



MATERIALI

Materiali di interesse per l'ingegneria

- metalli
- plastiche
- ceramici
- compositi
- lapidei
- acqua
- aria
- idrocarburi
- legno

Stati di aggregazione

- solido
- liquido
- gassoso

Perché così tanti materiali diversi?



differenti caratteristiche sono richieste per soddisfare differenti utilizzazioni

Caratteristiche dei materiali

- densità
- resistenza meccanica
- caratteristiche termofisiche
- ottiche
- elettriche
- chimiche
- tecnologiche

Utilizzazione dei manufatti

può essere usato per un aeroplano? e per una nave?
si rompe o si deforma troppo se sollecitato?
che succede se si scalda o si raffredda?
e trasparente? riflettente?
come conduce la corrente elettrica?
si degrada sotto l'azione di agenti ambientali? brucia?
può essere lavorato per ottenere una certa forma?



It's a lamp, what do you want me to say?

Una lampada è composta da uno stelo di supporto, da una parabola, da un interruttore e da una lampadina



La lampadina

Esistono vari problemi da risolvere:

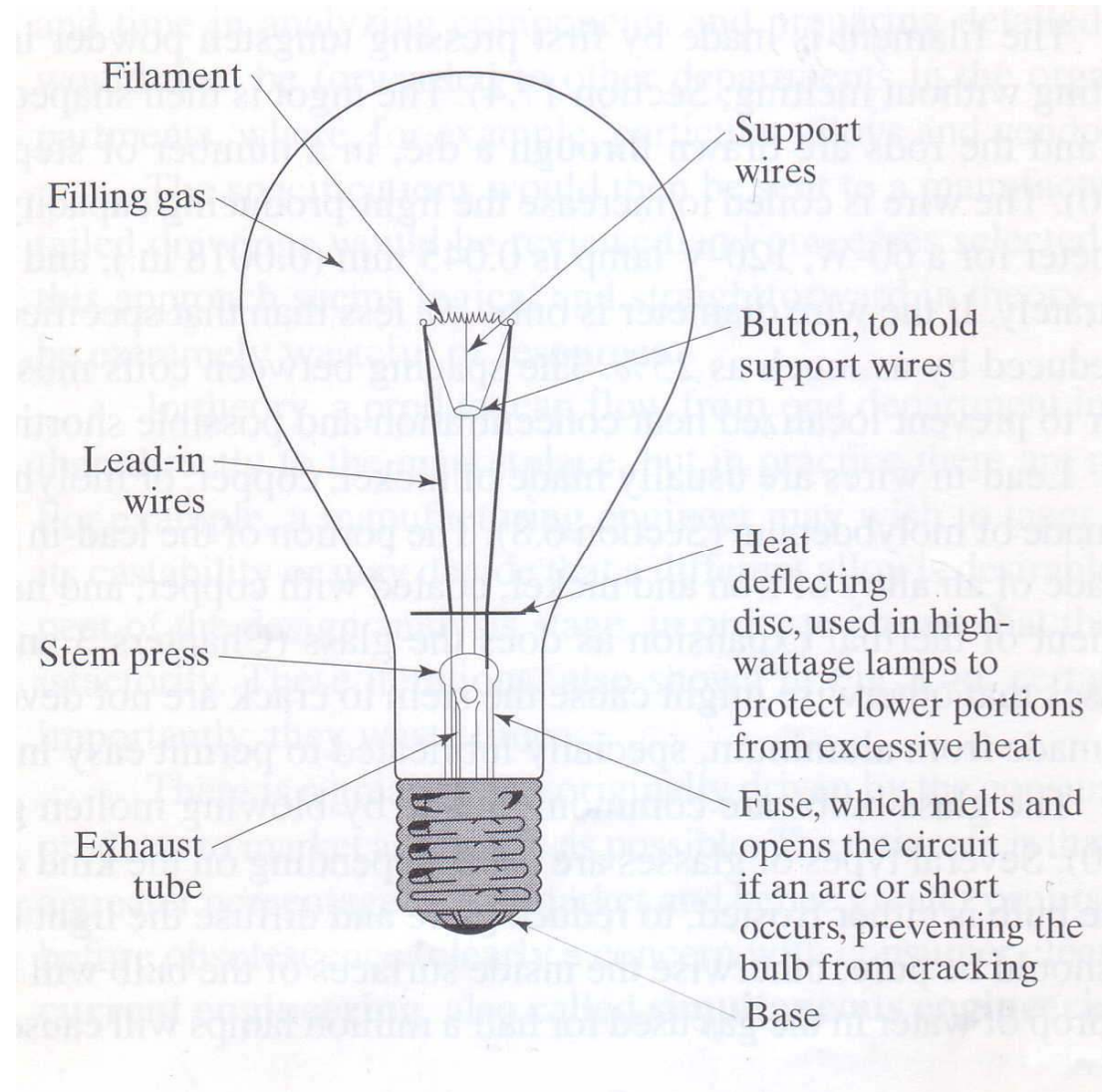
temperatura del filamento

trasparenza del vetro

resistenza dell'attacco filettato

caratteristiche del gas inerte

.....

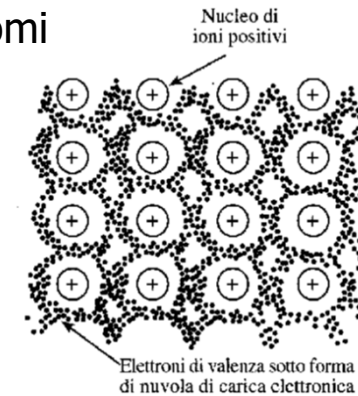




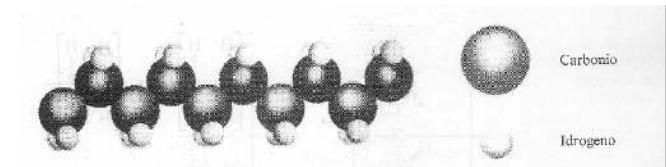
Da cosa dipendono le proprietà dei materiali?

principalmente dalla struttura atomica e quindi dal tipo di legame fra gli atomi

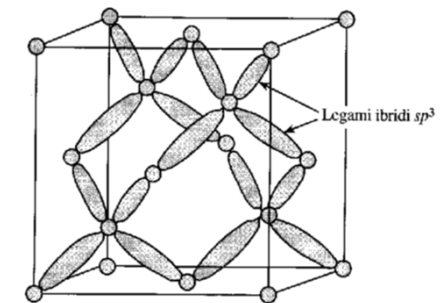
Materiali metallici → legame metallico



Materiali plastici → legame covalente / a dipolo



Materiali ceramici → legame covalente / ionico





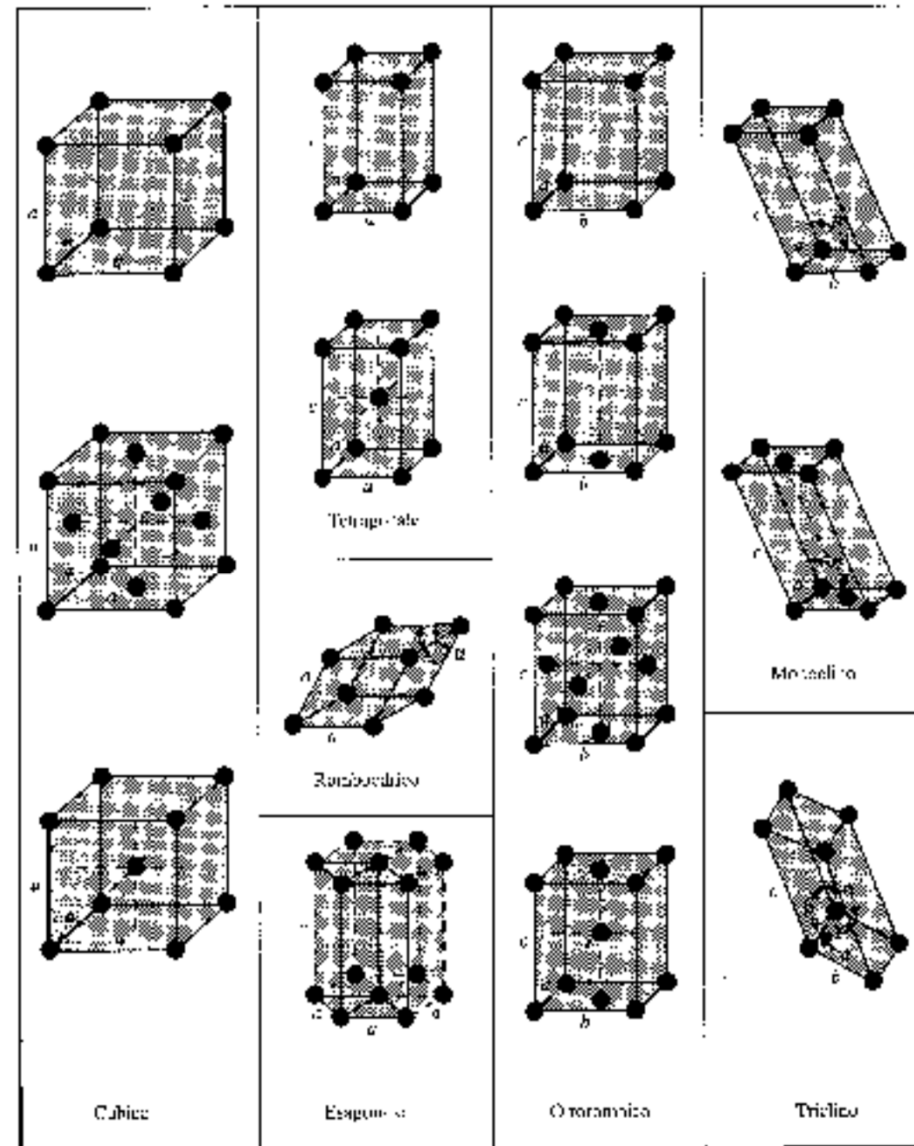
Nei solidi gli atomi possono sistemarsi secondo certe regole che dipendono da

- dimensioni dell'atomo
- carica dell'atomo
- energia di legame
- temperatura

in modo da dare 14 possibilità diverse di strutture cristalline

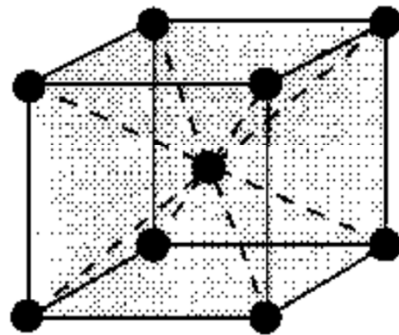
Ipotesi: gli atomi siano sfere rigide

Reticoli di Bravais

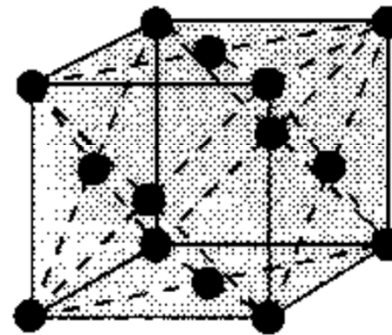




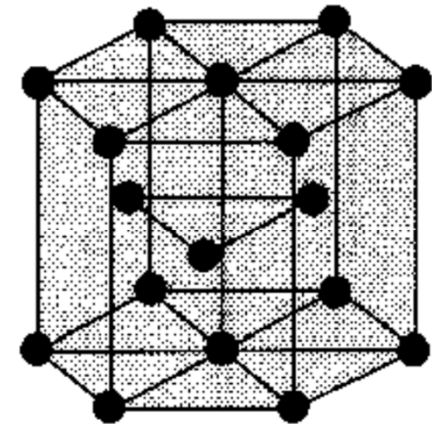
Nei metalli gli atomi si organizzano secondo una struttura cristallina che può essere di tre tipi:



(a)



(b)



(c)

●
posizione
degli atomi

CCC
cubico
corpo
centrato

ferro
tungsteno

CFC
cubico
facce
centrate

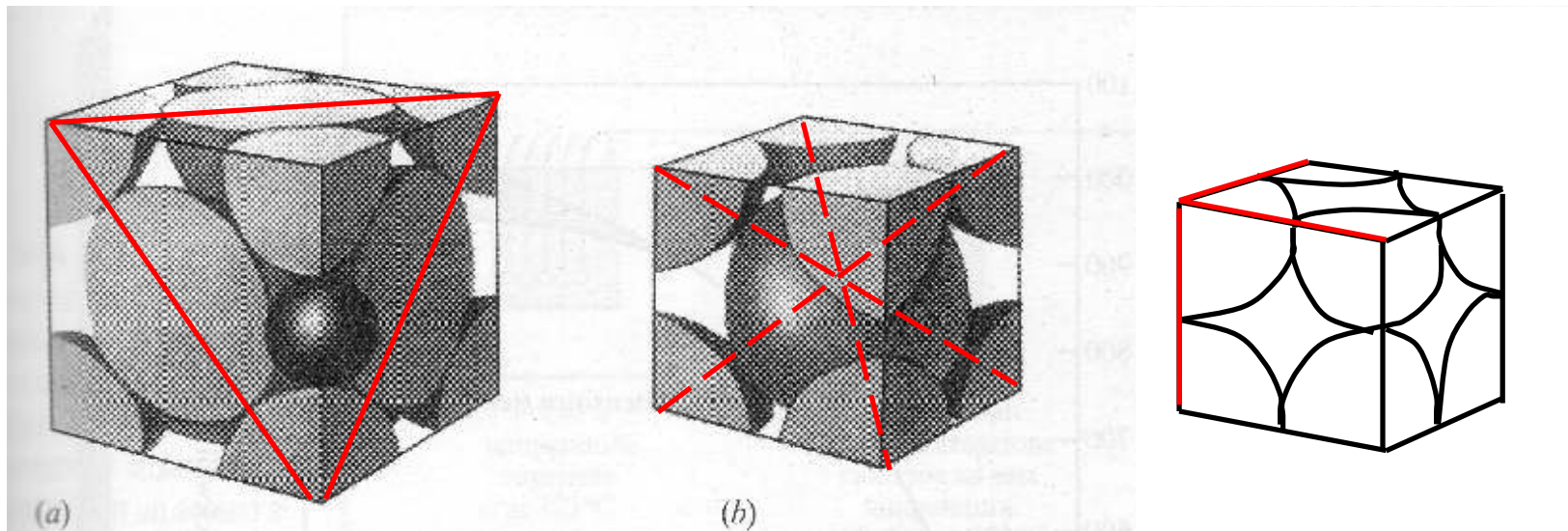
nichel
oro

EC
esagonale
compatto

zinco
titanio



Se gli atomi si considerano sfere rigide a contatto:



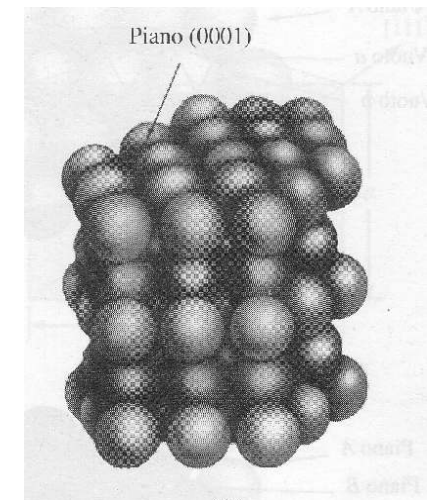
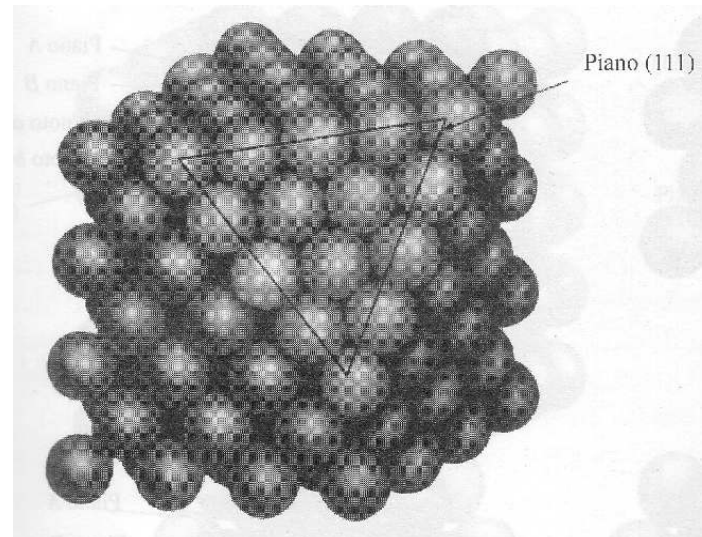
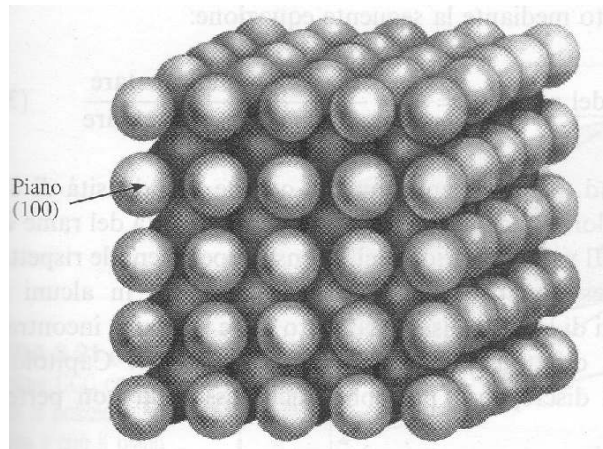
diagonale della faccia = $4 r$

diagonale del cubo = $4 r$

lato del cubo = $2 r$



Ripetendo la cella elementare nello spazio:



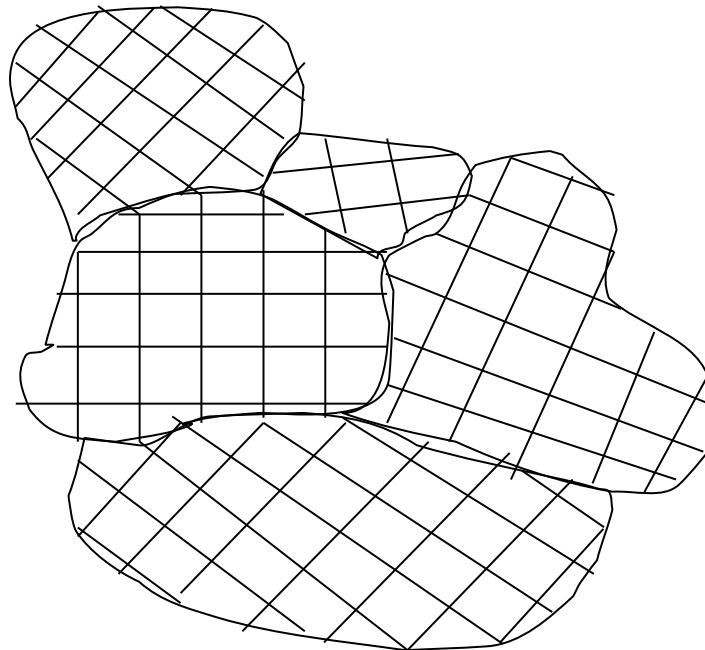


Cosa succede se due o più di queste strutture sono presenti?

E se hanno differenti dimensioni?

E se hanno differenti orientazioni nello spazio?

monocrystallo → policristallo



a seconda della storia del materiale



Le leghe

Tutti i materiali metallici di interesse per l'ingegneria sono formati da un miscuglio di elementi diversi

Atomi posizionati all'interno del reticolo → soluzioni solide interstiziali

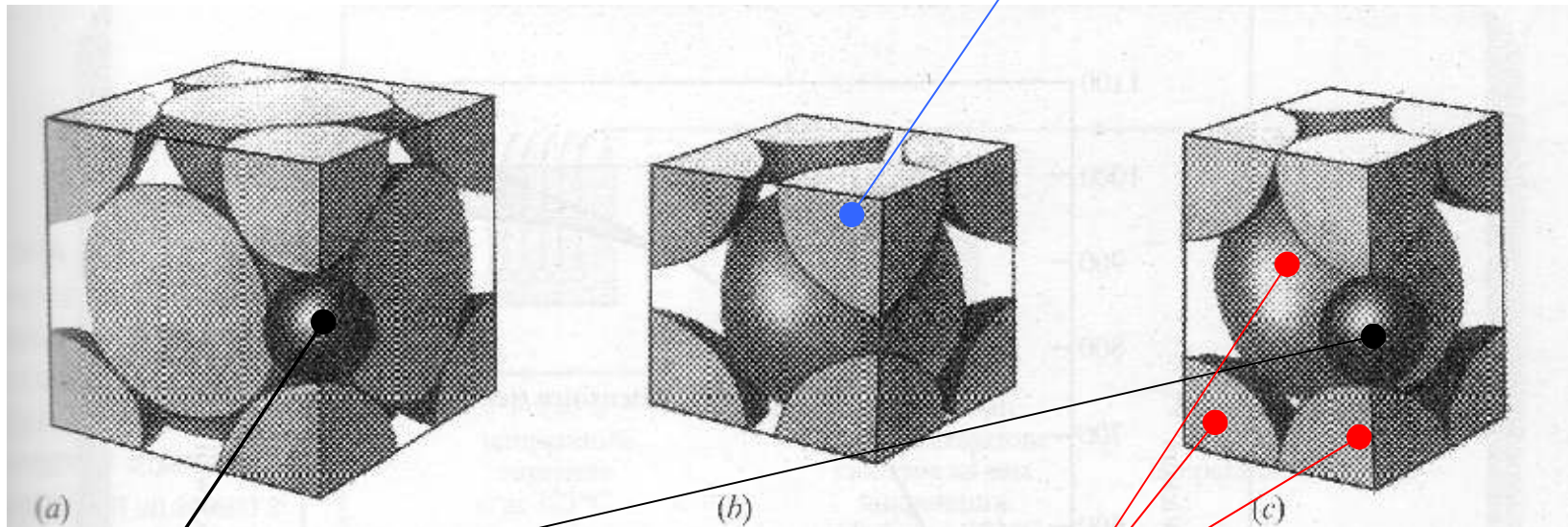
atomi piccoli, esempio carbonio nel ferro (acciai)

Atomi posizionati al posto di altri atomi del reticolo → soluzioni solide sostituzionali

atomi di dimensioni comparabili, ad esempio cromo e ferro (acciai inox)



atomo di cromo al posto di atomo di ferro



atomi di carbonio posizionati nei vuoti fra un atomo e l'altro di ferro



In conclusione:

per ogni legame

per ogni reticolo

per ogni materiale

per ogni orientazione

per ogni dimensione dei cristalli

per ogni lega

Per ogni composizione chimica della lega

si hanno differenti comportamenti



Studio delle leghe metalliche

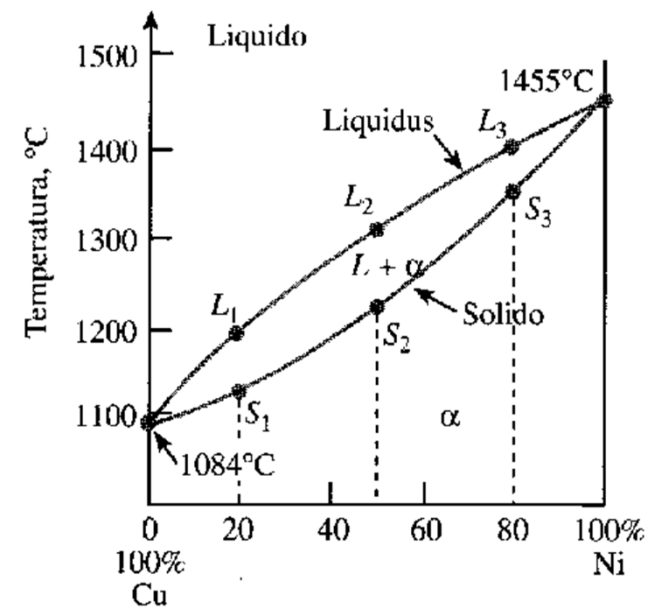
Struttura → diagrammi di stato (di equilibrio e non)
Comportamento → prove meccaniche, chimico-fisiche, tecnologiche

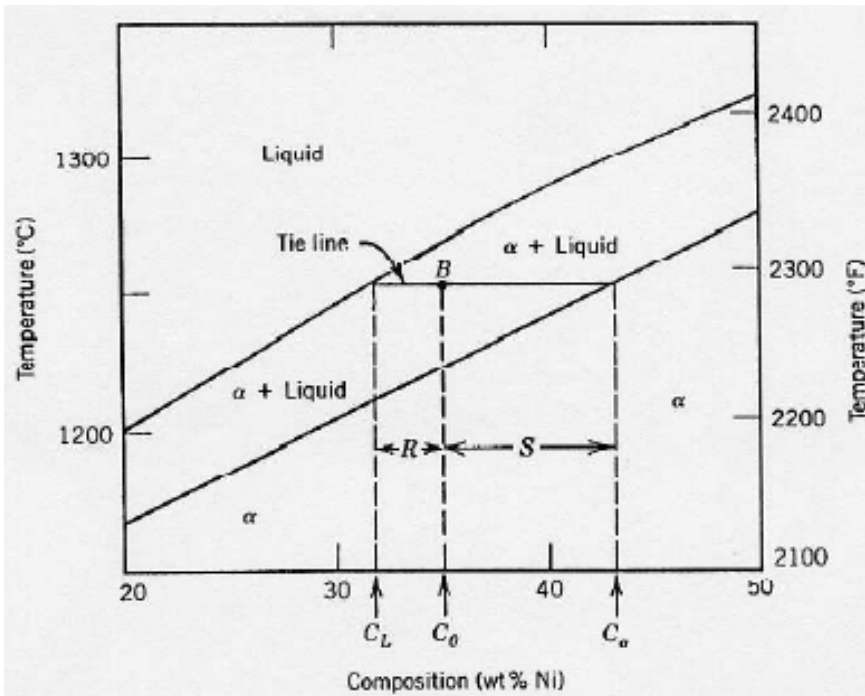
Diagramma di stato Cu -- Ni

(Condizioni termodinamiche di equilibrio)

Informazioni ottenibili
per una certa lega, ad una certa temperatura

- fasi presenti
- composizione chimica delle fasi
- percentuali delle fasi presenti
- temperature di inizio / fine trasformazione





Per una concentrazione media C_0

Alla temperatura T_0

- 1: fasi presenti
- 2: composizioni chimiche
 - si leggono sulla linea del solidus e sulla linea del liquidus le composizioni chimiche del solido e del liquido
- 3: quantità delle fasi presenti (regola della leva)
 - la distanza dalla composizione media alla linea del solidus è proporzionale alla quantità di liquido
 - la distanza dalla composizione media alla linea del liquidus è proporzionale alla quantità di solido

Al diminuire della temperatura

- 1: variazioni di composizione chimica e quantità di fasi presenti (come sopra)
- 2: temperature di inizio / fine trasformazione (solidificazione, insorgere di nuove fasi, ad esempio CFC → CCC)

$$W_L = \frac{S}{S + R}$$

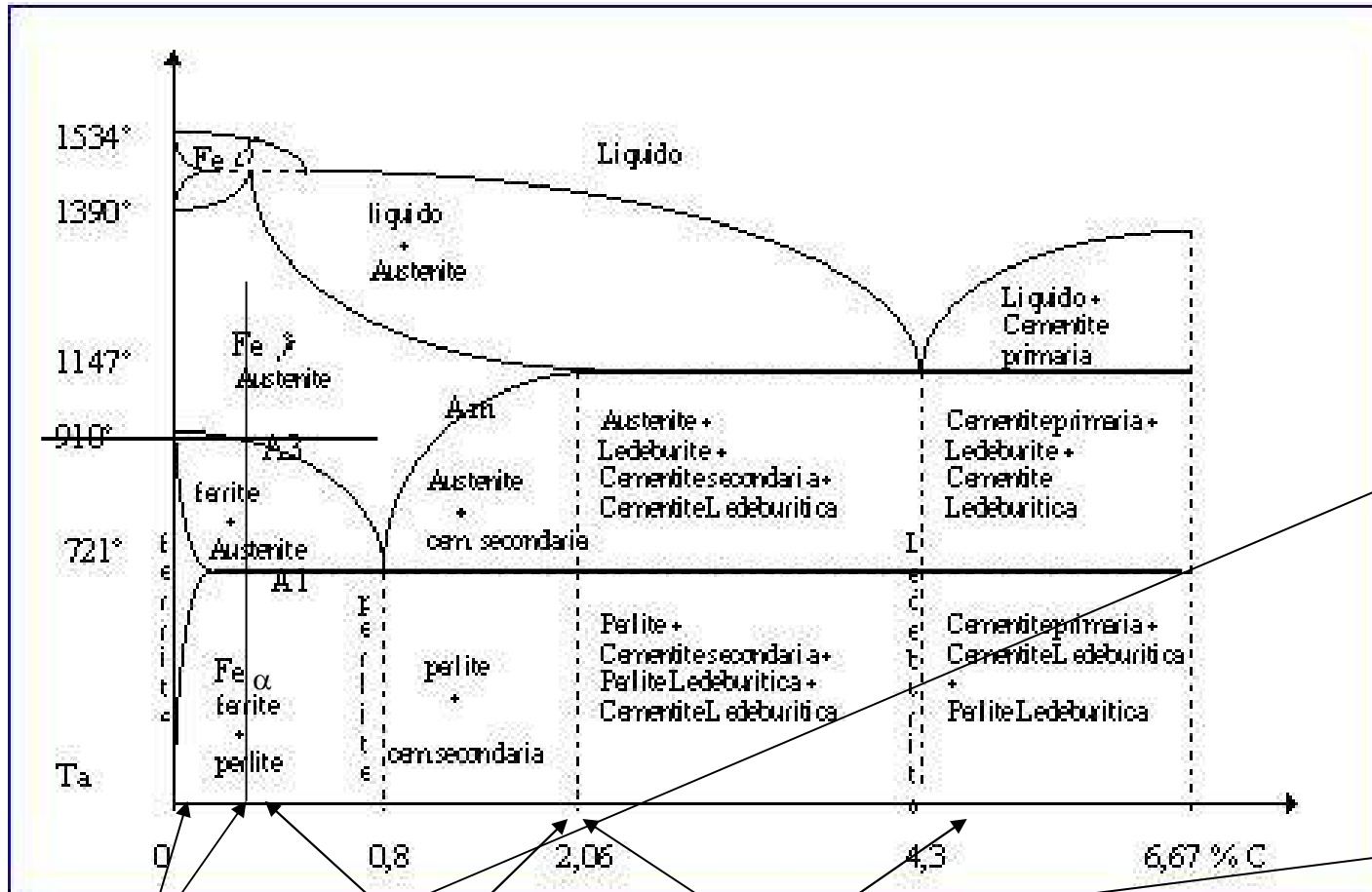
oppure:

