

Proprietà meccaniche

Materiale per usi strutturali



Proprietà meccaniche

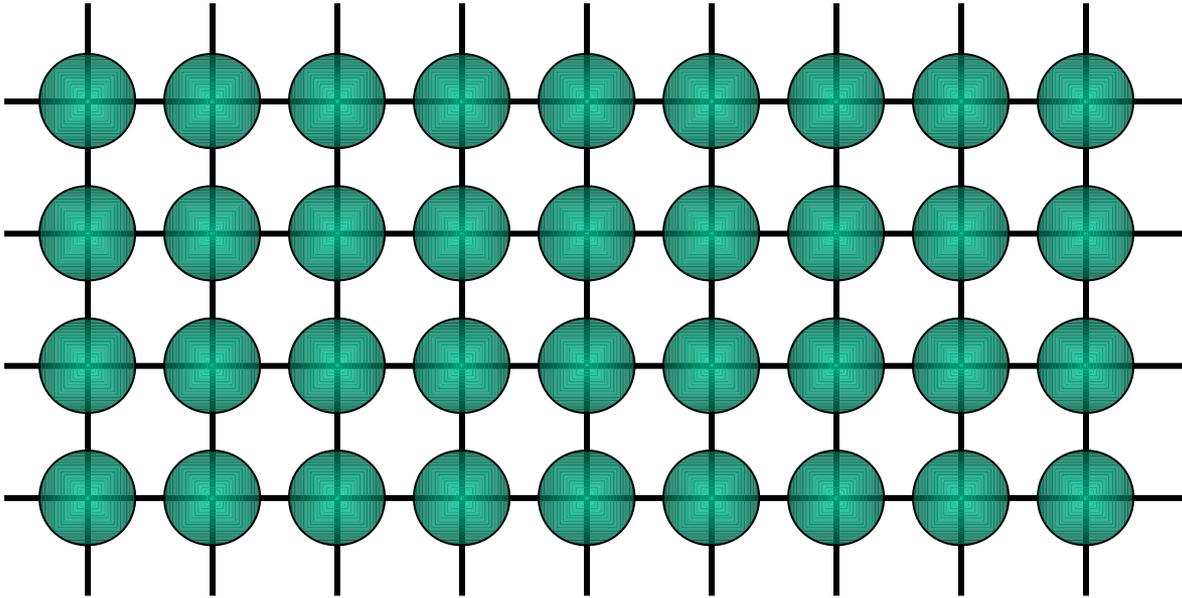
- Resistenza a trazione
- Resistenza a compressione
- Durezza
- Resilienza
- Resistenza a fatica
- Resistenza al creep



Prove meccaniche

Solidi

- Forma e volume propri.
- Reticolo cristallino.

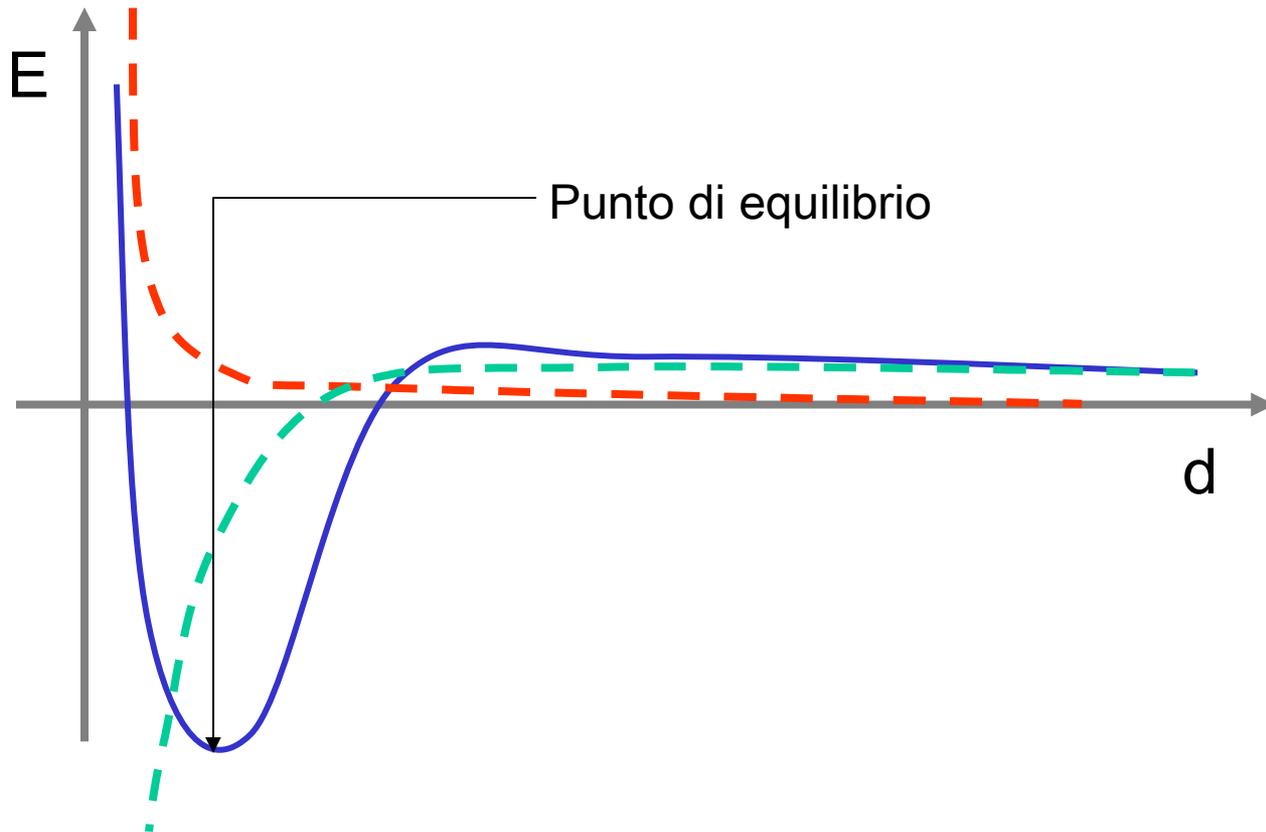


Tipi di legame primario: metallico, ionico, covalente.

I materiali amorfi (vetri, polimeri), in questo senso, non sono solidi.

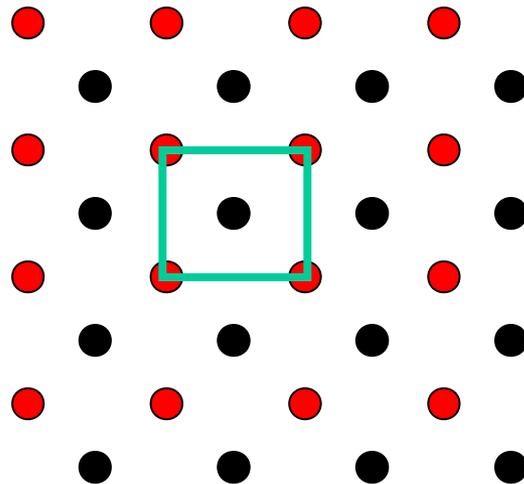
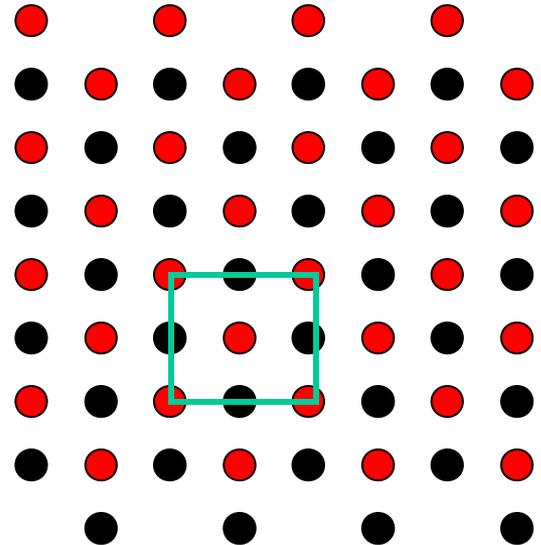
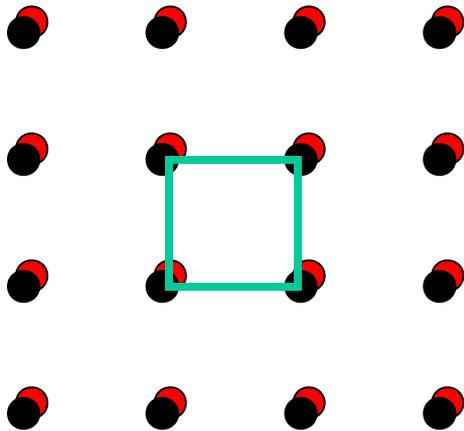
Solidi

