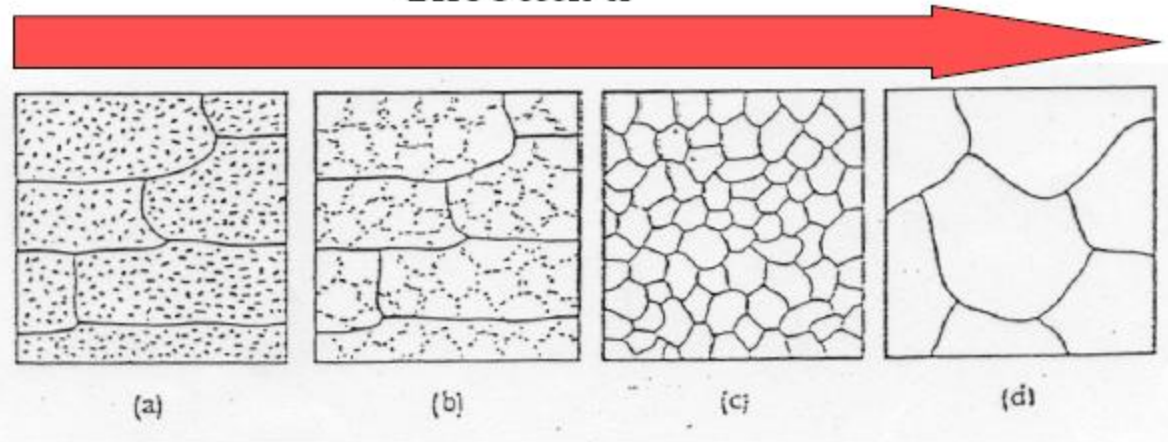
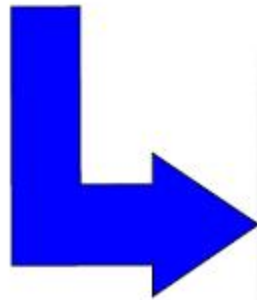
*Temperature di ricristallizzazione per alcuni metalli.*

Ricristallizzazione



*Deformazione a freddo*

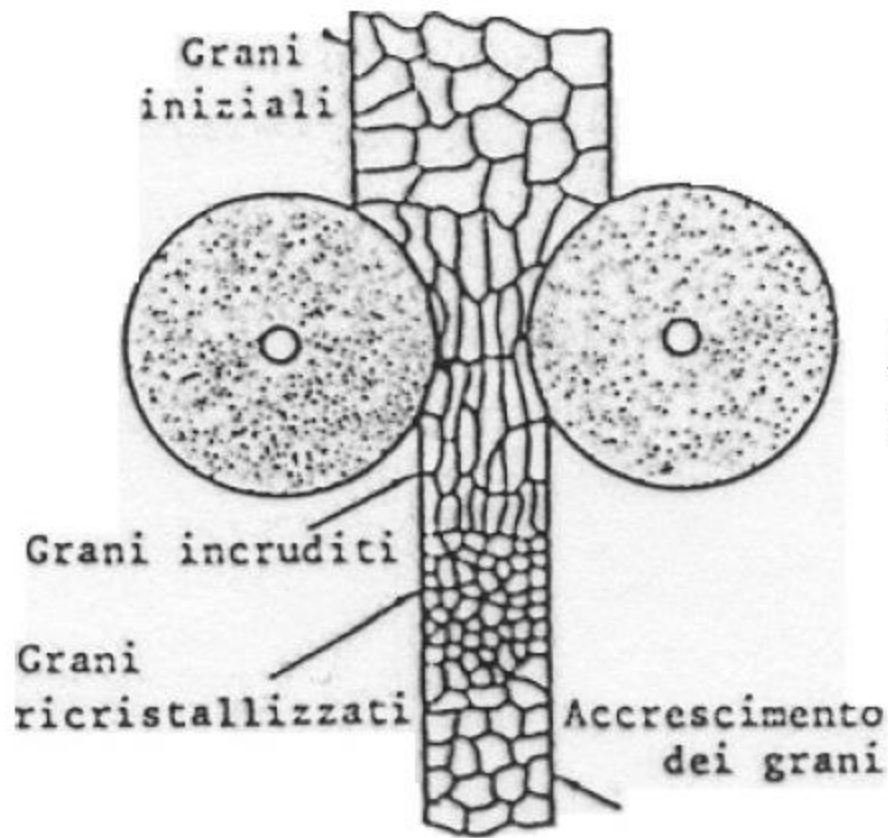
*Ricottura*



*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.*

## Ricristallizzazione

Il processo di deformazione plastica può avvenire anche a caldo.

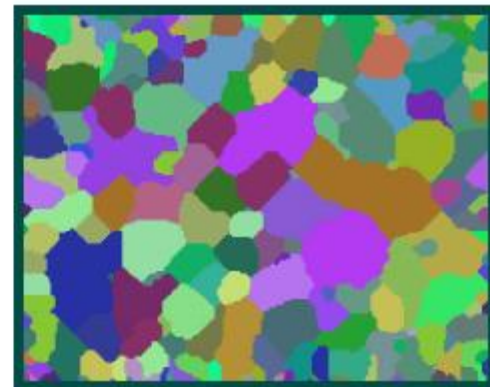


*Laminazione a caldo e ricristallizzazione.*

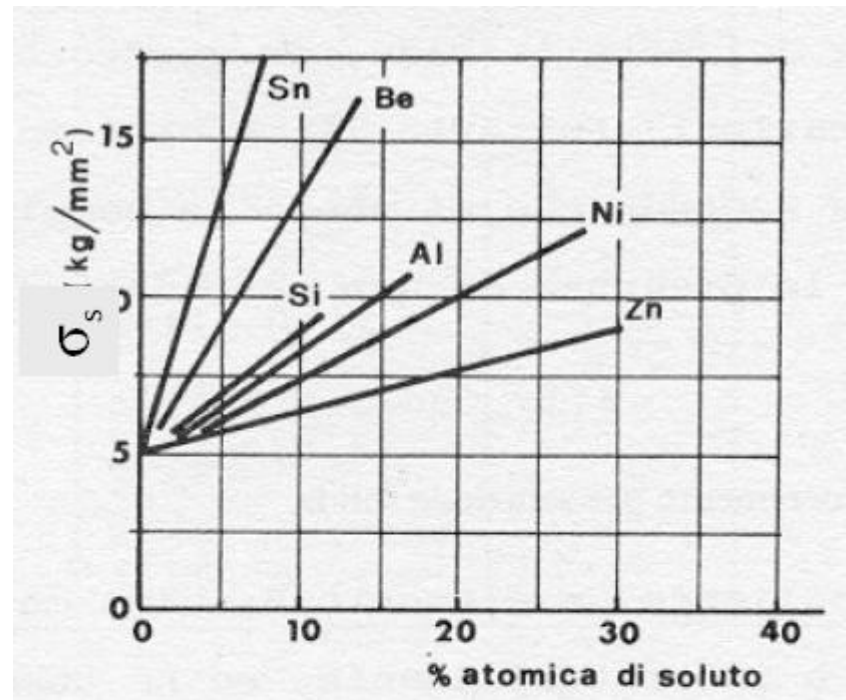
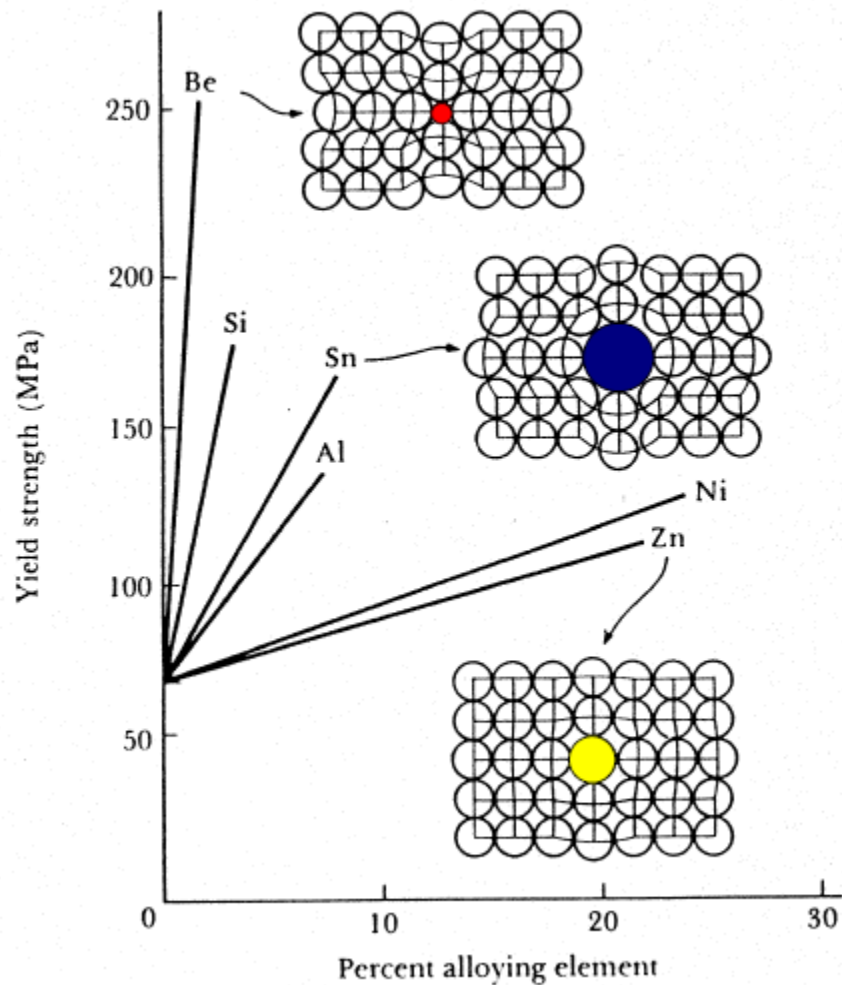
## Rafforzamento mediante difetti superficiali

I giunti dei grani creano ostacoli al passaggio delle dislocazioni che vengono trattenute da questi per il cambiamento di orientazione cristallografica tra due grani adiacenti che non consente il loro facile trasferimento.

All'interfaccia si viene a formare un **accumulo di dislocazioni** bloccate. Per far avvenire il movimento a parità di temperatura, **si deve applicare una forza maggiore.**



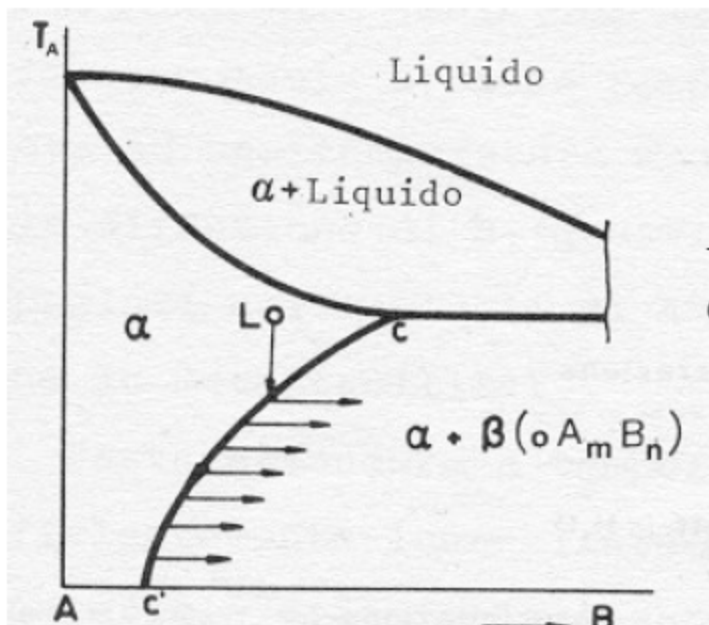




*Effetto di elementi in lega solubili sul limite di snervamento (all'1% di deformazione permanente) in rame policristallino a  $T$  ambiente.*

## ➤ B.1) Rafforzamento per precipitazione di una fase incoerente

Quando la lega si raffredda molto lentamente, la soluzione satura  $\alpha$  diventa satura ed evolve espellendo la seconda fase  $\beta$  che in molti casi è un intermetallico, incoerente con la fase primaria e più dura di questa.

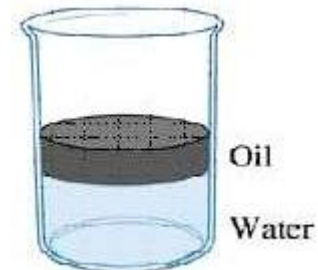
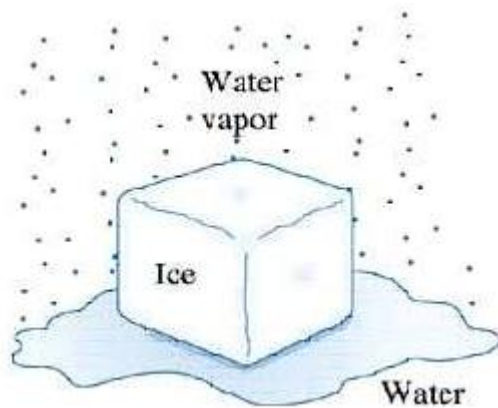


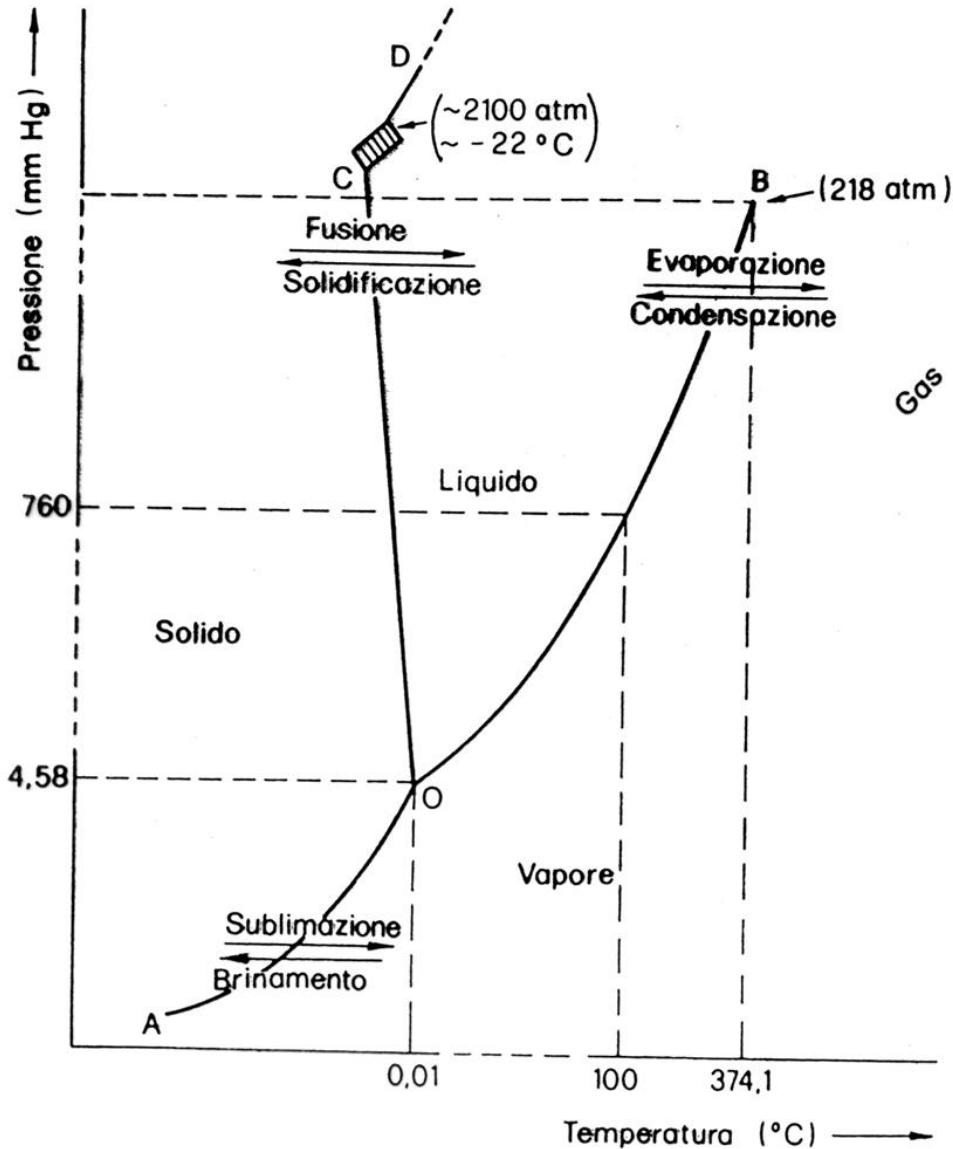
*Indurimento per precipitazione di una seconda fase.*

## DIAGRAMMI DI STATO

Il diagramma di stato (o delle fasi ) di una specie chimica permette:

- ❖ di conoscere, in funzione della temperatura e della pressione, i campi di esistenza di ciascun stato di aggregazione della specie chimica considerata.
- ❖ di definire le condizioni necessarie alla coesistenza in equilibrio di più stati di aggregazione di detta specie
- ❖ Fase **F** = porzione uniforme di materia, non solo per composizione chimica ma anche nello stato fisico.





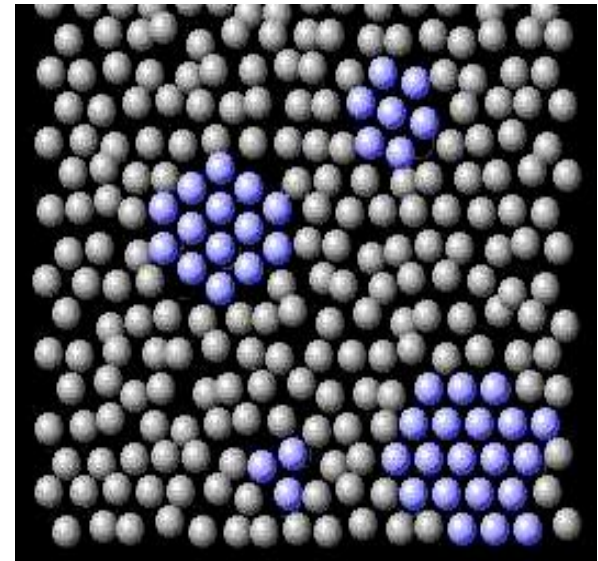
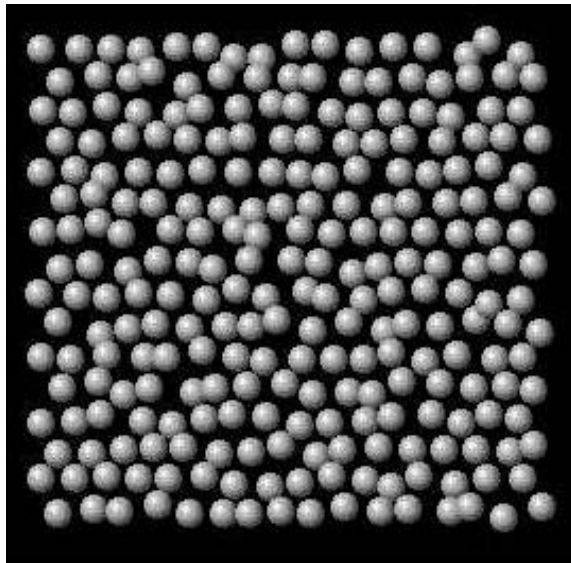
## Diagramma di stato per l'acqua

Da notare che per l'acqua, come poche altre sostanze, la linea di equilibrio tra liquido e solido è inclinata verso sinistra: ciò significa che un aumento di pressione favorisce la fusione.

## 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.



La formazione di cristalli stabili all'interno di un liquido è regolata da un bilancio energetico.

