

3



Modulo di **T**ecnologia dei **M**ateriali

Docente: Dr. Giorgio Pia

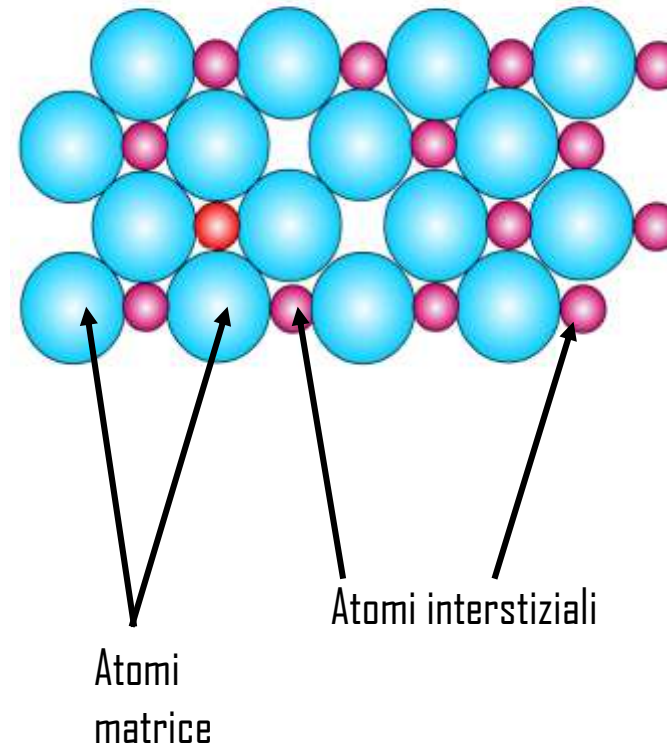
Modulo di **T**ecnologia dei **M**ateriali

La Diffusione

Diffusione atomica nei solidi

Diffusione per meccanismo interstiziale

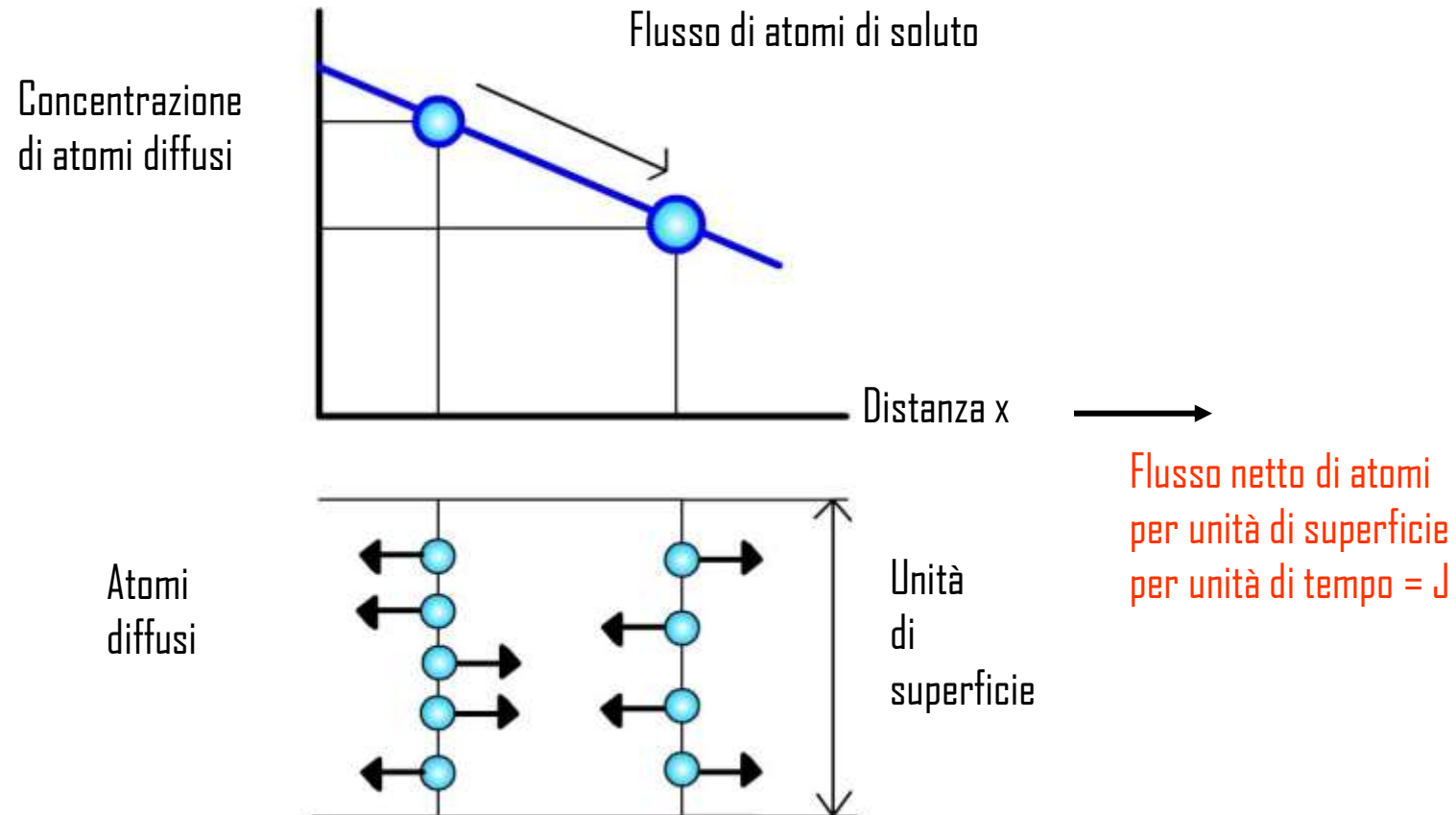
- Gli atomi si muovono da un sito interstiziale ad un altro
- Gli atomi che si muovono devono essere più piccoli degli atomi della matrice
- Esempio:
il carbonio diffonde interstizialmente nel ferro α CCC o nel ferro γ CFC



Diffusione atomica nei solidi

Diffusione allo stato stazionario

- Non c'è variazione nella concentrazione di atomi di soluto a differenti piani in un sistema, in un periodo di tempo
- Non avviene nessuna reazione chimica. Solo flusso netto di atomi



Diffusione atomica nei solidi

Legge di Fick

- Il flusso di atomi è dato da

$$J = -D \frac{dc}{dx}$$

J = flusso netto di atomi

D = coefficiente di diffusione

$$\frac{dc}{dx} = \text{gradiente di concentrazione}$$

I.e. per la condizione di diffusione allo stato stazionario, il flusso netto di atomi per diffusione atomica è uguale alla diffusione D per il gradiente di diffusione dc/dx

- Esempio: diffusività del ferro CFC a 500°C è $5 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{S}$ ed a 1000°C è $3 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{S}$

Diffusione atomica nei solidi

Diffusività

- La diffusività dipende da
 - tipo di diffusione: se la diffusione è interstiziale o sostituzionale
 - temperatura: quando la temperatura aumenta, la diffusività aumenta
 - tipo di struttura cristallina: il cristallo CCC ha APF = 0.68 rispetto al cristallo CFC (APF = 0.74) e quindi ha maggiore diffusività. Inoltre in CCC gli spazi interatomici sono maggiori che in CFC.
 - tipo di difetti del cristallo: strutture più aperte (bordi di grano) aumenta la diffusione
 - concentrazione delle specie diffuse: maggiori concentrazioni degli atomi di soluto diffusi influenzeranno la diffusività

Modulo di **T**ecnologia dei **M**ateriali

Proprietà Meccaniche

Deformazione plastica dei metalli

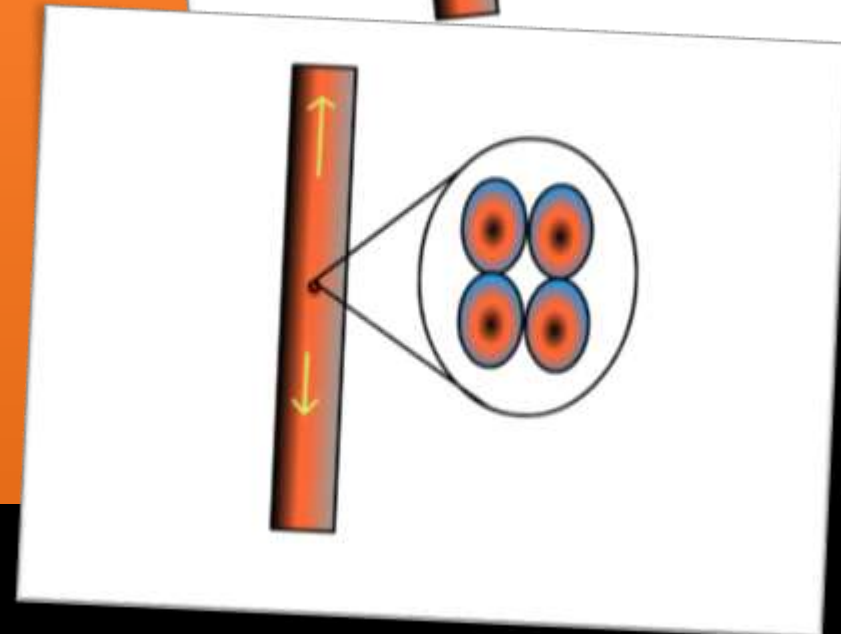
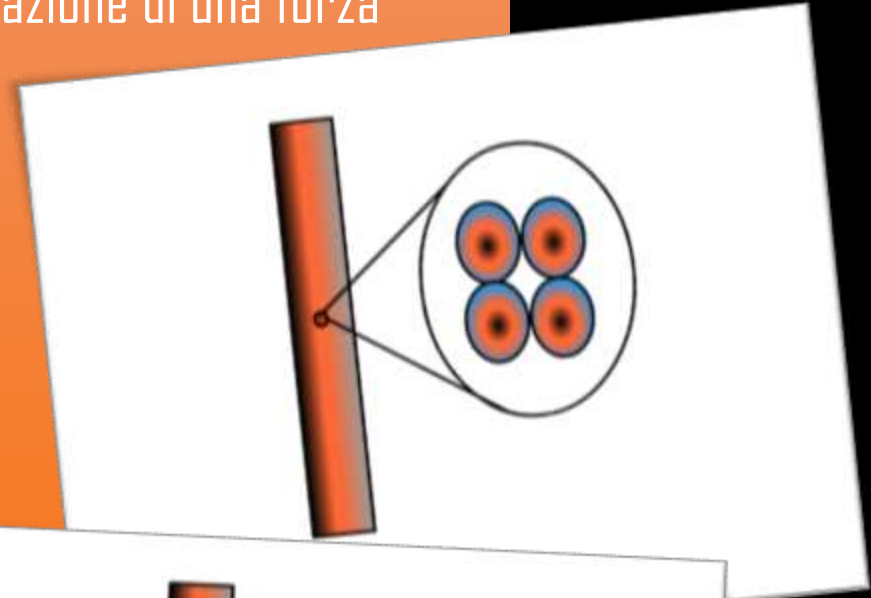