- Concetto di minima energia del sistema



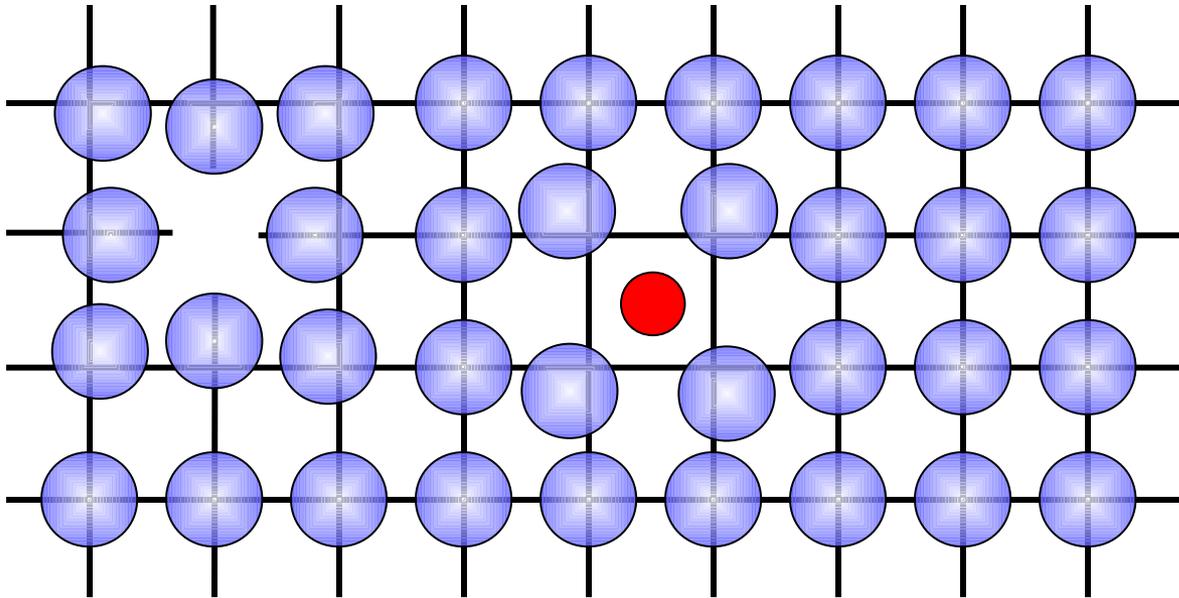
Solidi

- Tipi di reticolo: C, FCC, BCC



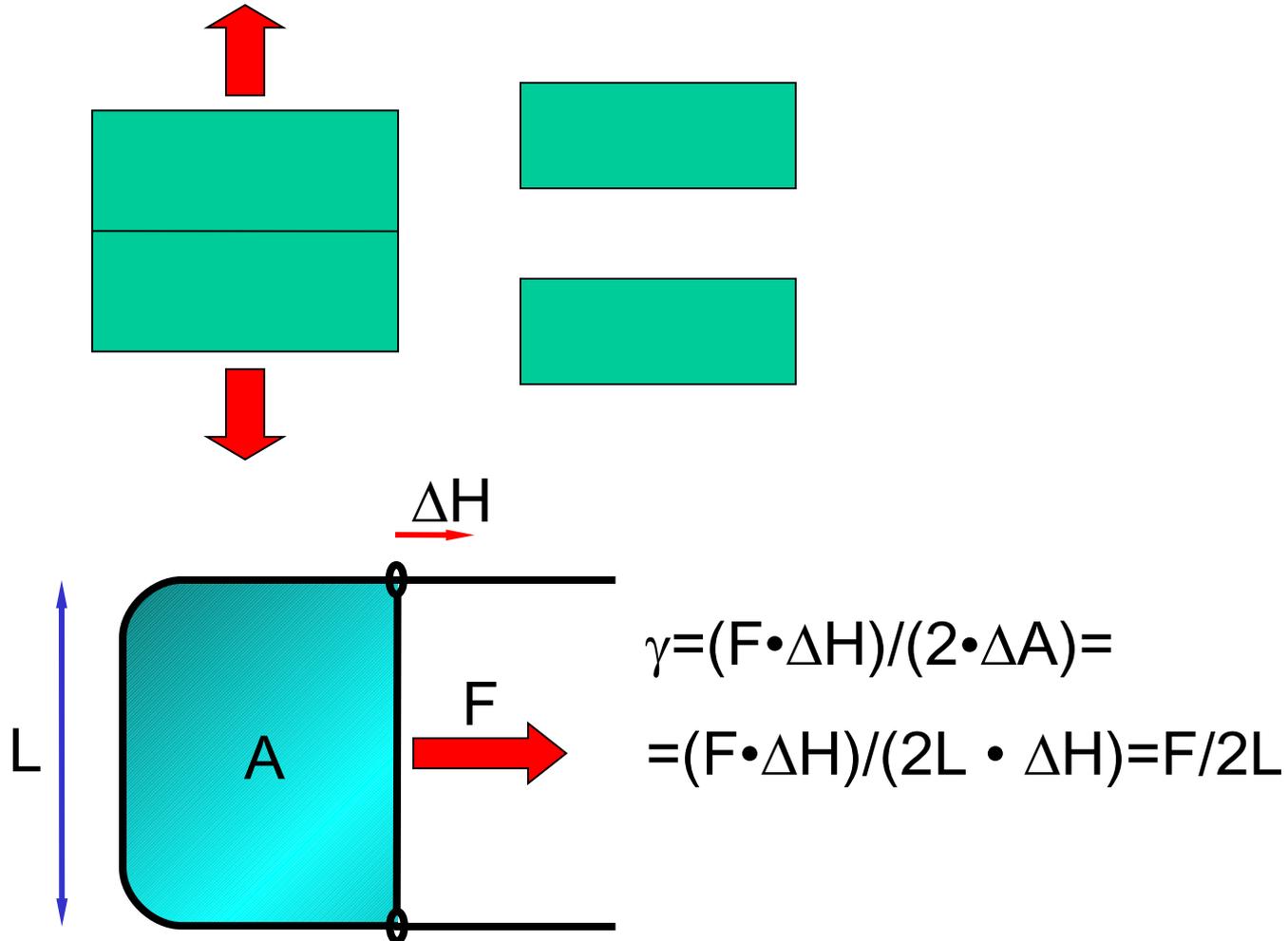
Solidi

- Difetti nei reticoli cristallini:
 - Di punto (1 D, vacanze, atomi interstiziali, ecc.)
 - Di linea (2D, dislocazioni)
 - Di superficie (3D, bordi di grano)



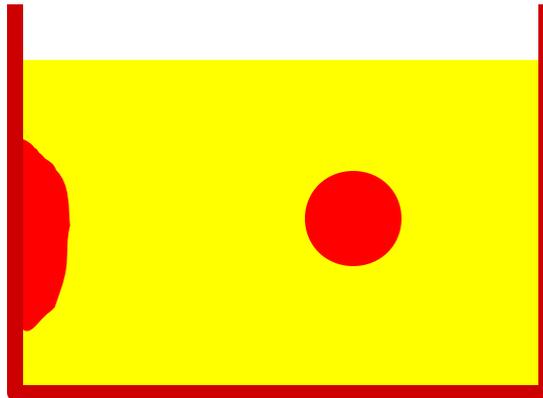
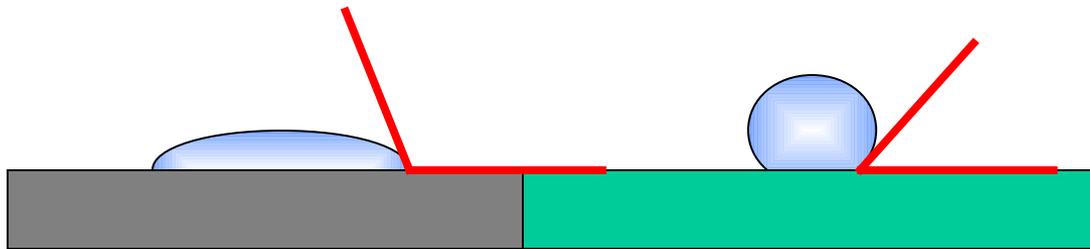
Solidi

- Energia interfacciale (tensione superficiale)