Da un lato la creazione del cristallo rappresenta per il sistema un **guadagno energetico** (cioè cede energia aumentando la sua stabilità) dato dalla variazione di energia libera di volume,  $\Delta G_v$ , per cui, indicato con  $r$  il raggio del cristallo, supposto sferico, si ha:

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_v$$

Dall'altro lato è necessario creare una superficie di separazione tra solido e liquido: e questo richiede un **consumo di energia** (l'energia globale aumenta) da parte del sistema, dato da:

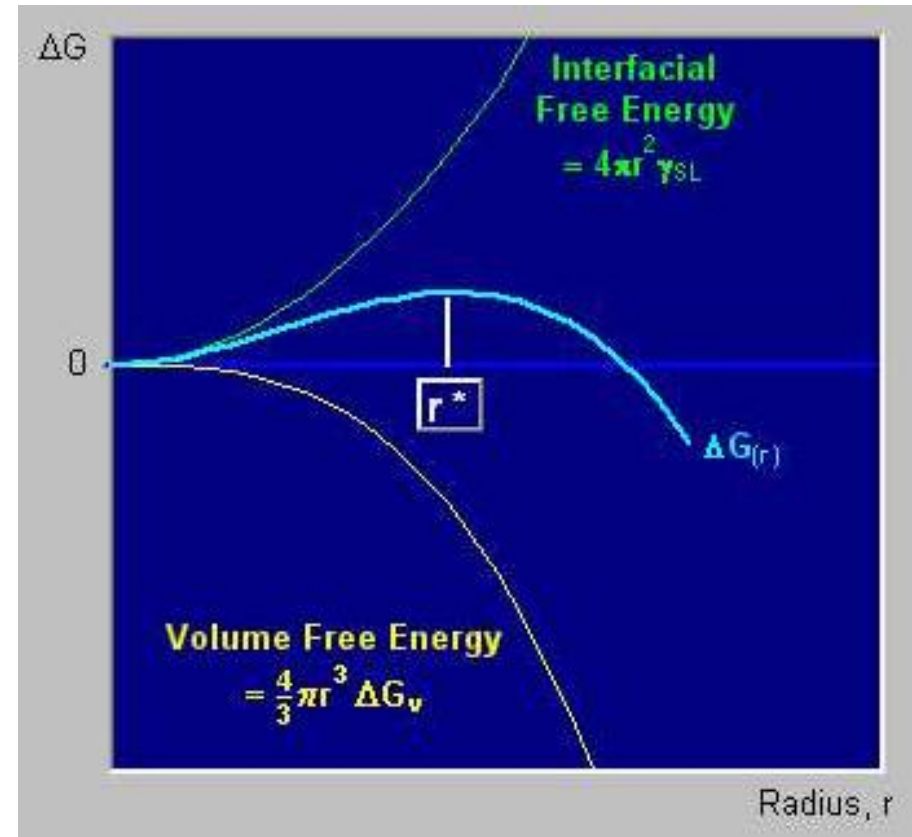
$$4 \pi r^2 \gamma_{SL}$$

dove  $\gamma_{SL}$  è l'energia superficiale specifica dell'interfaccia solido-liquido.

L'andamento globale dell'energia libera in funzione delle dimensioni del nucleo cristallino, come riportato in figura, si ottiene dalla somma delle energie di volume e di superficie, (che sono di segno opposto).

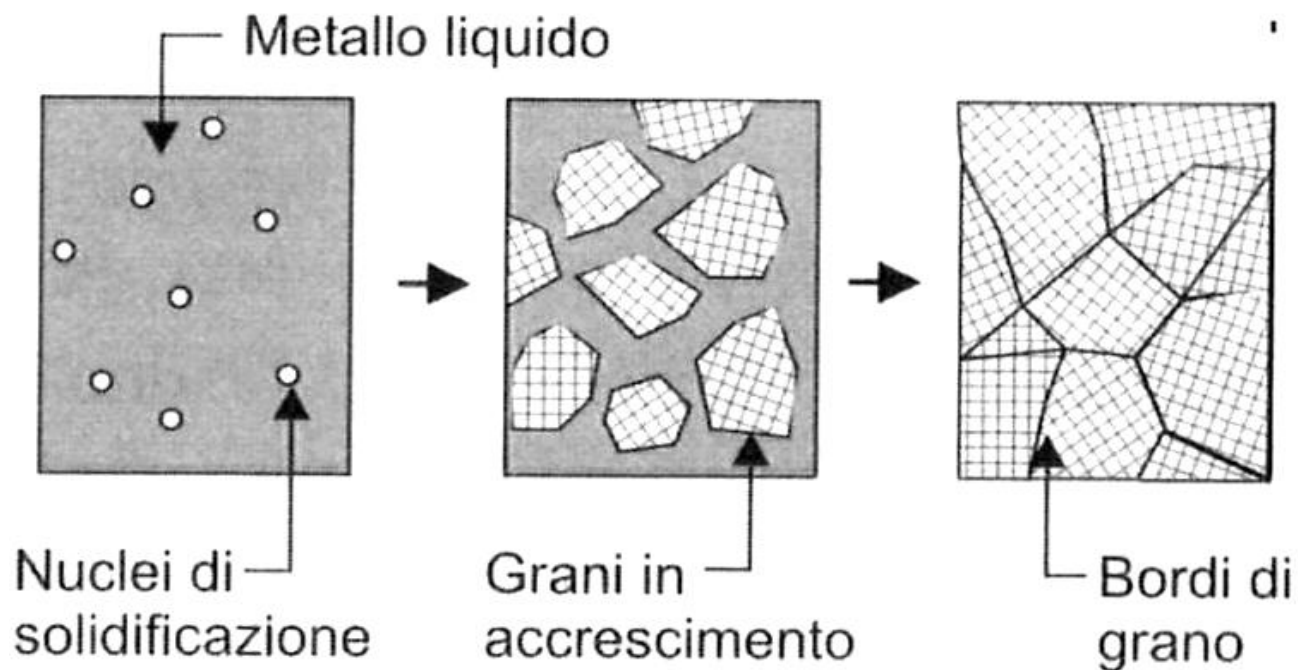
Si può notare che per piccoli valori di  $r$  il processo è sfavorito: l'energia superficiale richiesta è superiore all'energia di volume disponibile.

Solo al di sopra di un certo raggio critico  $r^*$ , l'energia di volume ottenibile supera quella richiesta



dall'interfaccia ed i nuclei cristallini diventano stabili e possono velocemente accrescersi visto che in questo modo l'energia globale diminuisce aumentando la stabilità

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.





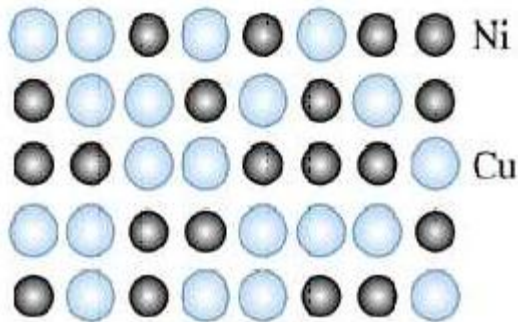
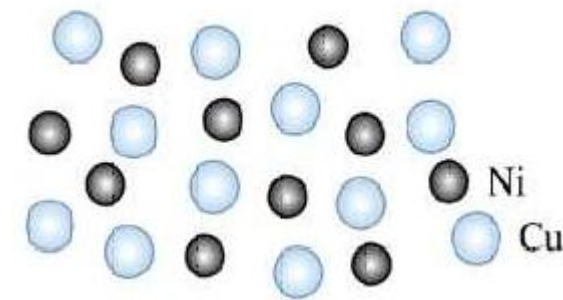
Se i siti di nucleazione sono in numero ridotto, al termine si otterrà una struttura grossolana; viceversa, se si formano molti siti di nucleazione, si otterrà una struttura a grano fine.

Siccome la struttura a grano fine dà luogo a migliori caratteristiche meccaniche del materiale metallico, spesso si aggiungono degli **affinatori di grano** (elementi di lega che favoriscono la formazione di nuclei stabili).

Il meccanismo di nucleazione e accrescimento, oltre che durante la solidificazione, si trova anche in alcuni tipi di trasformazione allo stato solido, oppure durante i processi di ricristallizzazione.

Il metodo più comune per preparare una lega binaria consiste nel fondere assieme i due metalli, nelle proporzioni desiderate, e nel lasciar raffreddare lentamente la massa fusa.

Salvo alcune eccezioni, i vari metalli, allo stato fuso, sono tra loro solubili in tutte le proporzioni e danno luogo, pertanto, a masse liquide omogenee (soluzioni liquide).



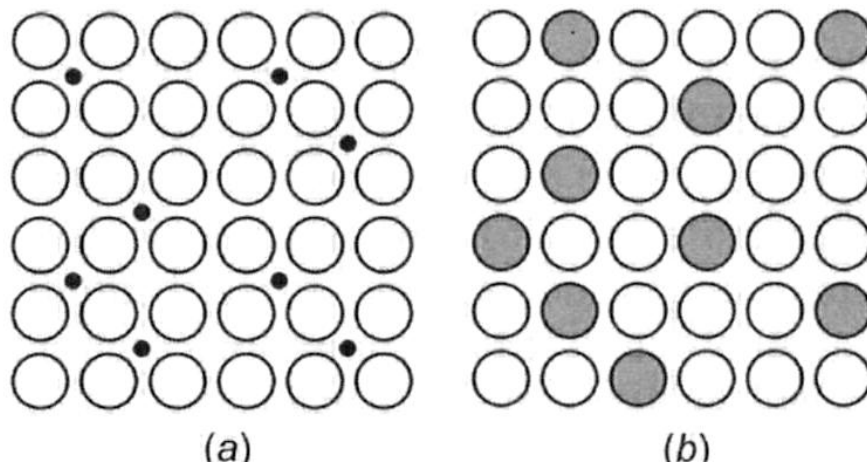
Quando le leghe fuse vengono lasciate raffreddare e solidificare, si possono formare diverse strutture in dipendenza di vari fattori, tra cui assumono notevole importanza:

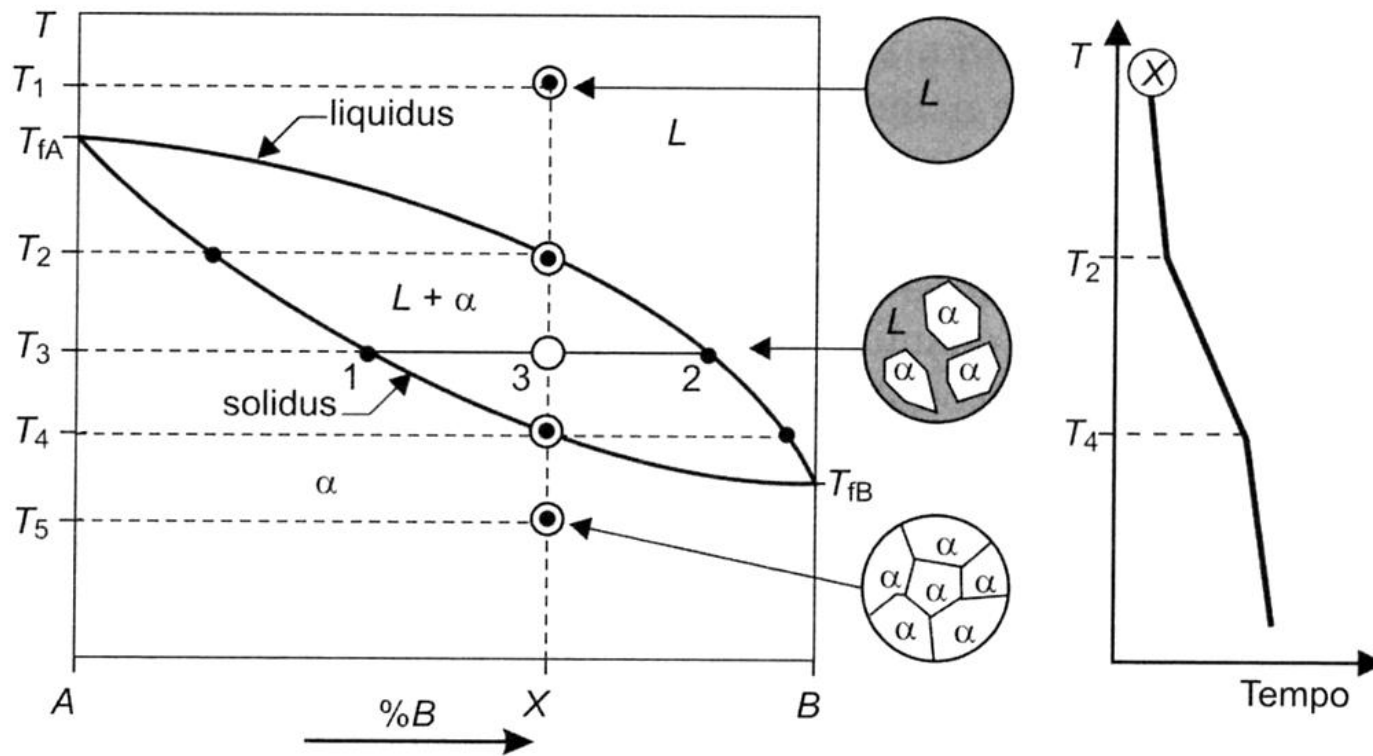
- ▶ la natura del legame chimico,
- ▶ la intensità delle forze di interazione, che si stabiliscono tra atomi di diversa specie nella lega.

A seconda degli elementi che formano la lega e del loro rapporto si potrà avere la formazione di grani cristallini di un unico tipo (questa volta formato da atomi di elementi diversi) oppure la formazione di grani cristallini diversi, cioè formati da reticoli cristallini diversi.

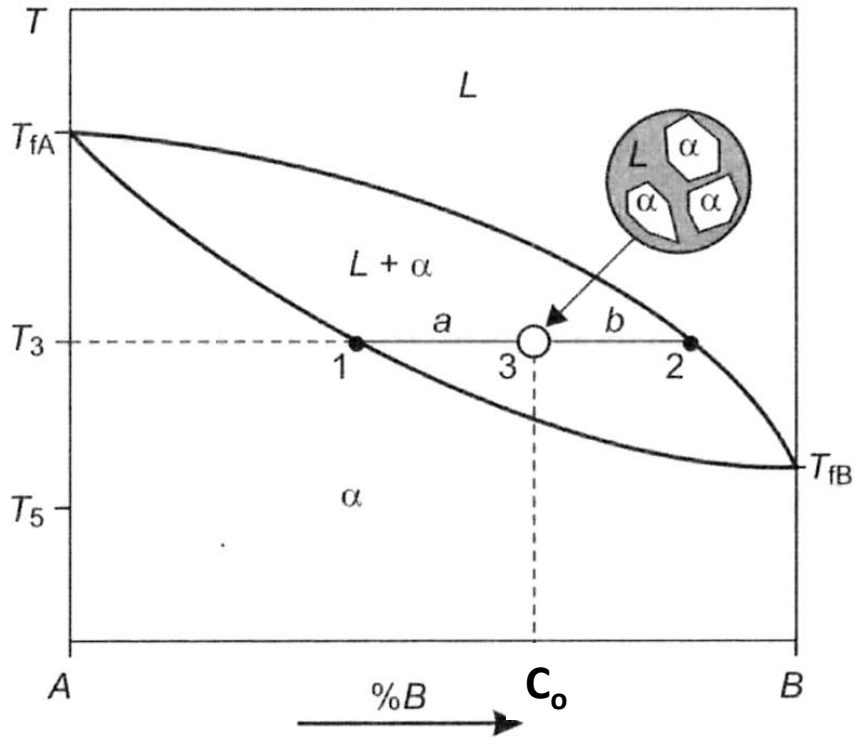
*Due o più materiali metallici possono formare un'unica fase quando generano una **soluzione solida** nella quale gli atomi diversi coesistono in un unico reticolo cristallino, e quindi formano un'unica fase.*

Si possono formare due tipi di soluzioni solide: **interstiziali** (a) e (b) **sostituzionali**.





In pratica la costruzione dei diagrammi di fase si esegue attraverso misure di analisi termica registrando, ad esempio, le curve di raffreddamento relative a leghe di composizione diversa,



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 ( $C_\alpha$ ) 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

La massa totale della lega è data dalla somma della parte liquida e della solida e può essere considerata unitaria

$$W_L + W_\alpha = 1$$

La quantità dell'elemento di lega si ripartisce tra liquido e solido in base alle concentrazioni

$$1 C_o = W_L C_L + W_\alpha C_\alpha$$

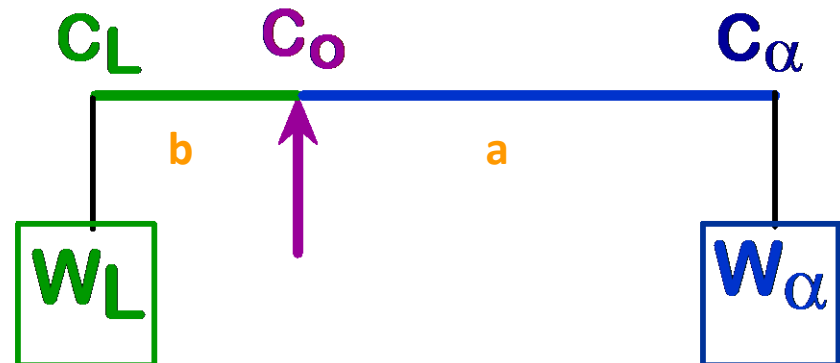
Dalla combinazione delle due equazioni:

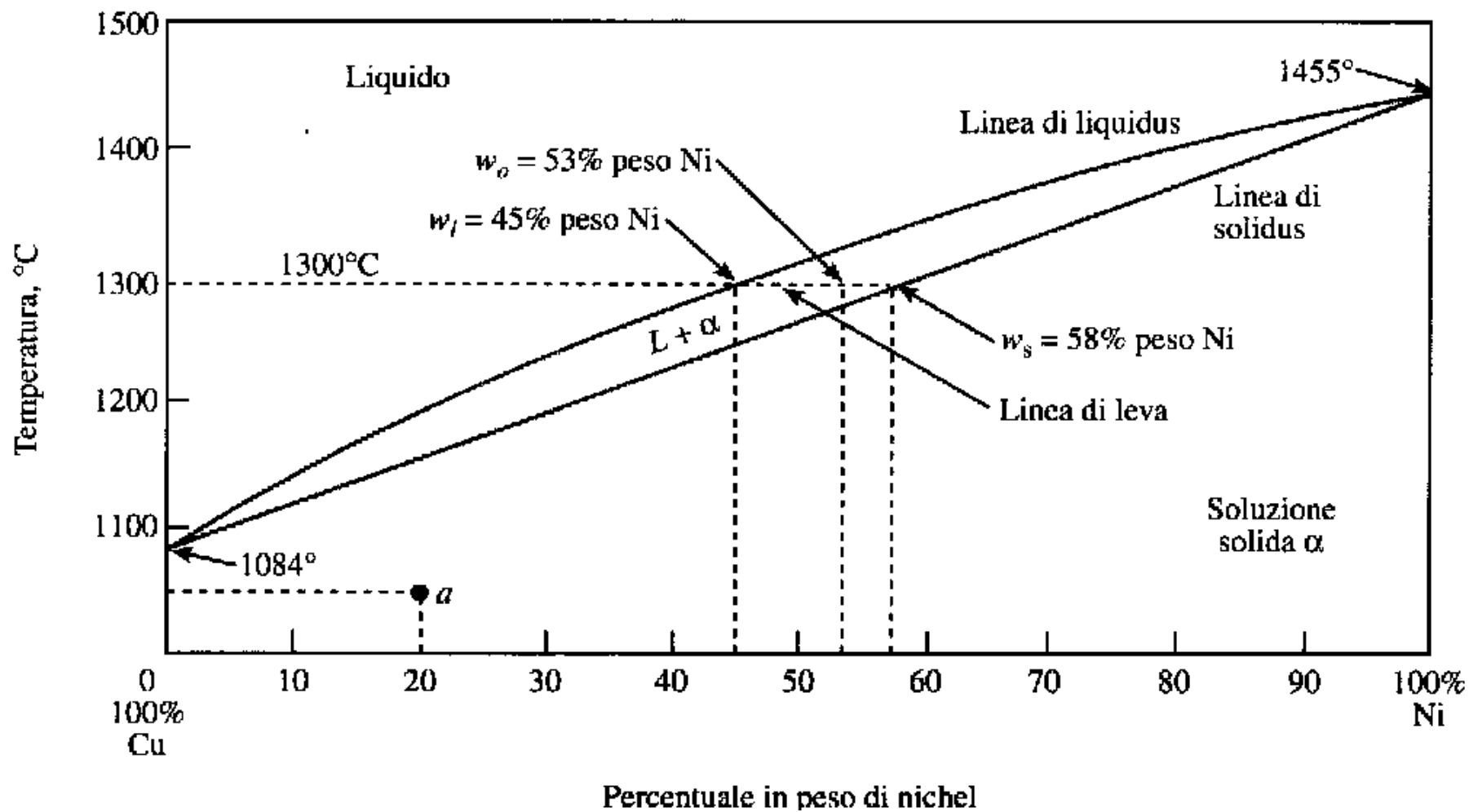
$$W_L = \frac{C_\alpha - C_o}{C_\alpha - C_L} = \frac{a}{a+b}$$

$$W_\alpha = \frac{C_o - C_L}{C_\alpha - C_L} = \frac{b}{a+b}$$

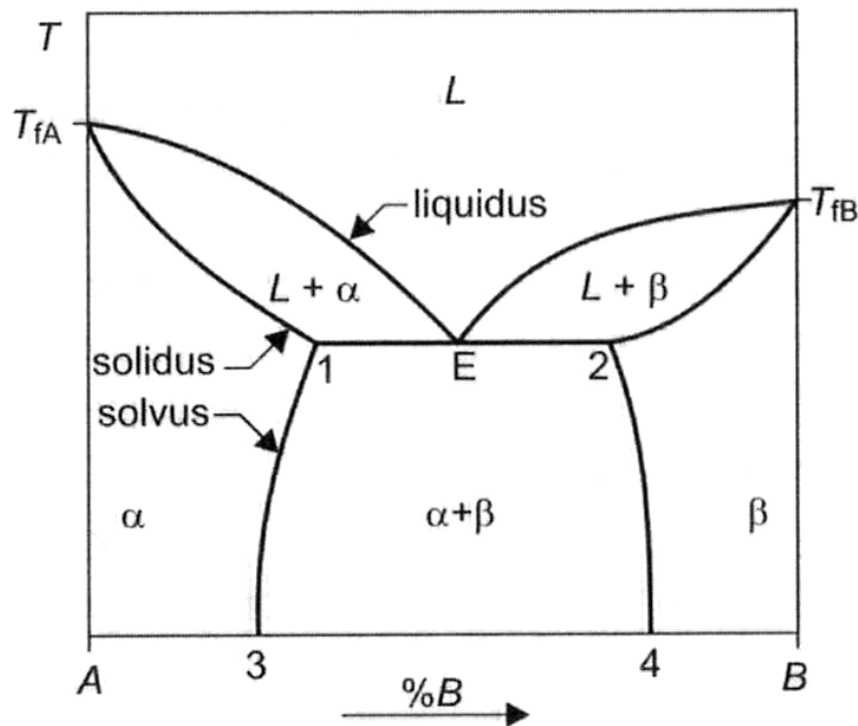
L'interpretazione geometrica porta all'equilibrio dei momenti di una leva, da cui:

$$W_L b = W_\alpha a$$





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.