I metalli

Sforzo e deformazione dei metalli

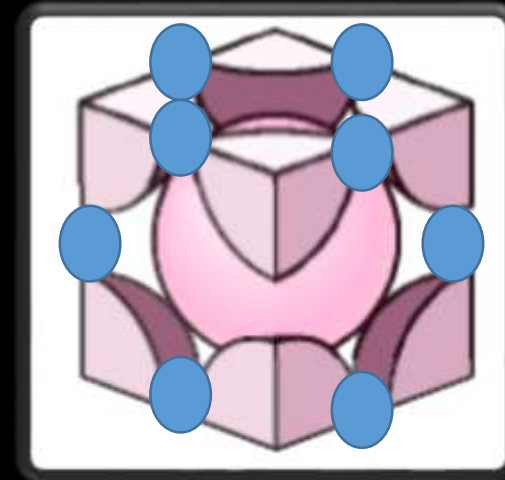
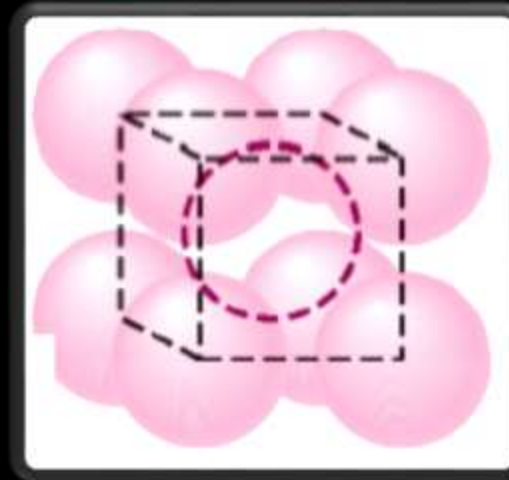
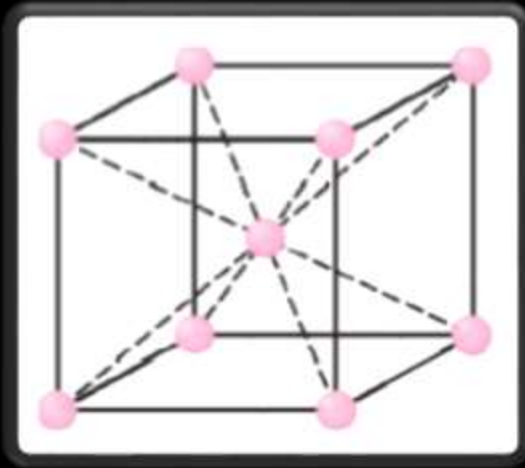
- I metalli vanno incontro a deformazione sotto l'azione di una forza assiale a trazione
- **Deformazione elastica:** il metallo ritorna alla sua dimensione iniziale quando la forza a trazione è rimossa
- **Deformazione plastica:** il metallo è deformato a un valore tale che non è possibile recuperare la sua dimensione iniziale



Ricordiamo... Reticoli di Bravais

Rappresentata da un atomo ad ogni spigolo di un cubo ed uno al centro del cubo...

...Ogni atomo ha 8 atomi vicini
Quindi, il *numero di coordinazione* è 8

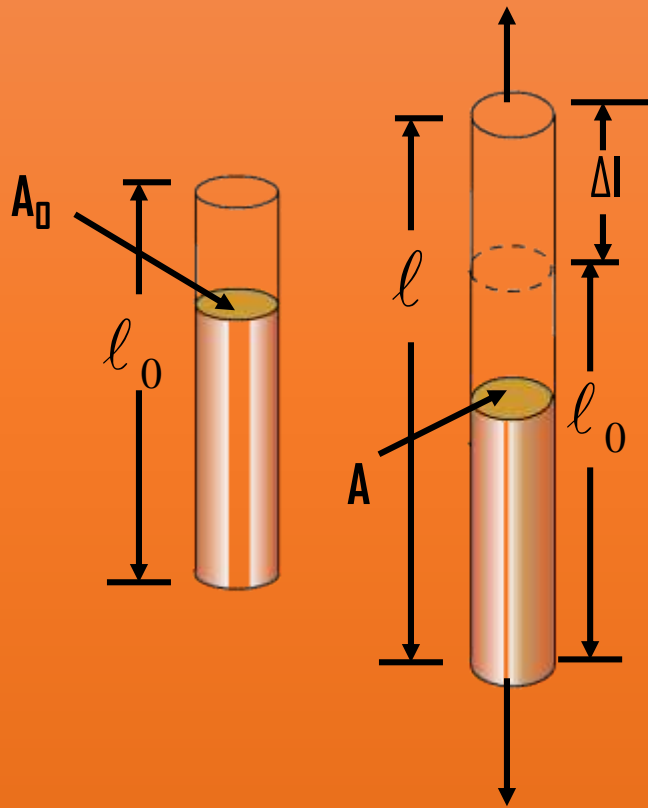


Esempi : Cromo ($a = 0.289$ nm); Ferro ($a = 0.287$ nm); Sodio ($a = 0.429$ nm)

I metalli

Sforzo e deformazione nominale

Sforzo nominale $\sigma = \frac{F \text{ (forza a trazione assiale media)}}{A_0 \text{ (superficie resistente iniziale)}}$



Unità dello sforzo: PSI or N/m² (Pascal)

Deformazione nominale = $\epsilon =$

$$\begin{aligned} & \frac{\text{Variazione lunghezza}}{\text{Lunghezza iniziale}} \\ &= \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l} \end{aligned}$$

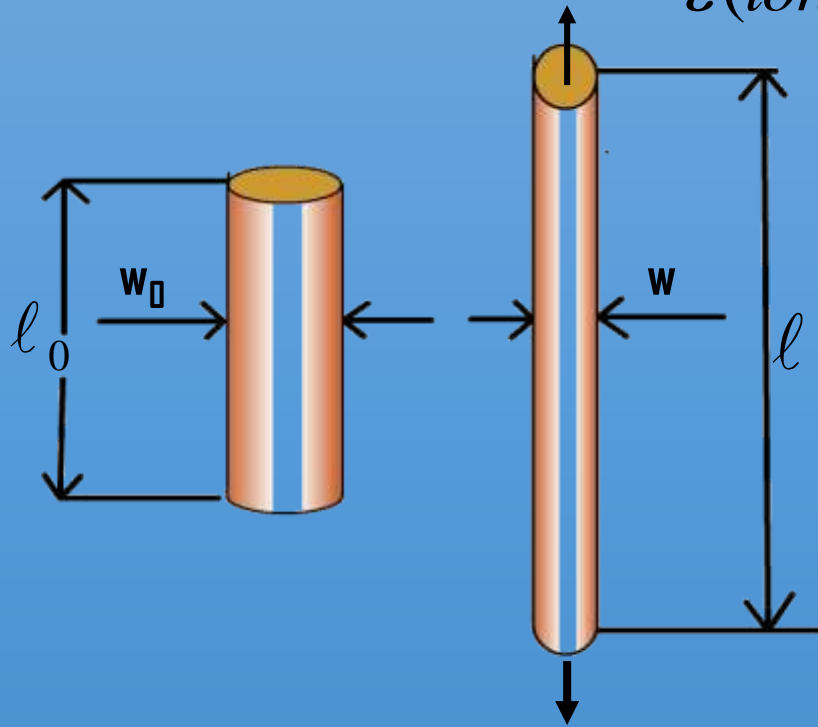
Unità della deformazione: in/in o m/m

I metalli

Modulo di Poisson

Rapporto di Poisson =

$$\nu = - \frac{\varepsilon(\text{laterale})}{\varepsilon(\text{longitudinale})} = - \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z}$$



$$\nu = - \frac{w - w_0}{l - l_0}$$

Solitamente il rapporto di Poisson varia tra 0.25 e 0.4.

Esempi: Acciaio inossidabile 0.28 →
Rame 0.33 →

I metalli

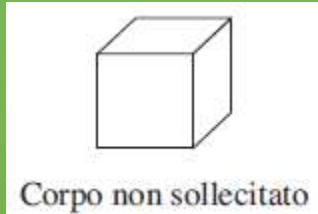
Costanti elastiche

Materiale	Modulo di Poisson
Leghe di alluminio	0.31
Rame	0.33
Acciaio (al solo carbonio e basso legato)	0.33
Acciaio inossidabile (18-8)	0.28
Titanio	0.31
Tungsteno	0.27

I metalli

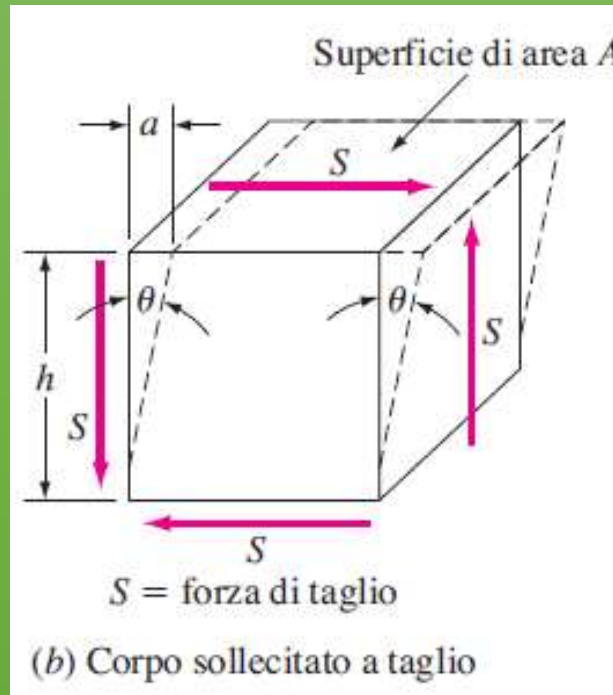
Sforzo e deformazione di Taglio

$$\tau = \text{sforzo di taglio} =$$



S (forza di taglio)