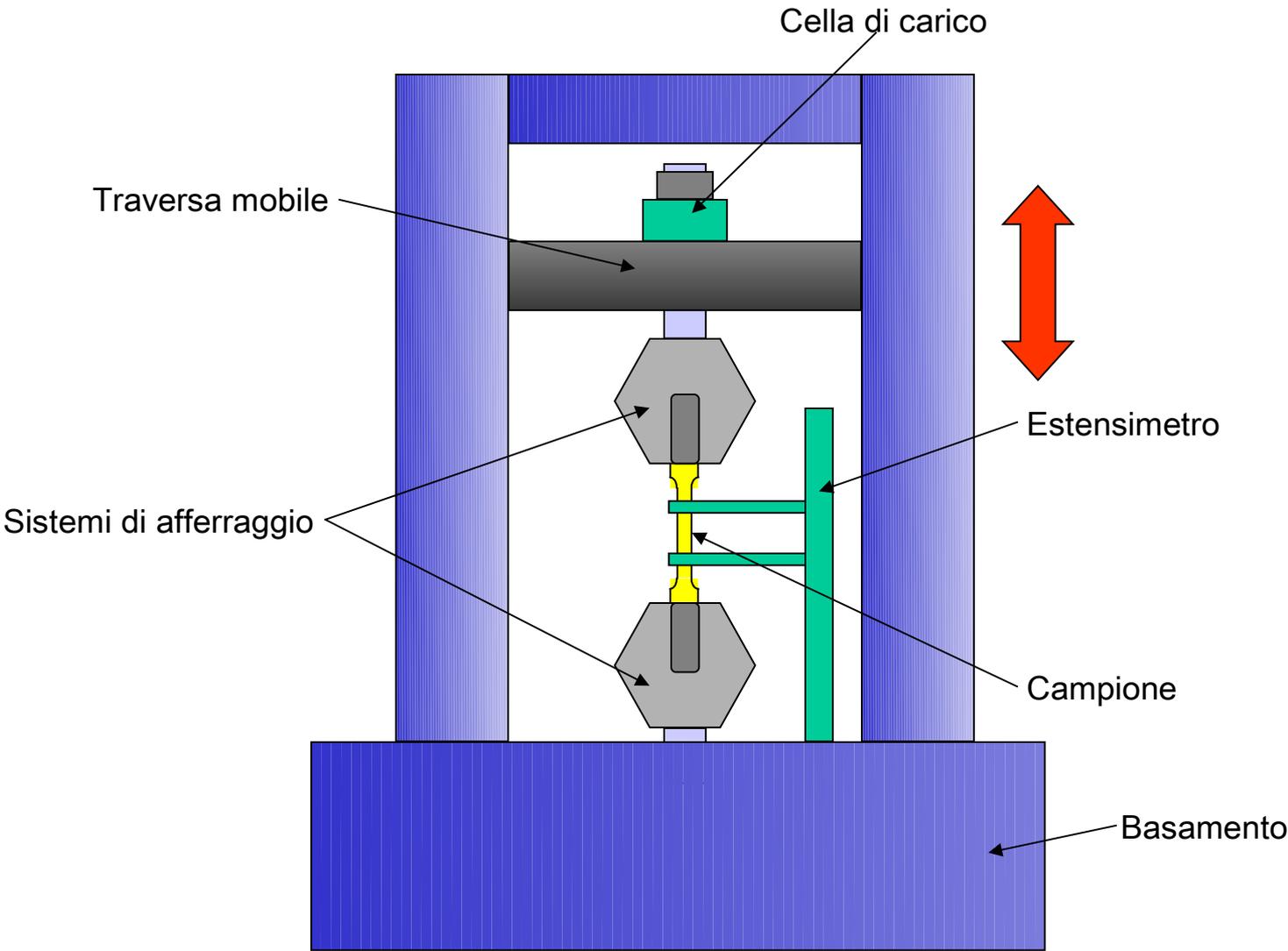


Solidi

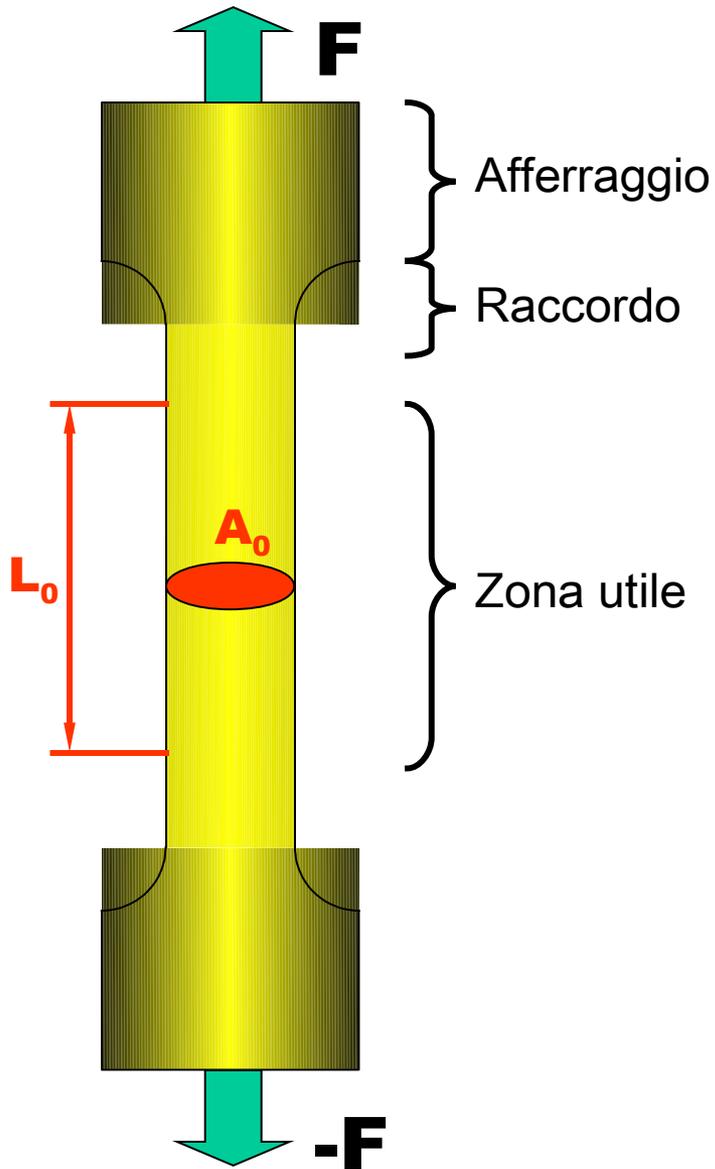
- Tensione superficiale: concetto ricorrente (bagnabilità, solidificazione, b.d.g., dislocazioni, ecc.).