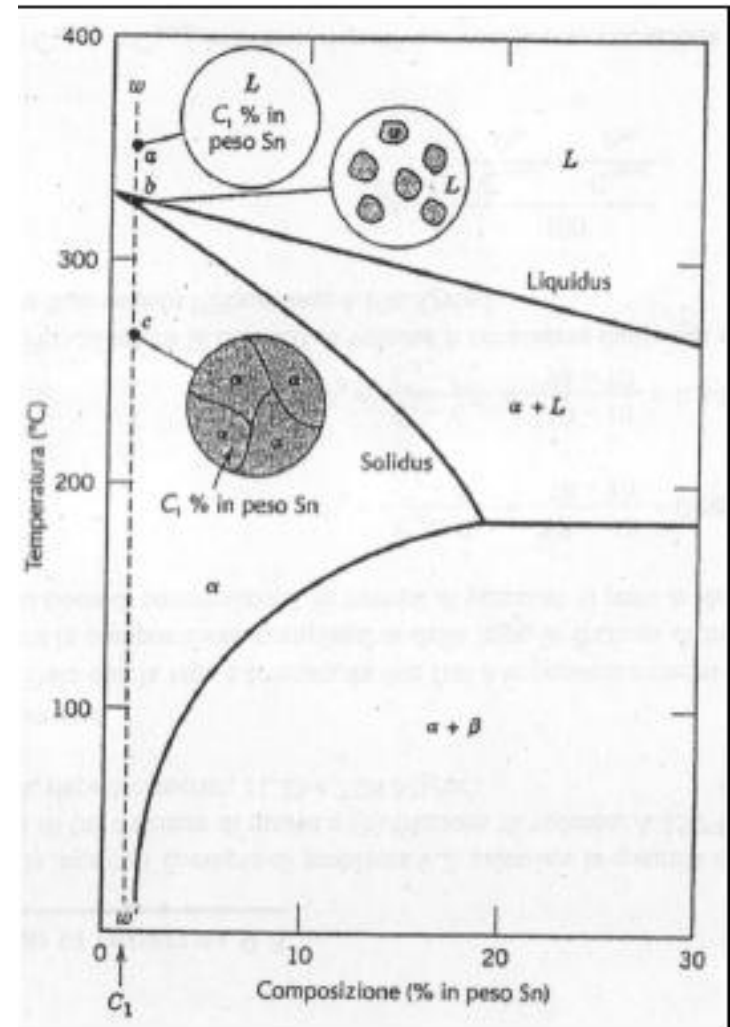
1. Esistono due soluzioni solide,  $\alpha$  e  $\beta$  rispettivamente ricche in  $A$  e  $B$  e con lo stesso reticolo del solvente.
2. La solubilità  $B$  in  $A$  e di  $A$  in  $B$  varia secondo le linee 1-3 e 2-4 (solvus) ed è massima nei punti 1 e 2.
3. Il punto  $E$  (varianza zero) indica 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  $\alpha$  e  $\beta$  le fasi in equilibrio.



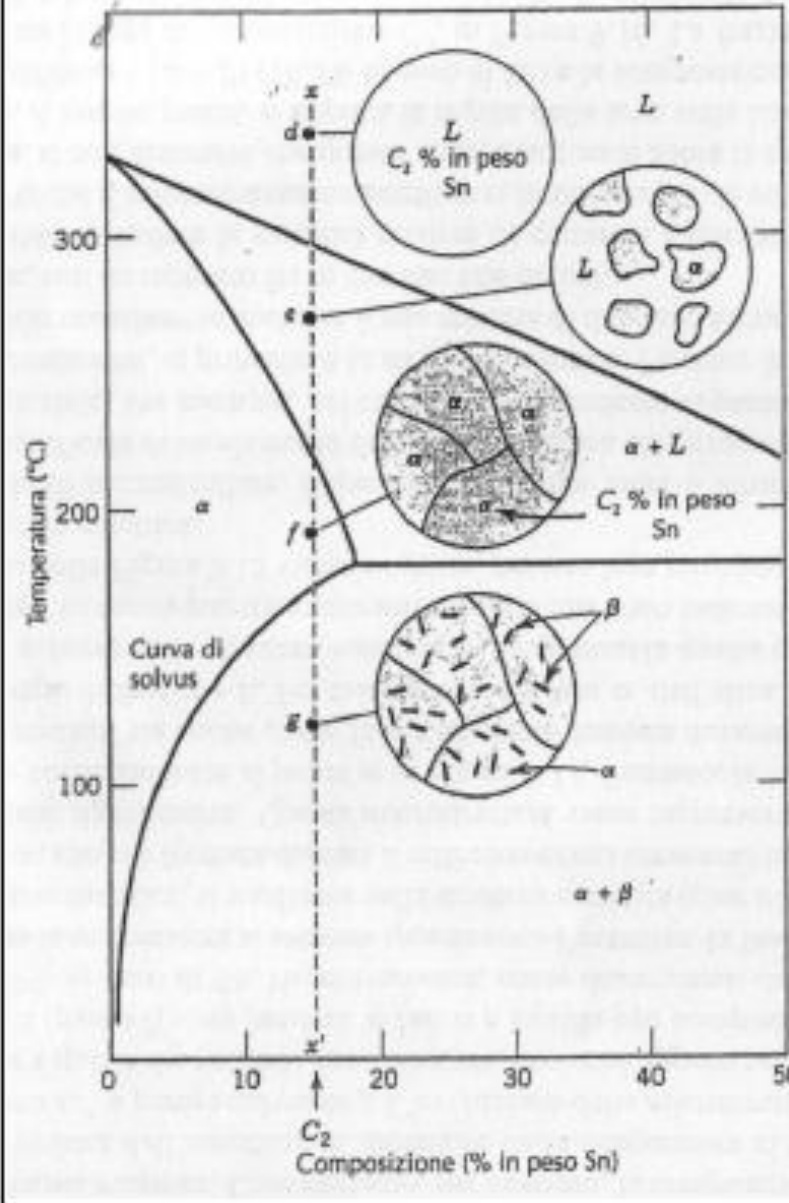
- Composizioni che vanno dal componente puro alla massima solubilità del solido per il componente alla temperatura ambiente (20 °C), nel sistema piombo stagno che consideriamo corrisponde a leghe ricche in piombo con peso in SN tra 0% e 2% oppure leghe con 99%-100% di Sn.

Raffreddata lentamente si ha che la lega rimane liquida fino a 330 °C dove incontra la linea di liquidus, nel breve tratto percorso nella regione  $\alpha + L$  la solidificazione assomiglia al caso di lega binaria in condizioni di equilibrio e si conclude con l'incontro della linea di solidus al di sotto della quale non vi sono più variazioni di microstruttura.

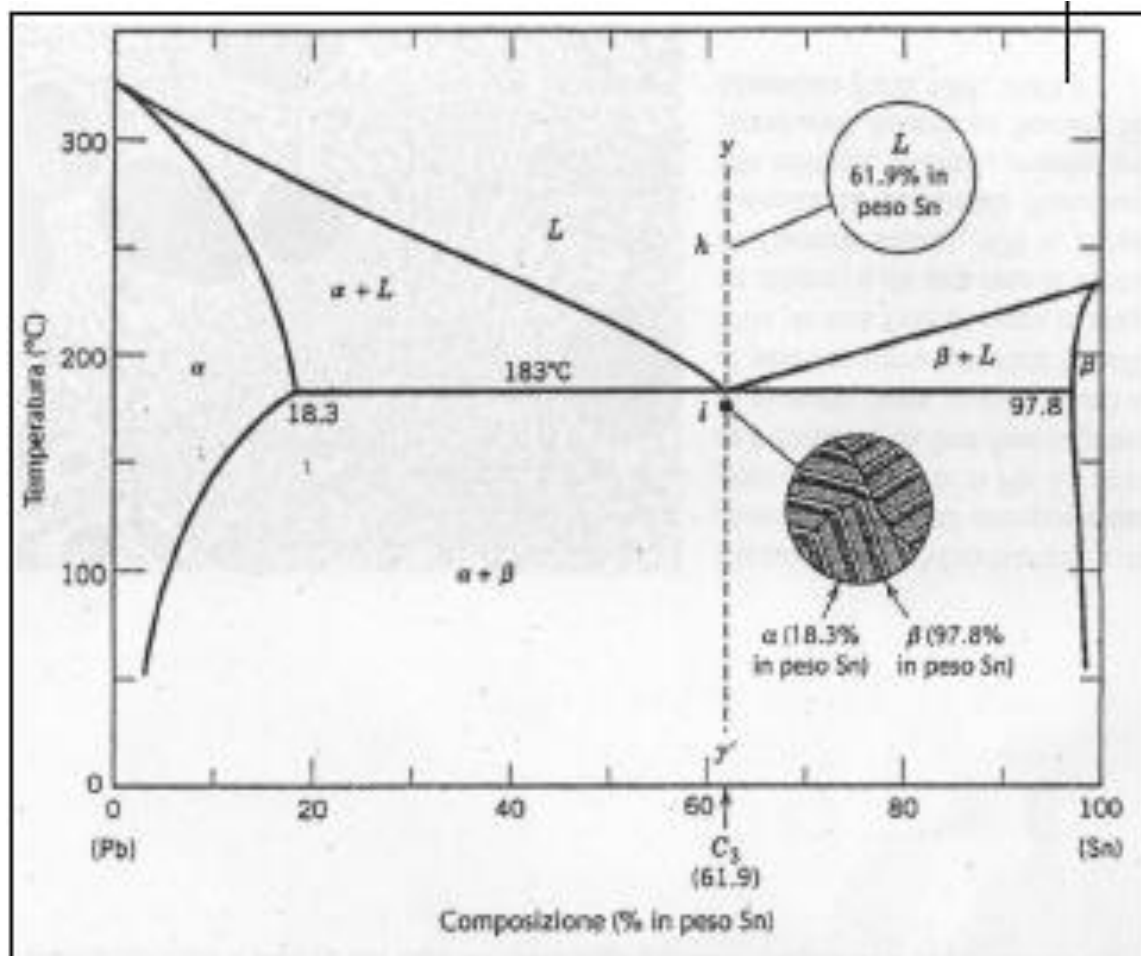


- Il secondo caso è quello che si verifica per composizioni che vanno dalla solubilità limite del solido alla temperatura ambiente a quella massima alla temperatura eutettica, le modificazioni sono del tutto simili a quelle del caso precedente.

Vediamo che al superare la curva di solvus si va oltre il limite di solubilità del solido  $\alpha$  per cui si ha formazione di piccole particelle di fase  $\beta$ , proseguendo col raffreddamento queste particelle aumentano di dimensione visto che al diminuire della temperatura aumenta la frazione di massa della fase  $\beta$ .



- Il terzo caso è quello relativo alla solidificazione alla composizione eutettica, si ha che al diminuire della temperatura non si verificano cambiamenti fino a che non si raggiunge la temperatura eutettica, dopodiché appena si interseca l'isoterma eutettica il liquido si trasforma nelle due fasi  $\alpha$  e  $\beta$ , nel corso di questa trasformazione ci deve essere necessariamente una redistribuzione dei componenti di piombo e di stagno visto che  $\alpha$  e  $\beta$  hanno diversa composizione e nessuna ha la composizione del liquido.

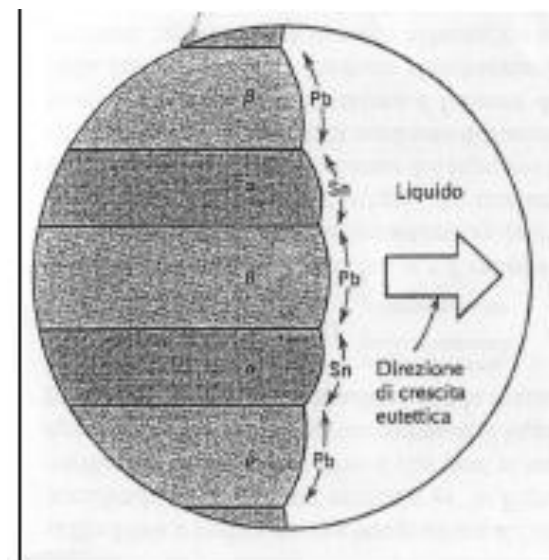


Questa redistribuzione viene realizzata mediante la diffusione degli atomi e la microstruttura risultante è formata da lamine alternate (chiamate lamelle) che si formano simultaneamente durante la trasformazione, la struttura così risultante viene chiamata struttura eutettica. Il successivo raffreddamento da una temperatura appena inferiore a quella eutettica non porta praticamente nessuna variazione rilevante. Schematizzando questa variazione microstrutturale si ha l'immagine a fianco, vediamo che:

- il processo di redistribuzione del piombo e dello stagno avviene per diffusione nel liquido.
- le frecce indicano le direzioni della diffusione degli atomi di piombo e di stagno

la struttura eutettica si forma con questa forma lamellare perché la diffusione degli atomi di stagno e piombi si può così realizzare su distanze relativamente brevi.

---





## 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.

In realtà il tenore di carbonio negli acciai non supera 1.2, ed è quasi sempre compreso tra **0.03 e 0.8**.

Gli acciai sono i materiali metallici di gran lunga più utilizzati con una produzione annua stimata in circa 650 milioni di tonnellate

Gli acciai da costruzione di uso generale (80% della produzione) vengono posti in opera allo stato grezzo di laminazione a caldo o dopo semplici trattamenti termici o meccanici.

In questa categoria rientrano gli acciai profilati per strutture metalliche e gli acciai per armature da calcestruzzo armato e precompresso, per i quali vengono richieste proprietà meccaniche di resistenza (carico di snervamento minimo) più che la composizione chimica .

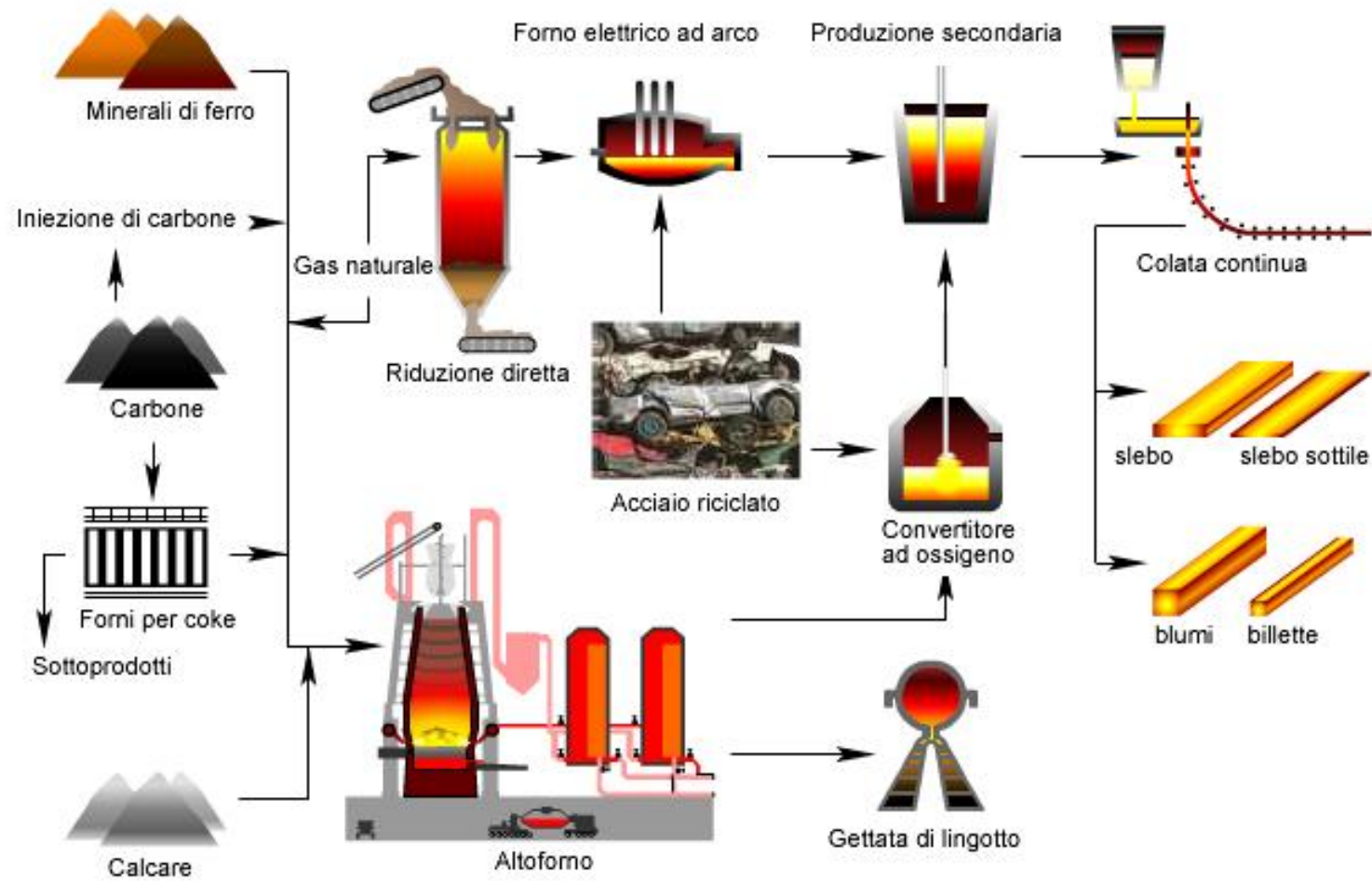
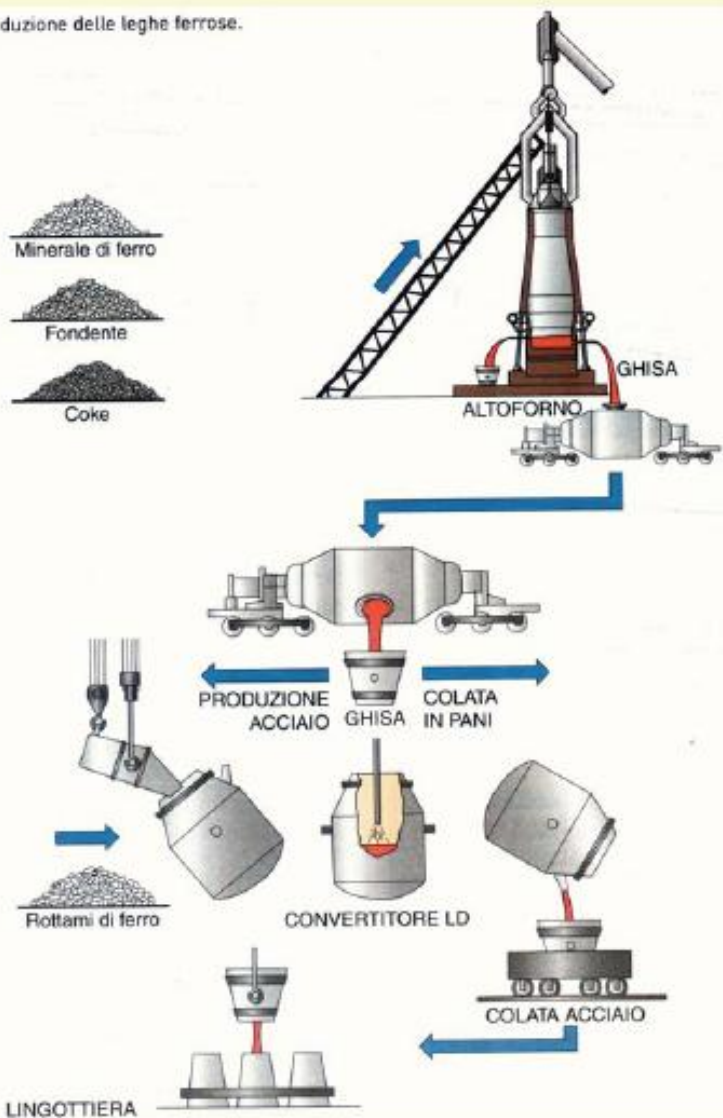