$$W_\alpha + W_L = 1$$

$$W_L = \frac{C_\alpha - C_0}{C_\alpha - C_L}$$



Diagramma di stato Fe-C



acciai dolci

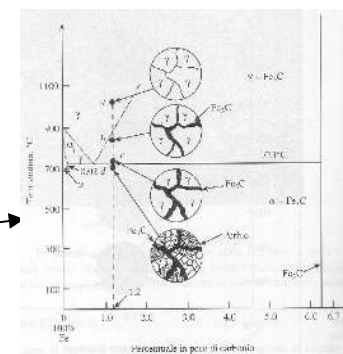
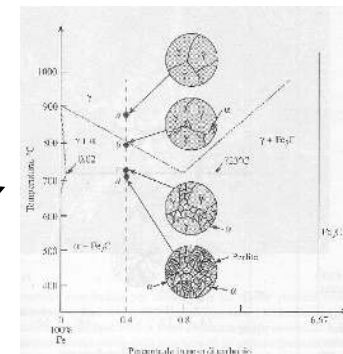
acciai duri

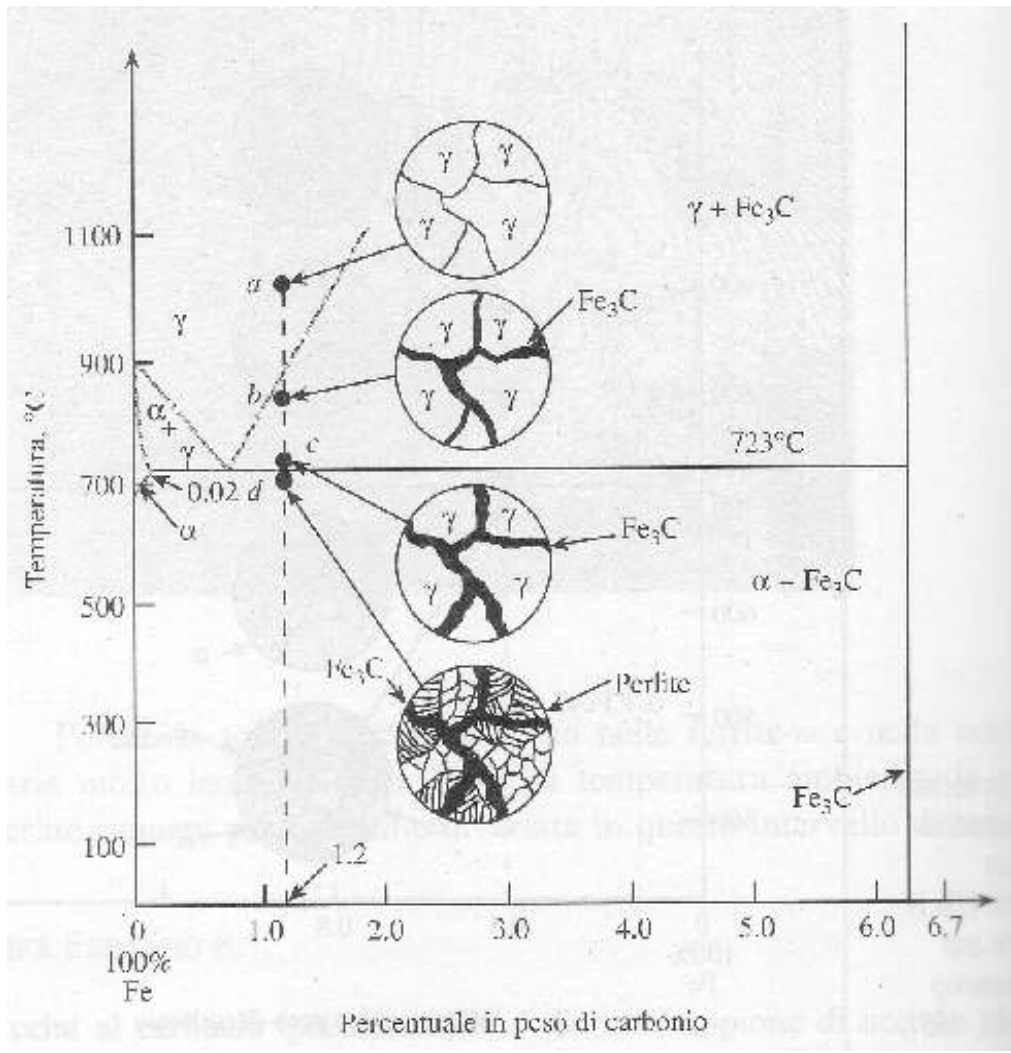
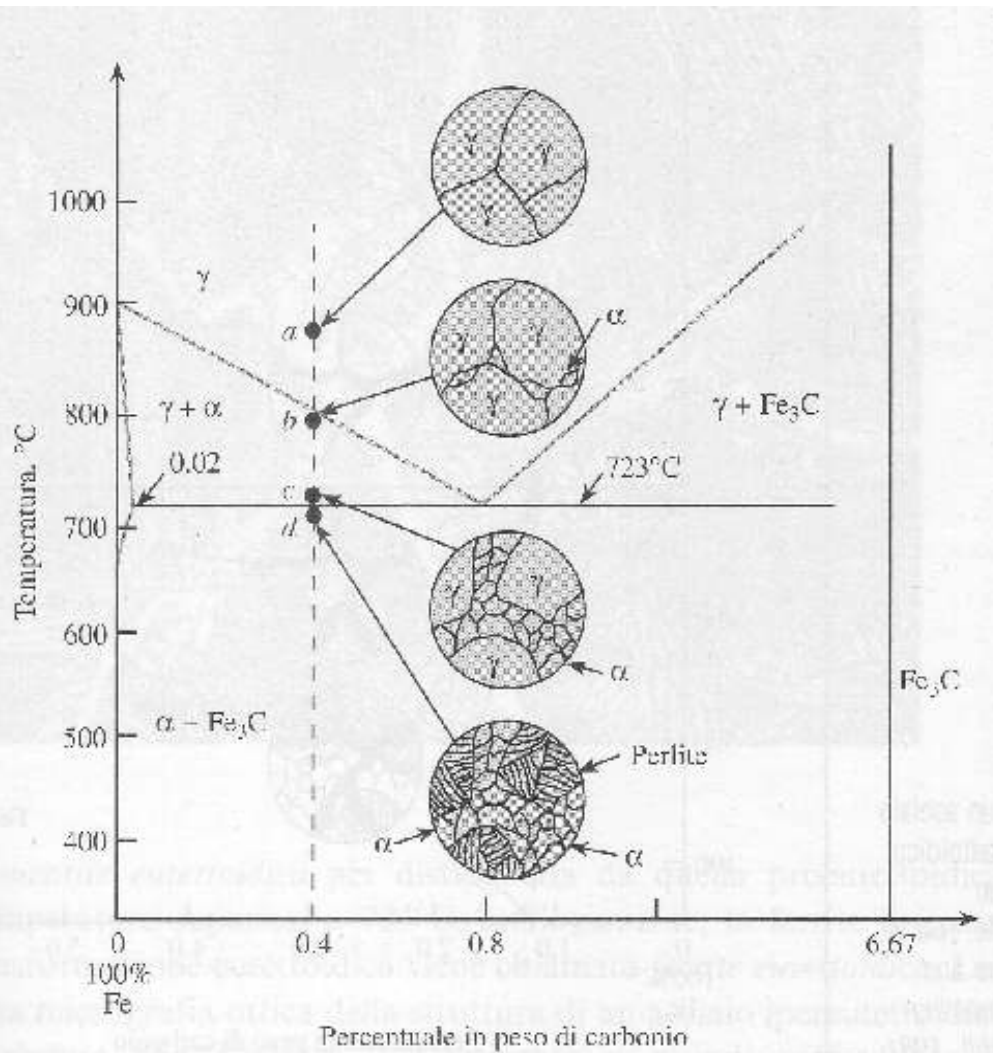
ghise

stesso 'tipo' di materiale

diverse strutture

diverse caratteristiche







Trattamenti termici

Operazione o successione di operazioni cui è sottoposto un materiale allo stato solido che consente la modifica più o meno profonda, a partire dagli strati superficiali, della microstruttura del materiale mediante uno o più cicli termici controllati

Generale applicato all'interno del pezzo.

Parziale o localizzato applicato soltanto ad una parte del pezzo, ma non al suo insieme

In linea generale:

- possono intervenire sulla modifica della natura e/o della dimensione, della forma e della distribuzione dei costituenti strutturali
- conferiscono particolari proprietà agli strati superficiali del pezzo trattato
- modificano la distribuzione e l'intensità delle tensioni interne.

Alla base di tutti i trattamenti termici vi sono le trasformazioni strutturali del ferro e delle soluzioni solide ferro-carbonio!

Trattamenti termici per indurire gli acciai

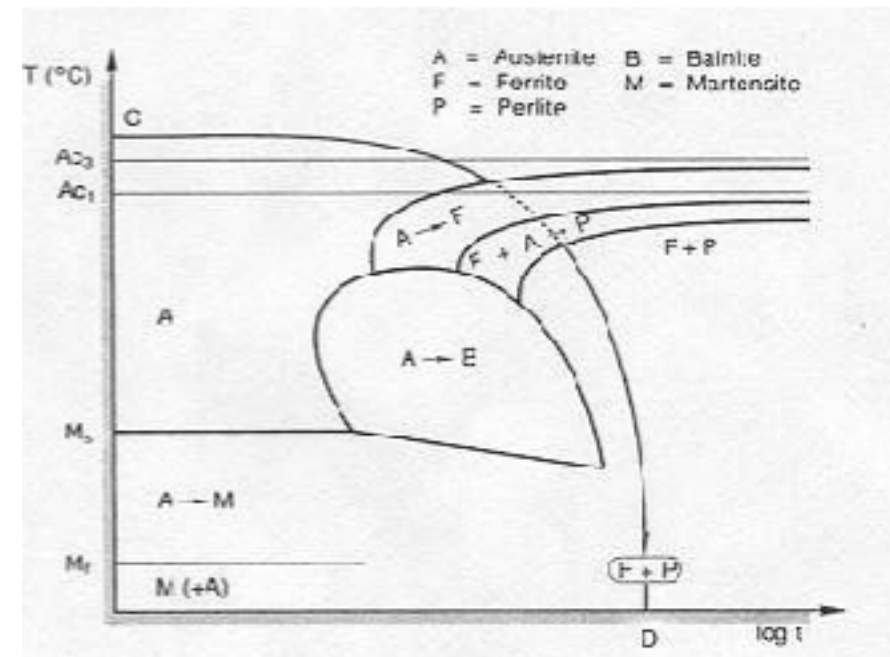
- riscaldamento a $T > A_1, A_3$: Ricottura, Normalizzazione, Tempra, ...
- riscaldamento a $T < A_1$: Ricottura di addolcimento, Rinvenimento, Distensione, ...

Ricottura

modalità: riscaldamento a T di austenitizzazione con permanenza prolungata e successivo raffreddamento lento in forno.

struttura: ferritico-perlitica (ipo-eut); perlitica (eut); cementitico-perlitica (iper-eut).

scopo: addolcire il materiale rendendo la struttura molto duttile e con una buona lavorabilità a freddo. (ad es.: risulta più lavorabile alle macchine utensili, più facilmente deformabile a freddo se incrudito, si omogeneizza la composizione del materiale grezzo da colata, si eliminano le tensioni interne)





Normalizzazione

modalità: riscaldamento a T di austenitizzazione con permanenza adeguata e successivo raffreddamento in aria.

struttura: acciaio a grana molto fine e regolare

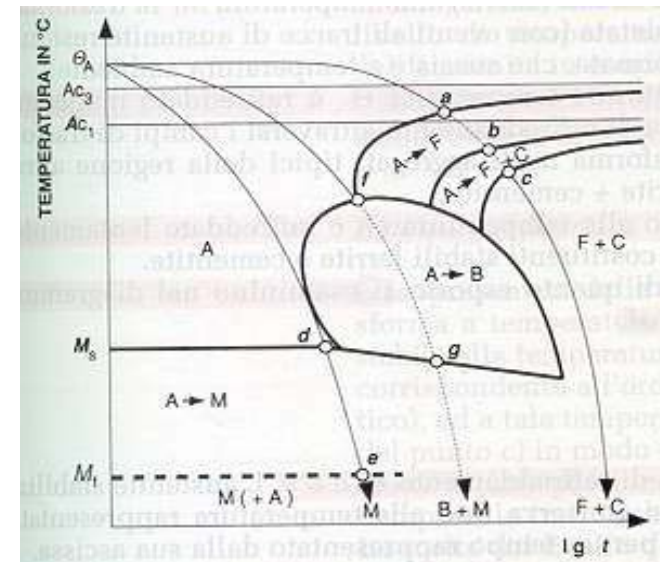
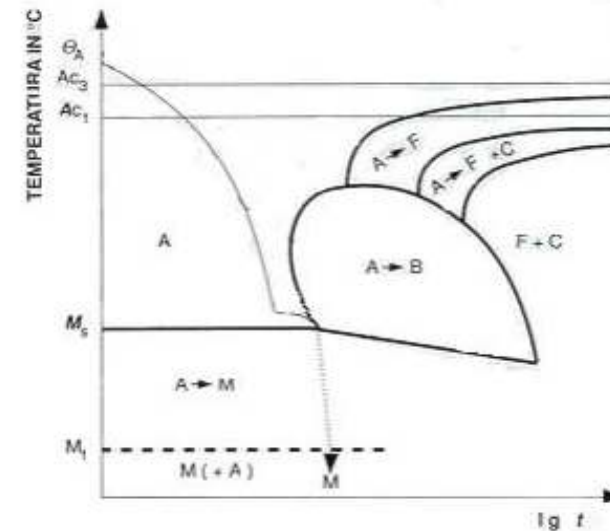
scopo: da impiegare come trattamento termico preventivo per annullare effetti dannosi di precedenti lavorazioni, in sostituzione della ricottura essendo più rapido ed economico