Prova di trazione



Prova di trazione

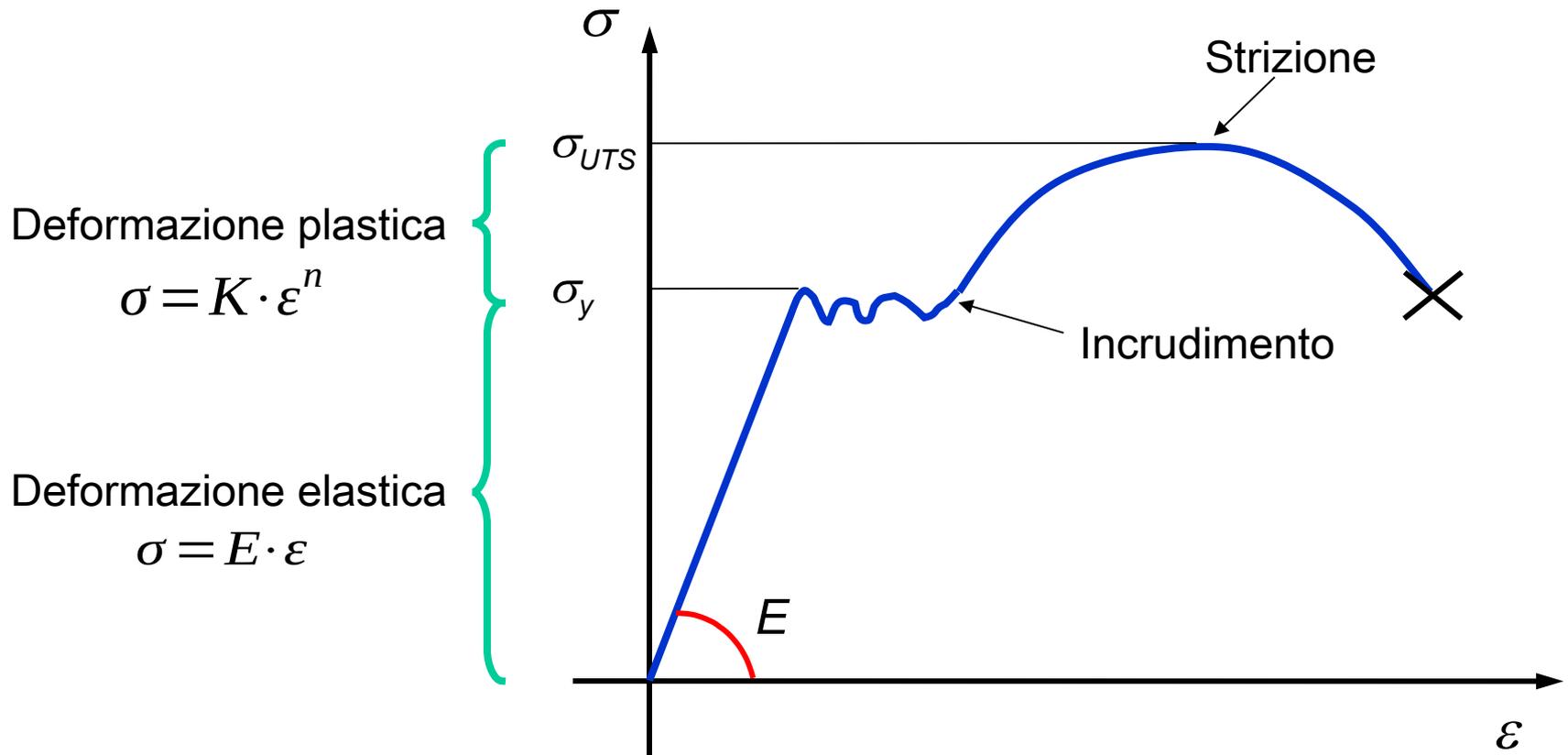


$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

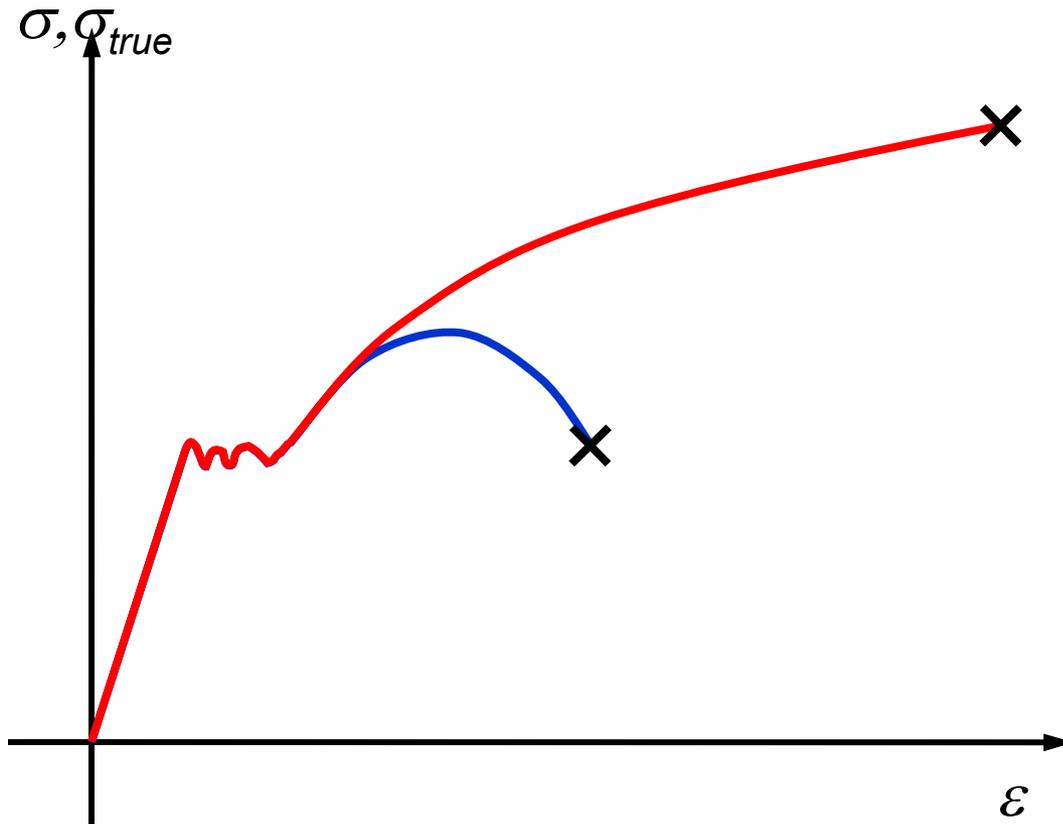
Prova di trazione

Prova di trazione a freddo di materiali metallici



Prova di trazione

Prova di trazione a freddo di materiali metallici

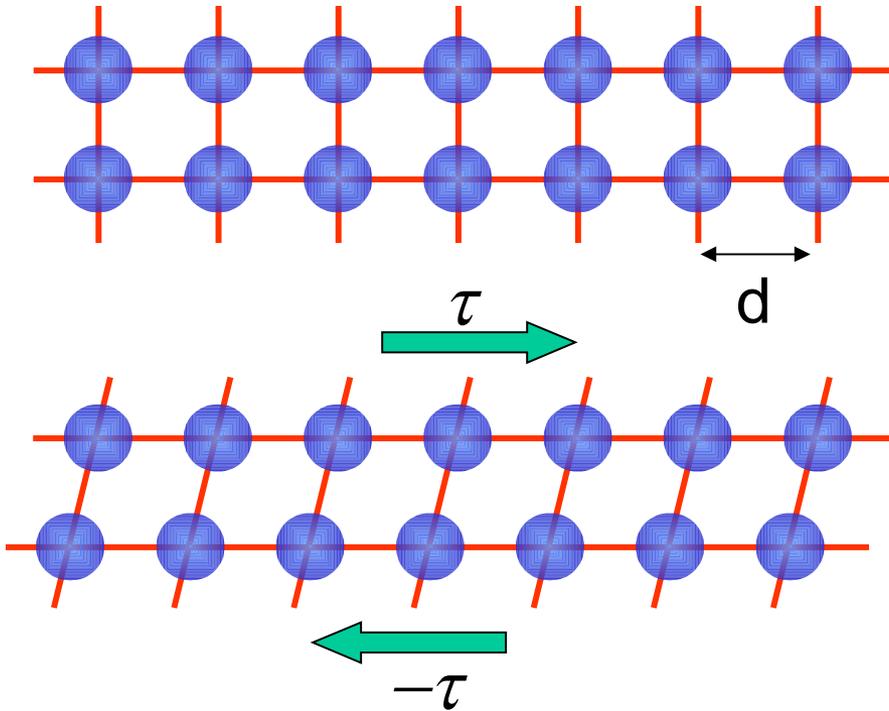


$$\sigma_{true} = \frac{F}{A_{true}}$$

$$\epsilon_{true} = \int_{L_0}^L \frac{dl}{l} = \ln \left(\frac{L}{L_0} \right)$$

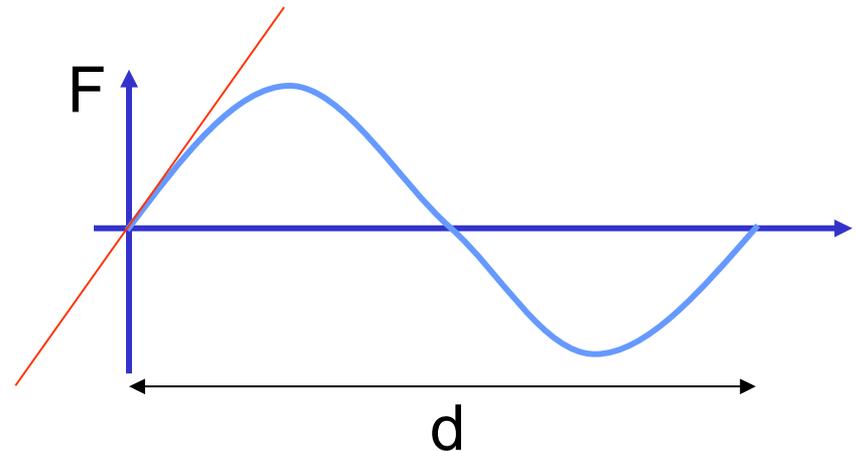
$$\epsilon_{true} = \ln \left(\frac{A_0}{A} \right)$$

Deformazione elastica

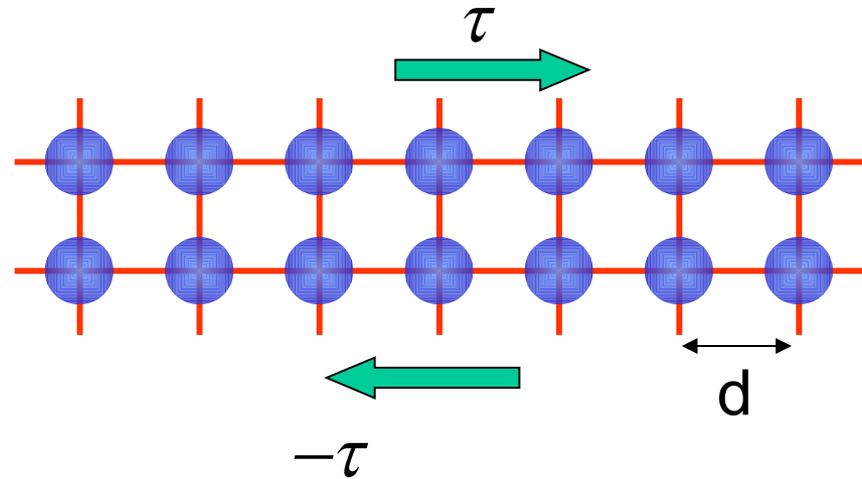


$$F = F_{\max} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{d} \cdot x\right)$$

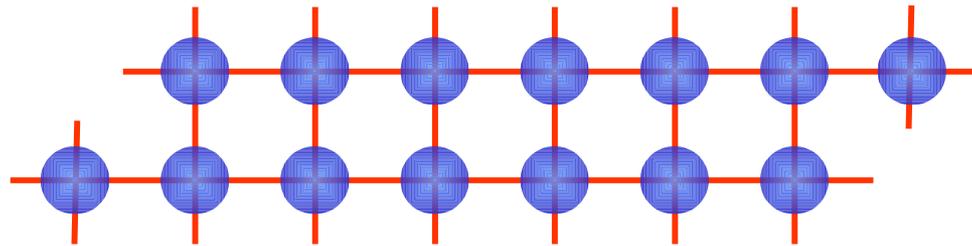
$$x \rightarrow 0 \Rightarrow F \simeq F_{\max} \cdot \frac{2\pi}{d} \cdot x$$



Deformazione plastica



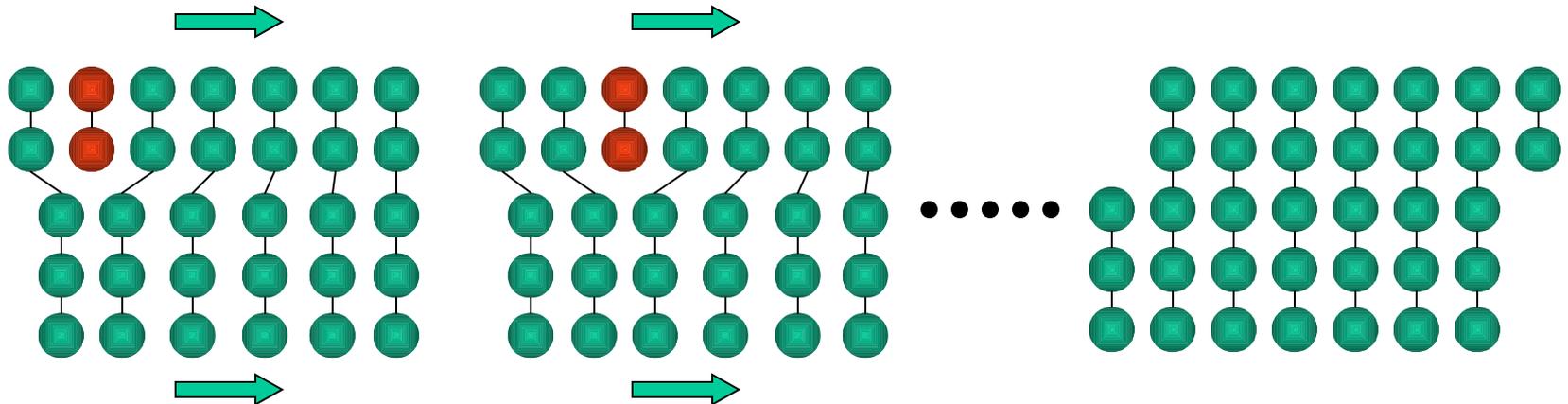
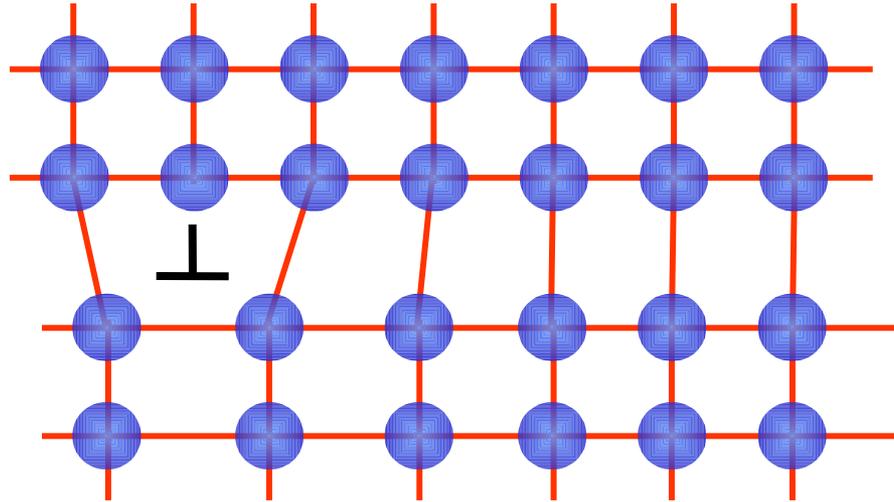
Risultato netto



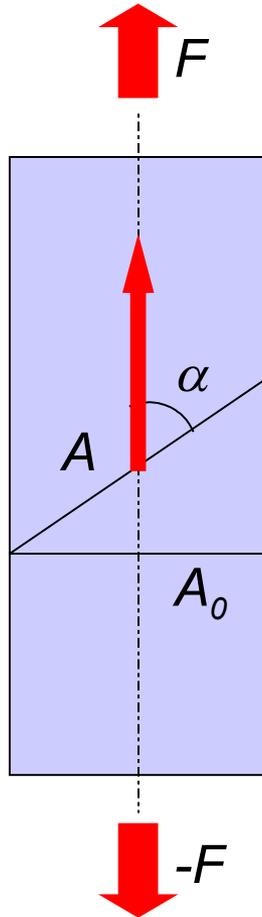
$$\sigma_{y,teorica} = 1.000 \div 10.000 \text{ volte } \sigma_{y,reale}$$