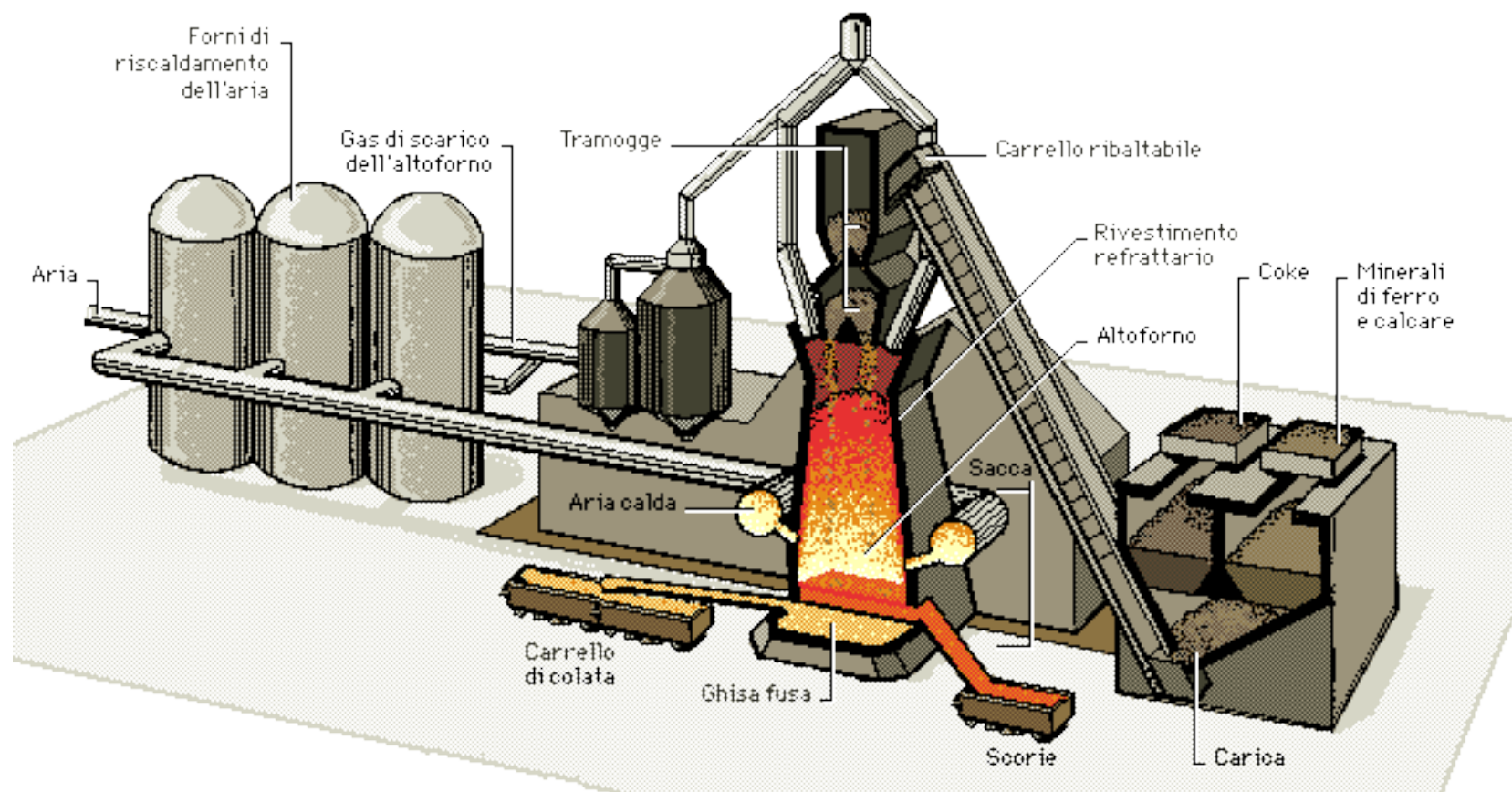
Illustrazione schematica del ciclo siderurgico



# PRODUZIONE GHISA E ACCIAIO

Processo di produzione delle leghe ferrose.





La ghisa che si ottiene direttamente nell'altoforno dai minerali di ferro, tramite processi detti siderurgici è detta *ghisa d'altoforno* oppure *ghisa di prima fusione*, *ghisa madre*, *ghisa greggia* e viene prevalentemente usata per produrre, mediante affinazione, i diversi tipi di acciaio. Solo in parte viene rifiuta, sia direttamente sia dopo sottrazione o aggiunta di altri elementi come silicio, manganese, zolfo, fosforo insieme a rottami di acciaio e ghisa, e colata in stampi, per produrre getti destinati all'industria metal meccanica.

*Proprietà:* è dura, fragile, resiste poco alla trazione e alla flessione, è resistente alla compressione e alla corrosione, la ghisa non può subire lavorazioni plastiche in quanto non è malleabile, né a caldo né a freddo; possiede un'ottima fusibilità , fonde a temperatura non molto elevata, è fluida, dà getti sani e compatti, e consente una facile realizzazione di pezzi anche molto complicati.

Le materie prime per la produzione dell'acciaio sono:

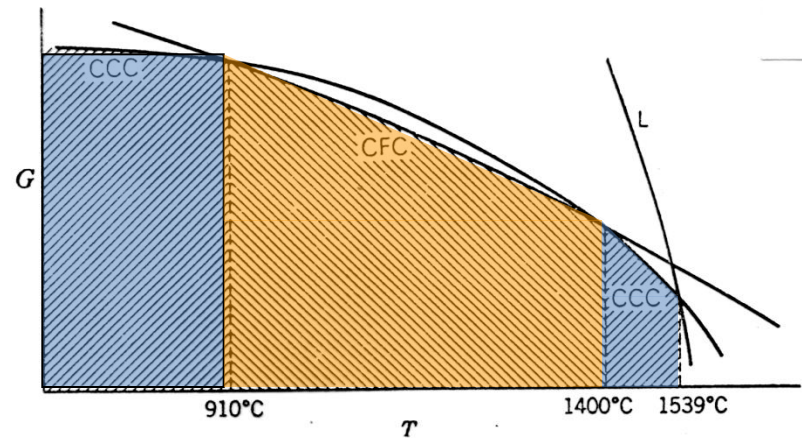
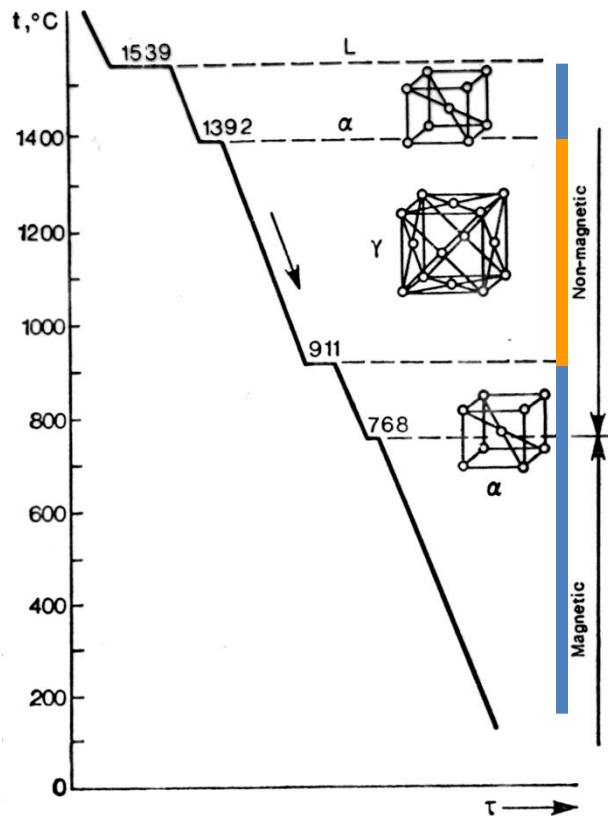
1. la ghisa greggia, proveniente dall'altoforno che viene affinata (riduzione della percentuale del carbonio e delle impurità) e che è la materia prima principale;
2. il rottame di ferro, derivato da recuperi civili e industriali
3. le ferroleghie, che sono leghe di ferro particolari, che non hanno impiego 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.

*Proprietà:* le proprietà dei vari tipi di acciaio dipendono principalmente dalla quantità di carbonio presente e dalla sua distribuzione nel ferro, dalle ferroleghie aggiunte e dai trattamenti termici subiti. Generalmente presentano buone proprietà meccaniche e sono lavorabili per deformazioni plastiche e con le macchine utensili; sono facilmente saldabili.

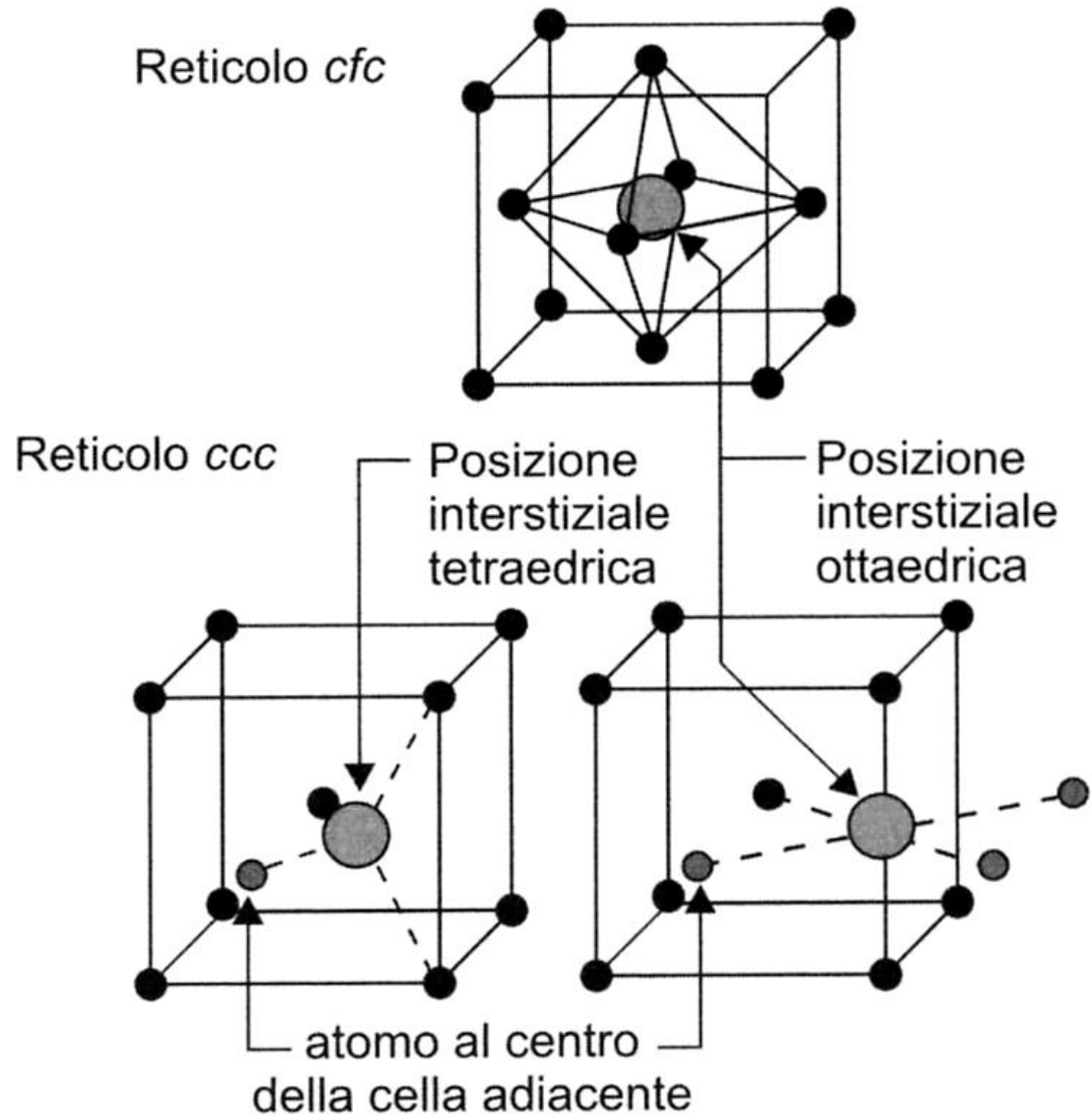
Quindi l'acciaio, che costituisce il più importante prodotto della siderurgia, viene commercializzato in una grande varietà di tipi, ciascuno con caratteristiche diverse, classificabili secondo la composizione chimica, la struttura, il processo di produzione, l'impiego prevalente.

Per studiare le microstrutture di equilibrio delle leghe Fe-C cominciamo ad osservare gli stati di equilibrio del Ferro.

Il ferro presenta, con il variare della temperatura, due forme cristalline di equilibrio, stabili in intervalli di temperatura ben definiti, come giustificato dall'andamento delle loro rispettive curve dell'energia libera.



I **possibili siti** che il carbonio può occupare entro i due reticoli del Ferro sono indicati in figura e chiaramente hanno dimensioni diverse.



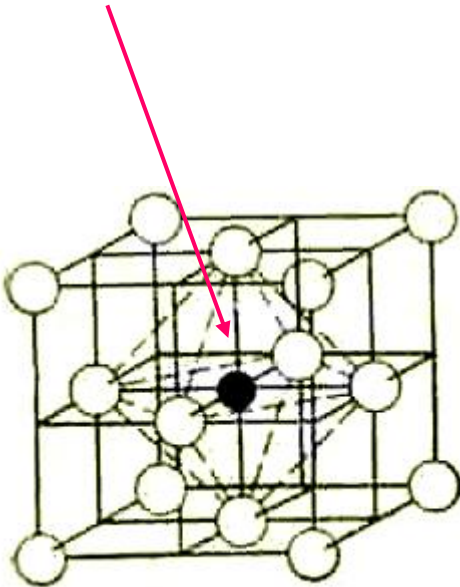
La differente solubilità, da 0,02 a 2,06 (cioè circa da 1 a 100) è dovuta alle differenti dimensioni dei vuoti interstiziali i cui diametri sono:

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

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

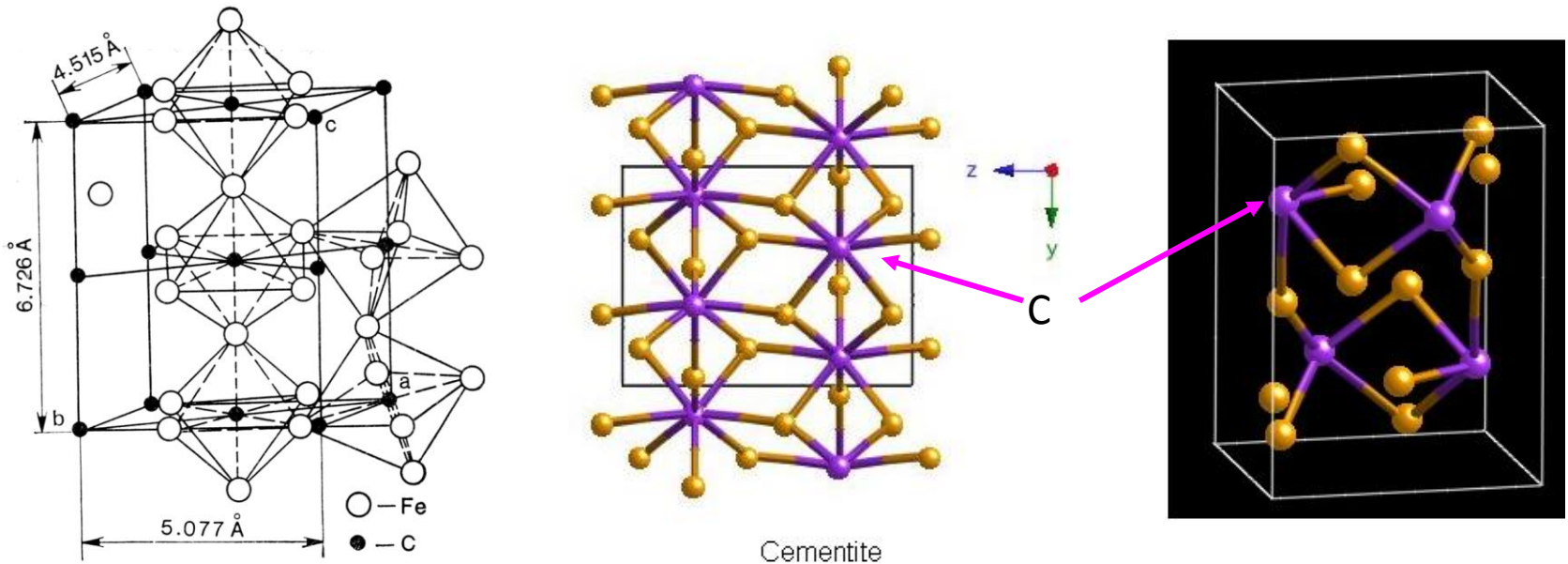
vuoto  $\gamma = 1.06 \text{ \AA}$

*Diametro atomo C = 1.54 \text{ \AA}*





La **Cementite** è un composto intermetallico di formula  $\text{Fe}_3\text{C}$ , 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.

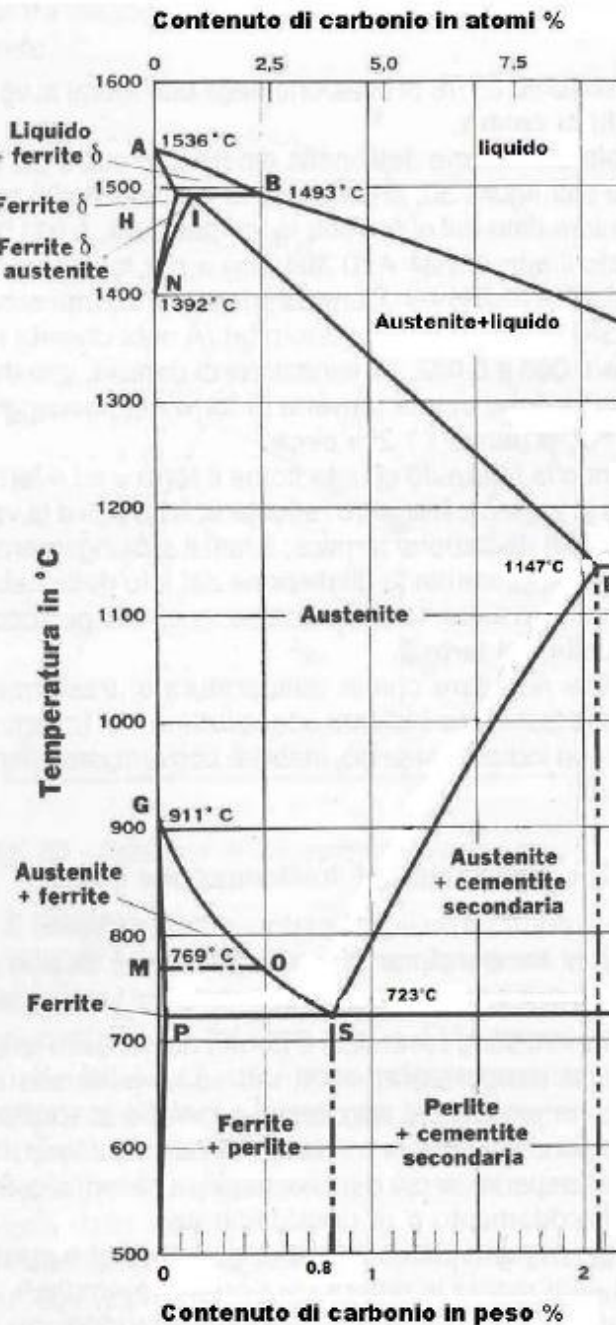


Ciascun atomo di C è circondato da **otto** di Fe, ciascuno dei quali è a sua volta collegato a **tre** atomi di C.