Tempra

modalità: riscaldamento a T di austenitizzazione con permanenza adeguata e successivo raffreddamento con velocità superiore alla “velocità critica di tempra” mediante mezzo temprante (in acqua, olio, sali fusi).

struttura: martensite pura, miscela martensite-bainite

scopo: incrementare notevolmente la durezza del materiale

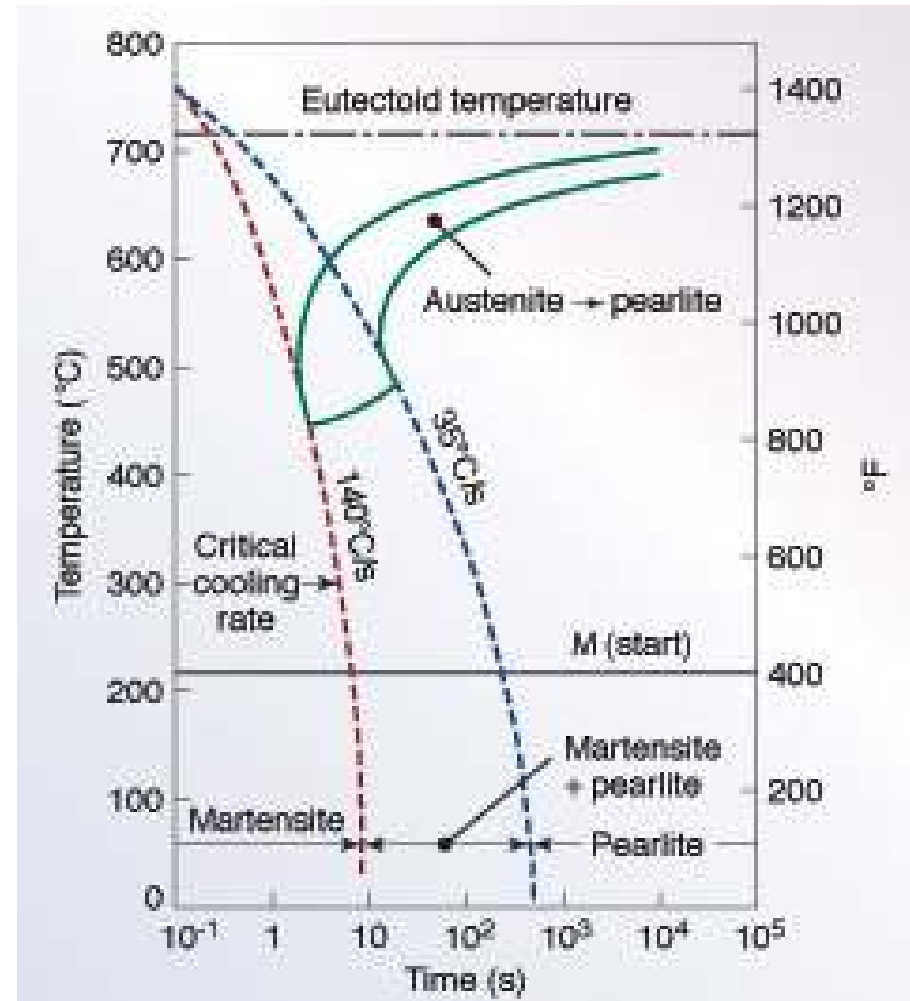
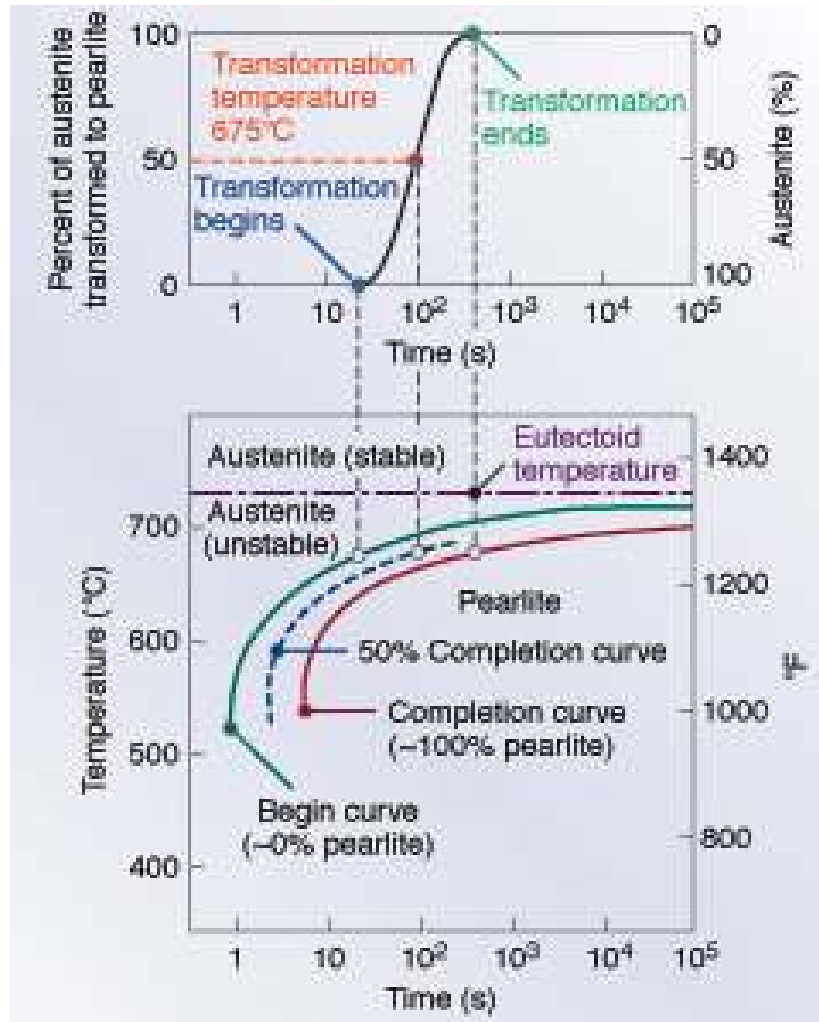




Note



Trasformazione da austenite a perlite





lega ipoeutettoide

A circa 875 °C (punto *a*) la microstruttura consisterà interamente di grani della fase (γ).

Nel raffreddamento fino a circa 775 °C (punto *b*), si attraversa la linea di confine fra il campo monofasico (γ) e quello bifasico ($\gamma+\alpha$), all'interno della regione di esistenza di entrambe le fasi (γ) e (α). A tale temperatura entrambe le due fasi coesistono. La maggior parte delle particelle minute di α si formerà lungo i bordi originari dei grani

Al diminuire della temperatura, procedendo secondo questa linea, il tenore di carbonio aumenta leggermente. Il raffreddamento dal punto *b* fino al punto *c*, situato ancora nella regione ($\gamma+\alpha$) ma proprio sopra l'eutettoide, fa aumentare la frazione della fase (α) e genera una microstruttura con le particelle di (α) che diventano più grandi.

Se la temperatura viene abbassata di pochissimo al di sotto dell'eutettoide, cioè fino al punto *d*, tutta la fase (γ) che era presente alla temperatura T_e si trasformerà in perlite.

lega ipereutettoide



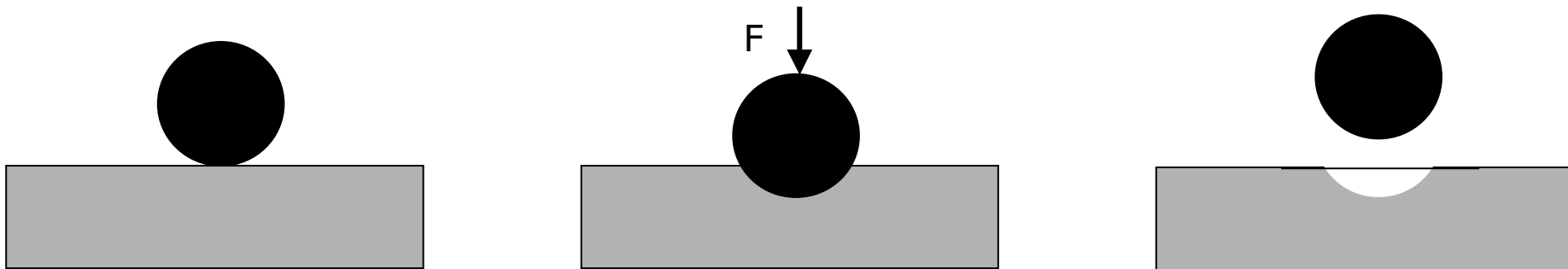
Proprietà meccaniche

--- durezza

--- resistenza a rottura

Durezza:

capacità di un materiale di resistere all'indentazione



Il valore di durezza ottenuto è convenzionale secondo varie scale, che utilizzano vari penetratori

Brinell (HB)

penetratore sferico
diametro sfera D
diametro impronta d

Vickers (HV)

penetratore piramidale (angolo al vertice 136°)
diagonale impronta d

Rockwell (HR)

penetratore sferico o conico (angolo 120°)
profondità impronta a
 $HRC = f(a)$ (scala convenzionale)

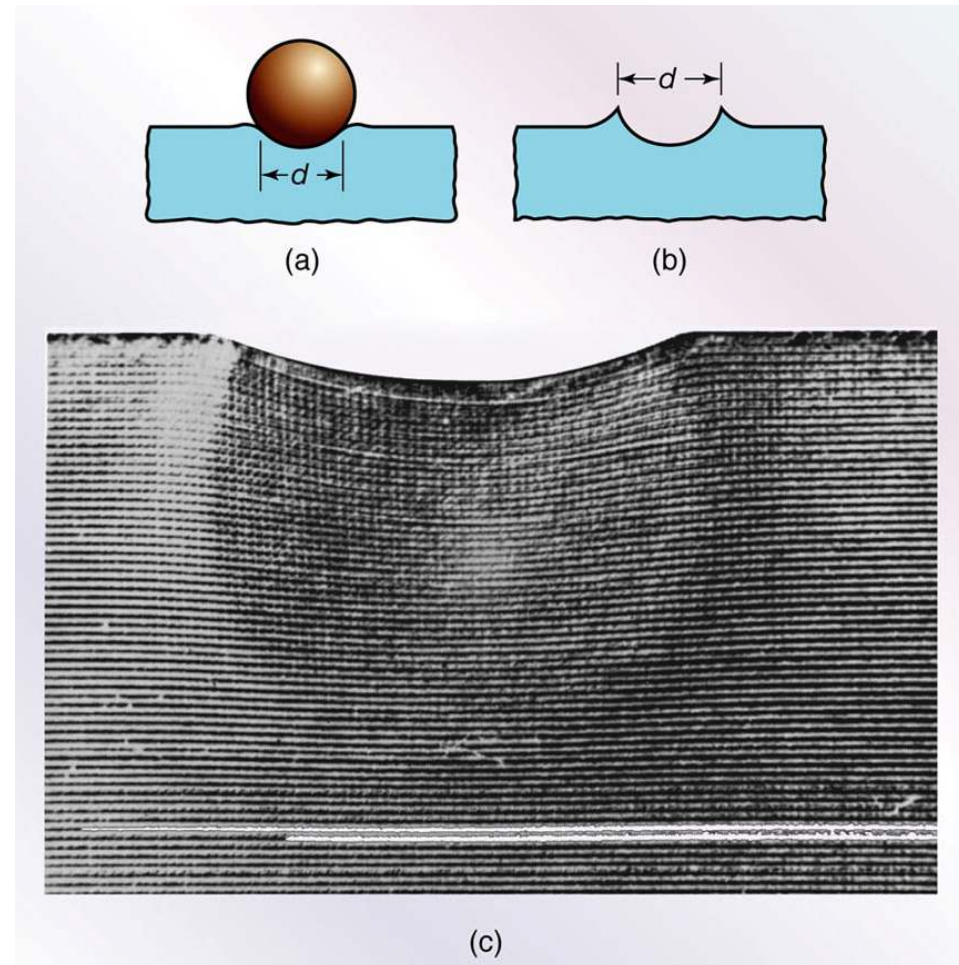


Test	Indenter	Shape of indentation		Load, P	Hardness number
		Side view	Top view		
Brinell	10-mm steel or tungsten carbide ball			500 kg 1500 kg 3000 kg	$HB = \frac{2P}{(\pi D)(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Diamond pyramid			1-120 kg	$HV = \frac{1.854P}{L^2}$
Knoop	Diamond pyramid			25 g-5 kg	$HK = \frac{14.2P}{L^2}$
Rockwell					
A } C } D }	Diamond cone			60 kg 150 kg 100 kg	HRA } HRC } HRD } = 100 - 500t
B } F } G }	$\frac{1}{16}$ - in. diameter steel ball			100 kg 60 kg 150 kg	HRB } HRF } HRG } = 130 - 500t
E	$\frac{1}{8}$ - in. diameter steel ball			100 kg	HRE }

geometria dell'impronta in una prova di
durezza Brinell:

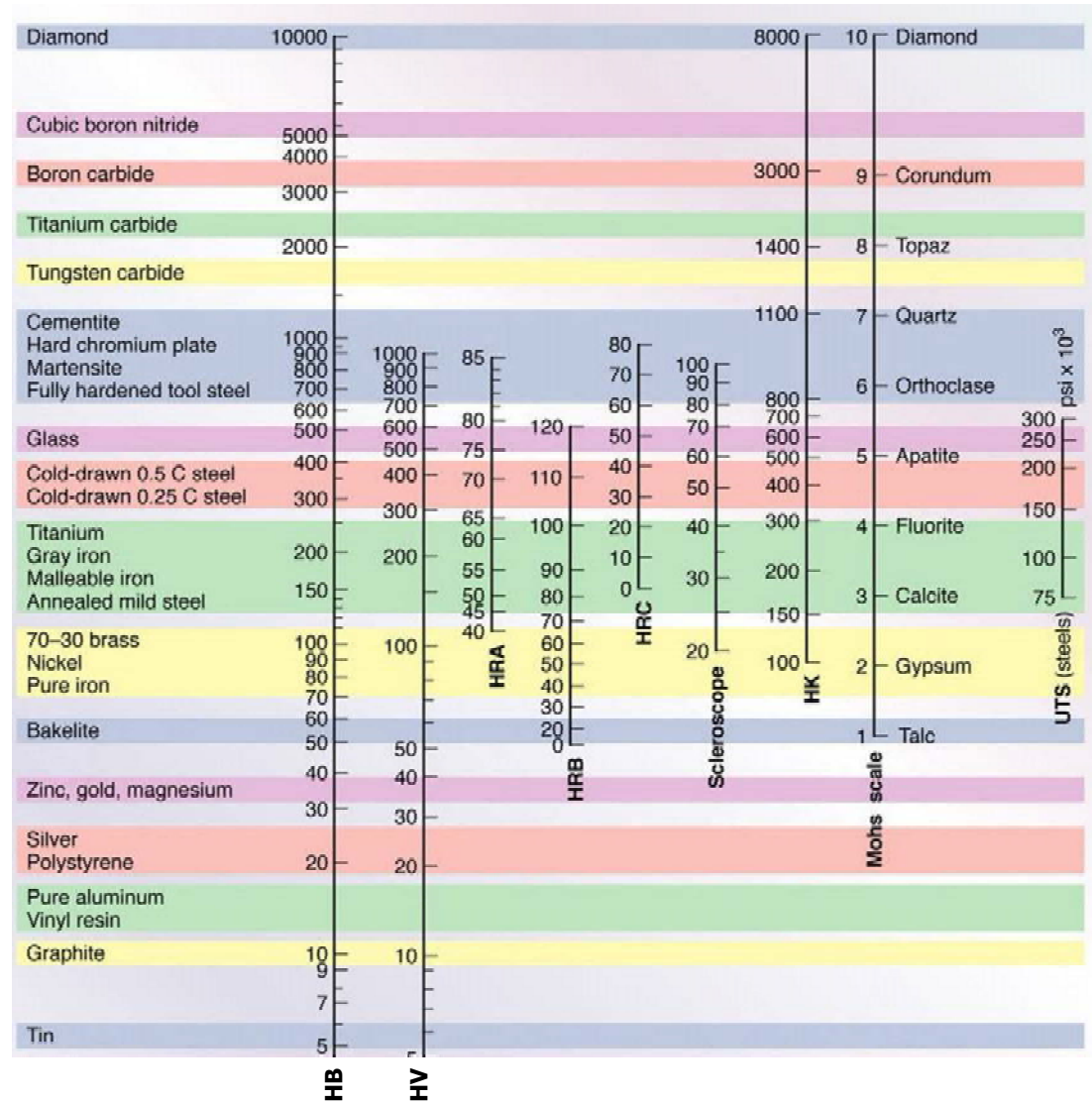
- (a) metallo ricotto
- (b) metallo incrudito
- (c) deformazione di un acciaio dolce
prodotta dall'azione di un indentatore
sferico.

*Osservazione: la profondità della zona
deformata in modo permanente è circa un
ordine di grandezza maggiore della
profondità di indentazione.*





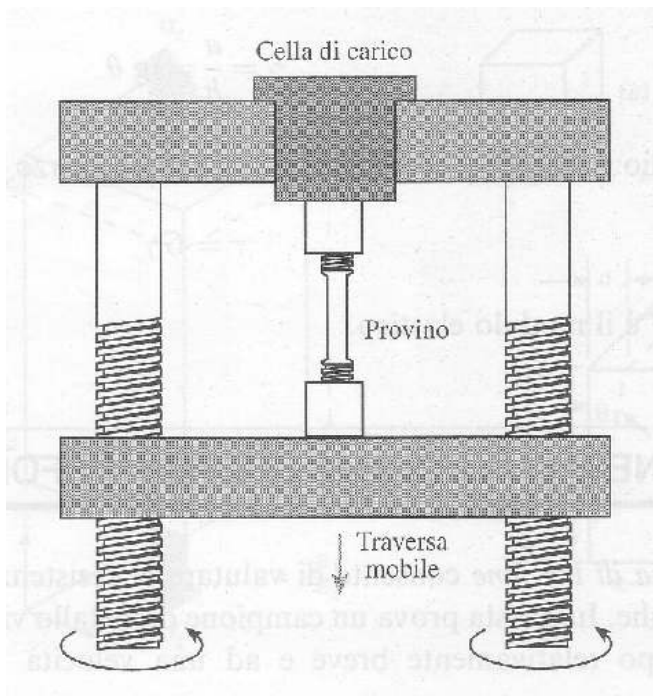
Scala di conversione delle varie durezza



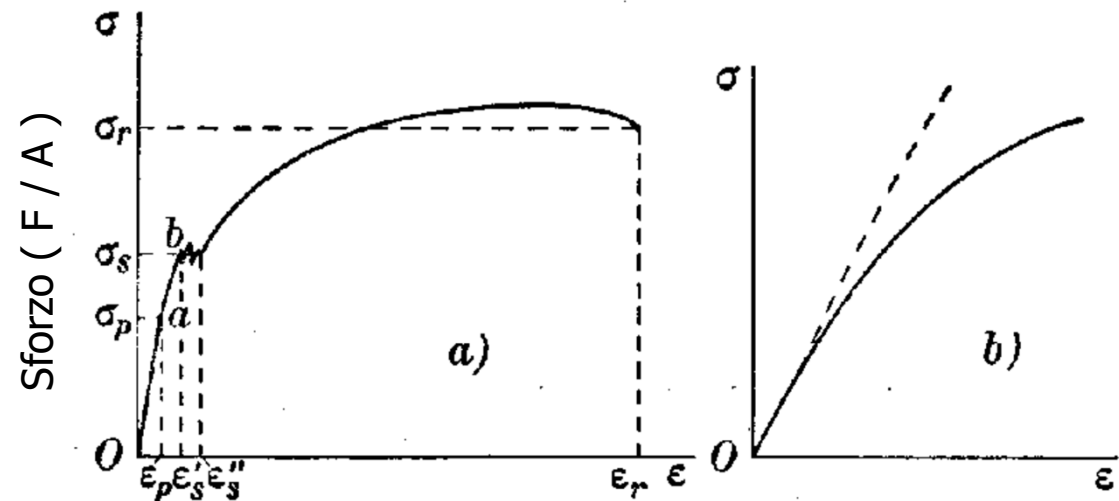


Prova di trazione

Capacità di un materiale di resistere a forze (sollecitazioni)



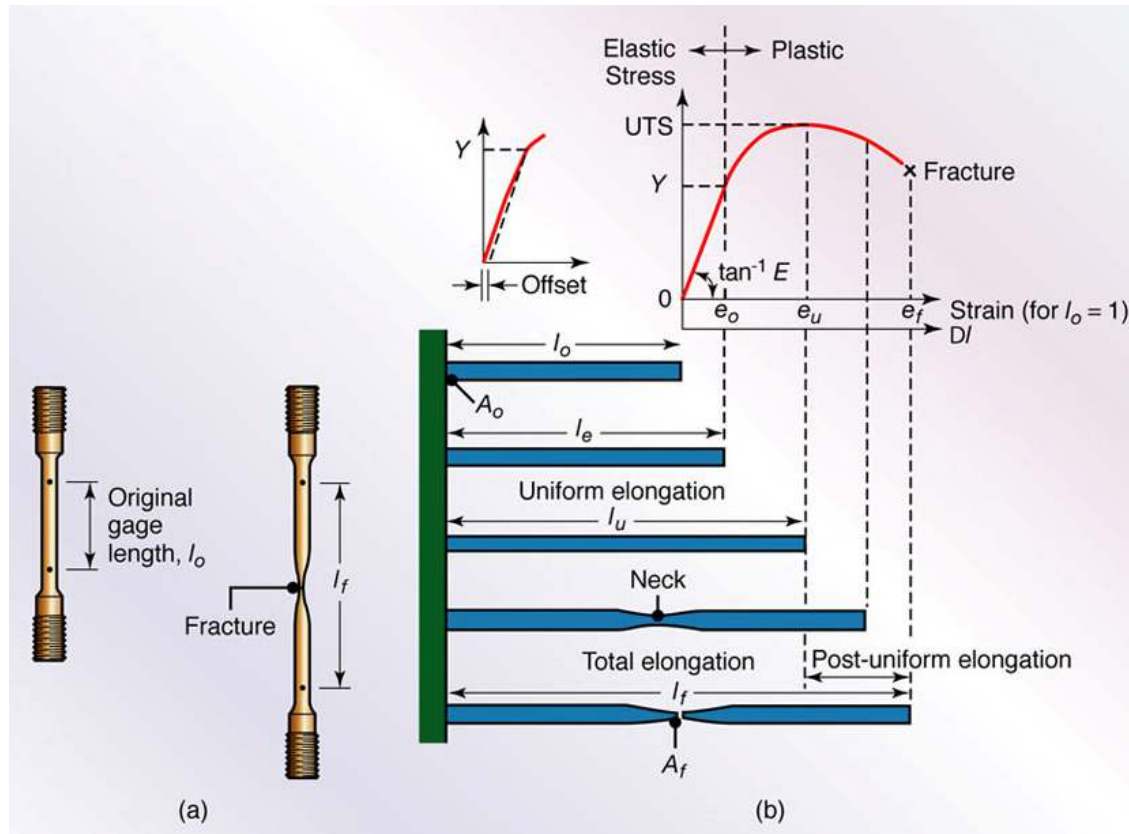
Macchina di prova



Deformazione ($\Delta l / l_0$)

- Modulo elastico
- Limite elastico
- Limite di rottura
- Allungamento a rottura
- Energia di rottura

Diagramma semplificato



(a) forma iniziale e finale di un provino per prove di trazione mono-assiale standard

(b) esempio di una sequenza di prova di trazione che mostra differenti istanti di deformazione del provino

Tensione nominale $\sigma = \frac{P}{A_0}$

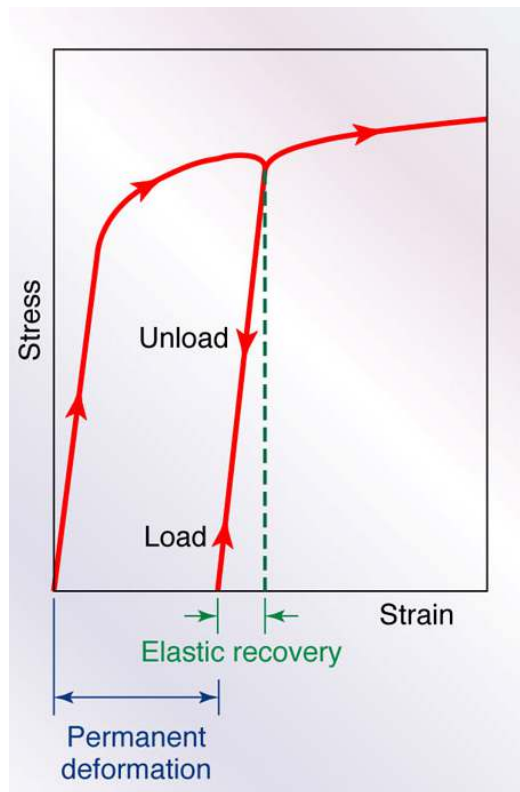
Deformazione convenzionale $e = \frac{l - l_0}{l_0}$

Modulo di Young $E = \frac{\sigma}{e}$

Campo elastico $\rightarrow \sigma = E \varepsilon$

Campo plastico $\rightarrow \sigma = k \varepsilon^n$

Fasi di carico e scarico di un provino di trazione



Se si annulla il carico dopo che il livello di tensione ha superato la tensione di snervamento (Y), la curva tensione-deformazione segue una linea retta avente la stessa pendenza del tratto elastico della curva.

L'inclinazione della curva è data dal modulo di Young del materiale (E)



Mechanical Properties of Various Materials at Room Temperature

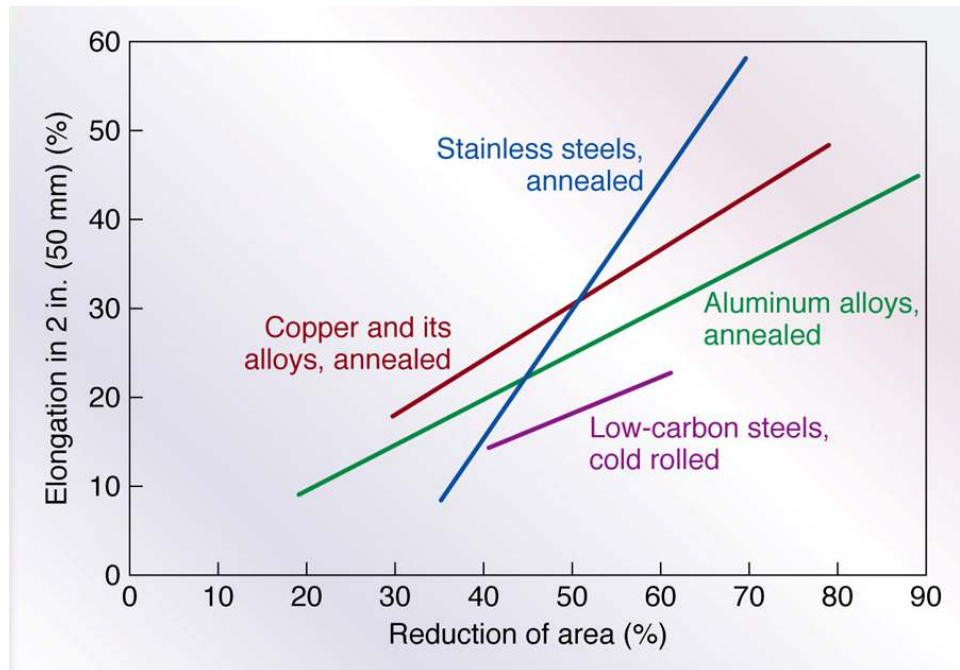
Metals (Wrought)	E (GPa)	Y (MPa)	UTS (MPa)	Elongation in 50 mm (%)	Poisson's ratio (ν)
Aluminum and its alloys	69 –79	35 –550	90 –600	45 –4	0.31 –0.34
Copper and its alloys	105 –150	76 –1100	140 –1310	65 –3	0.33 –0.35
Lead and its alloys	14	14	20 –55	50 –9	0.43
Magnesium and its alloys	41 –45	130 –305	240 –380	21 –5	0.29 –0.35
Molybdenum and its alloys	330 –360	80 –2070	90 –2340	40 –30	0.32
Nickel and its alloys	180 –214	105 –1200	345 –1450	60 –5	0.31
Steels	190 –200	205 –1725	415 –1750	65 –2	0.28 –0.33
Titanium and its alloys	80 –130	344 –1380	415 –1450	25 –7	0.31 –0.34
Tungsten and its alloys	350 –400	550 –690	620 –760	0	0.27
Zinc and its alloys	50	25 –180	240 –550	65 –5	0.27
Nonmetallic Materials					
Ceramics	70 –1000	—	140 –2600	0	0.2
Diamond	820 –1050	—	—	—	—
Glass and porcelain	70 –80	—	140	0	0.24
Silicon carbide (SiC)	200 –500	—	310 –400	—	0.19
Silicon nitride	280 –310	—	160 –580	—	0.26
Rubbers	0.01 –0.1	—	—	—	0.5
Thermoplastics	1.4 –3.4	—	7 –80	1000 –5	0.32 –0.40
Thermoplastics, reinforced	2 –50	—	20 –120	10 –1	—
Thermosets	3.5 –17	—	35 –170	0	0.34
Boron fibers	380	—	3500	0	—
Carbon fibers	275 –415	—	2000 –3000	0	—
Glass fibers	73 –85	—	3500 –4600	0	—
Kevlar fibers	62 –117	—	2800	0	—
Spectra Fibers	73 –100	—	2400 –2800	3	—

Note: In the upper table, the lowest values for E , Y , and UTS and the highest values for elongation are for pure metals. Multiply gigapascals (GPa) by 145,000 to obtain pounds per square in. (psi) and megapascals (MPa) by 145 to obtain psi.