Deformazione plastica

Dislocazione a spigolo



Deformazione plastica



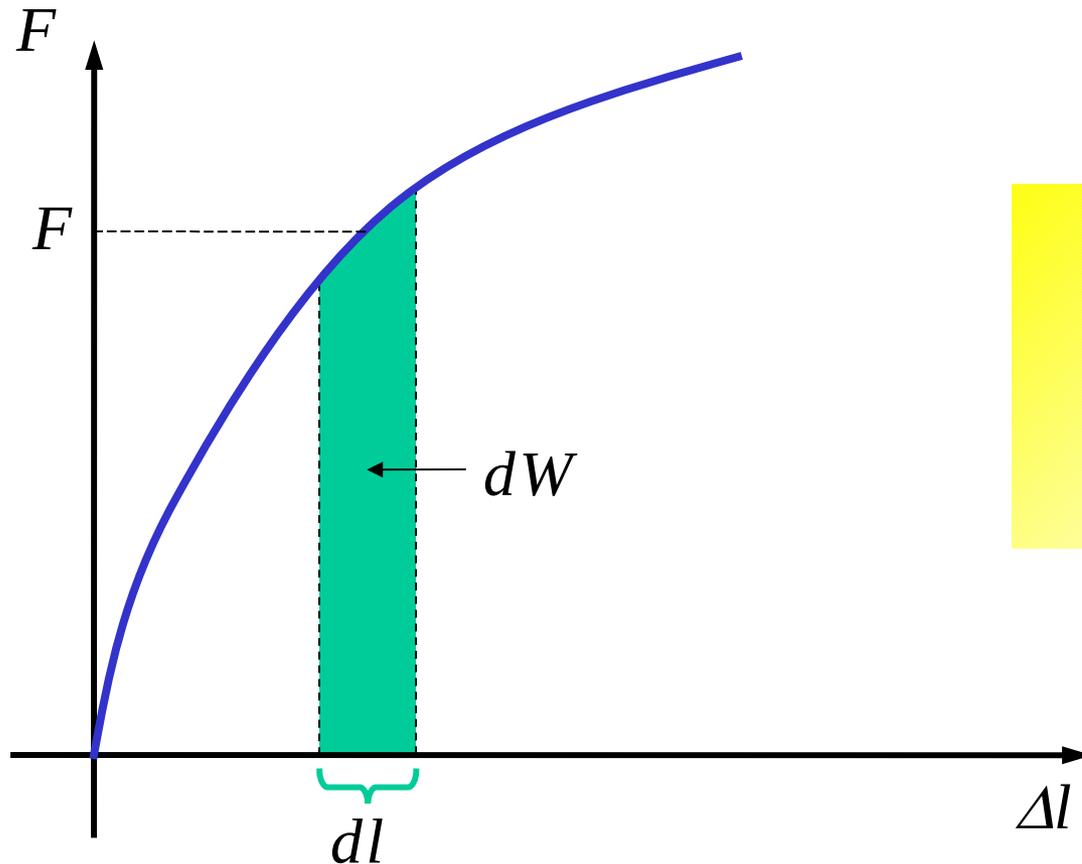
$$\tau = \frac{F \cdot \cos(\alpha)}{A} = \frac{F \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\alpha)}{A_0} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \tau = \frac{\sigma}{2} \cdot \sin(2 \cdot \alpha)$$

$$\max(\tau) \leftrightarrow \alpha = \frac{\pi}{4}$$

Prova di trazione

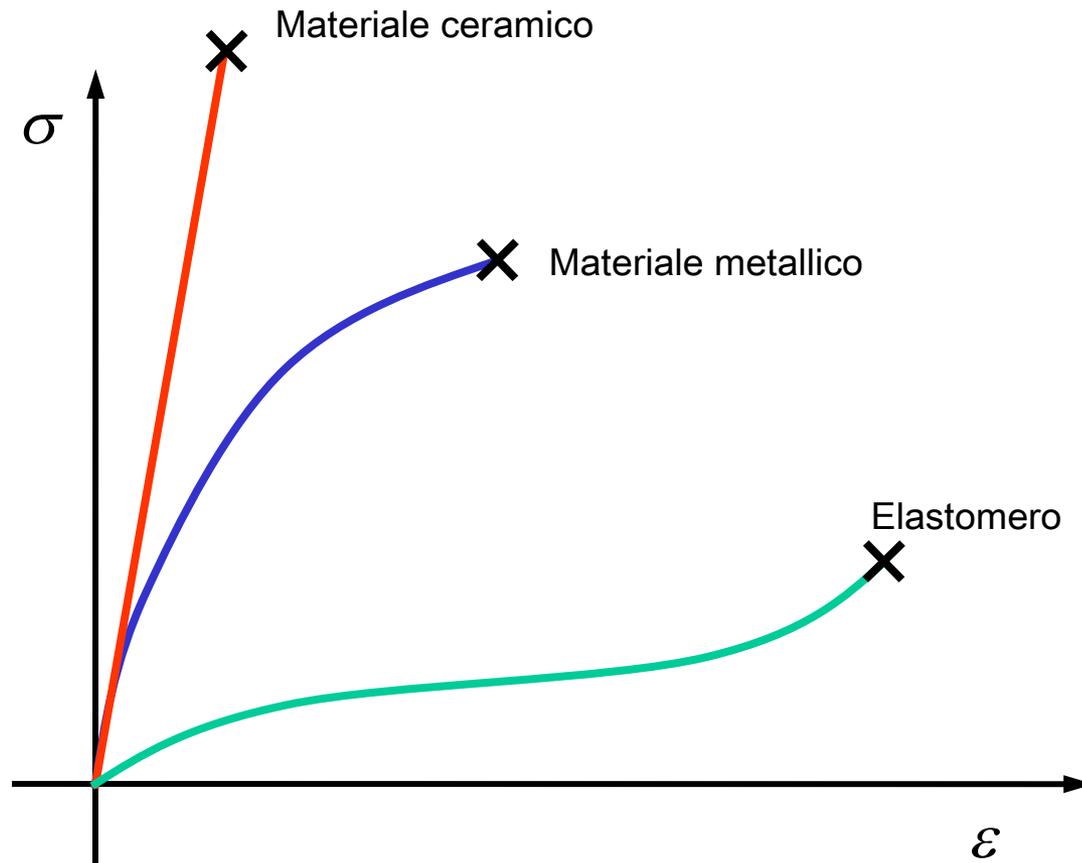
Energia di deformazione: tenacità



$$dW = F \cdot dl$$
$$W = \int_{L_0}^L F \cdot dl$$

Prova di trazione

Confronto tra vari tipi di materiali



Sforzo e deformazione

Tali valori sono dati dalle seguenti relazioni:

$$\sigma_{true} = \frac{F}{A_{true}}$$
$$\varepsilon_{true} = \int_{L_0}^L \frac{dl}{l} = \ln \left(\frac{L}{L_0} \right)$$
$$\varepsilon_{true} = \ln \left(\frac{A_0}{A} \right)$$

L'ultima espressione può essere facilmente ricavata supponendo costante il volume del materiale interessato.

Sforzo e deformazione

E' necessario a questo punto distinguere tra deformazione a freddo e deformazione a caldo.

Deformazione a freddo

Nel caso di materiali monocristallini la deformazione plastica a freddo può essere spiegata e modellizzata utilizzando la ben nota teoria delle dislocazioni.

Nel caso, più comune, di materiali policristallini, il moto delle dislocazioni ha inizio nei grani i cui piani cristallografici siano favorevolmente orientati rispetto alla forza agente.

Si tenga presente, tuttavia, che la presenza di altri grani circostanti, orientati meno favorevolmente, può parzialmente inibire tali deformazioni.

Durante la deformazioni la densità delle dislocazioni aumenta notevolmente e così pure le interazioni tra i campi di stress generati dalla presenza delle dislocazioni stesse e tra tali campi di stress ed altri difetti presenti nel materiale (bordi di grano, precipitati, ecc.).

Tale fenomeno conduce al fatto che, in una prova di trazione uniassiale, lo stress tende ad aumentare nel campo delle deformazioni plastiche anziché risultare costante come in un fluido viscoso.

Sforzo e deformazione

Le conseguenze della deformazione a freddo, e quindi dell'incrudimento, sono:

- ✓ Aumento del limite di snervamento \Rightarrow OK caratteristiche manufatto
- ✓ Diminuzione della duttilità \Rightarrow Limite alla deformazione massima possibile

Per attenuare o eliminare gli effetti dell'incrudimento possono essere effettuati opportuni trattamenti termici: se l'energia termica fornita al materiale è sufficiente, esso può **ricristallizzare**. In tal caso si riforma una struttura non incrudita ed, in genere, a grano più fine rispetto a quella di partenza.

Tale processo, detto **ricristallizzazione statica**, può avvenire solo se la temperatura supera un valore critico detto **temperatura di ricristallizzazione**.

Sforzo e deformazione

Deformazione a caldo

Si ha, per definizione, quando il materiale viene deformato ad una temperatura superiore a quella critica di ricristallizzazione.

Il materiale, in queste condizioni, può ricristallizzare dinamicamente: in questo caso la densità delle dislocazioni può rimanere bassa.

L'equilibrio tra incrudimento ed addolcimento del materiale è governato essenzialmente da due fattori:

- Temperatura
- Velocità di deformazione ($d\varepsilon/dt$)

Ciò comporta la possibilità di ottenere, operando in condizioni opportune, anche valori elevati della deformazione complessiva.

Sforzo e deformazione

Classificazione delle lavorazioni

In base a quanto detto le lavorazioni per deformazione plastica possono essere classificate in:

Lavorazioni a freddo: quelle in cui la temperatura è al di sotto della temperatura di ricristallizzazione. Spesso sono usate nelle fasi finali di produzione perché permettono di ottenere ottime finiture superficiali e precisione dimensionale. Esse comportano la necessità di utilizzare forze maggiori per la deformazione del materiale, ma anche la possibilità di lubrificare agevolmente la zona di contatto pezzo-utensile. La massima deformazione ottenibile senza l'uso di trattamenti termici intermedi è limitata dalle caratteristiche del materiale.

Lavorazioni a caldo: quelle in cui la temperatura è maggiore di quella di ricristallizzazione. E' possibile ottenere grandi valori della deformazione complessiva utilizzando forze minori. Il materiale ha però la tendenza ad ossidarsi e ciò provoca un decadimento delle caratteristiche di finitura superficiale. Le tolleranze dimensionali sono più ampie rispetto al caso precedente a causa della difficile prevedibilità degli effetti legati alle dilatazioni termiche.