A (superficie applicazione forza di taglio)



$$\text{Deformazione di taglio } \gamma =$$

spostamento a taglio

distanza " h " sulla quale agisce lo sforzo

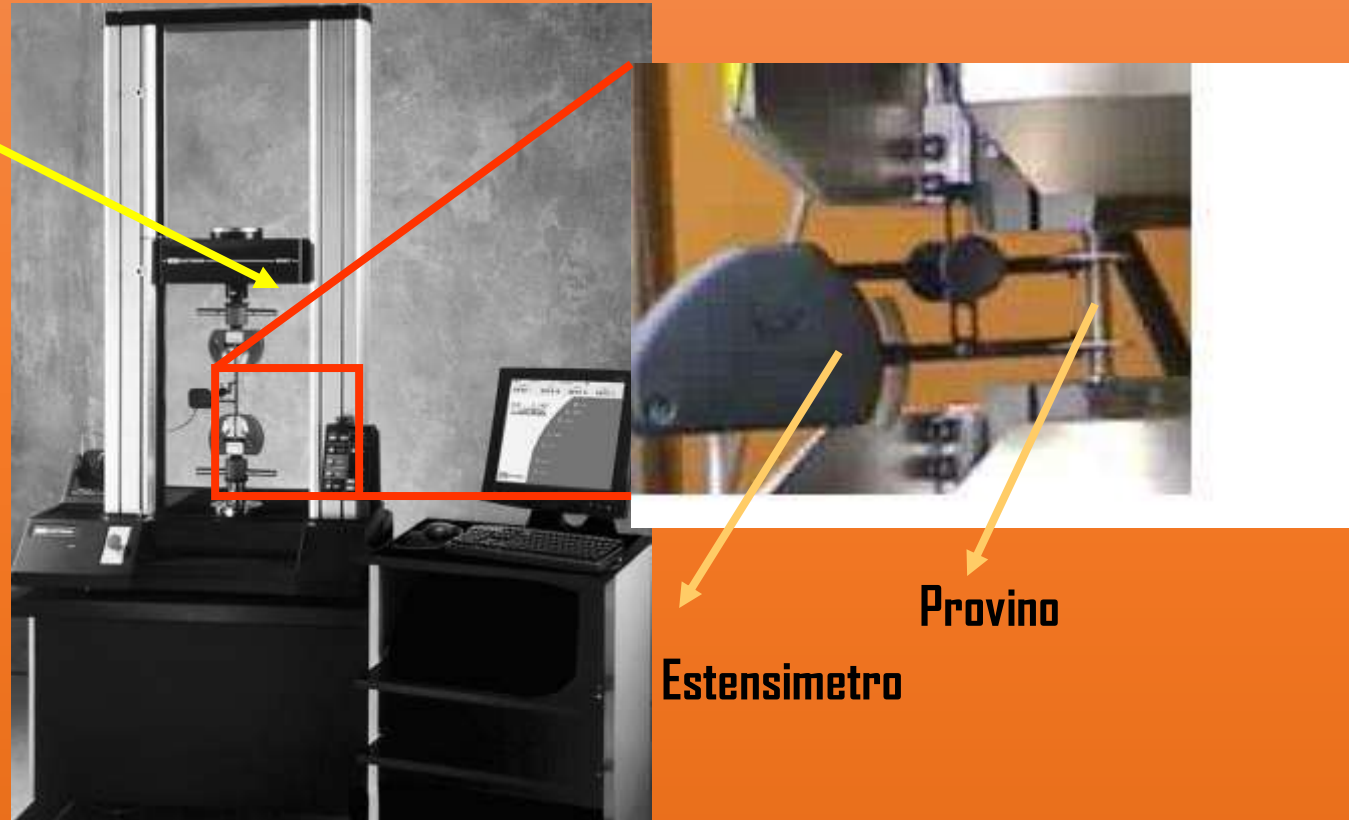
$$\text{Modulo elastico } G = \tau / \gamma$$

I metalli

Prova a trazione

- La resistenza meccanica dei materiali può essere testata tirando il metallo fino a rottura

Cella di carico

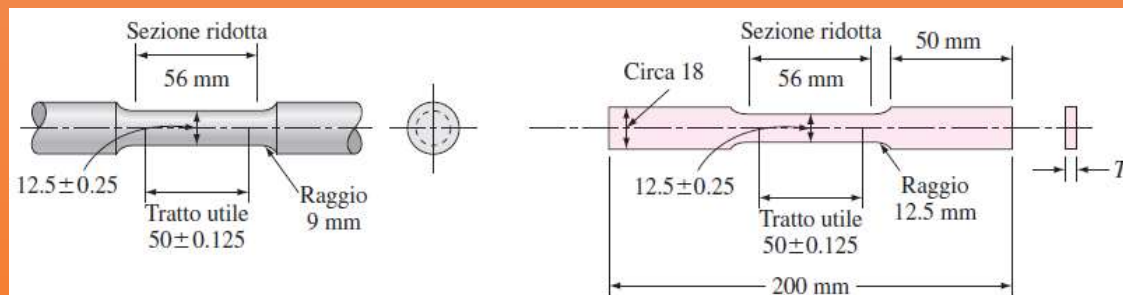


Estensimetro
Provino

I dati di forza sono ottenuti dalla **cella di carico**
I dati di deformazione sono ottenuti dall'**estensimetro**

I metalli

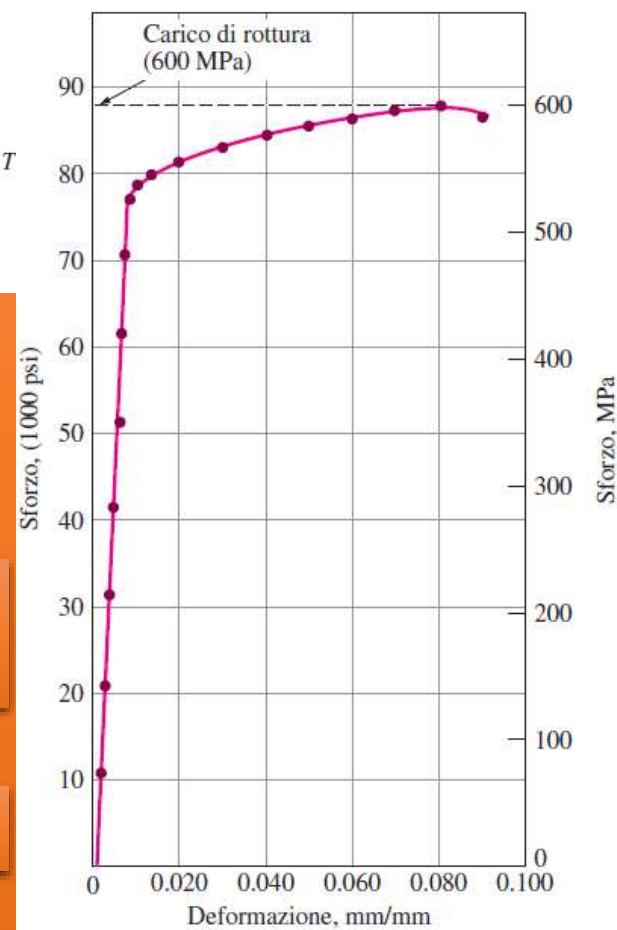
Prova a trazione



Provini utilizzati

Tipica curva
sforzo/deformazione

Al ad alta resistenza



I metalli

Proprietà meccaniche ottenute dalla prova a trazione

Il modulo di elasticità

Il carico di snervamento ad una deformazione dello 0.2%

Il carico di rottura

L'allungamento percentuale a rottura

La strizione percentuale a rottura

I metalli

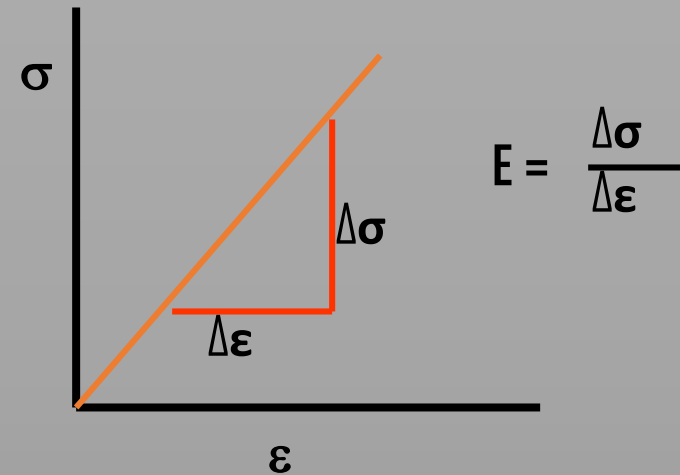
Proprietà meccaniche

- **Modulo di Elasticità (E):** lo sforzo e la deformazione hanno una relazione lineare nel campo elastico (Legge di Hook)

$$E = \frac{\sigma \text{ (sforzo)}}{\varepsilon \text{ (deformazione)}}$$

Maggiore la resistenza di legame,
maggiore il modulo di elasticità

- Esempi:
Modulo di elasticità dell'acciaio: 207 GPa
Modulo di elasticità dell'alluminio: 76 GPa