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  $\delta$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha$  o cristalli di Fe  $\delta$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha$
3. fase  $\text{Fe}_3\text{C}$



I costituenti strutturali ( fondamentali ) sono :

**Ferrite ( o Ferrite  $\alpha$  )**

Soluzione solida del carbonio nel Fe  $\alpha$

**Austenite**

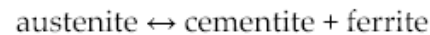
Soluzione solida del carbonio nel Fe  $\gamma$

**Cementite o ( cementite secondaria )**

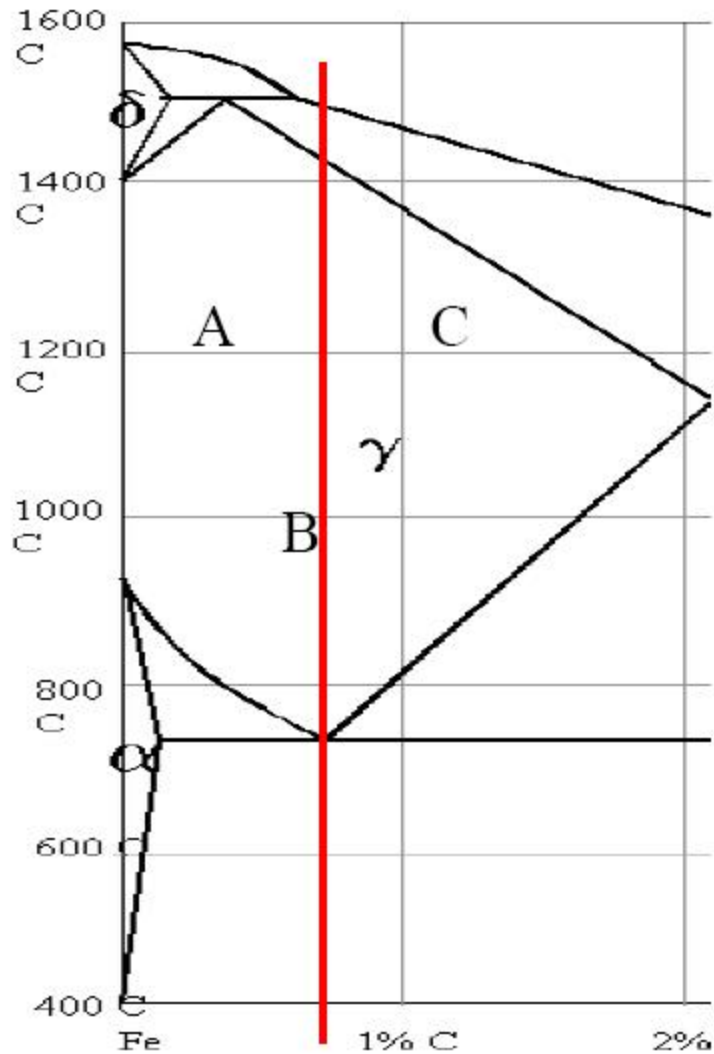
Carburo di ferro interstiziale di formula chimica  $\text{Fe}_3\text{C}$ , si forma per smiscelamento dall'austenite

**Perlite**

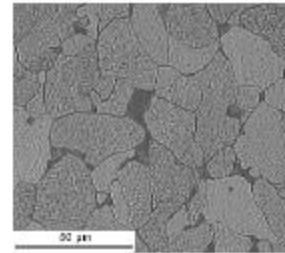
Formata da laminette alternate di ferrite ( tenera e duttile ) e cementite ( dura e fragile ). Si forma raffreddando con opportuna velocità l'acciaio oltre la temperatura eutettoidica ( 723 °C ) attraverso la seguente reazione :



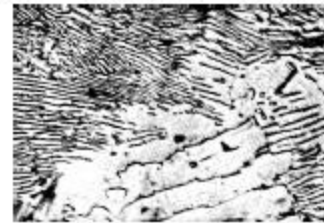
# Tipologie di leghe



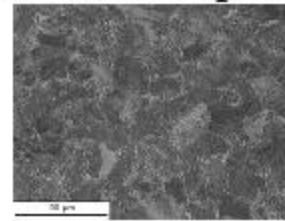
A - Acciai ipo-eutettoidici:  $< 0.8\% \text{ C}$

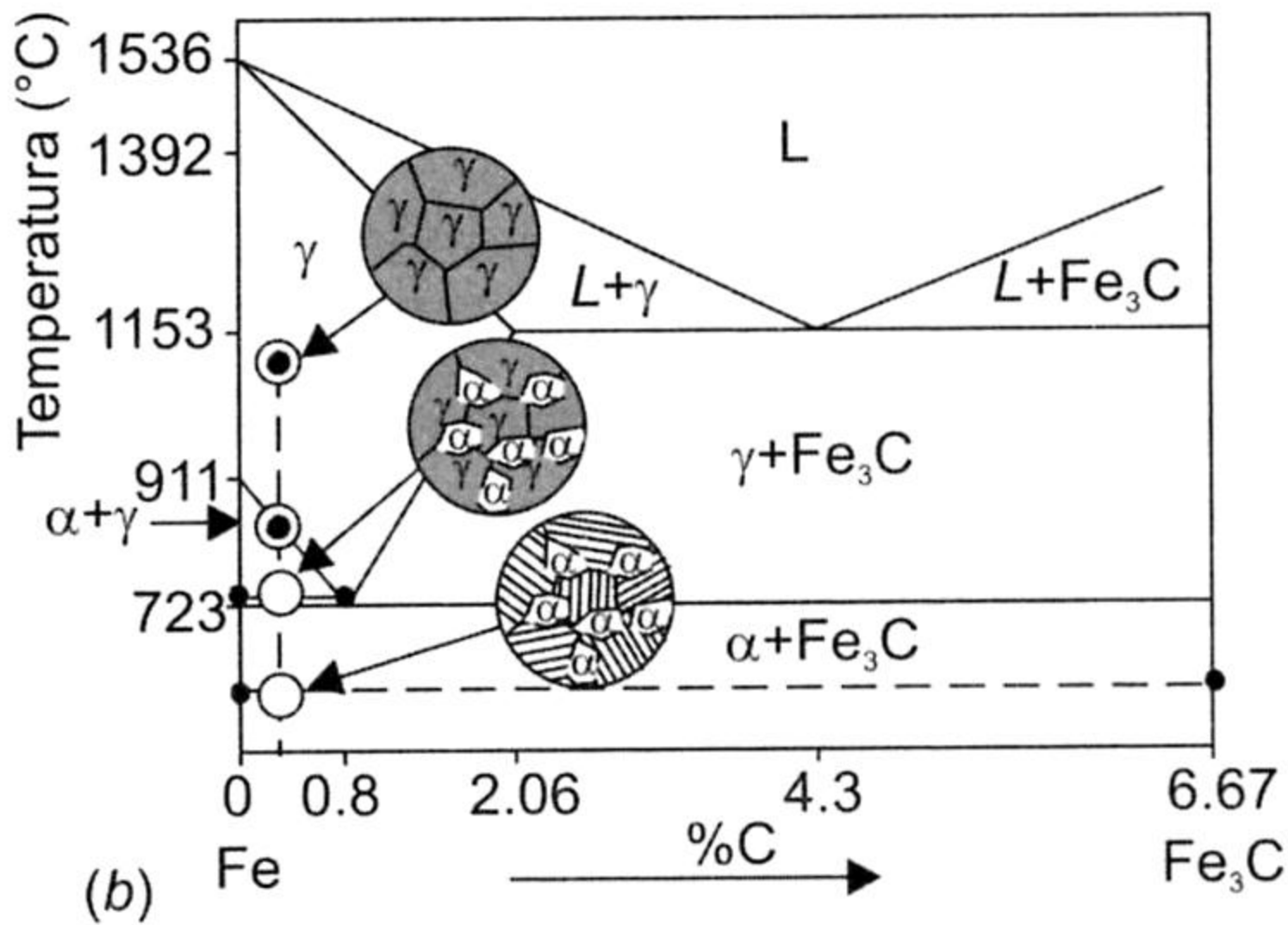


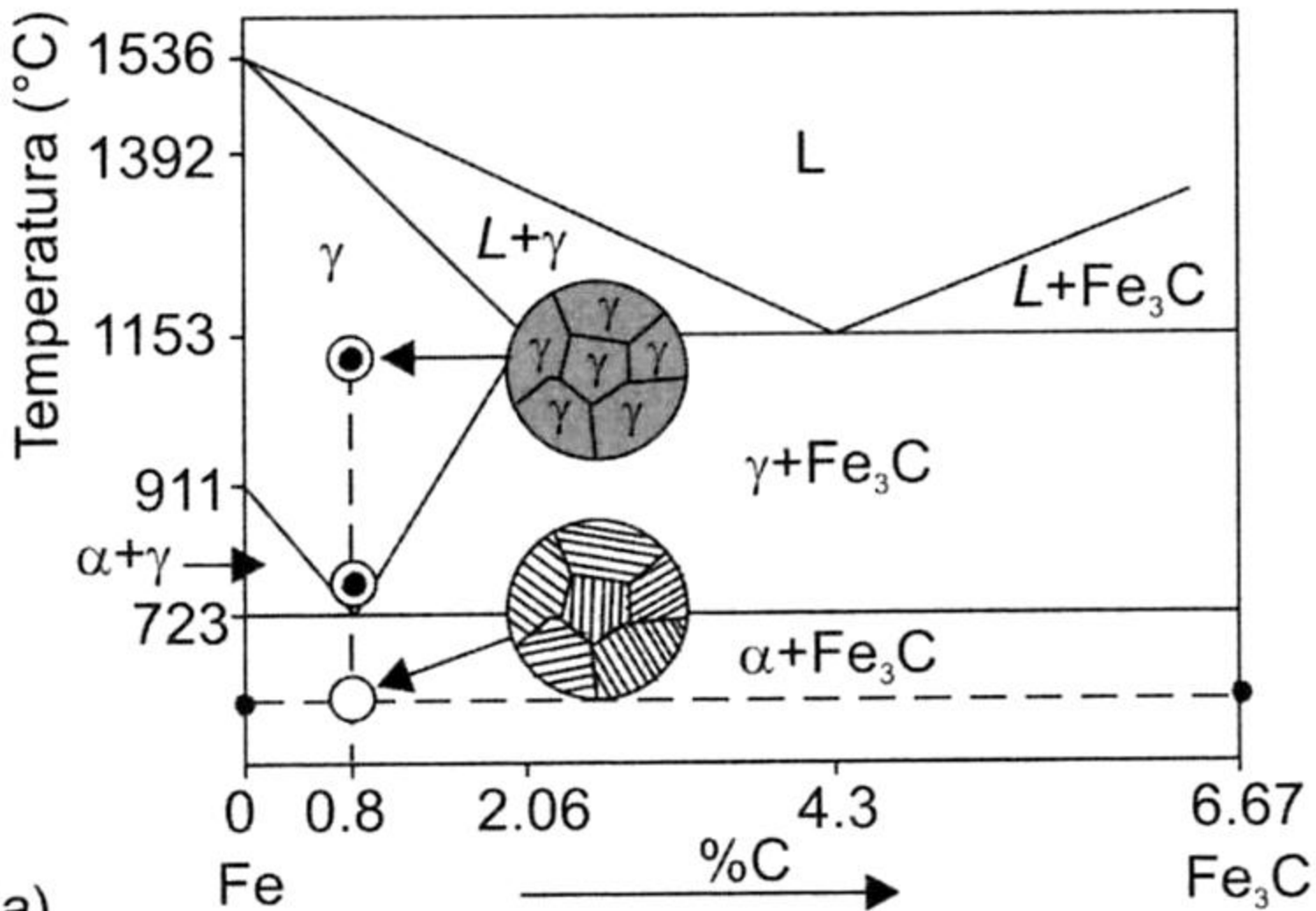
B - Acciai eutettoidici:  $0.8\% \text{ C}$



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



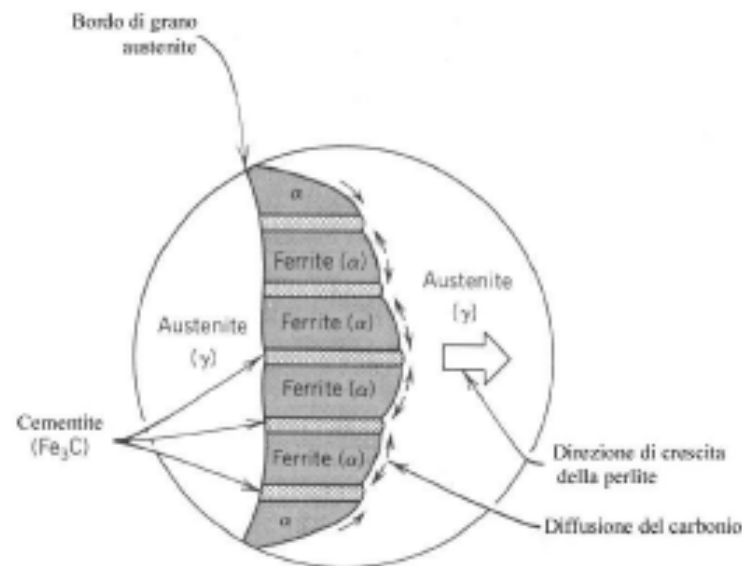




(a)

## Microstrutture degli acciai al carbonio

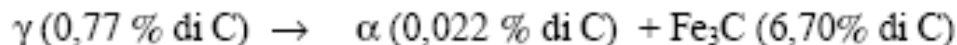
Le microstrutture e dunque le proprietà che gli acciai al carbonio mostrano a temperatura ambiente dipendono dal raffreddamento subito durante il processo di produzione. Guardando il diagramma di fasi si evince che durante il raffreddamento, trascurando la fase  $\delta$ , il liquido forma l'austenite o fase  $\gamma$ . Questa per raffreddamento ulteriore si trasforma in ferrite ( $\alpha$ ) e cementite ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Questo mescolamento si produce grazie alla diffusione del carbonio secondo un meccanismo schematizzato nella figura a fianco.



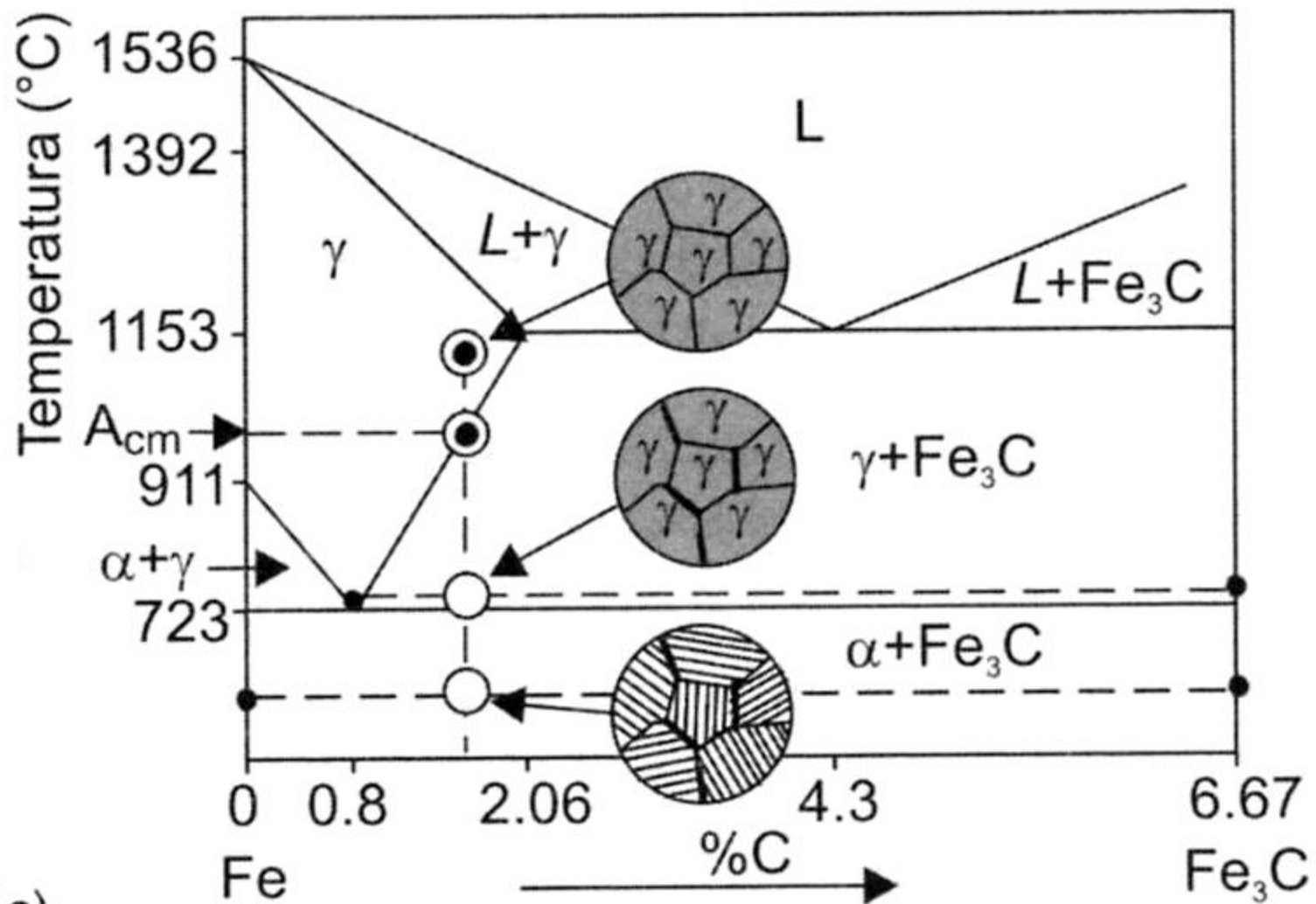
*Rappresentazione schematica della formazione di perlite dall'austenite; le frecce indicano la direzione di diffusione del carbonio.*

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 ( $727^\circ\text{C}$ ) 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)

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  $\alpha$ , 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.



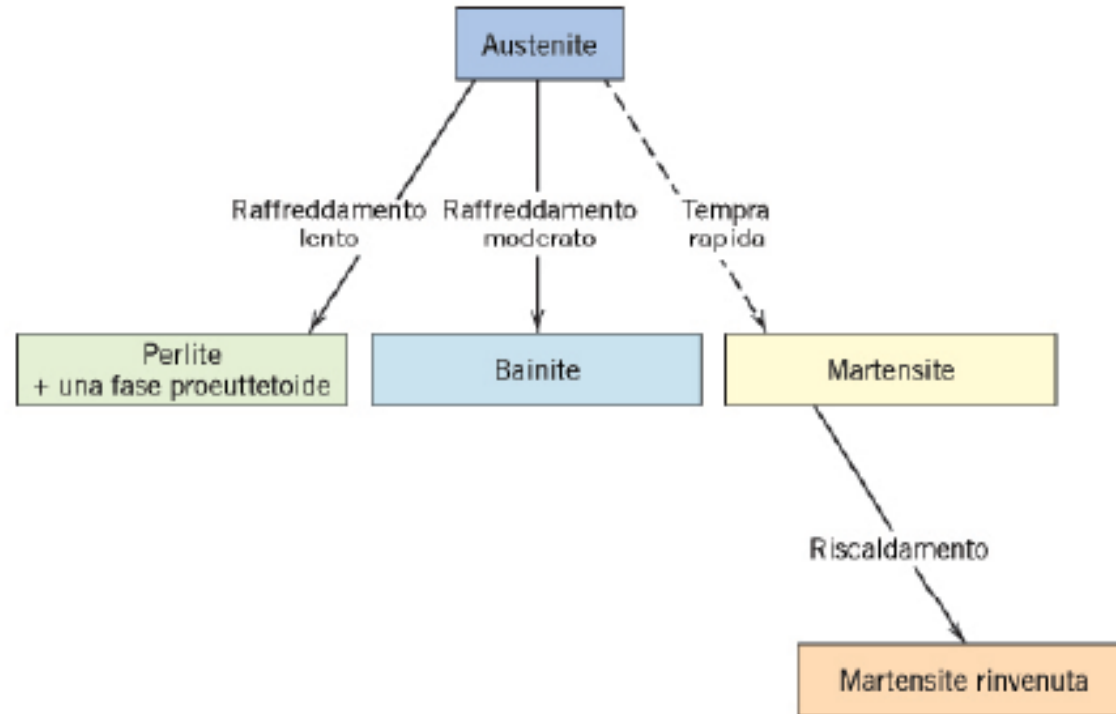
### *Processi termici condotti sugli acciai al carbonio*

- **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  $\gamma$ -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.