Sforzo e deformazione

Modello per la deformazione a freddo

Una relazione molto utilizzata, a livello tecnologico, per la valutazione e la modellizzazione degli effetti della deformazione plastica a freddo è la seguente:

$$\sigma_f = K \cdot \varepsilon^n$$

K ed n sono tabellati per diversi materiali e diverse temperature ($\ll T_{rixx}$)

Note:

- ▶ Si trascura la presenza della zona elastica lineare, in quanto siamo interessati, a livello tecnologico, a ragionare in regime di grandi deformazioni.
- ▶ Si trascura l'effetto –piccolo alle basse temperature- della velocità di deformazione.

Sforzo e deformazione

Modello per la deformazione a caldo

Una relazione molto utilizzata, a livello tecnologico, per la valutazione e la modellizzazione degli effetti della deformazione plastica a caldo è la seguente:

$$\sigma_f = C \cdot \dot{\varepsilon}^n$$

C ed m dipendono da materiale e temperatura e si trovano tabellati.

Viene aggiunto un pedice “ f ” ad indicare il termine *flow stress*.

Si noti che, in una prova di trazione si avrebbe:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{dl}{l} \cdot \frac{1}{dt} = \frac{v}{l}$$

Con v si intende la velocità di traslazione della traversa mobile della macchina.

Sforzo e deformazione

Criteri di plasticità

Nel caso più generale in cui tutte le componenti del tensore di sforzo siano non nulle, è possibile individuare una terna di assi tale che il tensore sforzo riferito a tale terna ha solo le componenti di sforzo normale ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) non nulle (direzioni principali \Rightarrow tensioni principali). Se σ_1 e σ_3 sono la massima e la minima tra le tensioni principali, il valore massimo della tensione tangenziale risulta sarà:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

Nello studio della deformazione plastica interessa stabilire i valori dei carichi esterni applicati necessari per provocare l'insorgenza di fenomeni di deformazione plastica. Mentre nel caso della tensione uniassiale (prova di trazione) si può ritenere valido, come criterio, il raggiungimento di una tensione pari al limite di snervamento del materiale, in un caso più generale bisogna adottare criteri adeguati.

Sforzo e deformazione

Nelle ipotesi che:

- ✓ La componente idrostatica non influenzi la plasticizzazione
- ✓ Il materiale sia omogeneo ed isotropo
- ✓ Il volume possa ritenersi costante durante la deformazione

Si può adottare il criterio di Tresca:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = C$$

C può essere valutata considerando che, nel caso di tensione uniassiale si ha $\sigma_3=0$, per cui:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_y - 0}{2} = C \Rightarrow C = \frac{\sigma_y}{2}$$

Altro criterio molto usato è quello energetico di Von Mises.

Sforzo e deformazione

Lavoro di deformazione

Nel caso della deformazione provocata da tensione uniassiale l'espressione per il lavoro specifico è la seguente:

$$W = \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon') \cdot d\varepsilon'$$

L'integrale può essere valutato introducendo, ad esempio, il legame già visto tra σ ed ε nella deformazione a freddo. Si ottiene, in tal caso:

$$W = K \frac{\varepsilon^{n+1}}{n+1}$$

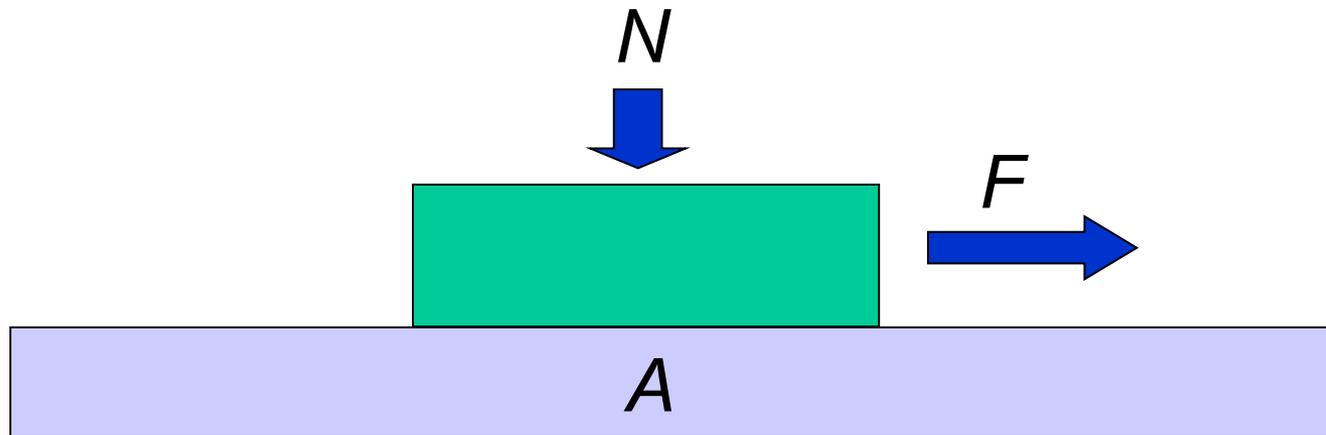
Il flow stress medio sarà allora:

$$\bar{\sigma}_f = \frac{W}{\varepsilon} = \frac{\varepsilon^n}{n+1}$$

Prova di compressione

Le forze d'attrito che si sviluppano nel contatto radente tra materiale in compressione e piastre possono essere descritte mediante il coefficiente di attrito dinamico:

$$\mu_d = \frac{F}{N} = \frac{F/A}{N/A} = \frac{\tau}{p}$$



Prova di compressione

Se τ raggiunge, all'interfaccia di un determinato sistema, in conseguenza di fenomeni d'attrito, il valore di plasticizzazione τ_{max} , si dice che il materiale “aderisce” alla superficie in quanto, localmente, non si muove più rispetto ad essa (il coefficiente d'attrito statico –o di primo distacco– è generalmente più alto di quello dinamico).

Si parla, in questo caso, di **attrito adesivo**.

Talvolta il valore di τ viene espresso come frazione della tensione tangenziale di snervamento (in un materiale il massimo sforzo generabile prima che si deformi plasticamente è quello di snervamento):

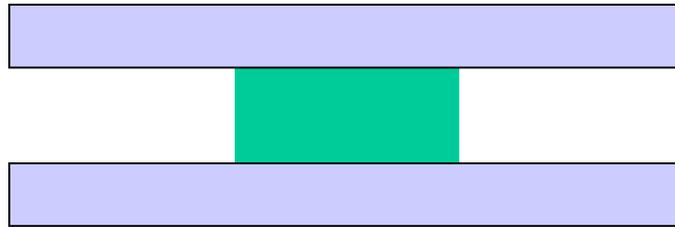
$$\tau = m^* \cdot \tau_{max}$$

$$0 < m^* < 1$$

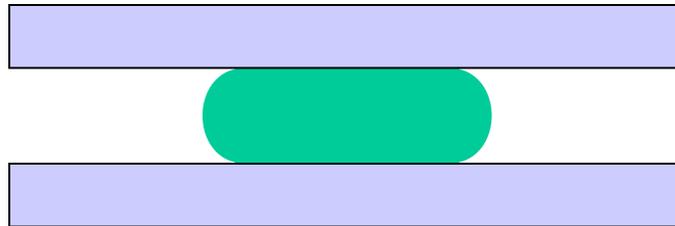
Il valore di m^* dipende essenzialmente dalla coppia di materiali considerati, dalla temperatura e dal tipo di lubrificazione adottata.

Prova di compressione

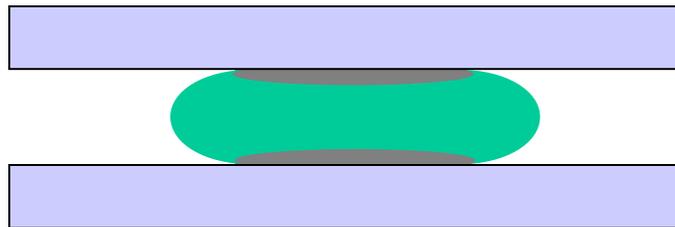
$m^*=0$



$m^*=0.5$

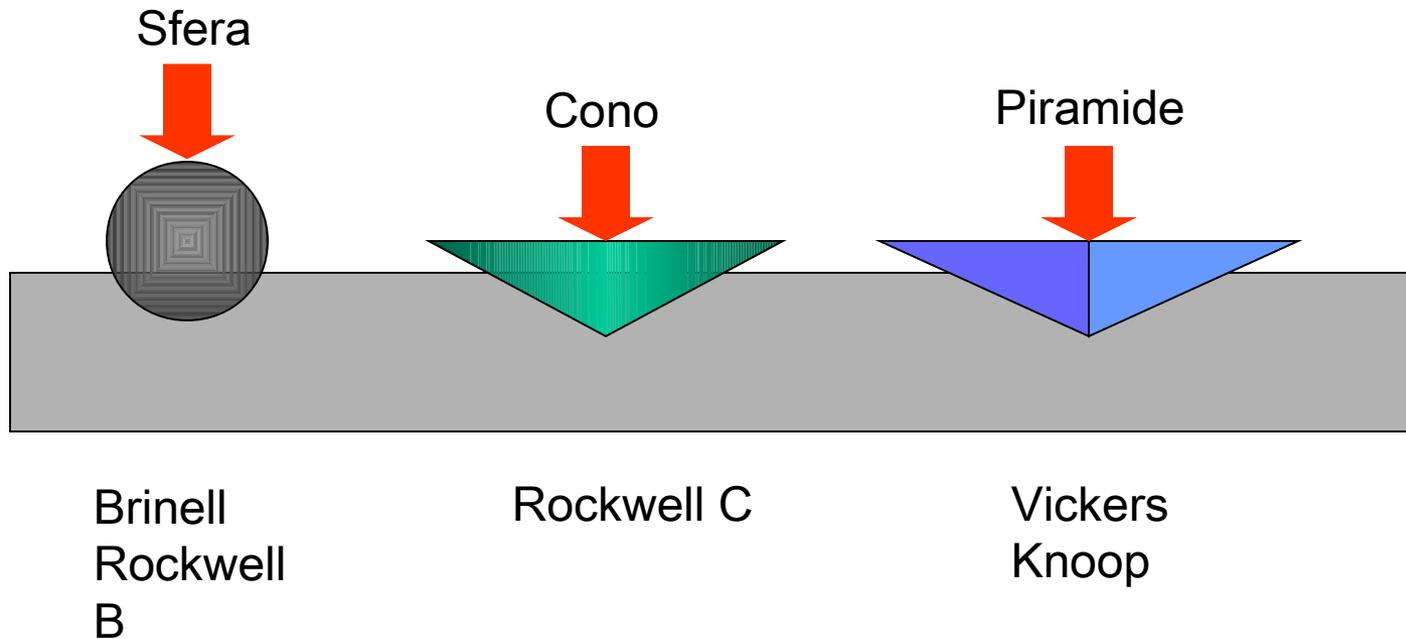


$m^*=1$



Prova di durezza

La durezza è la capacità di un materiale di opporsi alla deformazione plastica permanente. Viene valutata applicando un carico prestabilito mediante un penetratore di forma normalizzata e misurando la profondità di penetrazione o la superficie dell'impronta.