Duttilità dei materiali

La massima deformazione che il materiale può sopportare prima della frattura

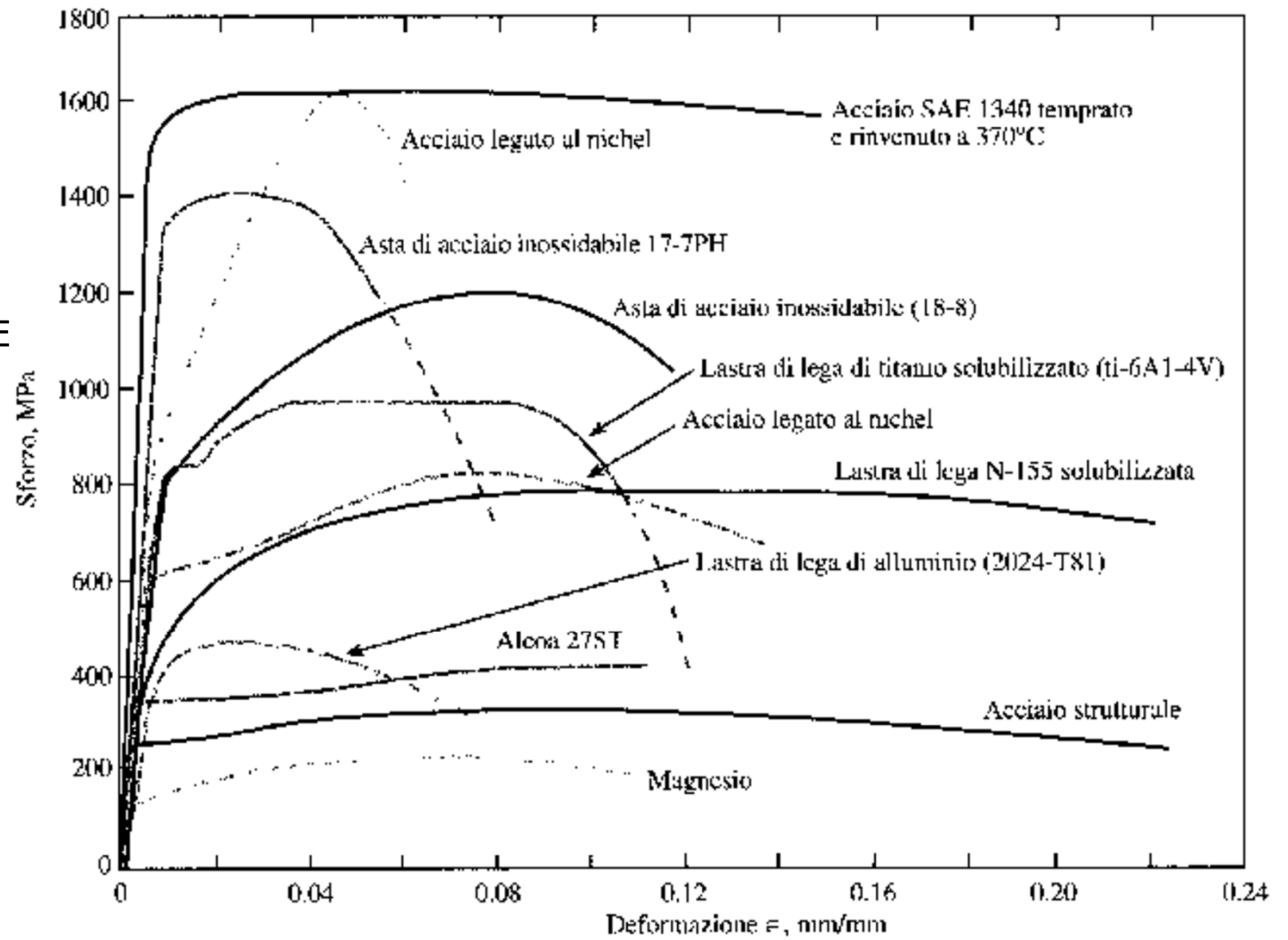


$$\text{Allungamento} = \frac{l_f - l_0}{l_0}$$

$$\text{Riduzione di area} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100$$



Ogni materiale ha la sua
curva caratteristica
Sforzo NOMINALE /
Deformazione CONVENZIONALE





Tensioni e Deformazioni REALI

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

dove A rappresenta l'area della sezione reale del provino

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$$

relazione ottenuta integrando gli incrementi infinitesimi di deformazione tra la lunghezza iniziale l_0 e quella attuale

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l}$$

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{P}{A_0} \cdot \frac{A_0}{A}$$

ed essendo

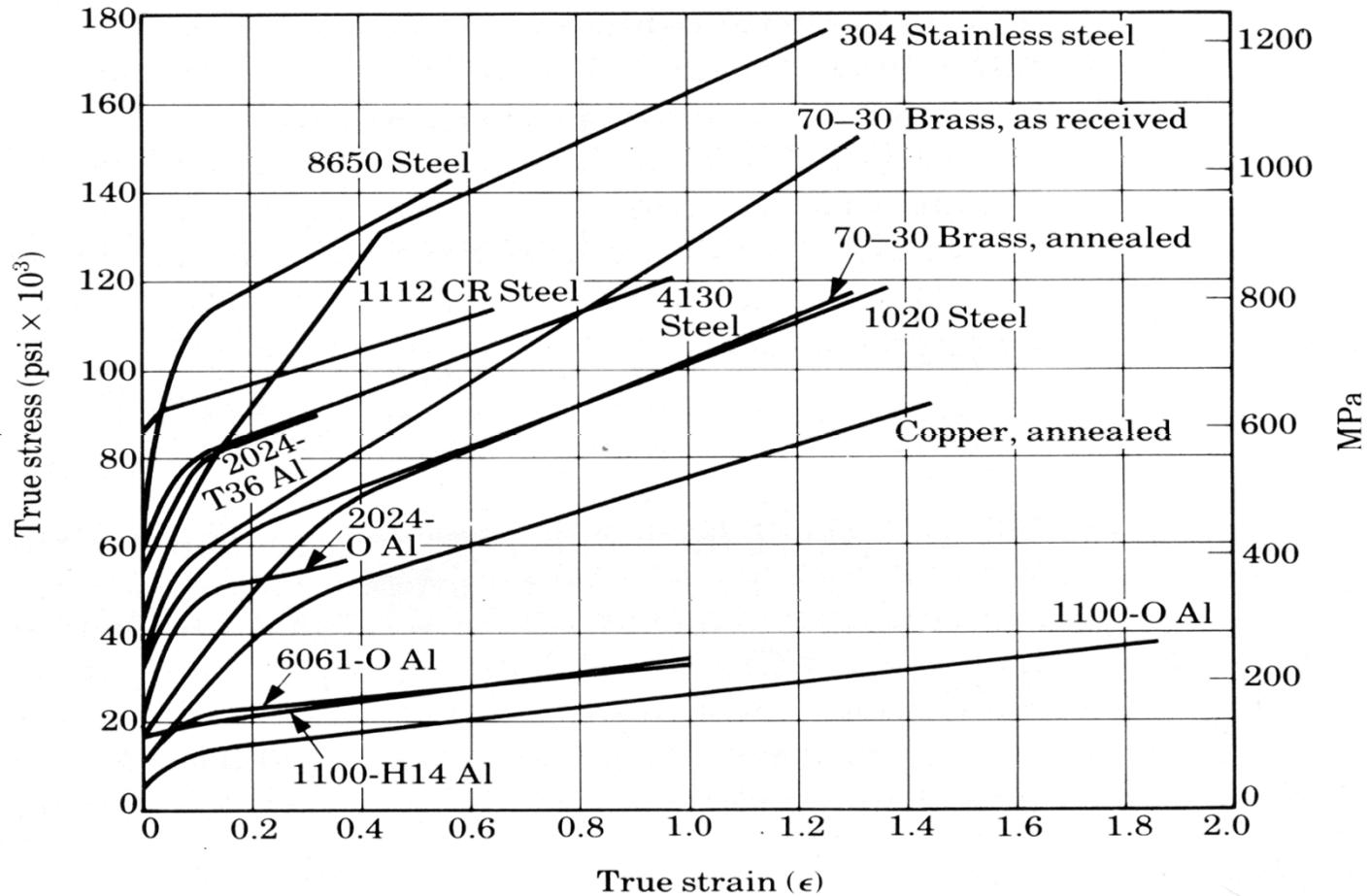
$$e = \frac{l - l_0}{l_0}, \frac{A_0}{A} = \frac{l}{l_0}, \frac{P}{A_0} = \sigma_n$$



$$\sigma = \sigma_n (1 + e)$$



Curve tensione REALE / deformazione REALE

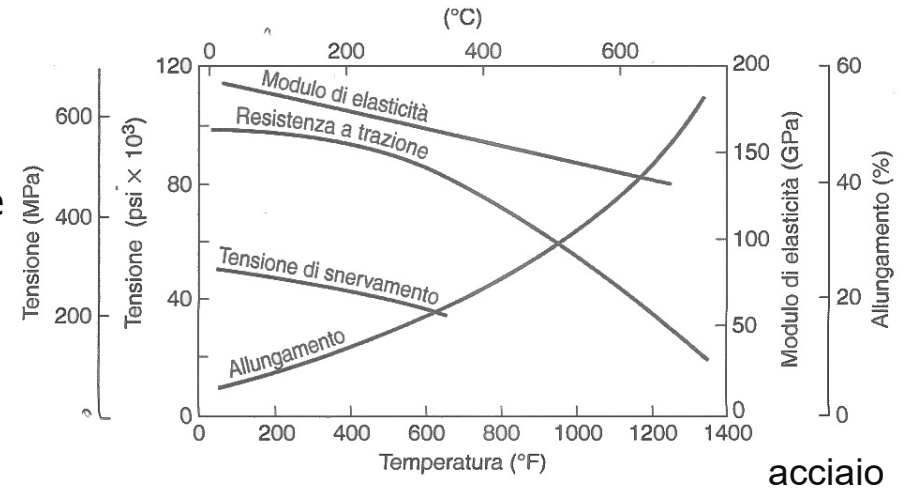
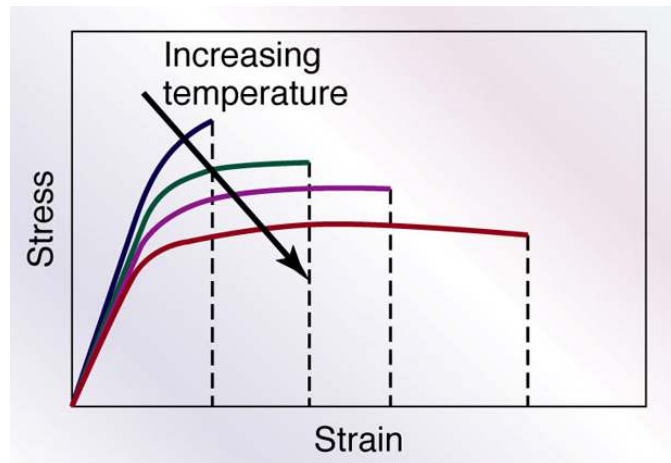




Effetto della Temperatura

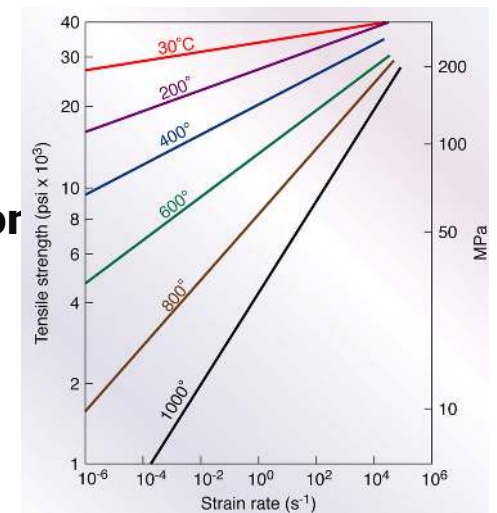
sulle proprietà meccaniche

sul diagramma tensione-deformazione



Effetto della Velocità di deformazione

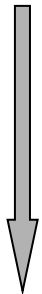
All'aumentare della temperatura la pendenza della curva aumenta \Rightarrow La resistenza a trazione diventa più sensibile alla velocità di deformazione a temperature elevate