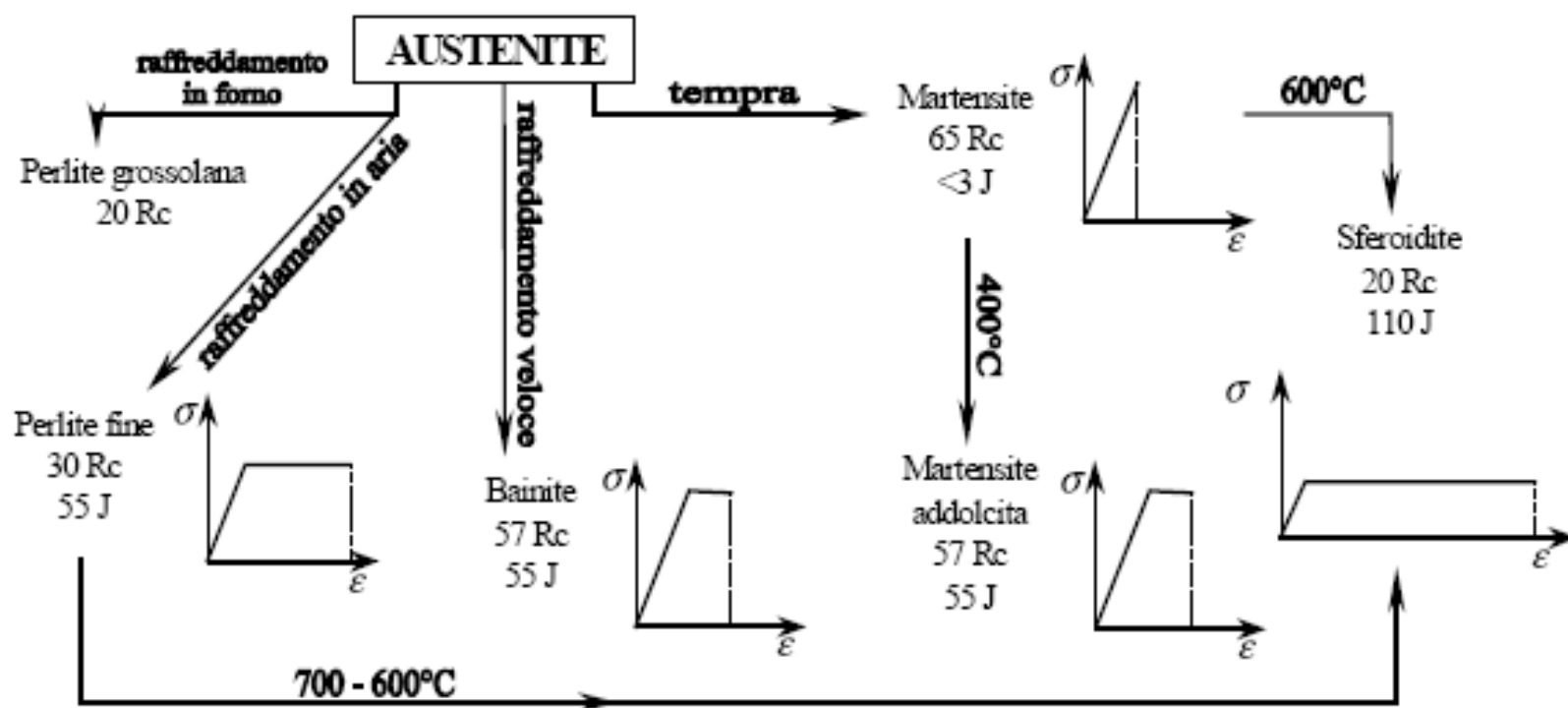
# Riepilogo delle trasformazioni

**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<sub>c</sub>) e tenacità possono essere così riassunti:*



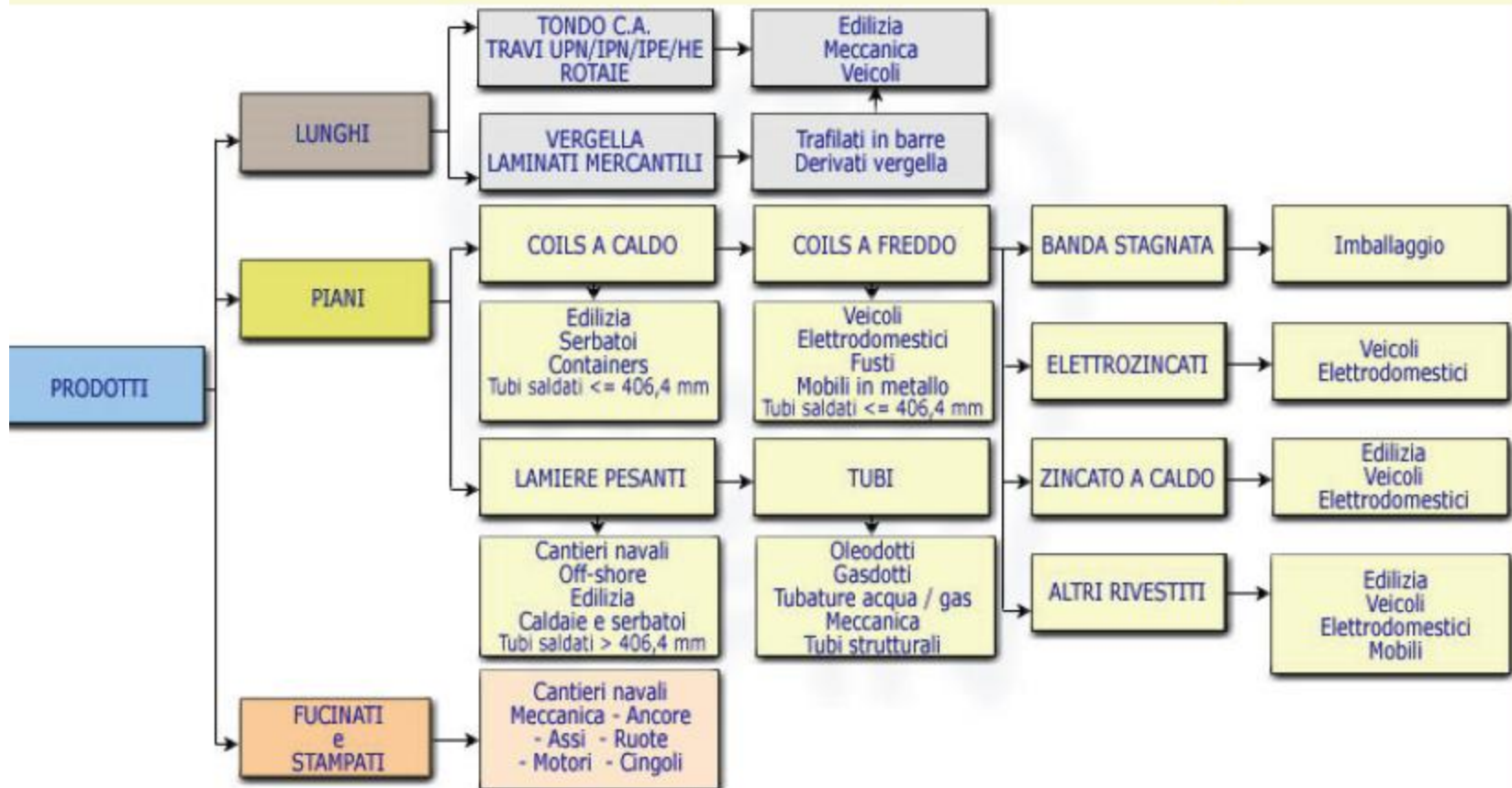
# PROPRIETA' DEGLI ACCIAI

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

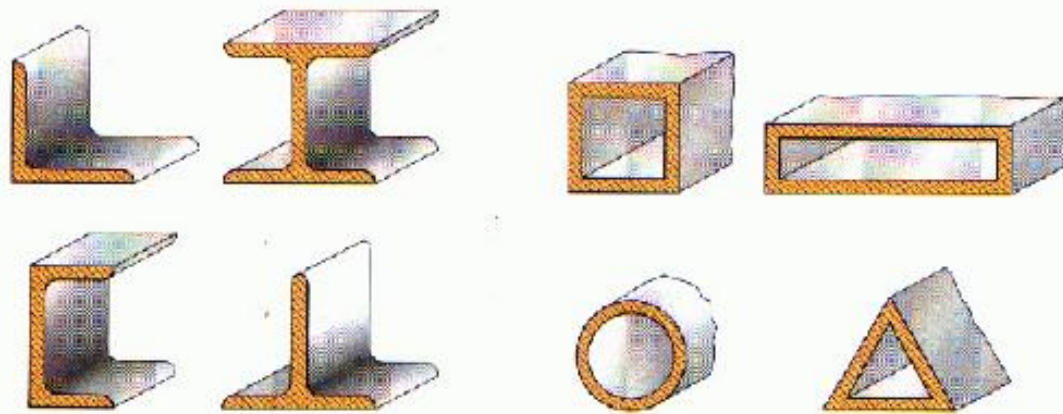
Occorre notare che le proprietà di un acciaio dipendono da molti fattori quali percentuale di carbonio , trattamenti termici , altri elementi di lega . In pratica si fabbricano numerosi tipi di acciai , ognuno adatto per un particolare scopo ( acciaio inox, acciaio per molle, acciaio per utensili , acciaio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

# I SEMILAVORATI DI ACCIAIO

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

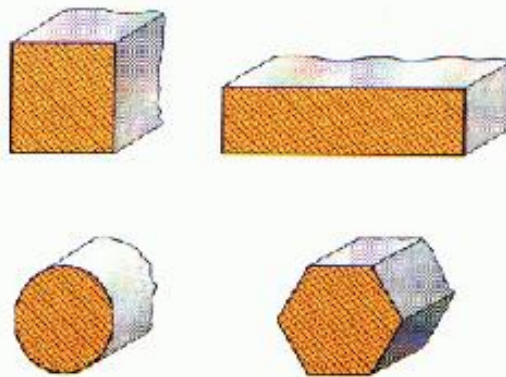


# SEMILAVORATI ACCIAIO



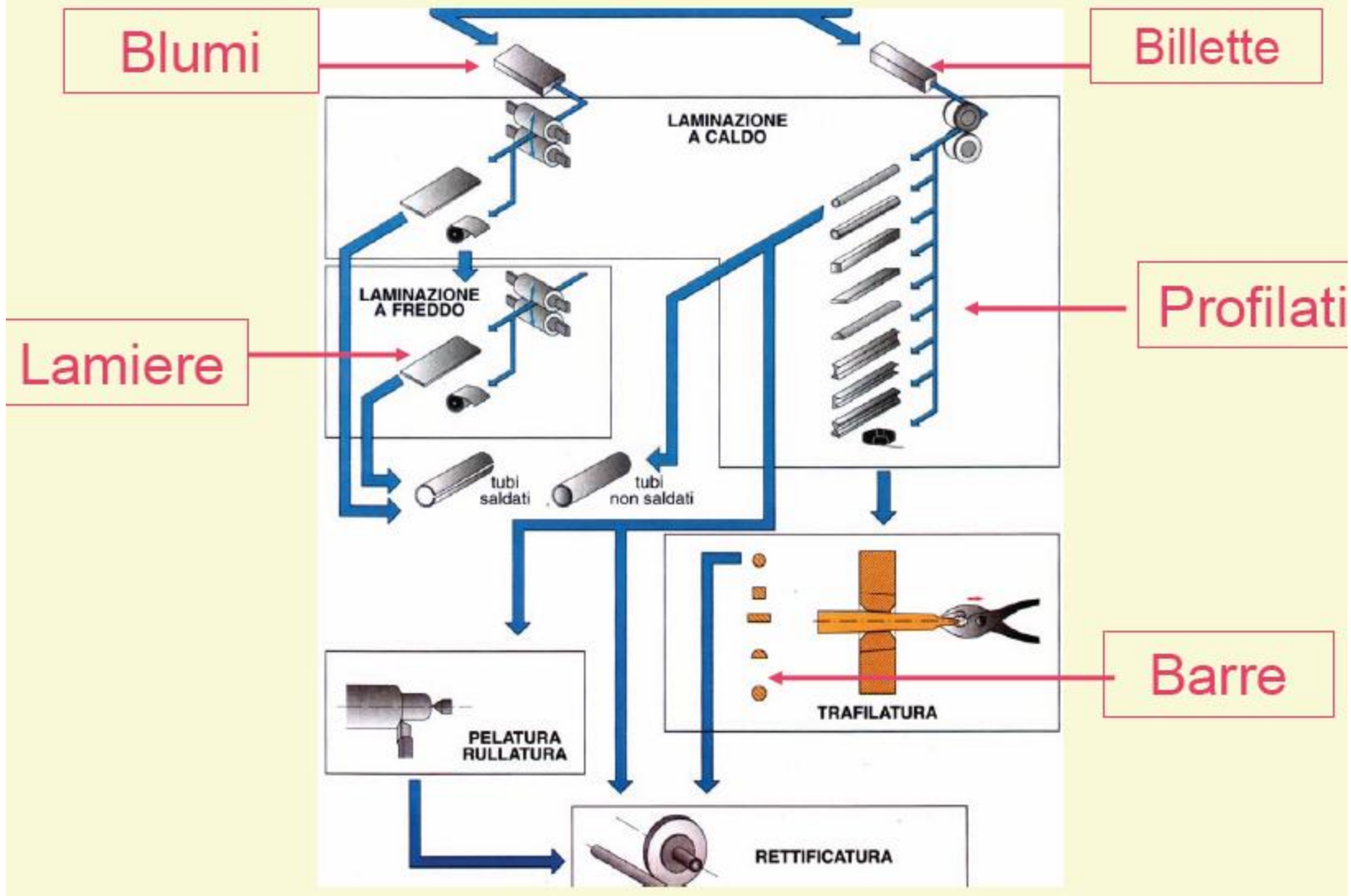
Profilati

Tubi



Barre

# SCHEMA LAMINAZIONE SEMILAVORATI ACCIAIO



## *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 ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$  = 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  $700^\circ\text{C}$ . 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.



# Acciai comuni a basso tenore di C

Microstruttura ferrite e perlite. Aumento della resistenza mediante lavorazione a freddo. Poco resistenti ma tenaci e duttili. I meno costosi da produrre.


**Table 13.1a** Compositions of Five Plain Low-Carbon Steels and Three High-Strength, Low-Alloy Steels

Designation <sup>a</sup>		Composition (wt%) <sup>b</sup>		
AISI/SAE or ASTM Number	UNS Number	C	Mn	Other
<i>Plain Low-Carbon Steels</i>				
1010	G10100	0.10	0.45	
1020	G10200	0.20	0.45	
A36	K02600	0.29	1.00	0.20 Cu (min)
A516 Grade 70	K02700	0.31	1.00	0.25 Si
<i>High-Strength, Low-Alloy Steels</i>				
A440	K12810	0.28	1.35	0.30 Si (max), 0.20 Cu (min)
A633 Grade E	K12002	0.22	1.35	0.30 Si, 0.08 V, 0.02 N, 0.03 Nb
A656 Grade 1	K11804	0.18	1.80	0.60 Si, 0.1 V, 0.20 Al, 0.015 N

<sup>a</sup>The codes used by the American Iron and Steel Institute (AISI), the Society of Automotive Engineers (SAE), and the American Society for Testing and Materials (ASTM), and in the Uniform Numbering System (UNS) are explained in the text.

<sup>b</sup>Also a maximum of 0.04 wt% P, 0.05 wt% S, and 0.30 wt% Si (unless indicated otherwise).

**Source:** Adapted from *Metals Handbook: Properties and Selection: Irons and Steels*, Vol. 1, 9th edition, B. Bardis (Editor), American Society for Metals, 1978, pp. 185, 407.

- 
- Contengono altri elementi di lega quali: Cu, Va, Mn, Ni (<10%)
  - Migliore resistenza
  - Duttili, malleabili
  - Resistono meglio alla corrosione

Designazione AISI (America Iron and Steel Institute) and SAE (Society of Automotive Engineers)

# Proprietà meccaniche

**Table 13.1b** Mechanical Characteristics of Hot-Rolled Material and Typical Applications for Various Plain Low-Carbon and High-Strength, Low-Alloy Steels

<i>AISI/SAE or ASTM Number</i>	<i>Tensile Strength [MPa (ksi)]</i>	<i>Yield Strength [MPa (ksi)]</i>	<i>Ductility [%EL in 50 mm (2 in.)]</i>	<i>Typical Applications</i>
<i>Plain Low-Carbon Steels</i>				
1010	325 (47)	180 (26)	28	Automobile panels, nails, and wire
1020	380 (55)	205 (30)	25	Pipe; structural and sheet steel
A36	400 (58)	220 (32)	23	Structural (bridges and buildings)
A516 Grade 70	486 (70)	260 (39)	21	Low temperature pres- sure vessels
<i>High-Strength, Low-Alloy Steels</i>				
A440	435 (63)	290 (42)	21	Structures that are bolted or riveted
A633 Grade E	520 (75)	380 (55)	23	Structures used at low ambient temperatures
A656 Grade 1	655 (95)	552 (80)	15	Truck frames and rail- way cars

# Acciai a medio tenore di C

Le proprietà meccaniche vengono migliorate attraverso: austenitizzazione, tempra e rinvenimento  
 Microstruttura: Martensite rinvenuta.

**Table 13.2a** AISI/SAE and UNS Designation Systems and Composition Ranges for Plain Carbon Steel and Various Low-Alloy Steels

AISI/SAE Designation <sup>a</sup>	UNS Designation	Composition Ranges (wt% of Alloying Elements in Addition to C) <sup>b</sup>			
		Ni	Cr	Mo	Other
10xx, Plain carbon	G10xx0				
11xx, Free machining	G11xx0				0.08–0.33S
12xx, Free machining	G12xx0				0.10–0.35S, 0.04–0.12P
13xx	G13xx0				1.60–1.90Mn
40xx	G40xx0			0.20–0.30	
41xx	G41xx0		0.80–1.10	0.15–0.25	
43xx	G43xx0	1.65–2.00	0.40–0.90	0.20–0.30	
46xx	G46xx0	0.70–2.00		0.15–0.30	
48xx	G48xx0	3.25–3.75		0.20–0.30	
51xx	G51xx0		0.70–1.10		
61xx	G61xx0		0.50–1.10		0.10–0.15V
86xx	G86xx0	0.40–0.70	0.40–0.60	0.15–0.25	
92xx	G92xx0				1.80–2.20Si

<sup>a</sup> The carbon concentration, in weight percent times 100, is inserted in the place of “xx” for each specific steel.

<sup>b</sup> Except for 13xx alloys, manganese concentration is less than 1.00 wt%.

Except for 12xx alloys, phosphorus concentration is less than 0.35 wt%.

Except for 11xx and 12xx alloys, sulfur concentration is less than 0.04 wt%.

Except for 92xx alloys, silicon concentration varies between 0.15 and 0.35 wt%.

# Acciai ad alto tenore di C

**Table 13.3** Designations, Compositions, and Applications for Six Tool Steels

AISI Number	UNS Number	Composition (wt%)*						Typical Applications
		C	Cr	Ni	Mo	W	V	
M1	T11301	0.85	3.75	0.30 max	8.70	1.75	1.20	Drills, saws; lathe and planer tools
A2	T30102	1.00	5.15	0.30 max	1.15	—	0.35	Punches, embossing dies
D2	T30402	1.50	12	0.30 max	0.95	—	1.10 max	Cutlery, drawing dies
O1	T31501	0.95	0.50	0.30 max	—	0.50	0.30 max	Shear blades, cutting tools
S1	T41901	0.50	1.40	0.30 max	0.50 max	2.25	0.25	Pipe cutters, concrete drills
W1	T72301	1.10	0.15 max	0.20 max	0.10 max	0.15 max	0.10 max	Blacksmith tools, wood-working tools

\* The balance of the composition is iron. Manganese concentrations range between 0.10 and 1.4 wt%, depending on alloy; silicon concentrations between 0.20 and 1.2 wt% depending on alloy.

Source: Adapted from *ASM Handbook*, Vol. 1, *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, 1990. Reprinted by permission of ASM International, Materials Park, OH.

Sono i più duri resistenti e meno duttili. Utilizzati nello stato indurito e rinvenuto. Resistenti all'usura. Acciai per utensili e stampi. Con Cr, Va, W, Mo formano carburi duri e resistenti.

# Acciai inossidabili

Sono acciai con almeno 10,5% di Cr e al max 1,2% di C;

- La resistenza a corrosione può essere aumentata attraverso aggiunte di Ni e Mo;
- Altamente resistenti alla corrosione in molti ambienti ed in special modo a quello atmosferico;
- Si possono dividere in tre classi sulla base della fase predominante nella microstruttura.

## *Martensitici*

- Possono essere trattati a caldo in modo che la martensite risulti il microcostituente principale;
- Aggiunte di lega in conc. Significative producono alterazioni notevoli del diagramma Fe-Fe<sub>3</sub>C;
- Sono magnetici

## *Austenitici*

- Il campo di esistenza si estende fino a T<sub>amb</sub>
- Rafforzati tramite lavorazione a freddo;
- Sono i più resistenti alla corrosione
- Non sono magnetici

## *Ferritici*

- Rafforzati tramite lavorazione a freddo
- Sono magnetici.

Si possono dividere anche secondo:

- Acciai con tenori di Ni maggiore o minore del 2,5%;
- Resistenza alla corrosione;
- Resistenza all'ossidazione a caldo;
- Resistenza allo scorrimento.

# Acciai inossidabili

408 • Chapter 13 / Types and Applications of Materials

**Table 13.4** Designations, Compositions, Mechanical Properties, and Typical Applications for Austenitic, Ferritic, Martensitic, and Precipitation-Hardenable Stainless Steels

AISI Number	UNS Number	Composition (wt%) <sup>a</sup>	Condition <sup>b</sup>	Mechanical Properties			Typical Applications
				Tensile Strength [MPa (ksf)]	Yield Strength [MPa (ksf)]	Ductility [%EL in 50 mm (2 in.)]	
<i>Ferritic</i>							
409	S40900	0.08 C, 11.0 Cr, 1.0 Mn, 0.50 Ni, 0.75 Ti	Annealed	380 (55)	205 (30)	20	Automotive exhaust components, tanks for agricultural sprays
446	S44600	0.20 C, 25 Cr, 1.5 Mn	Annealed	515 (75)	275 (40)	20	Valves (high temperature), glass molds, combustion chambers
<i>Austenitic</i>							
304	S30400	0.08 C, 19 Cr, 9 Ni, 2.0 Mn	Annealed	515 (75)	205 (30)	40	Chemical and food processing equipment, cryogenic vessels
316L	S31603	0.03 C, 17 Cr, 12 Ni, 2.5 Mo, 2.0 Mn	Annealed	485 (70)	170 (25)	40	Welding construction
<i>Martensitic</i>							
410	S41000	0.15 C, 12.5 Cr, 1.0 Mn	Annealed Q & T	485 (70) 825 (120)	275 (40) 620 (90)	20 12	Rifle barrels, cutlery, jet engine parts
440A	S44002	0.70 C, 17 Cr, 0.75 Mo, 1.0 Mn	Annealed Q & T	725 (105) 1700 (260)	415 (60) 1650 (240)	20 5	Cutlery, bearings, surgical tools
<i>Precipitation Hardenable</i>							
17-7PH	S17700	0.09 C, 17 Cr, 7 Ni, 1.0 Al, 1.0 Mn	Precipitation hardened	1450 (210)	1310 (190)	1–6	Springs, knives, pressure vessels

Gli acciai possono venir identificati secondo due tipi di classificazioni: per applicazioni o per composizione.