Prova di durezza

Note:

- Le caratteristiche dei penetratori, i valori dei carichi, i tempi di applicazione del carico, ecc. sono stabiliti in apposite norme.
- I valori di durezza ottenuti con i diversi metodi non sono in generale correlabili tra loro, se non per mezzo di tabelle sperimentali valide per singole classi di materiali.
- Per singole classi di materiali si può determinare per via sperimentale la correlazione tra durezza e resistenza meccanica \Rightarrow possibilità di eseguire prove non distruttive.

Prova di resilienza

Tenacità

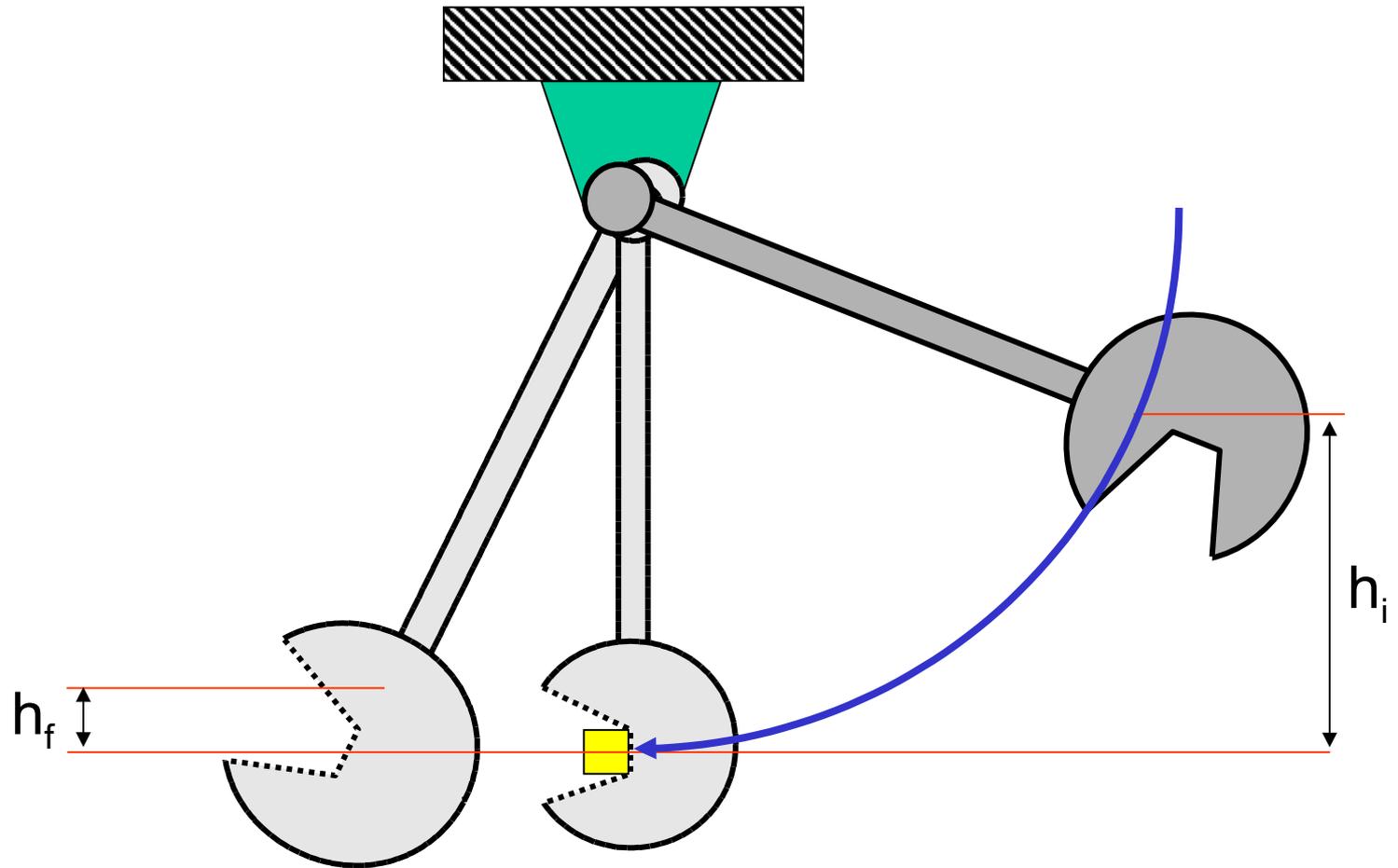
E' una misura dell'energia che un materiale è in grado di assorbire prima di rompersi. Il contrario di tenacità è fragilità.

Resilienza

E' una misura dell'energia che un materiale è in grado di assorbire prima di giungere a rottura sotto l'azione di un carico impulsivo. Eventuali fenomeni di assorbimento energetico la cui cinetica abbia tempi caratteristici relativamente lunghi vengono in tal modo inibiti. E' il caso, per esempio, dei fenomeni viscoelastici nel caso dei materiali polimerici.

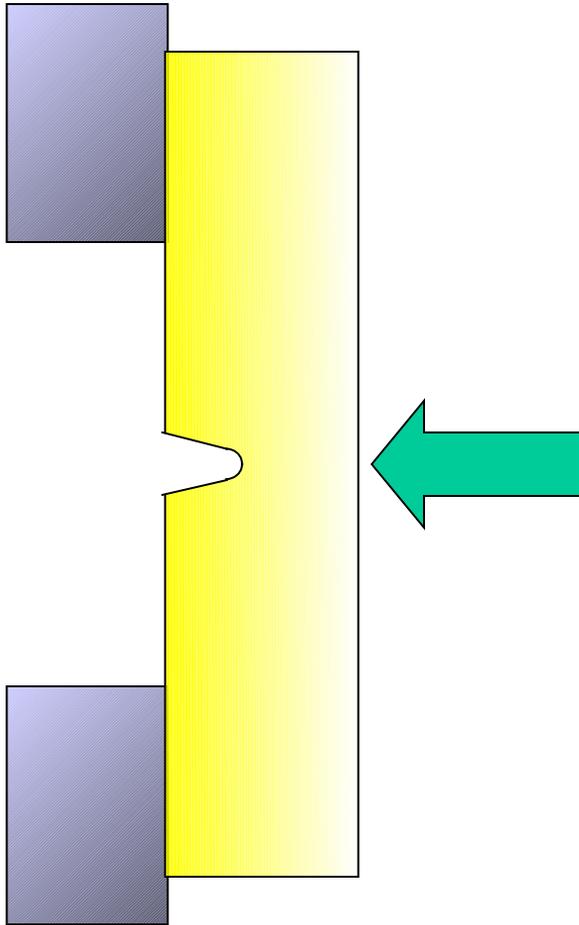
RESILIENZA ↔ URTO

Prova di resilienza

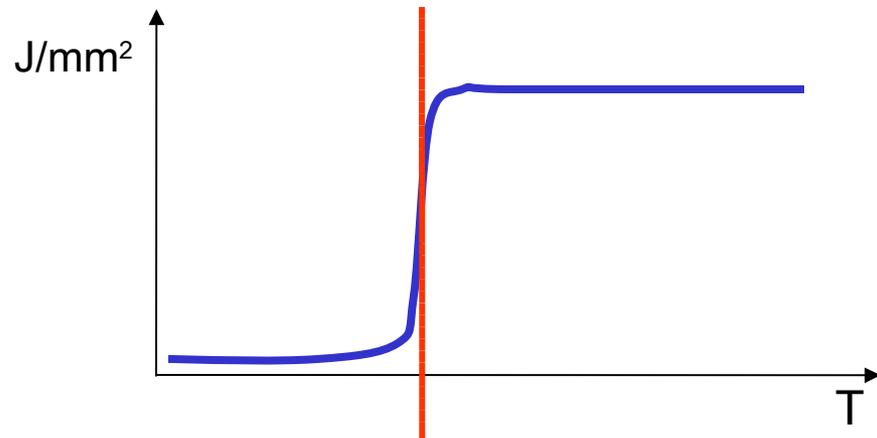


$$\Delta E = m \cdot g \cdot (h_i - h_f)$$

Prova di resilienza

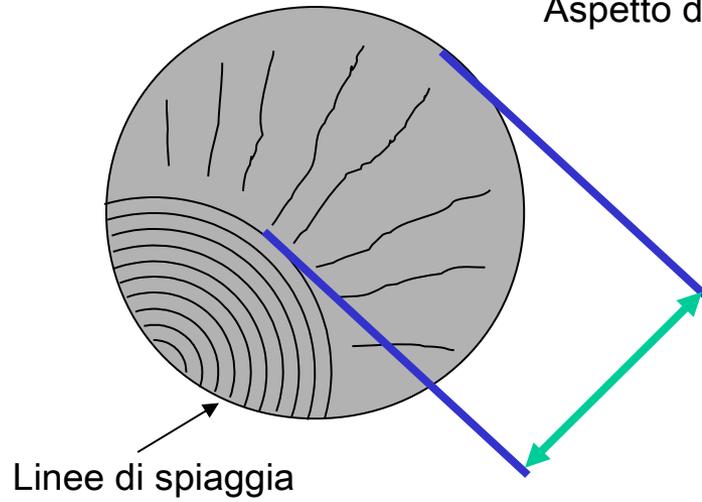


- Caratteristiche del provino e dell'intaglio e stabilite dalle norme
- Possibilità di applicare sensori di forza al percussore
- Resilienza = energia assorbita per unità di area
- Determinazione della temperatura di transizione duttile-fragile