**Porzione lineare della curva
sforzo/deformazione**

I metalli

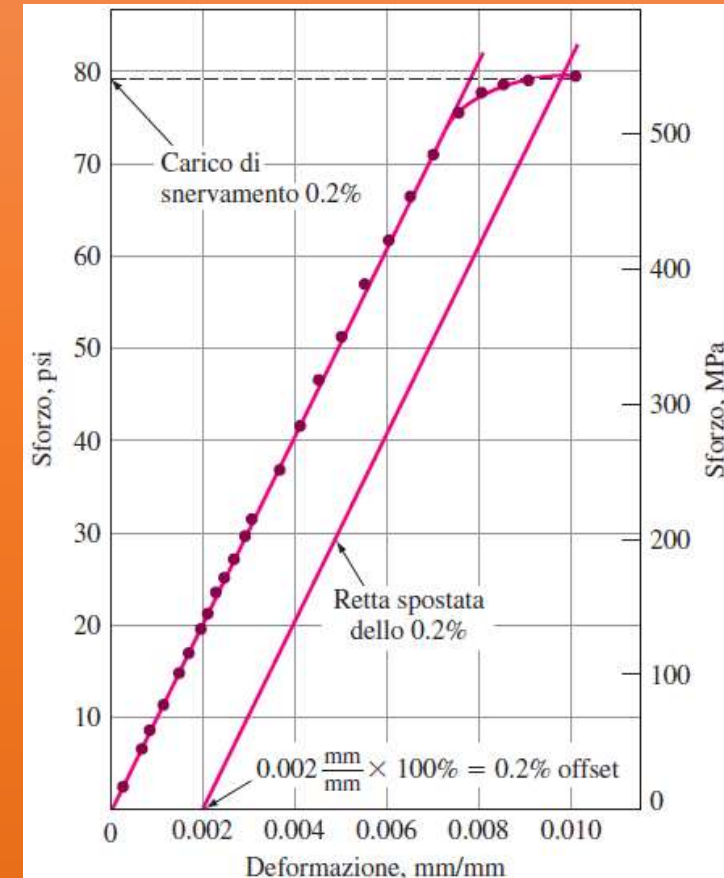
Proprietà meccaniche

Materiale	Modulo di Poisson	ità,
Leghe di alluminio	0.31	
Rame	0.33	
Acciaio (al solo carbonio e basso legato)	0.33	
Acciaio inossidabile (18-8)	0.28	
Titanio	0.31	
Tungsteno	0.27	

I metalli

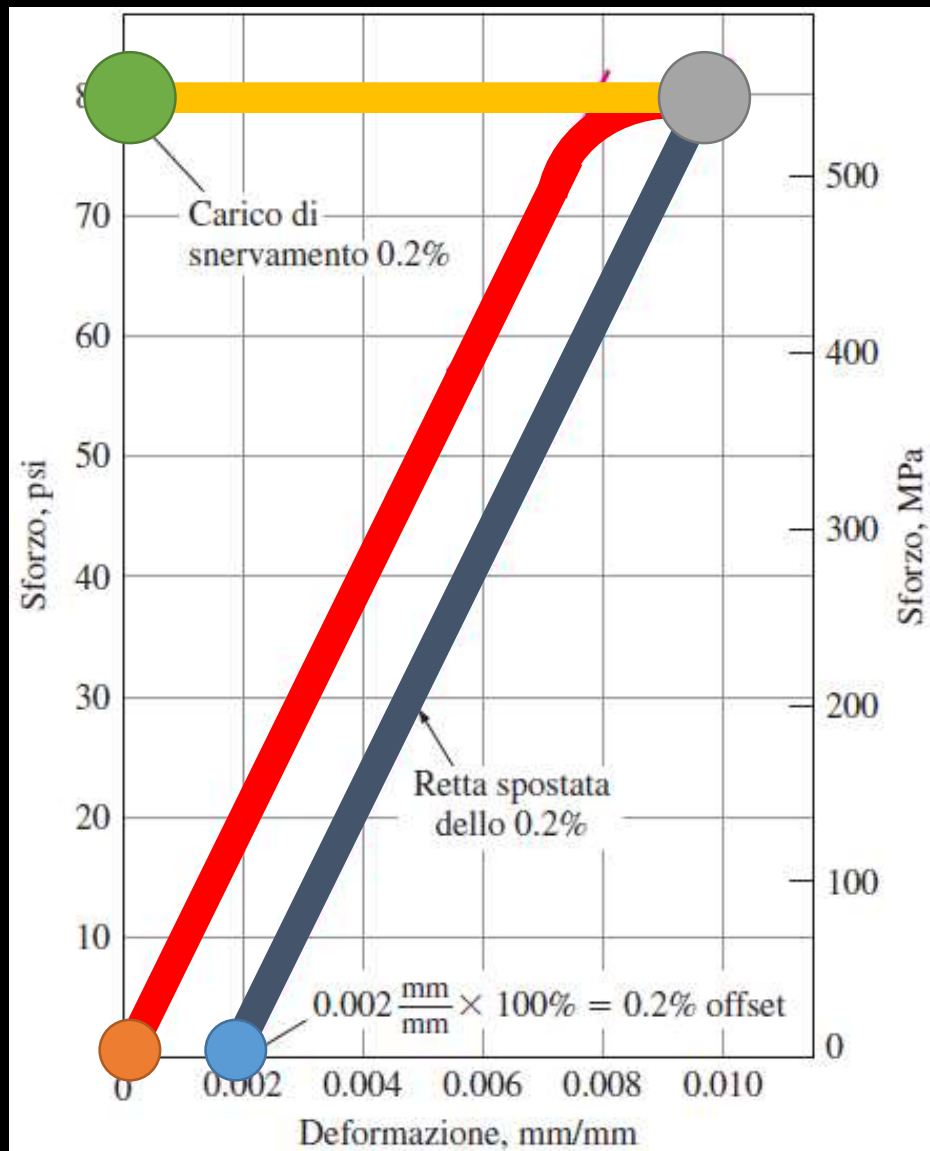
Sforzo di snervamento

- Lo sforzo di snervamento è lo sforzo al quale il metallo o la lega mostrano una significativa deformazione plastica
- ***offset sforzo di snervamento a 0.2%*** è quello sforzo al quale avviene una deformazione plastica pari allo 0.2%
- La linea di costruzione, che parte allo 0.2% di deformazione, parallela al campo elastico, è disegnata per trovare l'offset dello sforzo di snervamento a 0.2% di deformazione



I metalli

Sforzo di snervamento



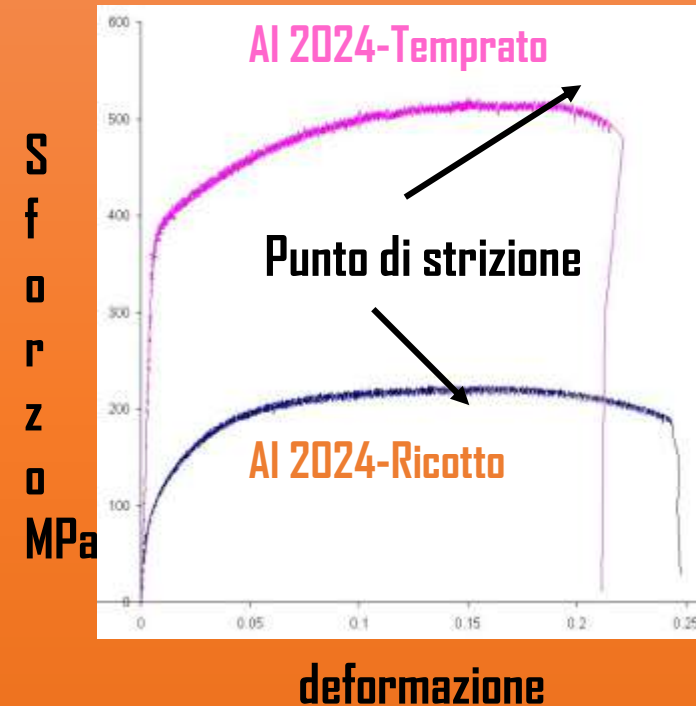
I metalli

Sforzo a rottura

- Lo sforzo a rottura a trazione (σ_r) è il massimo sforzo raggiunto in una curva sforzo/deformazione
- La **strizione** inizia quando è raggiunto σ_r



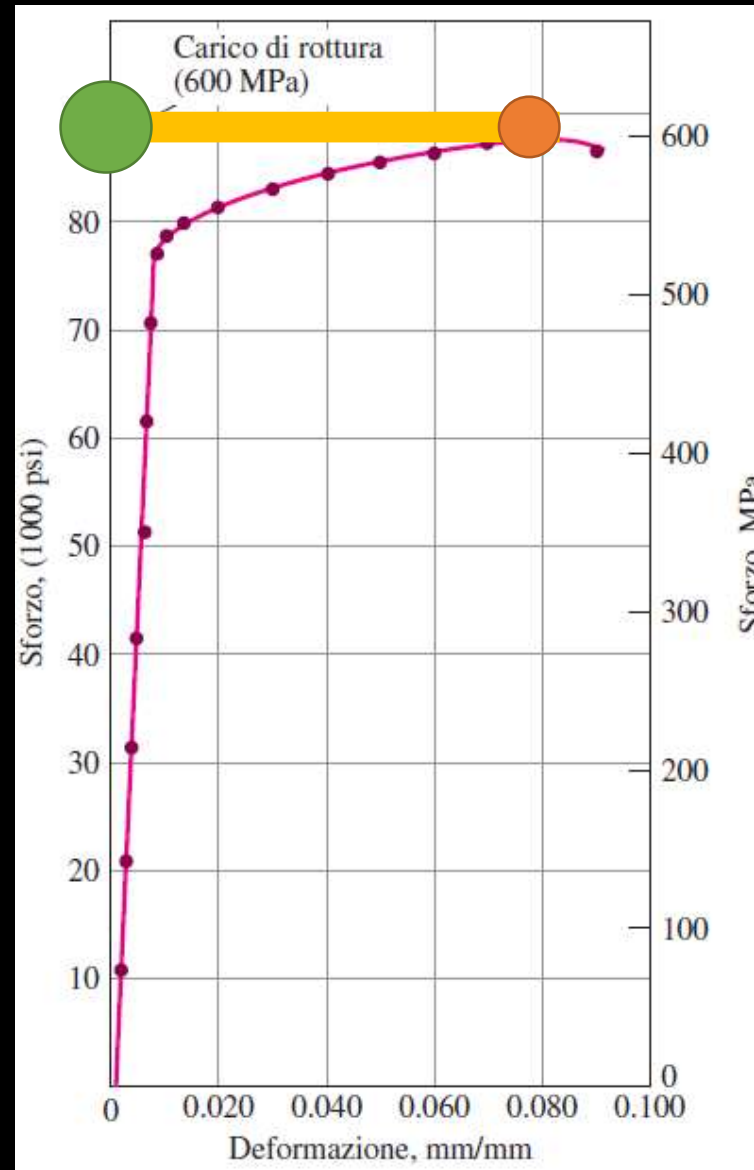
- Più duttile è il metallo, maggiore è la strizione prima della rottura
- Lo sforzo aumenta fino a rottura. La diminuzione nella curva σ/ε è dovuta al calcolo dello sforzo basato sull'area iniziale.