Suddividendo gli acciai per applicazione otteniamo il seguente schema:

- ✓ Acciai da costruzione di uso generale, i quali devono sopportare sollecitazioni in opera senza deformarsi o fratturarsi oltre limiti ben determinati.
- ✓ Acciai speciali da costruzione, per sollecitazioni più gravose: per cuscinetti, molle, fumi; oppure che possano venir induriti tramite successivi trattamenti: bonifica, nitrurazione, cementazione.
- ✓ Acciai da utensili, con la massima durezza per la lavorazione di altri materiali.
- ✓ Acciai inossidabili, per la resistenza a ossidazione e corrosione.
- ✓ Acciai per usi particolari, che comprendere tutti gli altri acciai che non rientrano nelle categorie succitate: per bassa temperatura, alta temperatura, per impieghi elettrici, ecc.

# Designazione Acciai

Norma **UNI EU 10027** del 1993 ha sostituito la norma **UNI EN 27** che è però ancora comunemente utilizzata.

## CARATTERISTICHE MECCANICHE

<b>Fe</b>	{ valore R (MPa); valore $R_e$ (MPa) preceduto da E	{ eventuale elemento caratterizzante; eventuali indicazioni complementari	Fe 410
<b>FeG</b> (getti)			FeE355Mn FeG440 Fe410D

## IMPIEGO

<b>Fe</b>	lettera indicante l'impiego V, M, P, B, H, D, R	grado di questa caratteristica di impiego	FeB215 FeP03
-----------	---	---	-----------------

## COMPOSIZIONE CHIMICA

*Non legati, destinati a trattamento termico:*

<b>C</b>	100 x %C	{ elemento chimico caratterizzante con cifra; eventuale prefisso grado qualitativo	C40S
<b>GC</b> (getti)			1C35 GC20

*Non legati, per impieghi particolari:*

<b>C</b>	lettera indicante l'impiego: D, B ecc.	100 x C	{ eventuale elemento + cifra caratterizzante; eventuale prefisso grado qualitativo	2CD1S CD30Cr1
----------	---	---------	--	------------------

*Debolmente legati (nessun elemento >5%):*

<b>-</b>	100 x %C	4	{ eventuali prefissi grado qualità	39NiCrMo3
<b>G</b>		{ elementi di lega		{ 10 100 1000

*Legati (almeno un elemento >5%):*

<b>X</b>	100 x %C	{ elementi di lega	%EI	X10CrNi188
<b>GX</b> (getti)				X150CrMo12KU

N.B. Per tutti possono seguire altre lettere indicanti requisiti particolari secondo la UNI 10440.



Considerando invece la composizione otteniamo il seguente schema:

- Acciai non legati (non contengono altri elementi in lega oltre a Fe e C se non impurezze)
  - A basso contenuto di carbonio
    - Normali
    - Alta resistenza, bassa lega
  - A medio contenuto di carbonio
    - Normali
    - Da trattamento termico
  - Ad alto contenuto di carbonio
    - Normali
    - Per utensili
- Acciai legati
  - Per utensili
  - Acciai inossidabili (contengono principalmente Cr e Ni)

## **Acciai al carbonio**

Costituiscono oltre il 90% di tutti gli acciai e contengono una quantità variabile, generalmente inferiore all'1,5%, di carbonio, un massimo di 1,65% di manganese, lo 0,60% di silicio e lo 0,60% di rame. Secondo il tenore o percentuale di carbonio, si dividono in:

**acciai extradolci (meno dello 0,15%);**

**dolci (da 0,15% a 0,25%);**

**semiduri (da 0,25% a 0,50%);**

**duri (oltre lo 0,50%).**

Gli acciai extradolci e dolci sono comunemente indicati come ferro. Parti di macchine, scocche di autoveicoli, la maggior parte delle strutture di acciaio degli edifici, scafi delle navi, chiodi, viti e bulloni sono solo alcuni dei prodotti realizzati con acciai al carbonio.

# Tipologie

## Acciai al carbonio

Impiegati per usi correnti (acciai comuni).

Le loro proprietà dipendono dal tenore di carbonio

Tracce di altri elementi, quali manganese (0,2-1%) e silicio (0,1-0,5%), oltre a fosforo e zolfo, il contenuto dei quali non deve però superare lo 0,034-0,05% in quanto risultano dannosi perché rendono il materiale particolarmente fragile

	<b>C</b>		<b>C</b>
<b>Extradolci</b>	< 0,15%	<b>Dolci</b>	0,15-0,25%
<b>Semiduri</b>	0,25-0,50%	<b>Duri</b>	0,50-0,75%
<b>Extraduri</b>	> 0,75		

## **Acciai legati**

Sono caratterizzati dalla presenza di quantità variabili di uno o più elementi – quali vanadio, molibdeno, manganese, silicio, rame – in percentuali superiori a quelle contenute negli acciai al carbonio. Gli acciai legati vengono usati nella produzione di molti componenti meccanici: bielle, alberi, perni, sterzi, assali dei veicoli, ecc.

## **Acciai debolmente legati ad alta resistenza**

Rappresentano la più recente categoria di acciai e sono noti con la sigla HSLA (acronimo di high-strength low-alloy). Contengono solo piccole quantità di altri elementi quali, ad esempio, vanadio, e dunque sono in generale più economici dei normali acciai legati; vengono prodotti con particolari procedure, capaci di conferire loro una resistenza meccanica, anche alle basse temperature, e una resistenza alla corrosione superiori a quelle degli acciai al carbonio.

# 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%

# Tipologie

## Acciai speciali

Gli elementi di lega possono essere suddivisi in due gruppi:

### Elementi austenizzanti

Allargano la zona di stabilità del ferro  $\gamma$

Elementi a destra del Mn (manganese compreso)

- Cobalto
- Nichel

### Elementi alfojeni

Allargano la zona di stabilità del ferro  $\alpha$

Elementi a sinistra del Mn

- Cromo
- Vanadio
- Alluminio
- Molibdeno
- Tungsteno
- Silicio

# Tipologie

## Acciai speciali

### W (Tungsteno)

Costituente degli acciai rapidi (10-18%) i cui carburi assicurano all'acciaio durezza ed elevata resistenza a rottura anche ad alta temperatura pertanto vengono impiegati per la costruzione di utensili per la lavorazione ad alta velocità dei metalli

Si parla di acciai extrarapidi se oltre a contenere tungsteno (18-19%) contengono anche cromo (4-7%) e vanadio

### Mo (Molibdeno)

Effetti analoghi a quelli del tungsteno e del cromo

# Tipologie

## Acciai speciali

### Si (Silicio)

Accresce nella lega il campo di esistenza della austenite

Diminuisce la deformabilità e soprattutto esalta le caratteristiche magnetiche (diminuzione delle perdite per isteresi magnetica).

Uso in costruzioni elettriche ed elettromeccaniche (trasformatori, motori, alternatori ecc.).

Insieme a piccole quantità di manganese, si ha un aumento del modulo elastico (molle).

### Al (Alluminio)

Altri elementi usati negli acciai speciali sono l'alluminio (acciaio da nitrurazione), il rame (aumenta la resistenza alla corrosione), il vanadio e il cobalto, il titanio, il piombo (favorisce la lavorabilità alle macchine utensili).



# Tipologie

## Acciai speciali

### Acciai Maraging

a basso contenuto di carbonio e contenenti nichel, titanio, alluminio, molibdeno e cromo; un complesso trattamento termico conferisce loro elevatissimo limite di snervamento e alta tenacità

### Acciai patinabili

contengono elementi (vanadio, in particolare) che, sotto l'azione delle intemperie, consentono la formazione di una patina resistente costituita dagli ossidi degli elementi in lega e che rende inutile la verniciatura.

## **Acciai inossidabili**

Contengono cromo (in quantità variabile tra il 12% e il 30%), nichel (fino al 35%) e altri elementi leganti, che li rendono brillanti e li proteggono dall'attacco degli agenti atmosferici e di gas e acidi corrosivi. Presentano una resistenza meccanica non comune, che possono mantenere anche per lunghi periodi a temperature estremamente alte o basse. La brillantezza della loro superficie li rende utilizzabili anche per scopi puramente decorativi. Trovano impiego nella realizzazione di tubature e serbatoi di raffinerie petrolifere e impianti chimici, di aerei a reazione e capsule spaziali, di apparecchiature e strumenti chirurgici, di protesi dentarie e chirurgiche. Molto diffuso l'impiego nella produzione di pentolame, posate e utensili da cucina.

## **Acciai da utensili**

Si usano per produrre la maggior parte degli utensili per lavorazioni meccaniche. In particolare, sono detti acciai rapidi quelli che contengono tungsteno, molibdeno e altri elementi leganti che ne aumentano la resistenza all'usura in lavorazioni ad alta velocità; extrarapidi o super-rapidi quelli che contengono anche cromo.

L'UNI propone una normativa valida in campo europeo (norma UNI EN 10027, parte I e II) che si riassume nella tabella seguente:

Gruppo	I. Acciai designati secondo le caratteristiche meccaniche o l'impiego		II. Acciai designati secondo la composizione chimica			
Sottogruppo	I.1 Caratteristiche meccaniche	I.2 Impiego	II.1 Non legati		II.2 Debolmente legati e legati	
			II.1.1 Per trattamento termico	II.1.2 Per impieghi particolari	II.2.1 Ogni elemento in lega < 5%	II.2.2 Almeno un elemento in lega > 5%
Simbolo iniziale	Fe(G)	Fe	(G)C	(n)C seguita dalla lettera indicante l'impiego	(n)(G)	(n)(G)X
Cifre o lettere per la caratteristica principale	R <sub>min</sub> garantito oppure R <sub>min</sub> garantito preceduto da E	Lettera indicante l'impiego seguita da numero a due o più cifre	Tenore percentuale di carbonio x 100			
Lettere indicanti alcuni elementi in lega	Eventuale simbolo dell'elemento volutamente aggiunto		Eventuale simbolo dell'elemento volutamente aggiunto		Simboli degli elementi in lega caratterizzanti l'acciaio	
Tenore degli elementi in lega o altro	Lettera indicante il grado di insensibilità alla frattura fragile				Tenore percentuale dei principali elementi in lega x4 o x10 o x... a seconda dell'elemento	Tenore percentuale dei principali elementi in lega
Grado qualitativo	Lettera e/o cifra indicante il grado qualitativo					
Requisiti particolari	Eventuali lettere indicanti il requisito soddisfatto					

*Tabella: I simboli in parentesi possono, o non, essere presenti. La lettera G indica l'acciaio per getto.*

*Una lettera n in parentesi indica che può essere presente una cifra indicante il grado qualitativo dell'acciaio. La casella vuota indica che tale parte non si applica.*

Esempi:

*Fe B 400:* Appartiene alla categoria I.2, dove B indica l'impiego per Beton, tondini, fili, trecce, trefoli, laminati lisci a caldo e 400 indica la resistenza allo snervamento in MPa minima garantita.

*X 8 Cr Ni 18 08:* È un acciaio alto-legato (inizia con la X) con lo 0.08 % di C, il 18 % di Cr e l'8 % di Ni; è una tipica composizione da acciaio inossidabile.

## 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 da costruzione

Classe	Sottoclassi
Acciai da costruzione di uso generale:	di base, di qualità.
Acciai speciali da costruzione:	da bonifica, autotemperanti, da cementazione, da nitrurazione, per molle, da cuscinetti.
Acciai inossidabili:	austenitici, ferritici, martensitici, duplex, indurenti per precipitazione, per getti.
Acciai da utensili:	rapidi, per lavorazioni a caldo, per lavorazioni a freddo.
Acciai per usi particolari:	per alta temperatura, per bassa temperatura, maraging, al 13% di manganese.

Rappresentano circa l'80% della produzione. Acciai per profilati per strutture metalliche, acciai per armature per cls armato e precompresso. Vengono classificati in acciai di base e di qualità.

Prodotti con cicli tecnologici semplici, senza aggiunta di microleganti. Sono designati in base alle caratteristiche meccaniche o in base all'impiego. Tenori di S<0.055% e P<0.050%

Piccole quantità di elementi di lega o processi di lavorazione innovativi.

Acciai	Caratteristica principale	Tipo	Composizione (% , valori tipici)						R MPa	R <sub>s</sub> MPa	A %
			C	Mn	Cr	Al	Nb	N			
di base	carico di rottura	Fe320	-	-	-	-	-	-	320	-	12
		Fe410	-	-	-	-	-	-	410	-	-
		Fe490	-	-	-	-	-	-	490	295	15
		Fe590	-	-	-	-	-	-	590	335	11
	carico di snervamento	FeE355	-	-	-	-	-	-	-	355	-
di qualità	HSLA alta resistenza	Nb	0,12	1,0	-	-	0,04	0,03	560	450	-
	HSLA alta resistenza e tenacità	Al-Nb	0,07	1,6	-	0,04	0,06	0,15	590	470	30
	HSLA struttura bainitica	Mn-Nb Mn-Cr-Nb	0,03 0,04	3,5 2,5	- 3,0	- -	0,10 0,02	- -	820 1035	635 850	19 -

# 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.

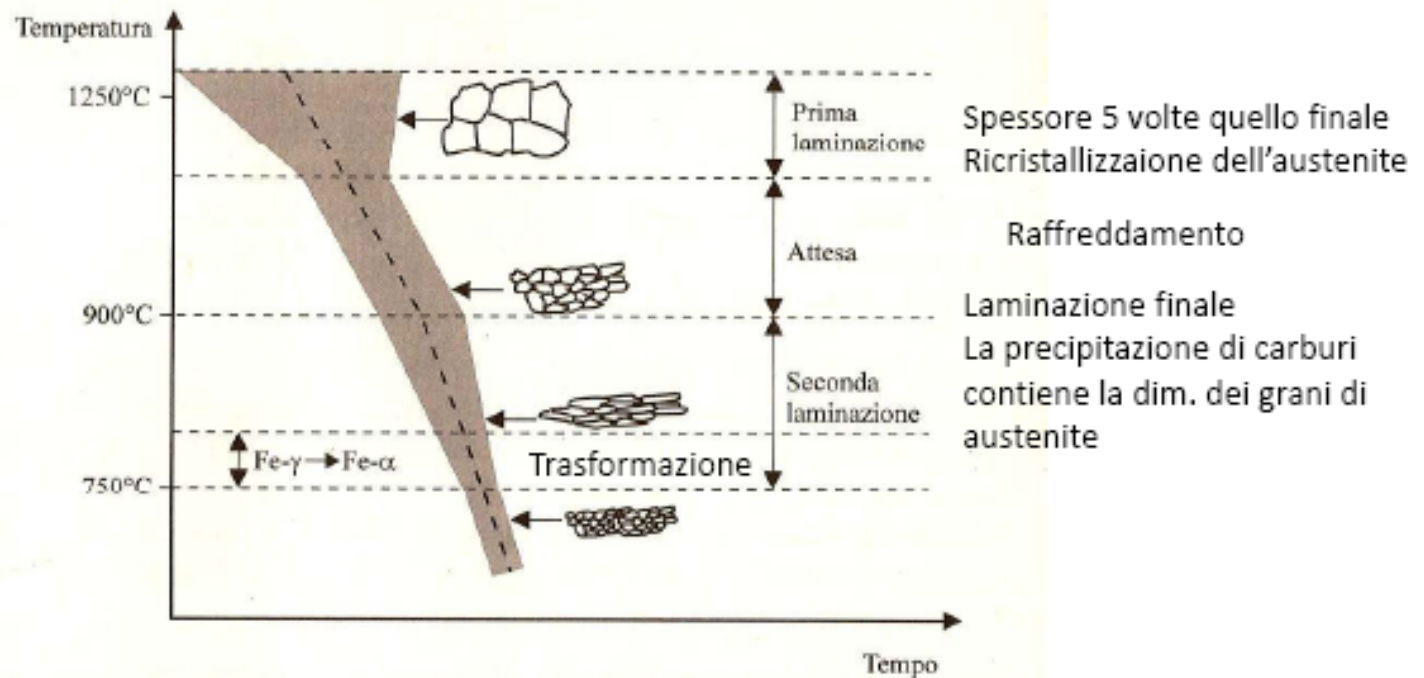


# Sviluppo degli acciai di qualità

L'avvento delle strutture saldate porta alla necessità di ridurre il tenore di C. Si aggiunge il Mn. Per mantenere valori elevati di resistenza e abbassare la temperatura di transizione fragile-duttile, si introduce l'affinamento del grano ferritico con l'aggiunta di Al.

Successivamente, si accresce ulteriormente il carico di snervamento aggiungendo microleganti quali: Nb, Va e Ti. Per migliorare la tenacità: laminazione controllata

Acciai microlegati con carico di snervamento maggiore 450 MPa e  $t$  di transizione  $< -80^{\circ}\text{C}$ .



Rappresentazione schematica delle trasformazioni di una lamiera di acciaio durante la **laminazione controllata**

# Materiali e prodotti per uso strutturale

I materiali e prodotti per uso strutturale devono essere, secondo normativa:

- Identificati mediante descrizione del fabbricante
- Certificati con documentazione di attestazione che documentino proprietà chimiche, fisiche e meccaniche
- Accettati dal Direttore dei lavori mediante controllo delle certificazioni e prove sperimentali aggiuntive

# Gli acciai per uso strutturale

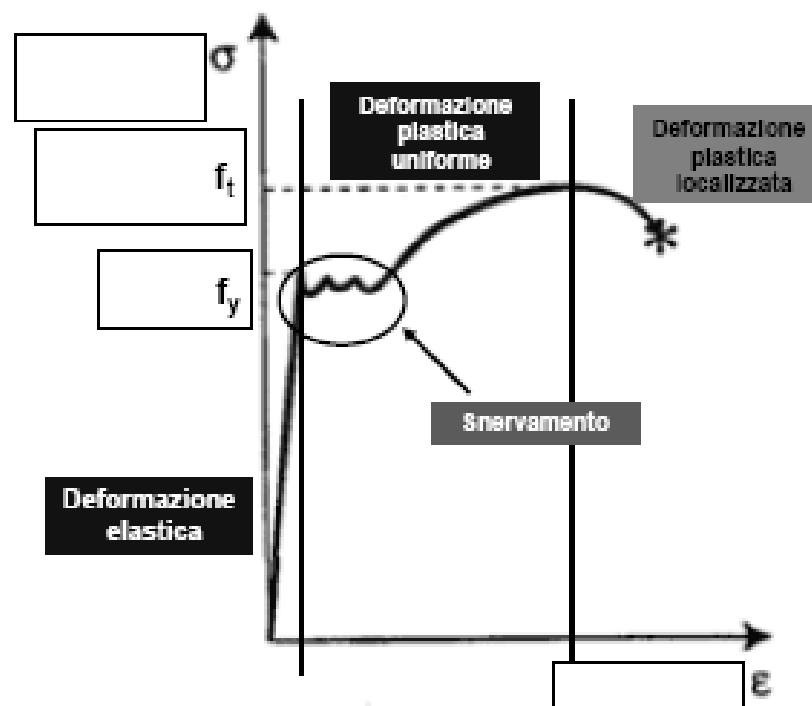
## Prescrizioni comuni a tutti i tipi di acciaio

- I controlli effettuati in fabbrica sono permanenti durante tutto il ciclo di produzione per mantenere uguale livello di affidabilità del prodotto finito indipendentemente dal processo produttivo.
- Il sistema di controllo della qualità deve essere coerente alla normativa UNI EN 9001 e certificato da un ente terzo
- Se al prodotto non fosse possibile applicare la marcatura CE, si esegue una procedura di qualificazione certificata dal Servizio Tecnico Centrale. Tale certificazione ha validità di 5 anni.

# 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%)

$\epsilon_p$  = 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

## Acciaio per cemento armato laminato a caldo

- L'acciaio utilizzato è denominato B450C ed è caratterizzato dai valori nominali delle tensioni di snervamento e rottura seguenti:

$$F_{y \text{ nom}} = 450 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{t \text{ nom}} = 540 \text{ N/mm}^2$$

Tale acciaio deve inoltre rispettare i seguenti requisiti:

# Acciaio per cemento armato laminato a caldo

$$f_{yk} \geq f_{y \text{ nom}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$f_{tk} \geq f_{t \text{ nom}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$1.15 \leq (f_t/f_y)_k \leq 1.35$$

$$(f_y/f_{y \text{ nom}})_k \leq 1.25$$

Allungamento maggiore o uguale al 7.5%  
Inoltre si eseguono prove di piega a 90° e si  
verifica che dopo il raddrizzamento non  
siano presenti cricche.