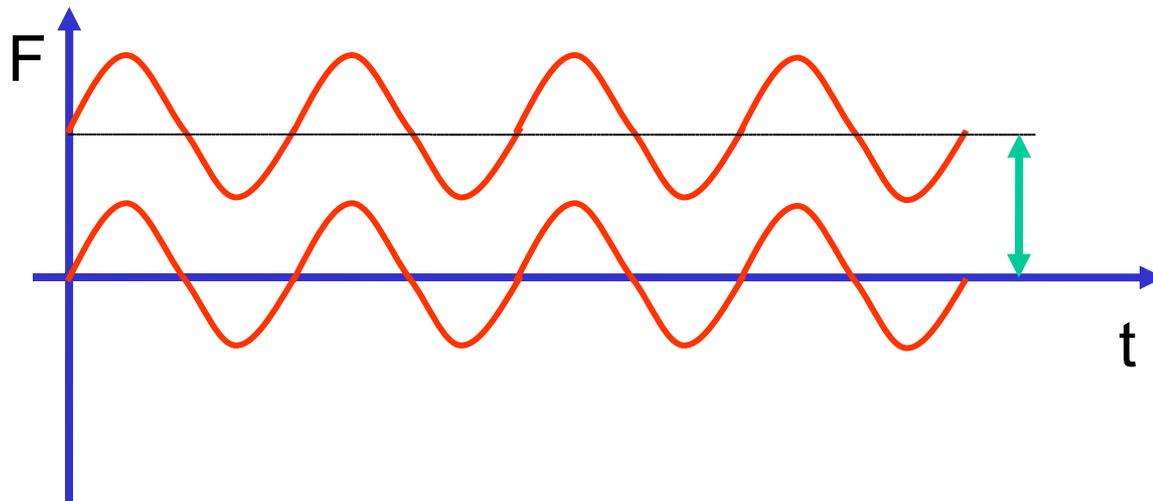


Fatica

Aspetto di frattura a fatica

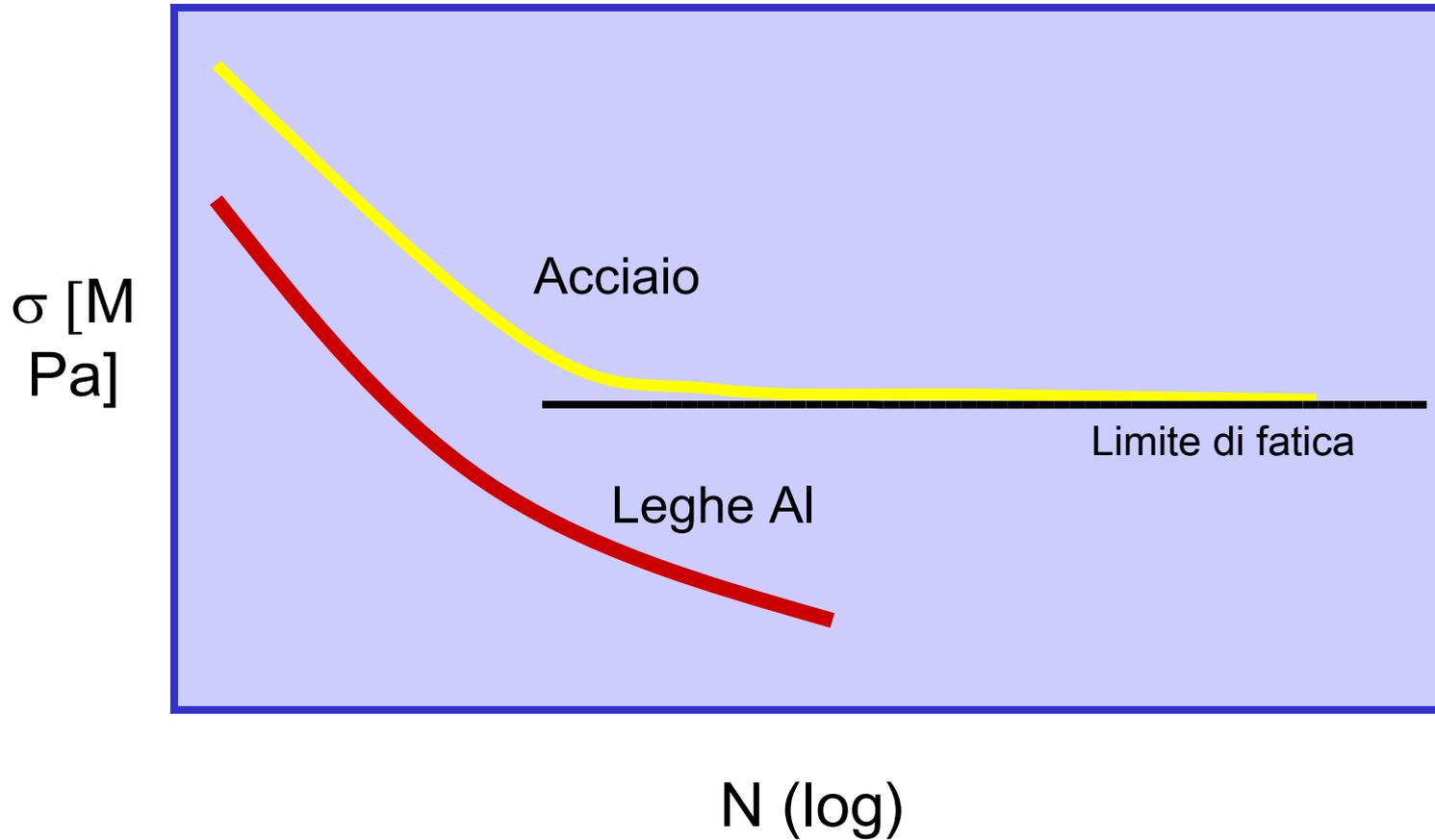


Sollecitazione a fatica



Fatica

Grafici σ -N



Fatica

Fasi

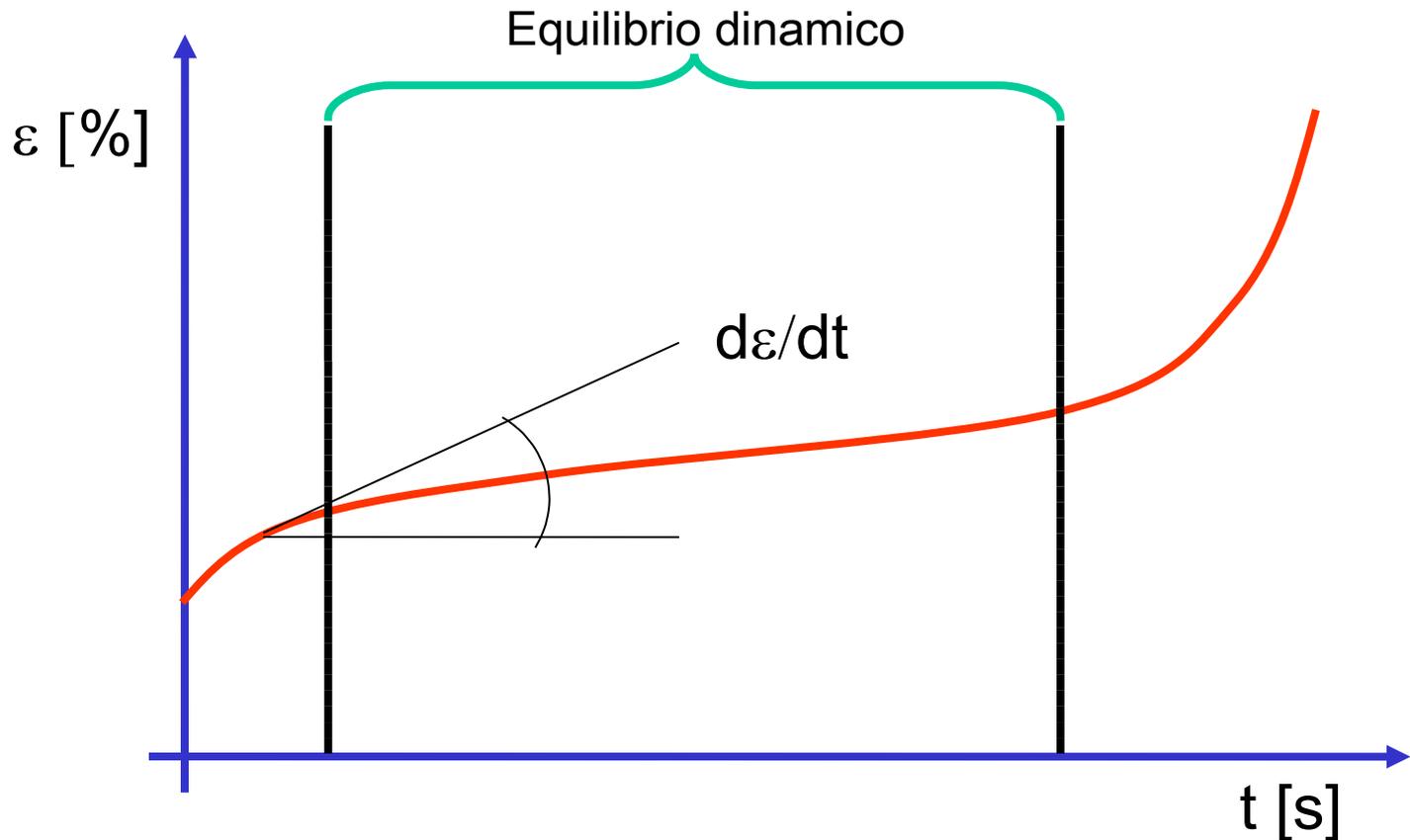
- Innesco della cricca
- Crescita della cricca lungo le bande di scorrimento
- Crescita della cricca per sforzo di trazione (modo I)
- Rottura

Fattori che influenzano la resistenza a fatica

- ✓ Concentrazione degli sforzi
- ✓ Rugosità superficiale
- ✓ Condizione superficiale
- ✓ Ambiente corrosivo

Creep

Deformazione irreversibile e crescente nel tempo che avviene (nei materiali metallici) a temperatura generalmente maggiore di $0.5 \cdot T_m$.



Creep

Nei materiali polimerici si ha scorrimento viscoelastico se la temperatura è maggiore di quella di transizione vetrosa (T_g).