Curve σ/ε di Al 2024 con due diversi trattamenti termici. il provino duttile ricotto si striziona di più

I metalli

Sforzo a rottura



I metalli

Allungamento percentuale

- L'allungamento percentuale è una misura della duttilità di un materiale
- È l'allungamento del metallo prima della rottura, espresso come percentuale della lunghezza iniziale

$$\% \text{ allungamento} = \frac{\text{Lunghezza finale} - \text{Lunghezza iniziale}}{\text{Lunghezza iniziale}}$$

- Misurata usando un calibro unendo le due parti fratturate
- Esempio: allungamento percentuale di Al puro 35%
per la lega di alluminio 7076-T6 11%

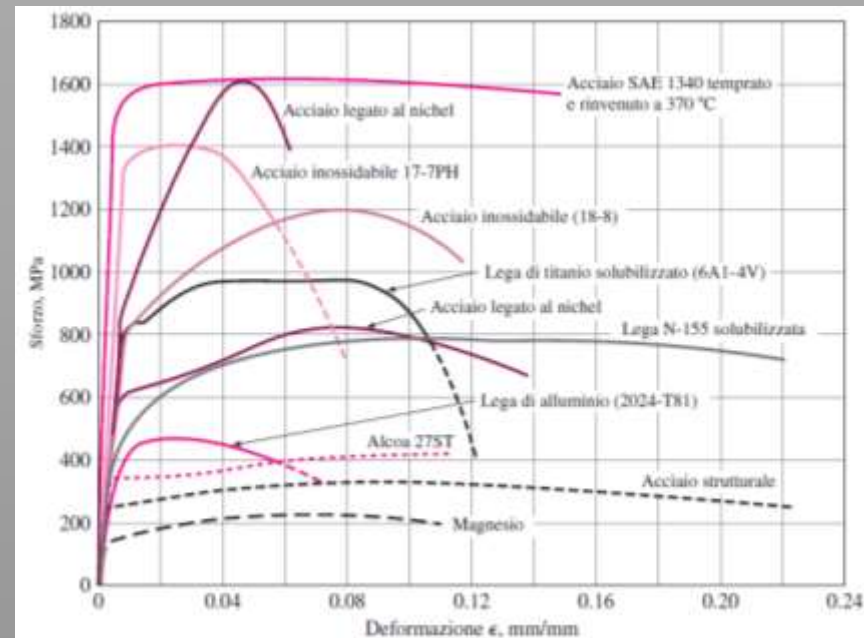
I metalli

Riduzione percentuale d'area

- La riduzione percentuale di area è un'altra misura della duttilità
- Il diametro della zona fratturata si misura con un calibro

$$\% \text{ riduzione area} = \frac{\text{Area iniziale} - \text{Area finale}}{\text{Area iniziale}}$$

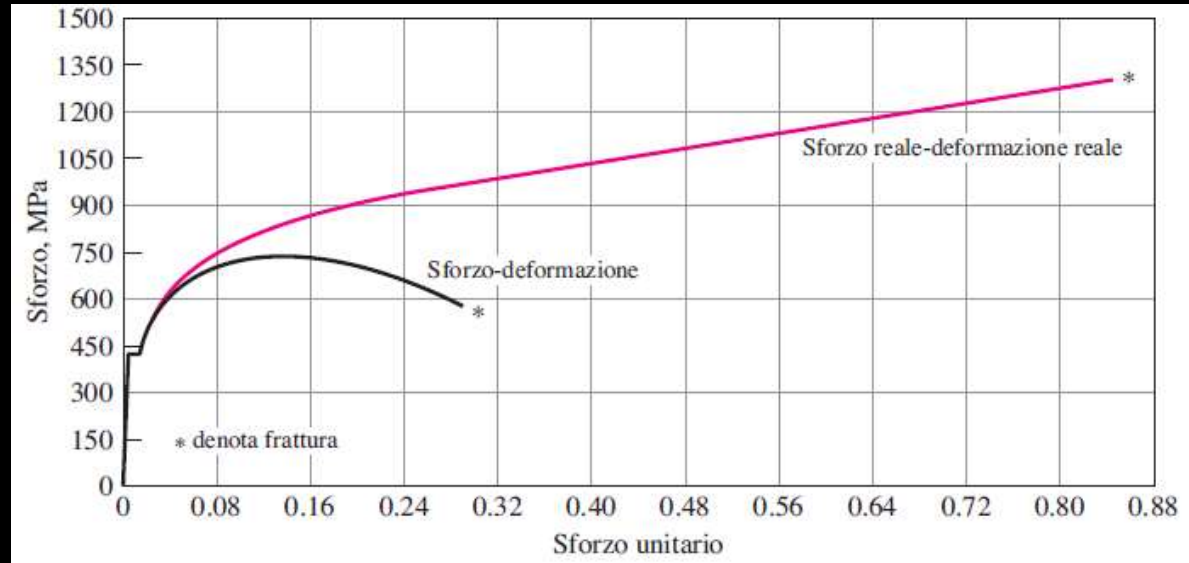
- La riduzione percentuale di area nei metalli diminuisce in presenza di porosità



Curve σ/ϵ per diversi metalli

I metalli

Sforzo e deformazione reale



- Lo sforzo e la deformazione reali si basano sulla superficie resistente e la lunghezza istantanea

- Sforzo reale = $\sigma_t = \frac{F}{A_i \text{ (superficie istantanea)}}$

- Deformazione reale = $\epsilon_t = \int_{l_0}^{l_i} \frac{dl}{l} = Ln \frac{l_i}{l_0} = Ln \frac{A_0}{A_i}$

- Lo sforzo reale è sempre maggiore dello sforzo nominale

I metalli

Durezza e prova di durezza

- La durezza è una misura della resistenza di un metallo alla deformazione (plastica) permanente
- Procedura generale:

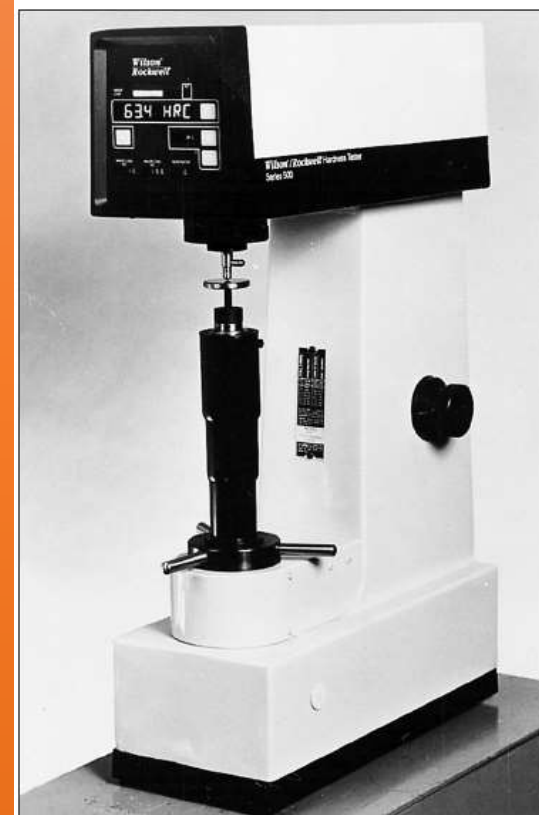
Premere il penetratore, che è più duro del metallo, sulla superficie del metallo



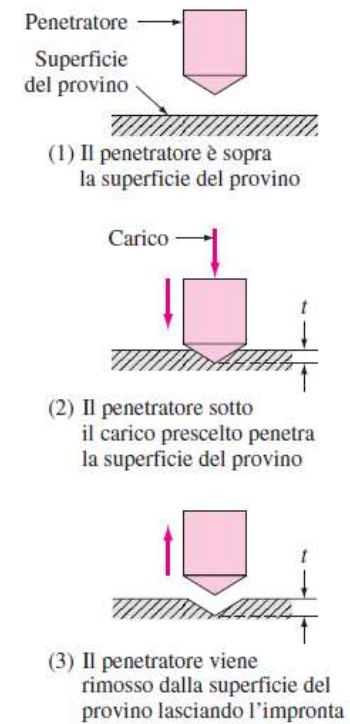
Sollevarre il penetratore



Misurare la durezza misurando la profondità e la larghezza dell'impronta

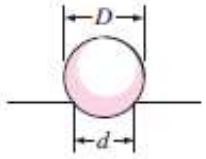
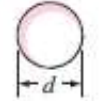
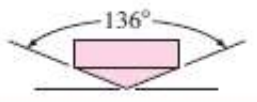
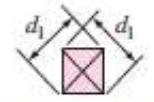
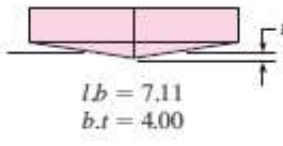
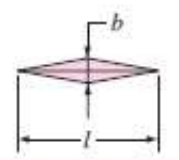
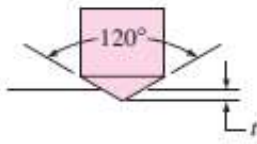

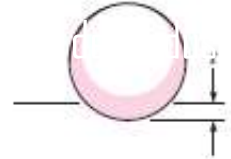



Strumento per la durezza Rockwell



I metalli

Prove di durezza

Test	Carico	Forma del penetratore		Penetratore	Formula per il calcolo della durezza
		Vista laterale	Vista dall'alto		
Brinell	P			Sfera di 10 mm di acciaio o carburo di tungsteno	$BHN = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	P			Piramide di diamante	$VHN = \frac{1.72P}{d_1^2}$
Microdurezza Knoop	P	 $lb = 7.11$ $b.t = 4.00$		Piramide di diamante	$KHN = \frac{14.2P}{l^2}$
Rockwell					
A } B } C }	60 kg 150 kg 100 kg			Cono di diamante	$\left. \begin{matrix} R_A \\ R_C \\ R_D \end{matrix} \right\} 100-500f$
B } F } G }	100 kg 60 kg 150 kg			Sfera di acciaio di diametro 1/16 in	$\left. \begin{matrix} R_B \\ R_F \\ R_G \end{matrix} \right\} 130-500f$
E	100 kg			Sfera di acciaio di diametro 1/8 in	$\left. \begin{matrix} R_E \end{matrix} \right\}$