## Acciaio per cemento armato trafilato a freddo

- L'acciaio è denominato B450A ed ha i medesimi valori nominali di snervamento e rottura dell'acciaio B450C
- È utilizzato per produrre tondini di piccolo diametro, compreso tra 5 e 10 mm
- I requisiti meccanici che deve rispettare sono diversi:



# Acciaio per cemento armato trafilato a freddo

$$f_{yk} \geq f_{y \text{ nom}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$f_{tk} \geq f_{t \text{ nom}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$(f_t/f_y)_k \geq 1.05$$

$$(f_y/f_{y \text{ nom}})_k \leq 1.25$$

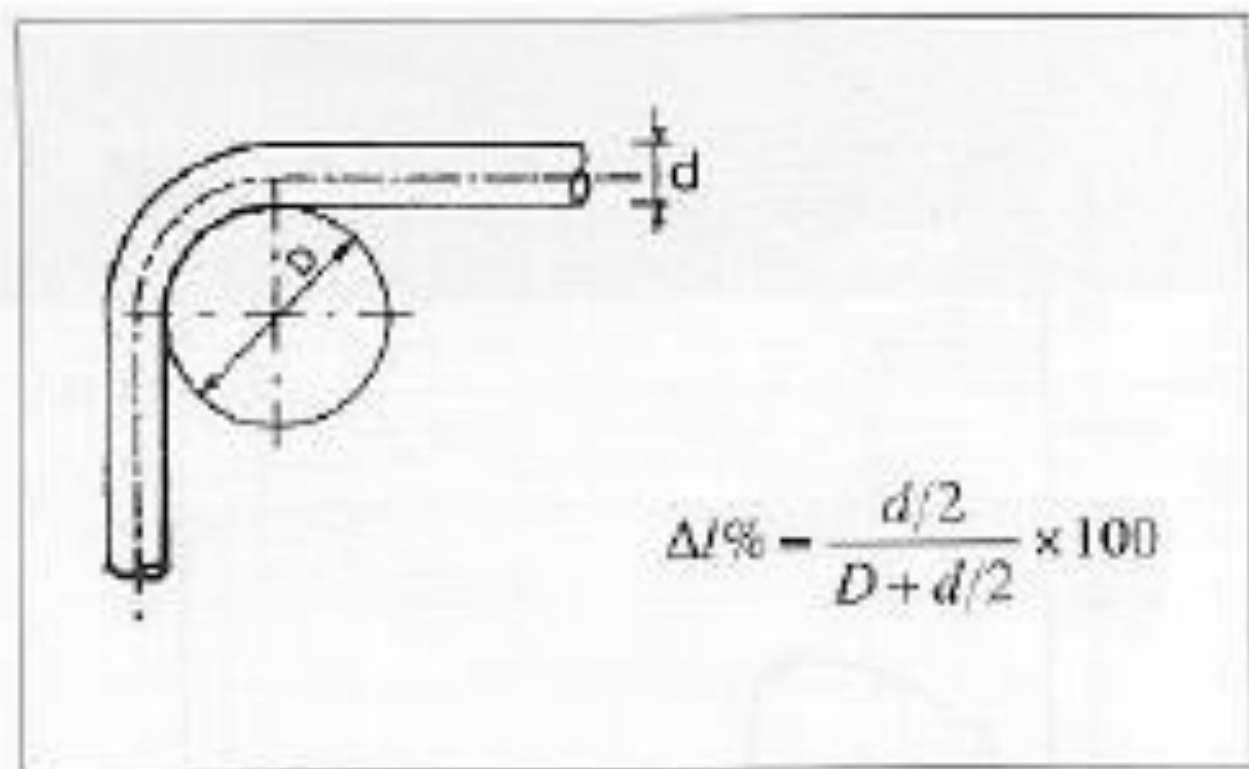
Allungamento maggiore o uguale al 2.5%

Anche per questo acciaio si eseguono prove di piega a 90° (diametro del mandrino è pari a 4 volte  $\phi$ ) e si verifica che dopo il raddrizzamento non siano presenti cricche.

# Accertamento delle proprietà meccaniche

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

## Prove di piega a 90°



# Diametro del mandrino per prove di piega a 90°

Diametro del mandrino per prove di piegamento a 90 ° e  
successivo raddrizzamento senza cricche:

$\phi < 12 \text{ mm}$	4 $\phi$
$12 \leq \phi \leq 16 \text{ mm}$	5 $\phi$
per $16 < \phi \leq 25 \text{ mm}$	8 $\phi$
per $25 < \phi \leq 50 \text{ mm}$	10 $\phi$

# CONFRONTI

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

# Accertamento delle proprietà meccaniche

- Le normative di riferimento sono:
  - UNI EN ISO 15630-1 : barre e vergella
  - UNI EN ISO 15630-2 : reti elettrosaldate

## Accertamento delle proprietà meccaniche

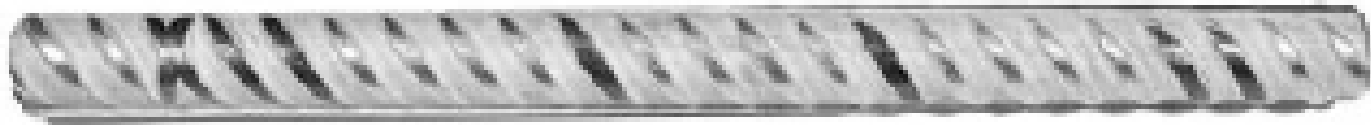
- Per acciai deformati a freddo le prove si eseguono dopo aver mantenuto il provino a 100°C circa per 60 minuti e successivamente raffreddato in aria calma
- Quando lo snervamento non è identificabile, si sostituisce il valore della tensione di snervamento ( $f_y$ ) con il valore della tensione cui corrisponde una deformazione longitudinale plastica residua pari allo 0.2%

# Caratteristiche dimensionali

- L'acciaio per cemento armato viene prodotto in genere sotto forma di barre o rotoli, reti o tralicci per uso diretto o da trasformare ulteriormente.
- Può essere trasformato anche prima di essere fornito al cantiere per ottenere:
  - Elementi presagomati  
(staffe, ferri piegati,...)
  - Elementi preassemblati  
(gabbie per armatura,...)

# 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.





# Caratteristiche dimensionali

## - Barre e rotoli -

- Le barre sono caratterizzate dal diametro della barra liscia tonda equipesante, assumendo la densità dell'acciaio pari a  $7.85 \text{ Kg/dm}^3$
- Il diametro deve essere compreso tra 6 e 50 mm
- Per barre con diametro maggiore di 40 mm la struttura è da considerarsi composta e valgono le regole delle strutture composte acciaio-conglomerato cementizio
- L'uso dei rotoli è ammesso fino a diametri di 16 mm. Vanno verificate attentamente le proprietà meccaniche dell'acciaio dopo il raddrizzamento.

## Tolleranze dimensionali

Le deviazioni ammissibili secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni sono:

$\pm 6\%$	di diametro nominale 5-8 mm
$\pm 4.5\%$	di diametro nominale 8-50 mm

i valori sono espressi in % sulla sezione di impiego

# Accettazione in cantiere degli acciai per armatura

- I controlli sono obbligatori e da effettuarsi su 3 spezzoni per un diametro per ogni lotto di spedizione di acciaio se proveniente da diversi stabilimenti.
- La prova deve essere effettuata entro 30 giorni dalla consegna del materiale in cantiere
- Esistono dei parametri limite per l'accettazione di detti acciai

## Accettazione in cantiere degli acciai per armatura

$f_y$  = tensione di snervamento massima

$A_{gt}$  = Allungamento al carico massimo

$f_y$  minimo: 425 N/mm<sup>2</sup>

$f_y$  massimo: 572 N/mm<sup>2</sup>

$A_{gt}$  minimo: maggiore del 6% per acciai laminati a caldo

$A_{gt}$  minimo: maggiore dell' 2% per acciai trafilati a freddo

# Obblighi del Direttore dei Lavori

Il direttore dei lavori:

- cura il prelievo dei campioni e deve assicurare con sigle o etichettature che i campioni inviati al laboratorio incaricato siano effettivamente quelli prelevati
- sottoscrive la domanda di prove al laboratorio autorizzato, contenente precise indicazioni (in caso di mancata sottoscrizione le certificazioni non hanno valenza ai sensi del decreto)

## Certificati

I certificati emessi dai laboratori devono contenere:

- L'identificazione del laboratorio che rilascia il certificato
- Identificazione univoca del certificato (numero di serie, data emissione, numerazione pagine)
- Identificazione del committente dei lavori in esecuzione e del cantiere di riferimento

Forma		Barre		Rotoli		Reti saldate	
di prodotto	Designazione alfanumerica	B500A	B500B	B500A	B500B	B500A	B500B
	Designazione numerica	1.0438	1.0439	1.0438	1.0439	1.0438	1.0439
$\phi$	(mm)	6-16	6-40	5-16	6-16	5-16	6-16
$f_{yk}$	(MPa)	500	500	500	500	500	500
$(f/f_y)_k$		1,05	1,08	1,05*	1,08	1,05*	1,08
$\epsilon_{uk}$	(%)	2,5	5,0	2,5*	5,0	2,5*	5,0

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

Caratteristiche degli acciai per cemento armato B500A e B500B nelle varie forme di prodotto previste nella norma UNI ENV 10080

Per garantire la le operazioni di saldatura in cantiere, la realizzazione di reti elettrosaldate, secondo il D.M. 9-1-96, è necessario che il contenuto di carbonio equivalente:  $CE=C+Mn/6 +(Cr +Mo+V)/5+(Ni+Cu)/15<0.5\%$

**Riquadro 10.4 Acciai per armature secondo il D.M. 9-1-1996**

Questo decreto ministeriale descrive le tipologie di armatura, le modalità di prova per l'accertamento delle proprietà meccaniche (eventualmente rimandando a specifiche norme EN e UNI) e dell'aderenza con il calcestruzzo, i controlli da effettuare in stabilimento e in cantiere.

Gli acciai per armature vengono divisi in: a) acciai in barre tonde lisce e b) acciai in barre ad aderenza migliorata. Possono essere forniti in rotoli fino a un diametro di 14 mm. La seguente tabella riporta la denominazione dei tipi previsti e le prescrizioni per le proprietà meccaniche (si evidenzia che la denominazione utilizzata dal D.M. non coincide con alcuna delle designazioni viste nel Riquadro 10.1). Per reti e tralicci elettrosaldati dovrà inoltre essere verificato in cantiere che:  $f_d/f_{yk} \geq 1,10$ .

TIPO DI ACCIAIO	$f_{yk}$ (MPa)	$f_{tk}$ (MPa)	$A_5$ (%)
Acciai in barre tonde lisce ( $5 \leq \phi \leq 30$ mm):			
• Fe B 22 k	$\geq 215$	$\geq 335$	$\geq 24$
• Fe B 32 k	$\geq 315$	$\geq 490$	$\geq 23$
Acciai in barre ad aderenza migliorata:			
• Fe B 38 k ( $5 \leq \phi \leq 30$ mm)	$\geq 375$	$\geq 450$	$\geq 14$
• Fe B 44 k ( $5 \leq \phi \leq 26$ mm)	$\geq 430$	$\geq 540$	$\geq 12$
Fili acciaio trafilato ( $5 \leq \phi \leq 12$ mm)	$\geq 390$	$\geq 440 \geq 8$ (su 10 diametri)	
Reti e tralicci elettrosaldati	$\geq 390$	$\geq 440 \geq 8$ (su 10 diametri)	

Per quanto riguarda la duttilità, sono previste prove di piegamento (ad esempio a 180°) o piegamento e raddrizzamento su un mandrino di diametro variabile secondo il tipo e il diametro dell'armatura; dopo la prova, la parte esterna dell'armatura non deve presentare cricche. Per costruzioni in zona sismica il Decreto chiede al progettista di porre attenzione alla duttilità del materiale, dichiarando nella relazione sui materiali i limiti dei rapporti  $f_y/f_{yk}$  e  $(f_t/f_y)_{minimo}$  posti alla base del calcolo e che dovranno essere soddisfatti dall'acciaio impiegato. La circolare del 15-10-96 "Istruzioni al D.M. 9-1-96" suggerisce i valori orientativi:  $f_y/f_{yk} \leq 1,35$  e  $(f_t/f_y)_{minimo} \geq 1,13$ . Questa indicazione ha lo scopo di attirare l'attenzione dei progettisti sulla pericolosità di utilizzare acciai fragili o con tensione di snervamento troppo vicina a quella di rottura.

Per le armature ad aderenza migliorata sono previste verifiche dell'aderenza al calcestruzzo (secondo il metodo "beam test"). Gli acciai saldabili devono essere oggetto di apposita marchiatura e devono rispettare i contenuti massimi degli elementi C (0,22% su analisi di colata), P (0,050%), S (0,050%) e N (0,012%) e il valore massimo del carbonio equivalente ( $CE < 0,50$ ).

I controlli sulle armature dovranno essere effettuati sia in stabilimento (a cura del produttore che dovrà provvedere alla qualificazione e alla marchiatura di ciascun prodotto) sia in cantiere. Le prove in cantiere vengono effettuate presso un laboratorio ufficiale su 3 spezzoni di uno stesso diametro, scelto entro ciascun gruppo di diametri per ciascuna partita prescelta di uno stesso stabilimento, e riguardano la resistenza e la duttilità.

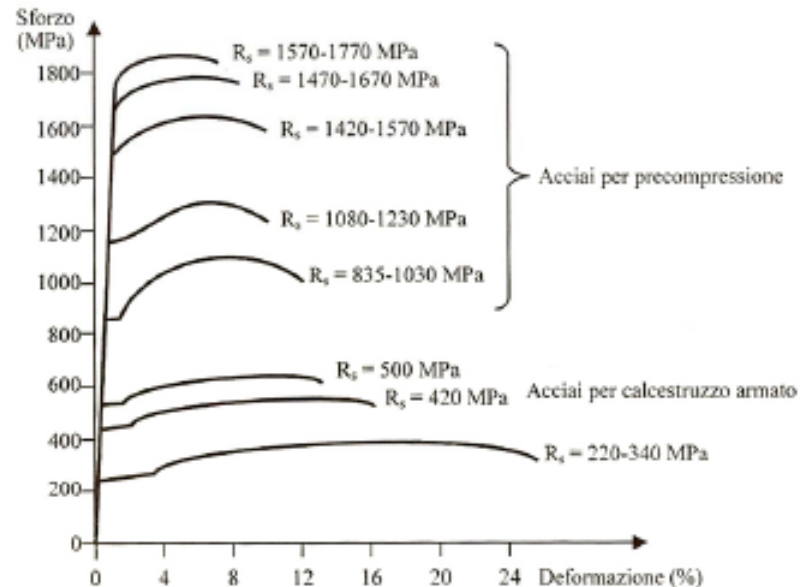
# Acciai ad alta resistenza per c.a.p.

Acciai ad alto snervamento usati per strutture in c.a.p. in forma di: trefoli da 7 fili, fili singoli, barre oppure gruppi di trefoli, fili o barre. La principale caratteristica è l'elevato carico di snervamento (>1000MPa); comunque per garantire valori accettabili di duttilità, la resistenza a trazione deve essere mantenuta entro limiti ragionevoli.

Sono classificati in base a:

- *Tipo*: indica i valori caratteristici del carico di snervamento allo 0.1% ( $f_{p0,1k}$ ) e del carico di rottura ( $f_{pk}$ );
- *Classe*: indica il comportamento a rilassamento
- *Dimensione*
- *Caratteristiche superficiali*.

c.a.p.=  
cemento armato precompresso



# IL CALCESTRUZZO ARMATO PRECOMPRESSO (C.A.P.)



Resistenza (1)	Produtz.	Tipo (2)	$\phi$ (mm)	Composizione chimica (%)				A <sub>10</sub> %	$\Delta\sigma$ <sup>(3)</sup> %
				C	Si	Mn	altri		
835-1030	laminato a caldo,	L	26-36	0,65-0,80	0,65-0,85	1,10-1,70	-	7	3,3
		N	26,5-36						
1080-1230	e stirato, rinvenuto	L	26-36	0,65-0,80	0,65-0,85	1,10-1,70	0,1-0,4 V	6	3,3
		N	26,5-36						
1420-1570	bonific.	L	6-14	0,45-0,65	1,6-2,0	0,4-0,8	0,2-0,6Cr	6	2,0
		N	5-14						
1375-1570	patentato	L	8-12,2	0,7-0,9	0,10-0,35	0,5-0,9	-	6	7,5 (2,0)
1470-1670	trafilato e rinvenuto	L	6-7,5						
		N	5,5-7,5						
1570-1770		L	4,0-5,5						
		N	5						
		7	9,3-15,3						

(1) R<sub>0,2%</sub> - R<sub>r</sub> espressi in MPa.

(2) L = tondo liscio; N = tondo nervato; 7 = trefolo a 7 fili.

(3) Rilassamento per una sollecitazione  $\sigma_1 = 0,7 \cdot R_s$  a 20°C e per 1000 ore.

## Proprietà meccaniche degli acciai da precompressione

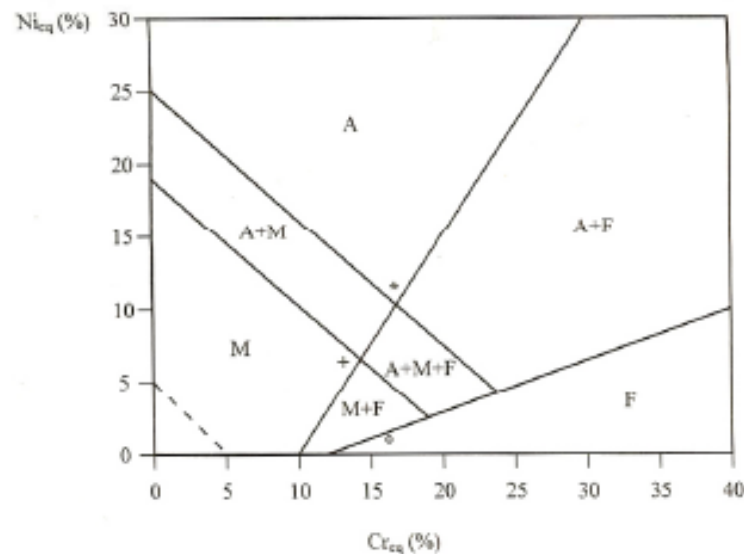
Per quanto riguarda la composizione chimica l'elemento predominante è il carbonio, impiegato fino a tenori pari a 0.9%: Altri elementi sono Mn, Cr, Mo, V. Questi elementi modificano le curve di raffreddamento e quindi la struttura che si ottiene durante il raffreddamento dopo l'ultimo processo di laminazione. La composizione chimica deve essere accuratamente controllata perché non si formino fasi fragili.



# Acciai Inox

Le principali applicazioni nell'ingegneria civile riguardano: l'arredo urbano, le finiture, il restauro di monumenti. Il costo è 7-10 volte quello degli acciai comuni da costruzione.

Diagramma di Schaeffler: microstruttura degli acciai inox in fz della composizione



La resistenza alla corrosione degli acciai inox è dovuta alla capacità di ricoprirsi di uno strato sottile di ossido di solito di cromo che presenta proprietà protettive. Quindi non soffrono di corrosione generalizzata.

La composizione chimica e la conseguente microstruttura nell'acciaio inox determinano sia le proprietà meccaniche sia la resistenza alla corrosione.

Acciai inossidabili più diffusi: microstruttura, denominazione EN e AISI e valori tipici di composizione chimica.

Microstruttura	Sigla EN	Sigla AISI	Elementi di lega (%)					
			C	N	Cr	Ni	Mo	Altri
Ferritica	1.4000	410S	0,04	-	12	-	-	-
	1.4016	430	0,04	-	16,5	-	-	-
Martensitica	1.4028	420	0,30	-	12,5	-	-	-
Duplex	1.4362	S32304	0,02	0,10	23	4,5	-	-
	1.4460	329	0,02	0,09	25	5	1,5	-
	1.4462	S31803	0,02	0,17	22	5,5	3	-
	1.4410	S32750	0,02	0,27	25	7	4	-
Austenitica	1.4372	201	0,05	0,15	17	5	-	Mn
	1.4310	301	0,10	0,04	17	7	-	-
	1.4307	304L	0,02	0,06	18,3	9,2	-	-
	1.4301	304	0,04	0,06	18,3	8,7	-	-
	1.4541	321	0,04	0,01	17,3	9,2	-	Ti
	1.4303	305	0,02	0,02	18	11,5	-	-
	1.4404	316L	0,02	0,06	17,3	11	2,2	-
	1.4401	316	0,04	0,04	16,8	10,7	2,2	-
	1.4406	316LN	0,02	0,14	17,5	11	2,2	-
	1.4571	316Ti	0,04	0,01	17	11	2,2	Ti
	1.4432	316L	0,02	0,06	17	11,7	2,7	-
	1.4436	316	0,04	0,06	17	11	2,7	-
	1.4435	316L	0,02	0,06	17,3	12,7	2,7	-
	1.4438	317L	0,02	0,08	18,3	12,2	3,2	-
	1.4434	317LN	0,02	0,12	17	11	3,2	-
	1.4439	S31726	0,02	0,14	17,3	12,7	4,2	-
1.4539	N08904	0,01	0,06	20	25	4,5	Cu	
1.4547	S31254	0,01	0,20	20	18	6,1	Cu	
1.4652	S32654	0,01	0,50	24	22	7,3	Mn,Cu	

Nelle costruzioni viene utilizzata solo una decina di acciai inox, in maggioranza a microstruttura austenitica.