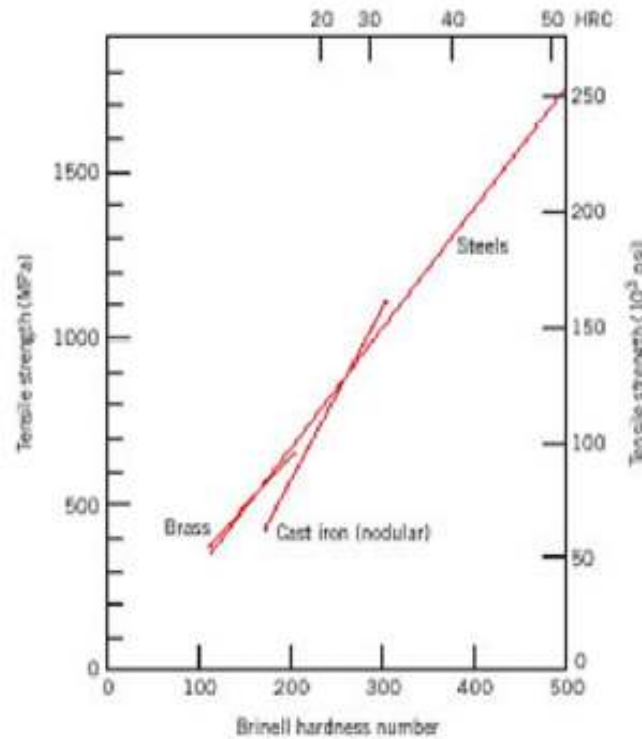
alluminio

Correlazione durezza – tensione di snervamento

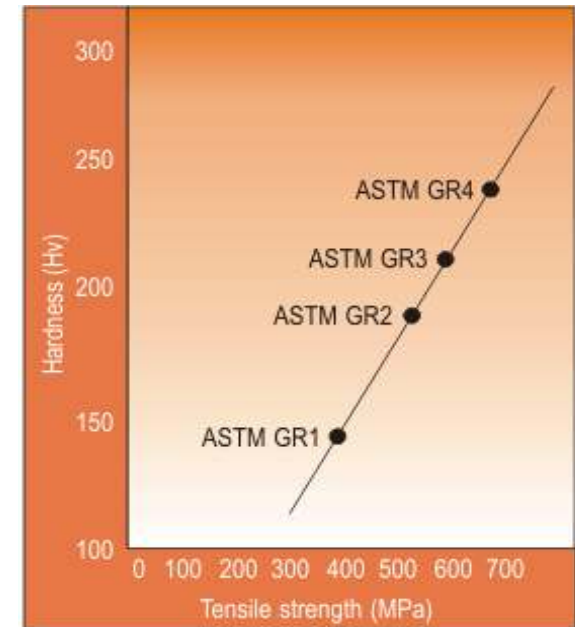
Prove sperimentali effettuate su diversi materiali hanno dimostrato che il rapporto fra la σ_s e la HV è praticamente costante in un ampio intervallo



$$HB \approx HV \approx 0,3 \sigma_s$$



ottone, ghisa, acciaio



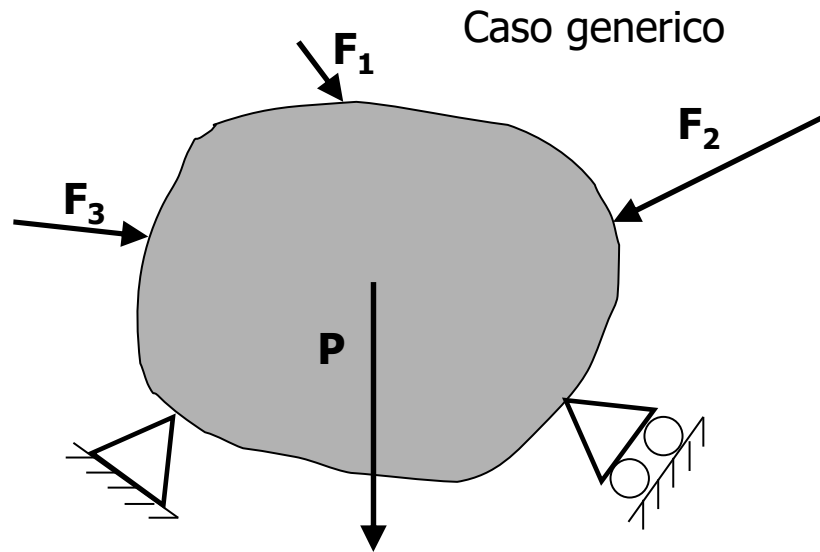
titanio

Una prova di durezza può essere considerata quasi equivalente ad una prova di compressione eseguita su una piccola porzione di materiale

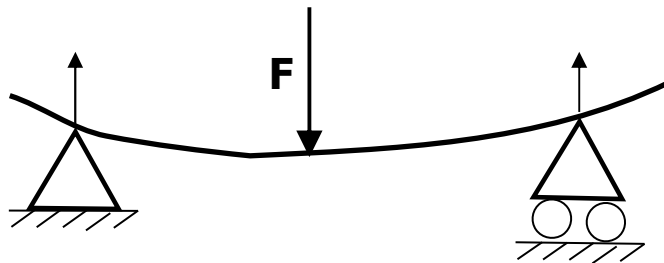
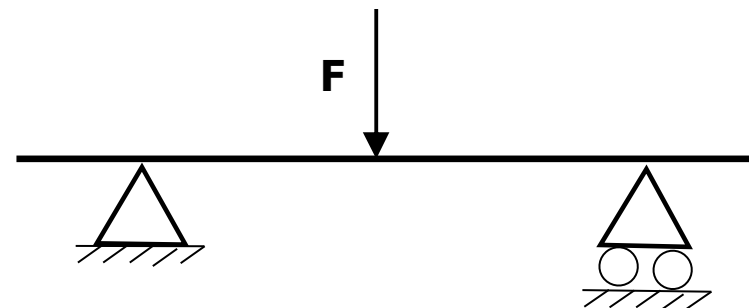


Resistenza dei materiali

Forze	di massa	gravitazionali inerziali elettromagnetiche
	di contatto	fra solidi fra solidi e liquidi fra solidi e gas
	attraverso una superficie	
	pressioni tensioni sollecitazioni	accettabili?
	deformazioni	accettabili?



riducibile a



che porta a tensioni/deformazioni



Studio delle sollecitazioni / deformazioni

Forze → F

Reazioni vincolari → R_1, R_2, \dots, R_n = F/2 trave appoggiata

Momento flettente → M_t = F L / 4

Freccia massima → f = F L³ / 48 E I

Tensione → σ = $M_t y / I$

?? $\sigma < = > \sigma_{max}$??

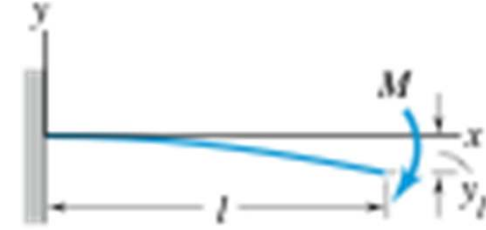
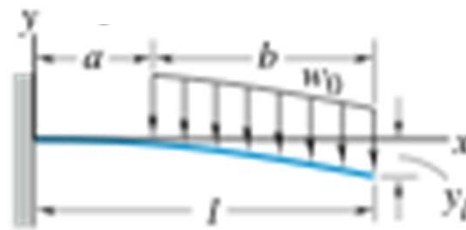
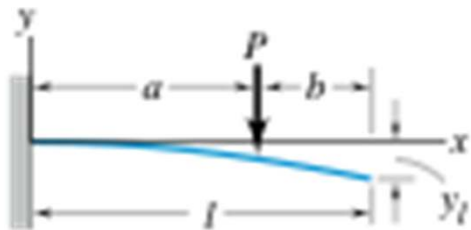
?? $f < = > f_{max}$??

F forza
L lunghezza
E modulo elastico
I momento d'inerzia
y semi spessore
f freccia massima
 σ tensione

Tipologia di Carico (Forze o Coppie)

CONCENTRATO se agiscono su un punto isolato della superficie del corpo

RIPARTITO o DISTRIBUITO se agiscono su zone estese



PERMANENTE se agisce continuamente e invariabilmente (peso proprio)

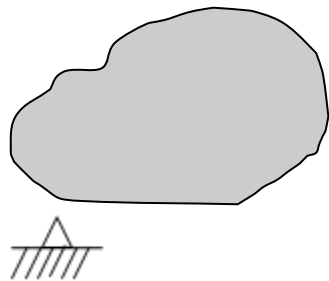
ACCIDENTALE se agisce non continuamente e con intensità variabile

STATICO se costante o varia con sufficiente lentezza da non produrre vibrazioni nella struttura

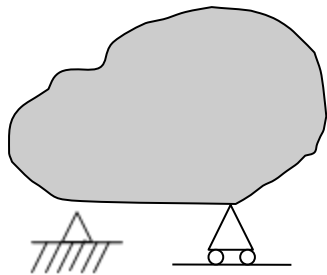
DINAMICO se variabile in modo rapido



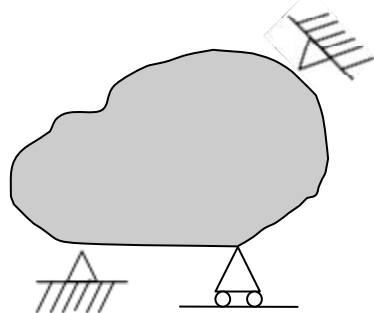
Tipologia di Reazione vincolare



LABILE quando i vincoli sono insufficienti rispetto ai gdl



ISOSTATICA quando il numero dei vincoli è uguale a quello dei gdl



IPERSTATICA quando i vincoli sono sovrabbondanti rispetto ai gdl

Masse e Momenti di Inerzia

Shape	Equations
	$m_s = \frac{\pi d^2 l \rho}{4}$ $I_{xx} = I_{yy} = I_{zz} = \frac{m_s l^2}{12}$
	$m_s = \frac{\pi d^2 t \rho}{4}$ $I_{xx} = \frac{m_s d^2}{8}$ $I_{yy} = I_{zz} = \frac{m_s d^2}{16}$
	$m_s = abc\rho$ $I_{xx} = \frac{m_s (a^2 + b^2)}{12}$ $I_{yy} = \frac{m_s (a^2 + c^2)}{12}$ $I_{zz} = \frac{m_s (b^2 + c^2)}{12}$
	$m_s = \frac{\pi d^2 l \rho}{4}$ $I_{xx} = \frac{m_s d^2}{8}$ $I_{yy} = I_{zz} = \frac{m_s (3d^2 + 4l^2)}{48}$
	$m_s = \frac{\pi \rho (d_o^2 - d_i^2) l}{4}$ $I_{xx} = \frac{m_s (d_o^2 - d_i^2)}{8}$ $I_{yy} = I_{zz} = \frac{m_s (3d_o^2 - 3d_i^2 + 4l^2)}{48}$
	$m_s = \frac{\pi d^3 \rho}{6}$ $I_{xx} = I_{yy} = I_{zz} = \frac{m_s d^2}{10}$

la Massa è una misura della resistenza alle variazioni in un moto di traslazione

il Momento di Inerzia è una misura della resistenza del corpo a mutare la sua velocità di rotazione. Dipende dalla massa del corpo e dalla distribuzione di questa rispetto all'asse di rotazione.



Stato di Sollecitazione

Noti i carichi: forze e coppie attive (F e M) e le Reazioni vincolari (R_n) agenti su un generico corpo è necessario cercare le interazioni scambiate attraverso una generica sezione piana S del corpo → determinare le Tensioni interne σ

Sollecitazioni semplici

Compressione / Trazione	Produce accorciamento / allungamento delle fibre lungo asse del solido
Taglio	Produce lo scorrimento di una sezione rispetto a quella adiacente sia trasversalmente che longitudinalmente.
Flessione	Produce incurvamento longitudinale del solido
Torsione	Produce la rotazione delle sezioni trasversali rispetto all'asse

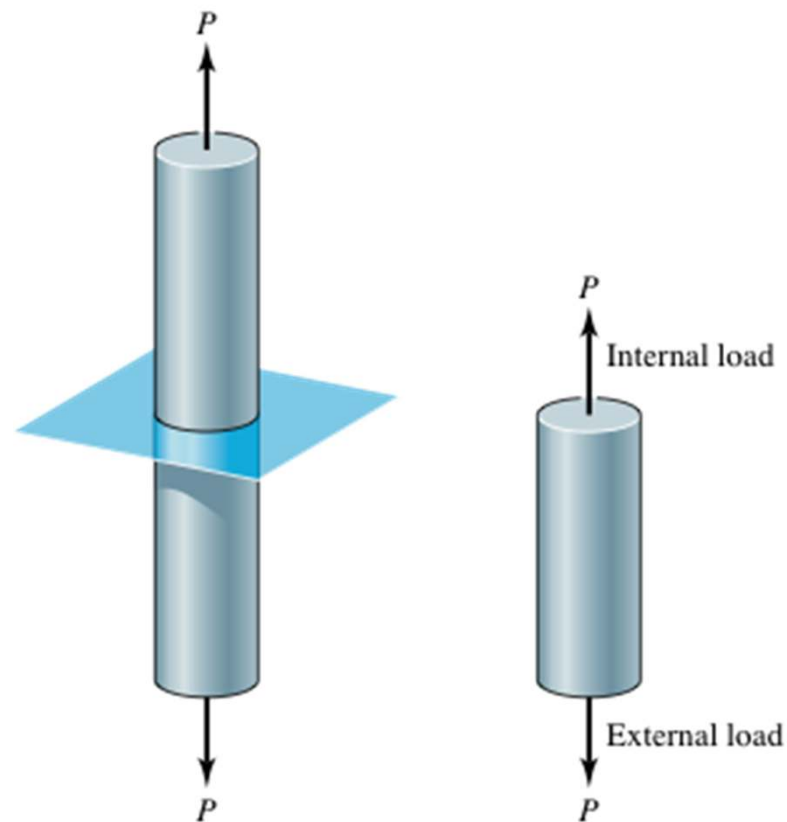
Sollecitazioni composte

Pressoflessione	Produce accorciamento e incurvamento delle fibre lungo l'asse del solido
Flessione e taglio	Dovuta a forze inclinate rispetto all'asse longitudinale per cui provocano deformazioni composte
Carico di punta	Produce sbandamento dell'asse essendo i carichi di compressione agenti su solidi troppo snelli



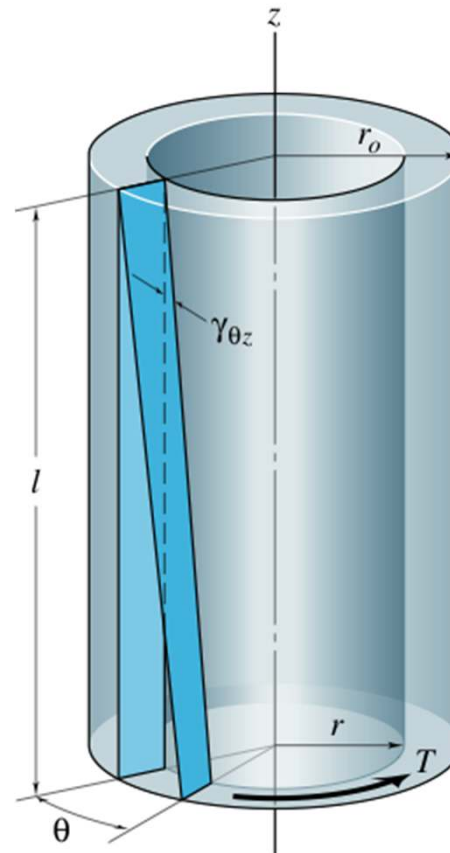
Esempi di sollecitazioni elementari cui può essere soggetto un corpo