La prova di durezza
non distruttiva
Per questo m

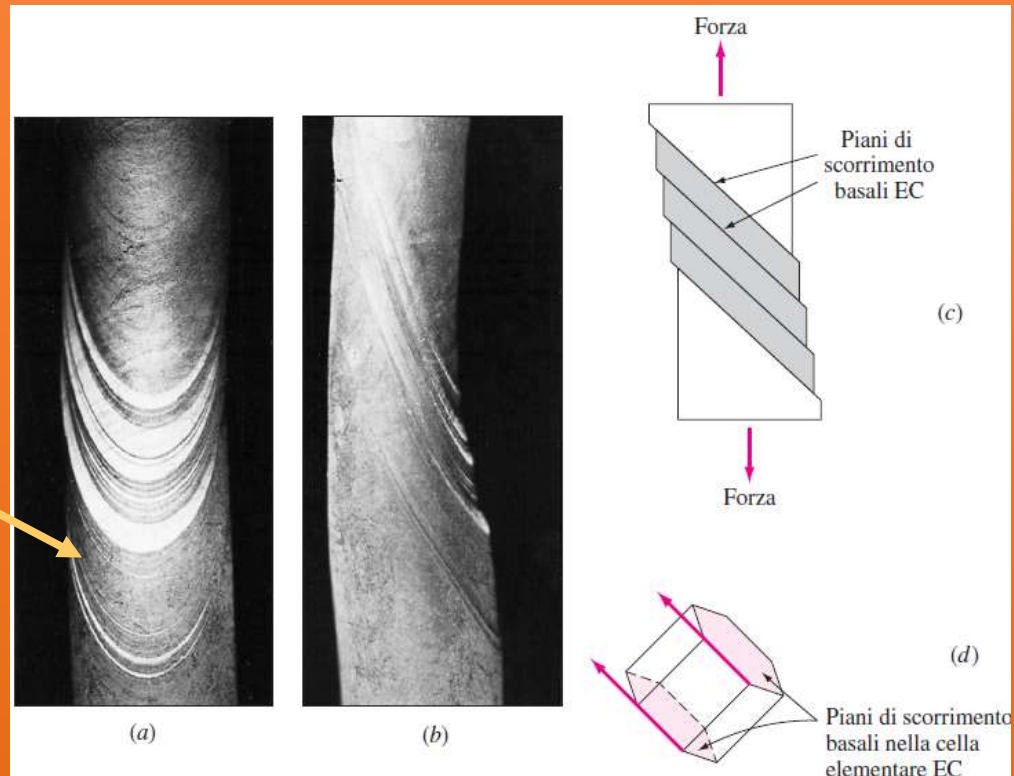
po

I metalli

Deformazione plastica in monocristalli

- La deformazione plastica di un **monocristallo** provoca segni di traslazione sulla superficie
→ **bande di scorrimento**
- Atomi di specifici piani cristallografici (piani di scorrimento) provocano le bande di scorrimento

Bande di scorrimento
Sono dovute a sforzi di taglio



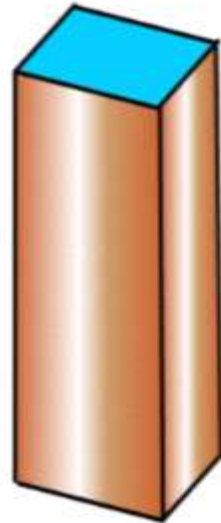
I metalli

Bande di scorrimento e piani di scorrimento

- Le bande di scorrimento nei metalli duttili sono uniformi (avvengono su alcuni piani di scorrimento)

- Lo scorrimento avviene su diversi *piani di scorrimento* all'interno delle bande di scorrimento

- I piani di scorrimento hanno spessori di circa 200\AA e sono compensati da circa 2000\AA



I metalli

Bande di scorrimento e piani di scorrimento



Se calcolassimo l'energia necessaria per lo scorrimento di un blocco di atomi su un altro in un cristallo metallico perfetto, si avrebbe una resistenza di circa 1000 - 10000 più grande di quella reale

I metalli

Bande di scorrimento e piani di scorrimento

Perché i cristalli di un metallo si deformino ai bassi valori di resistenza di taglio osservati, devono essere presente un'elevata densità di dislocazioni.

Le dislocazioni si formano durante la solidificazione di un metallo, ma molte di più quando questo viene deformato passando da un numero di 10^6 cm/cm^3 a 10^{12} cm/cm^3



Ricordando le Dislocazioni

Difetti Cristallini – difetti di linea

Le dislocazioni sono distorsioni nel reticolo cristallino centrate attorno ad una linea

Formate durante: solidificazione, deformazione permanente, condensazione di vacanze

Differenti tipi di difetto di linea: dislocazione a spigolo, dislocazione a vite dislocazione mista

Ricordando le Dislocazioni

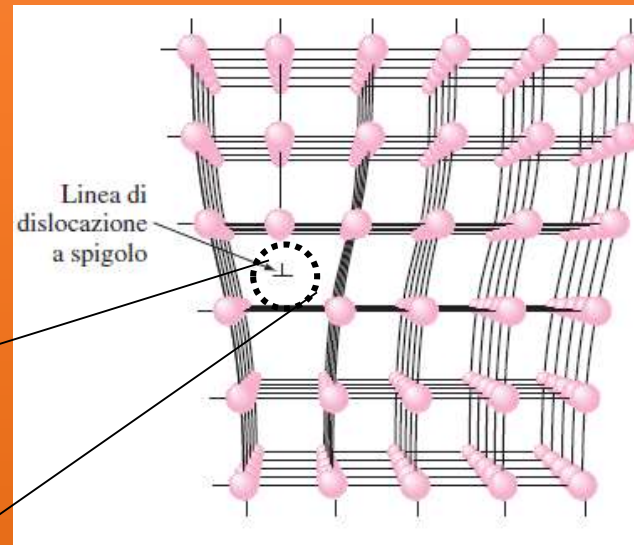
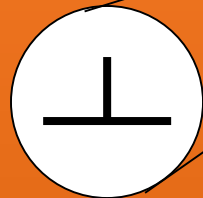
Difetti Cristallini – difetti di linea

- Formata dall'inserimento di semipiani di atomi extra

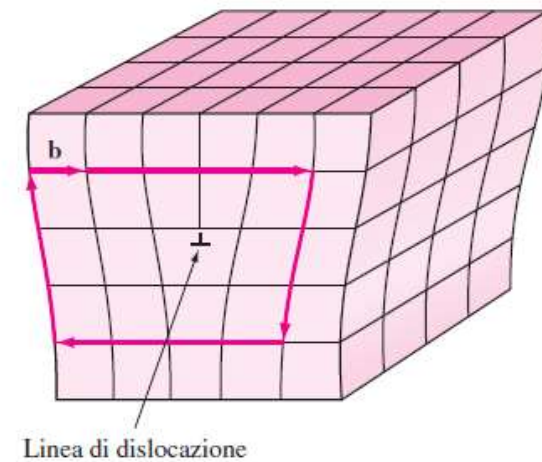
-  dislocazione a spigolo positiva

-  dislocazione a spigolo negativa

- Il vettore di Burgers mostra lo scorrimento di atomi (slittamento)



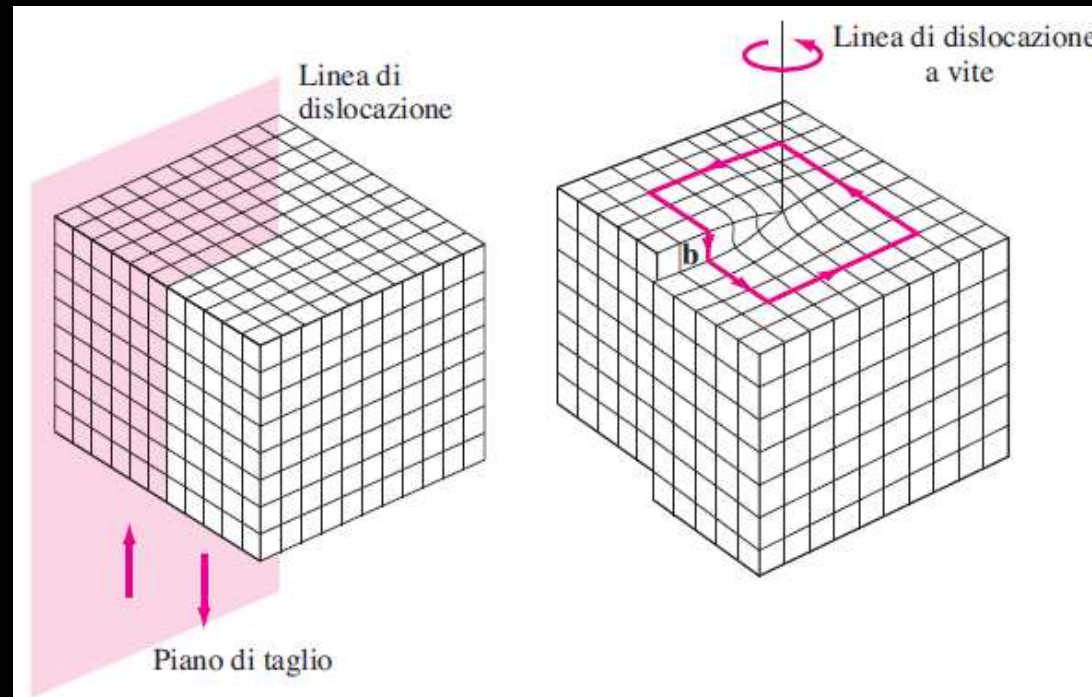
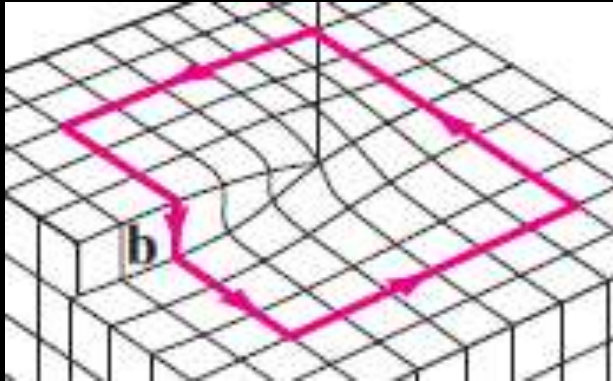
Vettore di Burgers