Barra circolare sottoposta a Trazione



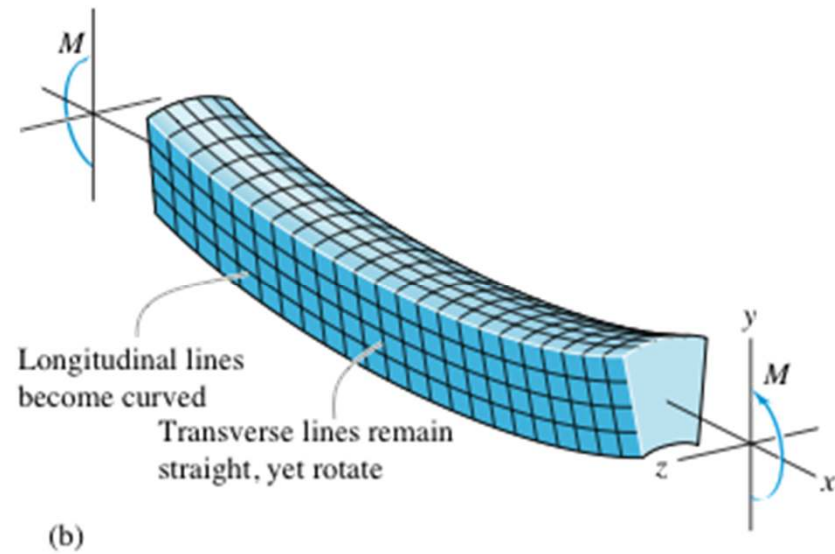
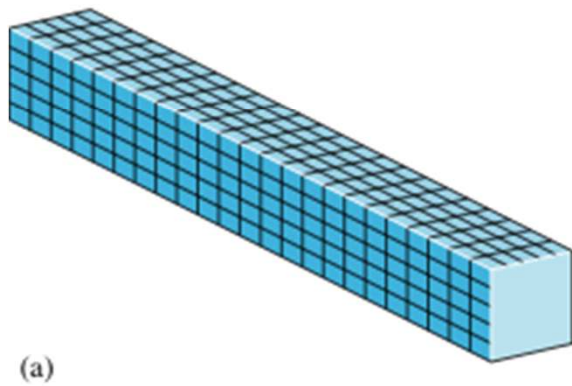


Cilindro cavo sottoposto a Torsione



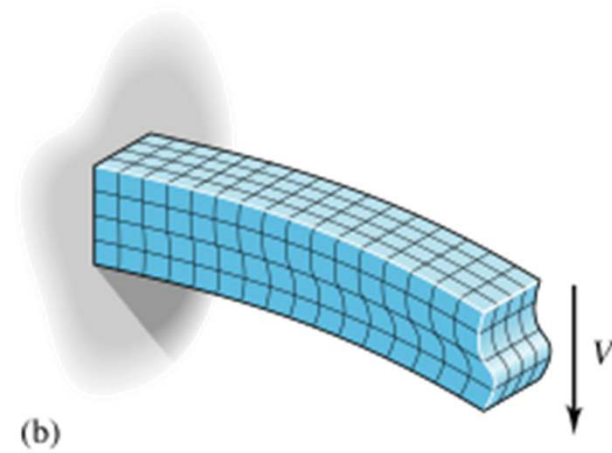
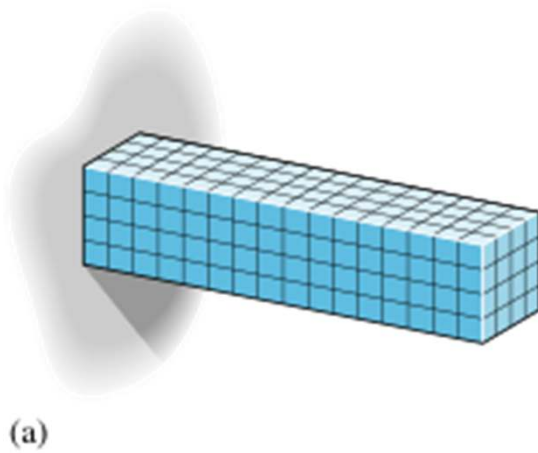


Trave sottoposta a Flessione



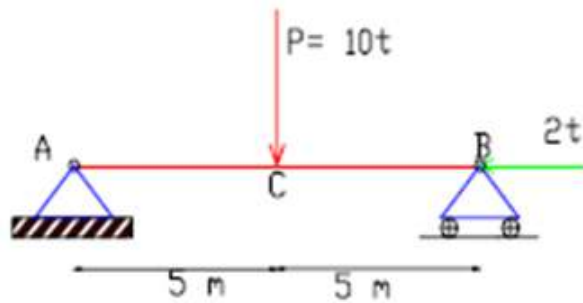


Trave sottoposta a Flessione e Taglio

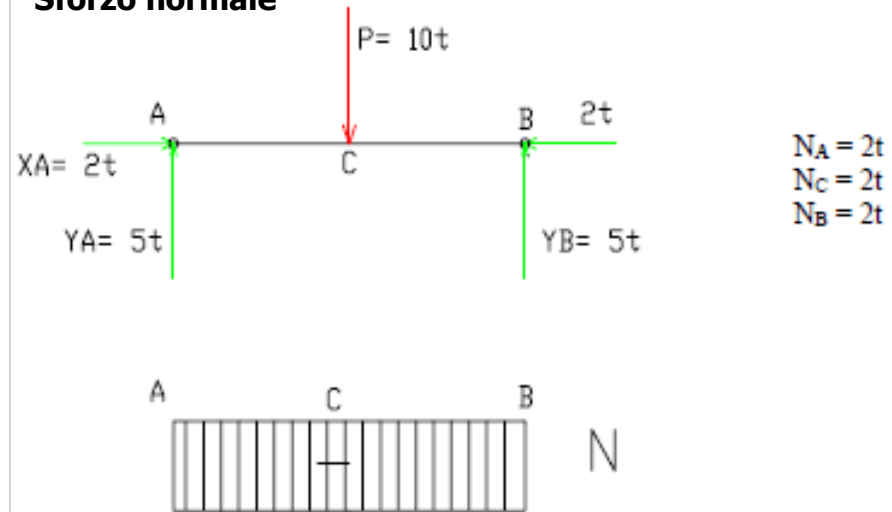




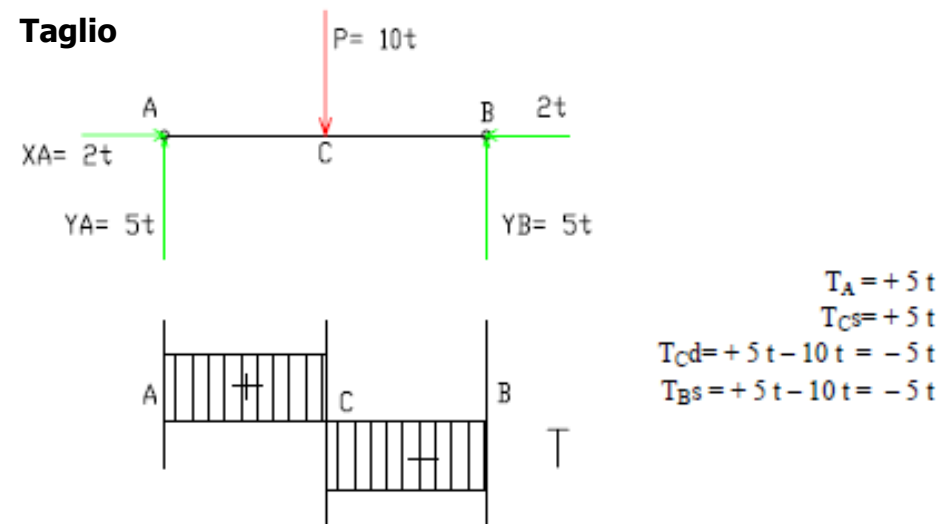
Diagrammi delle sollecitazioni



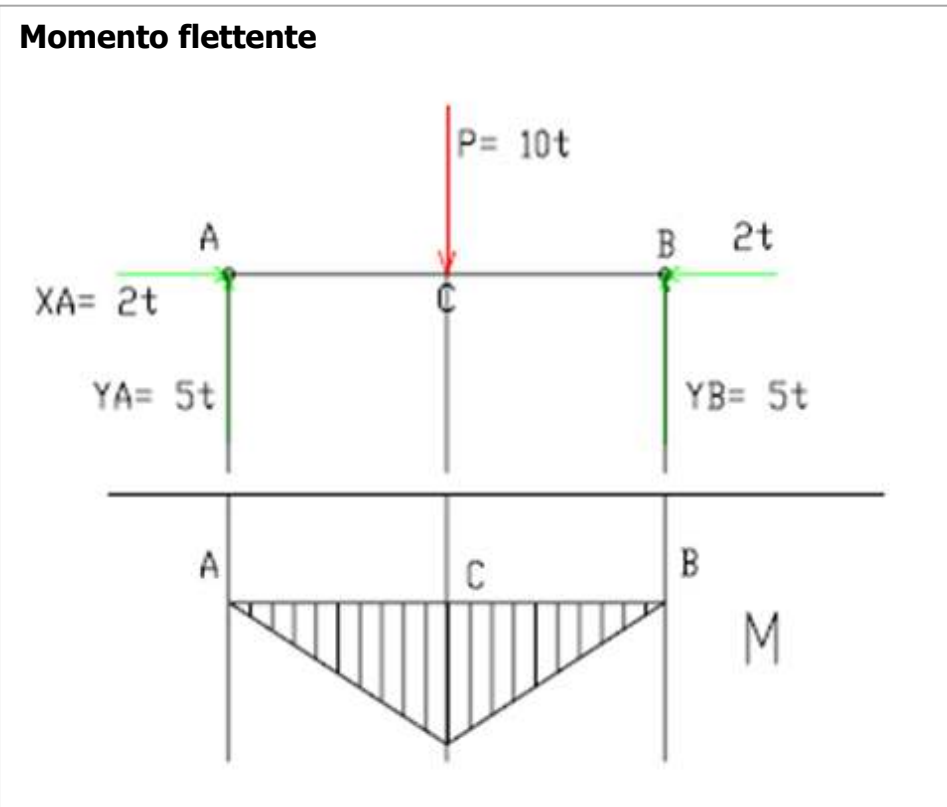
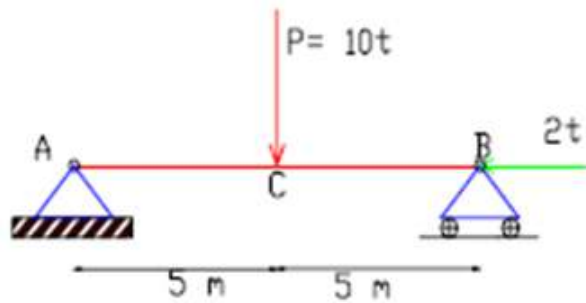
Sforzo normale



Taglio

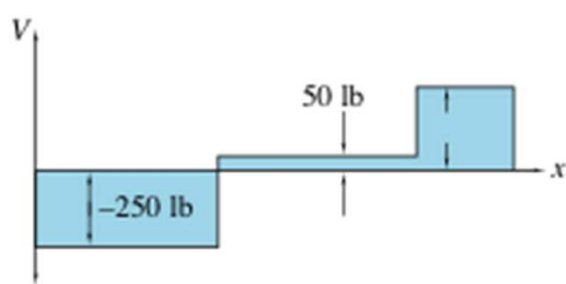
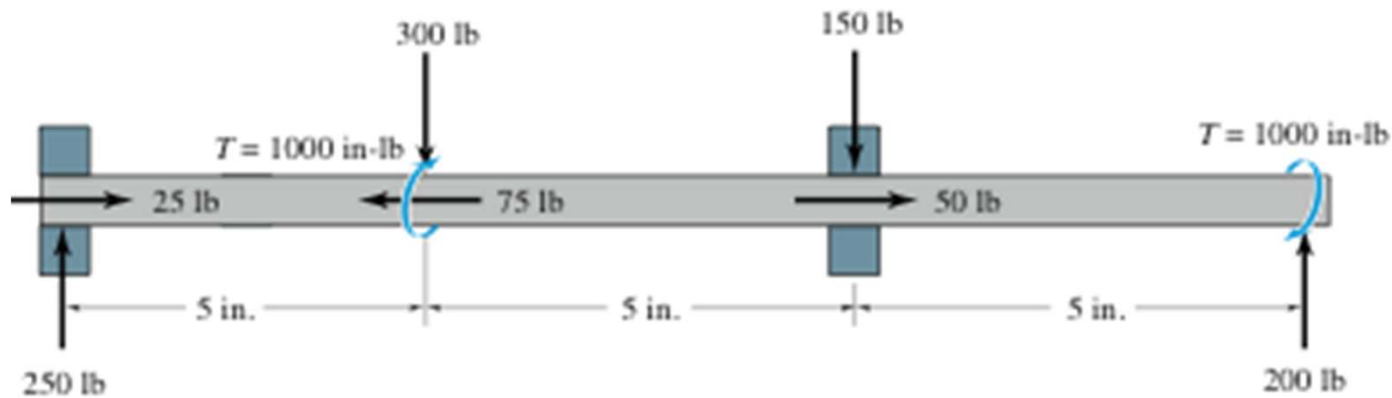


Diagrammi delle sollecitazioni

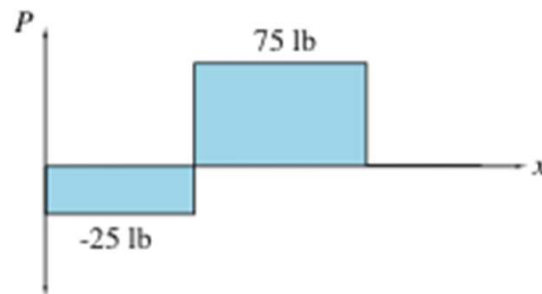




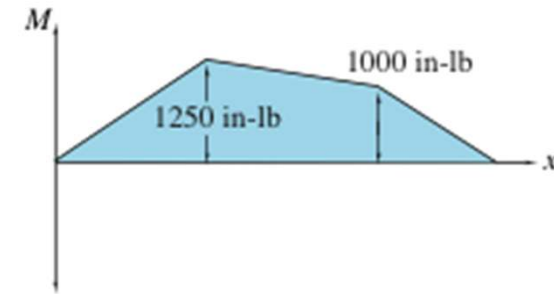
Albero sottoposto ad un sistema di forze



(a)



(b)



(c)

(a) Forza di taglio; (b) Sforzo normale; (c) diagramma del momento flettente.