Ricordando le Dislocazioni

Difetti Cristallini – difetti di linea

- Formata dagli *sforzi di taglio* applicati su regioni di un cristallo perfetto separato da un piano di taglio
- Distorsione del reticolo sottoforma di una scala a spirale
- Il vettore di Burgers è parallelo alla linea di dislocazione



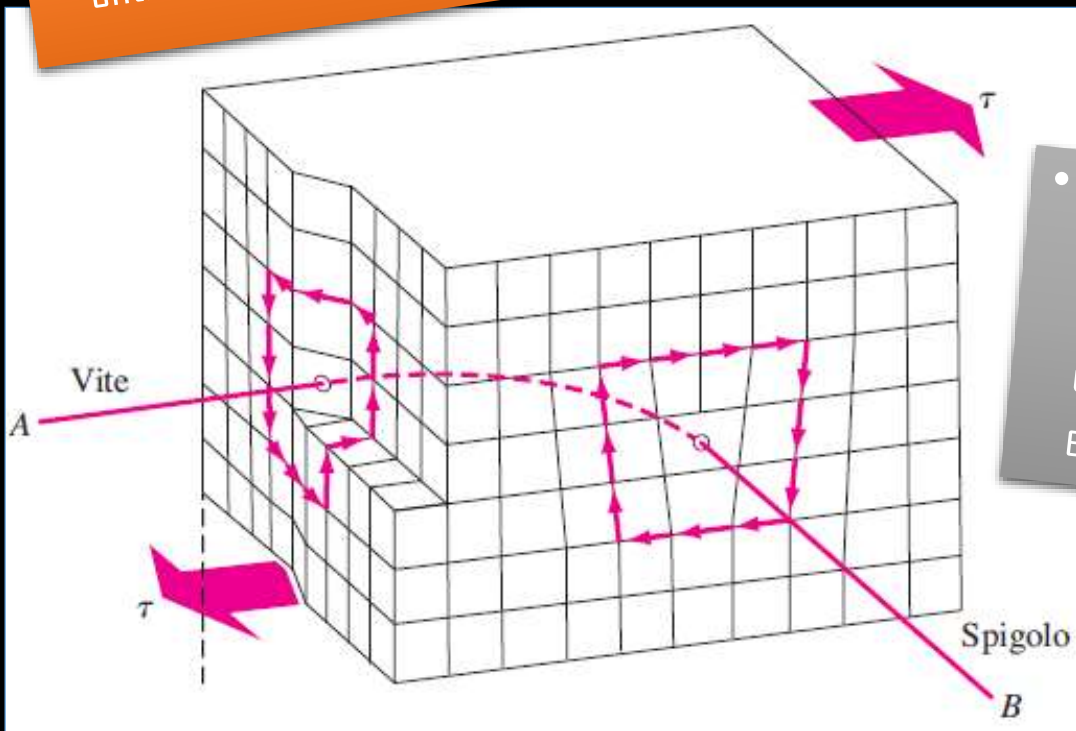
Ricordando le Dislocazioni

Difetti Cristallini – difetti di linea

- La maggior parte dei cristalli hanno componenti di entrambi i tipi di dislocazione



Struttura di una dislocazione del ferro deformata al 14% a -195°C

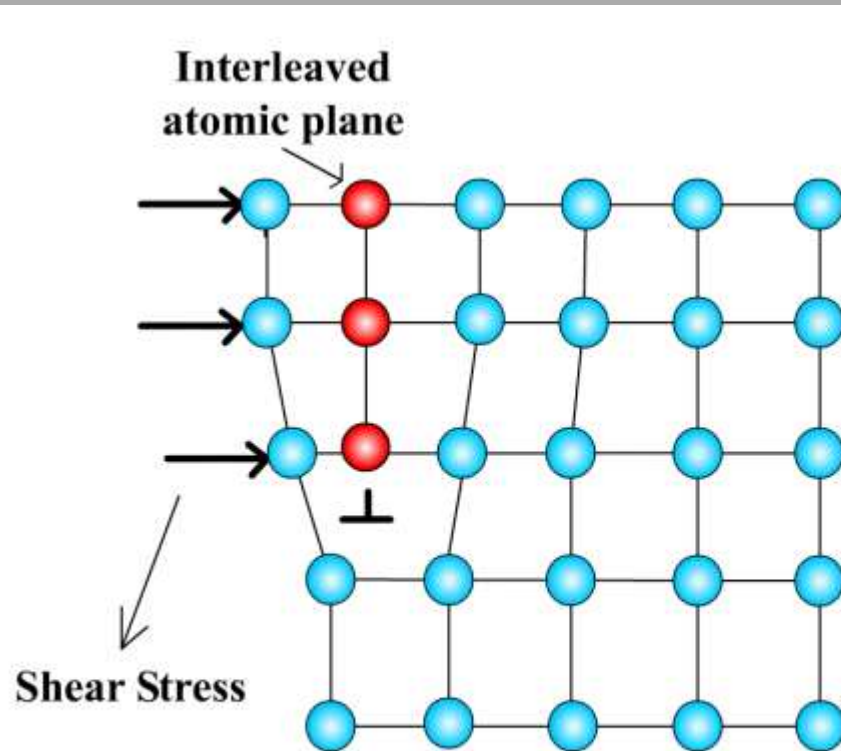


- La dislocazione, avendo una disposizione atomica irregolare, apparirà come linee scure quando osservata al microscopio elettronico

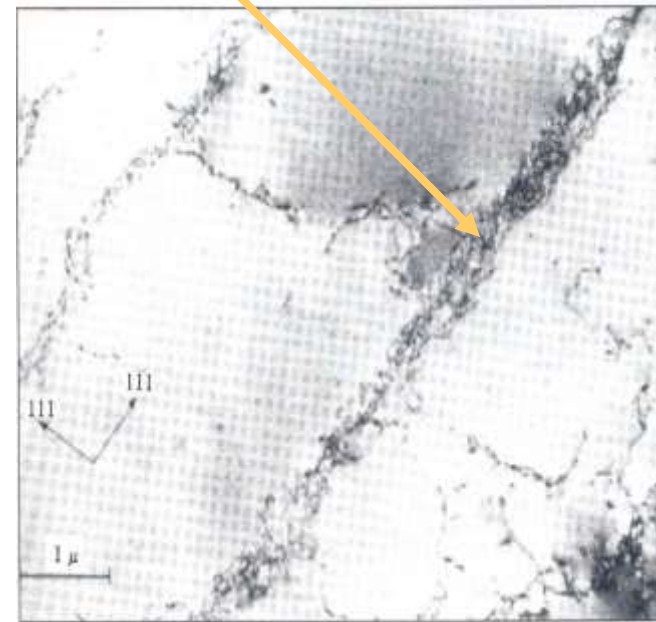
I metalli

Meccanismo di scorrimento

- Durante il taglio, gli atomi non scorrono uno sull'altro
- Lo scorrimento avviene per il movimento delle dislocazioni



Parete ad alta densità di dislocazioni

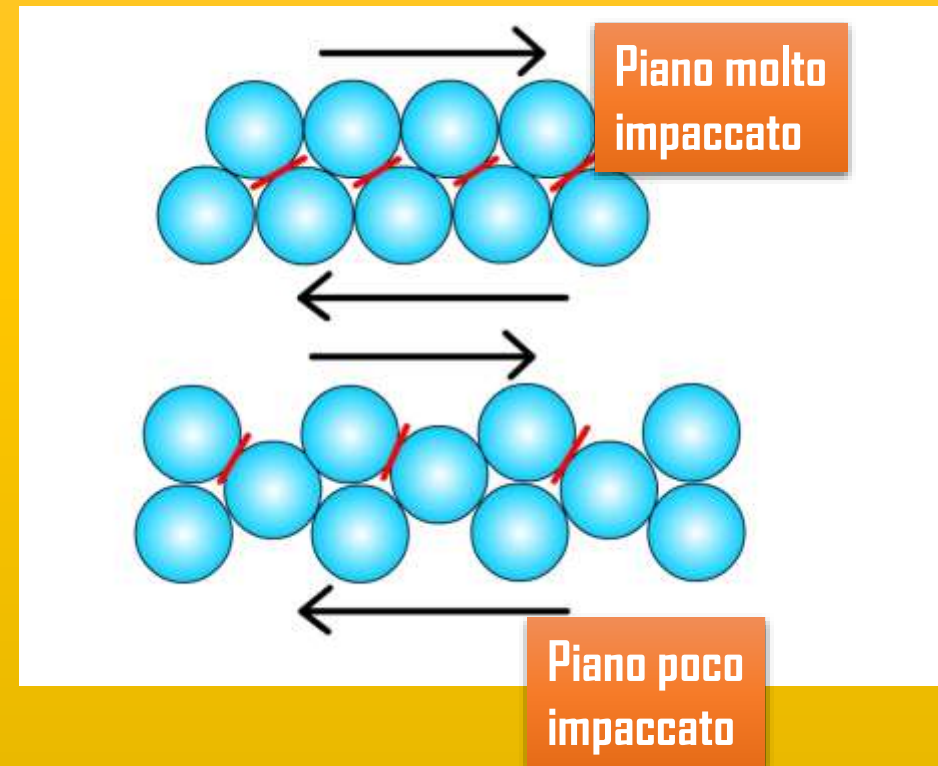


Struttura di una dislocazione in alluminio deformato

I metalli

Scorrimento nei cristalli

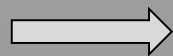
- Lo scorrimento avviene in piani densi o strettamente impaccati
- È richiesto un basso sforzo di taglio affinché avvenga lo scorrimento su piani densamente impaccati
- Se lo scorrimento è ristretto in piani impaccati, allora i piani meno densi diventano operativi
- È richiesta meno energia per muovere gli atomi lungo piani più densi



I metalli

Sistemi di scorrimento

- Scorrimento: combinazione di piani e direzioni di scorrimento
- Ogni cristallo ha un numero di sistemi di scorrimento caratteristici
- Nel cristallo CFC, lo scorrimento avviene nei piani ottaedrici $\{111\}$ e nelle direzioni $\langle 110 \rangle$



4 piani di tipo $\{111\}$ e 3 direzioni $\langle 110 \rangle$

$4 \times 3 = 12$ sistemi di scorrimento

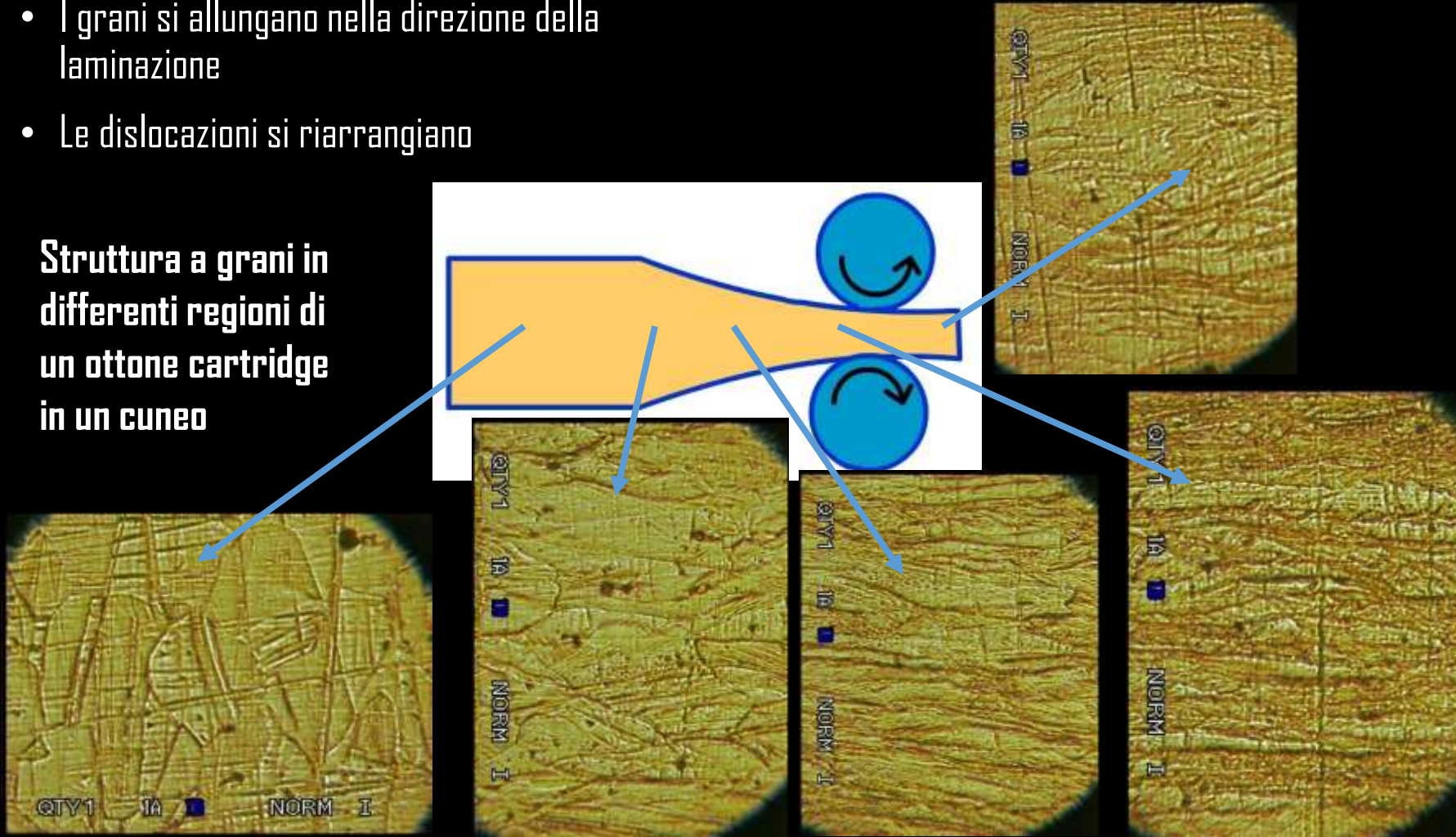
Struttura	Piano di scorrimento	Direzione di scorrimento	Numero di sistemi di scorrimento	
CFC: Cu, Al, Ni, Pb, Au, Ag, Fe,	$\{111\}$	$\langle \bar{1}10 \rangle$	$4 \times 3 = 12$	
CCC: Fe, W, Mo, ottone	$\{110\}$	$\langle \bar{1}10 \rangle$	$6 \times 2 = 12$	
Fe, Mo, W, Na	$\{211\}$	$\langle \bar{1}11 \rangle$	$12 \times 1 = 12$	
Fe, K	$\{321\}$	$\langle \bar{1}11 \rangle$	$24 \times 1 = 24$	
EC: Cd, Zn, Mg, Ti, Be,	$\{0001\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$1 \times 3 = 3$	
Ti (piani prismatici)	$\{100\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$3 \times 1 = 3$	
Ti, Mg (piani piramidali)	$\{101\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$6 \times 1 = 6$	

I metalli

Effetto della deformazione plastica

- La deformazione plastica porta ad uno sforzo di taglio dei grani l'uno con l'altro
- I grani si allungano nella direzione della laminazione
- Le dislocazioni si riarrangiano

**Struttura a grani in
differenti regioni di
un ottone cartridge
in un cuneo**



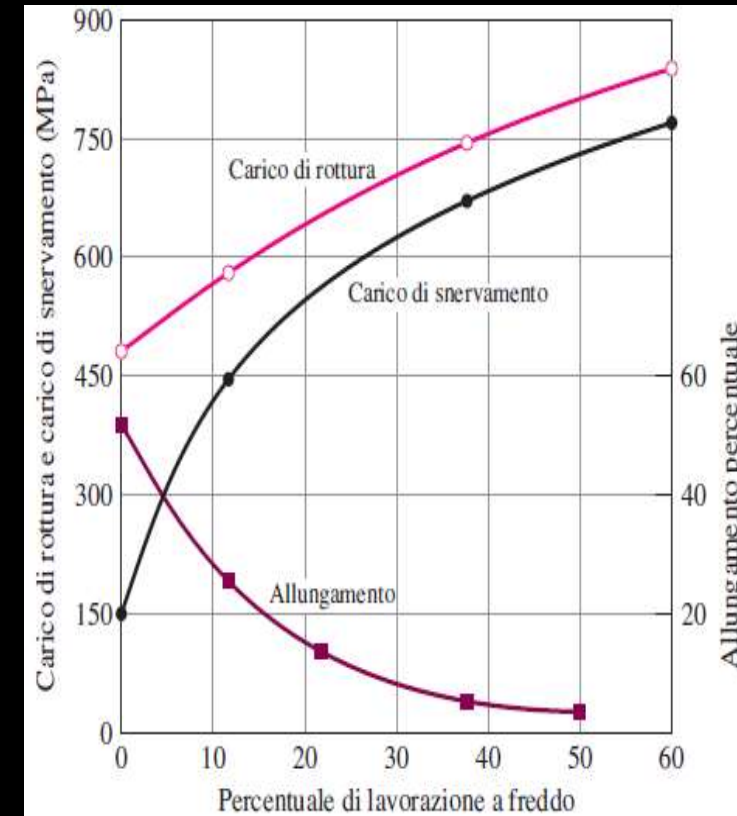
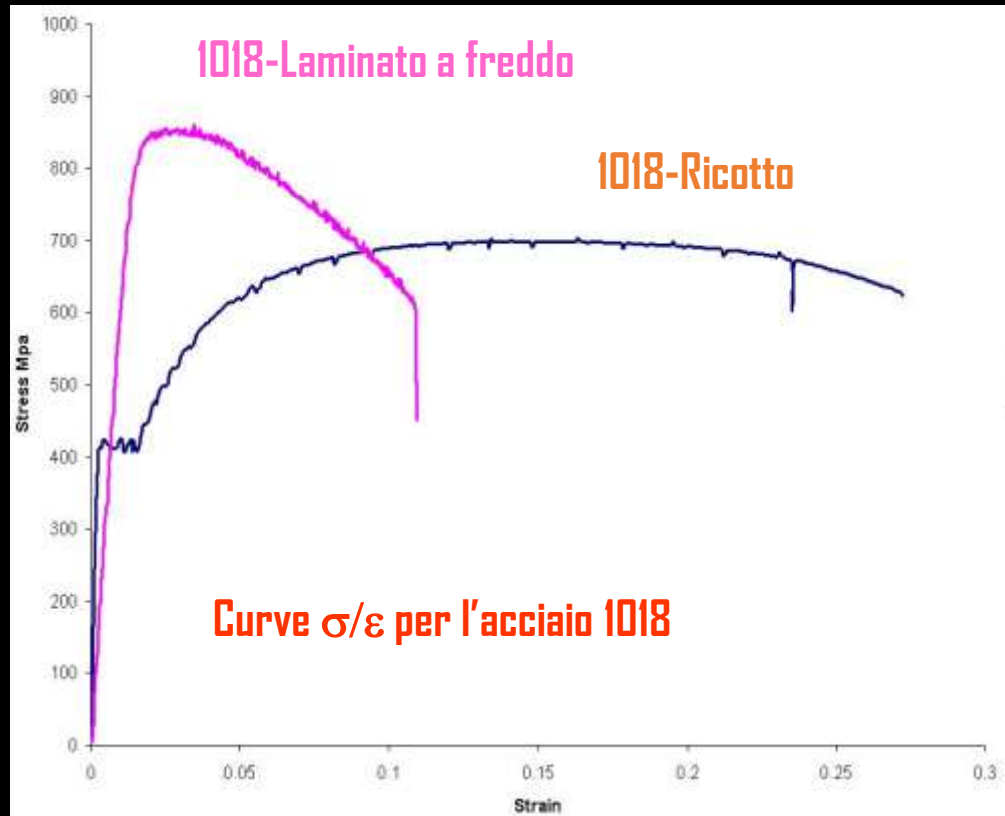
I metalli

Effetto della lavorazione a freddo sulla resistenza a trazione

- Il numero di dislocazioni è aumentato dalla lavorazione a freddo
- I movimenti delle dislocazioni sono ostacolati dai bordi di grano e da altre dislocazioni



Incrudimento



Modulo di **T**ecnologia dei **M**ateriali

Proprietà Meccaniche