

INGEGNERIA MECCANICA

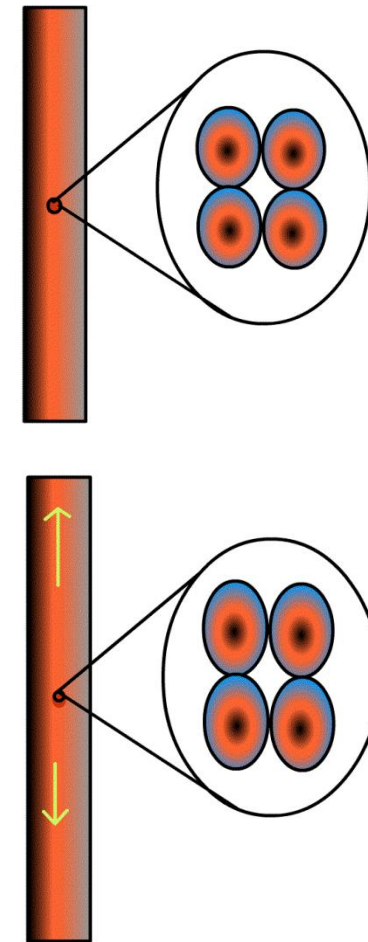
CORSO DI TECNOLOGIA DEI MATERIALI

PROPRIETÀ MECCANICHE DEI METALLI

INGEGNERIA MECCANICA - CORSO DI TECNOLOGIA DEI MATERIALI

Sforzo e Deformazione nei Metalli

- I metalli vanno incontro a deformazione sotto l'azione di una forza. In caso di una forza assiale, si produce:
- **Deformazione elastica:** gli atomi si allungano con conseguente complessivo allungamento campione. Ma ritornano alla loro dimensione originale dopo la rimozione della forza, determinando una **deformazione recuperabile**
- **Deformazione plastica:** gli atomi rompono i legami e scorrono l'uno sull'altro. Una volta che si verifica lo scorrimento, gli atomi non possono tornare alla loro posizione originale, determinando una **deformazione permanente**

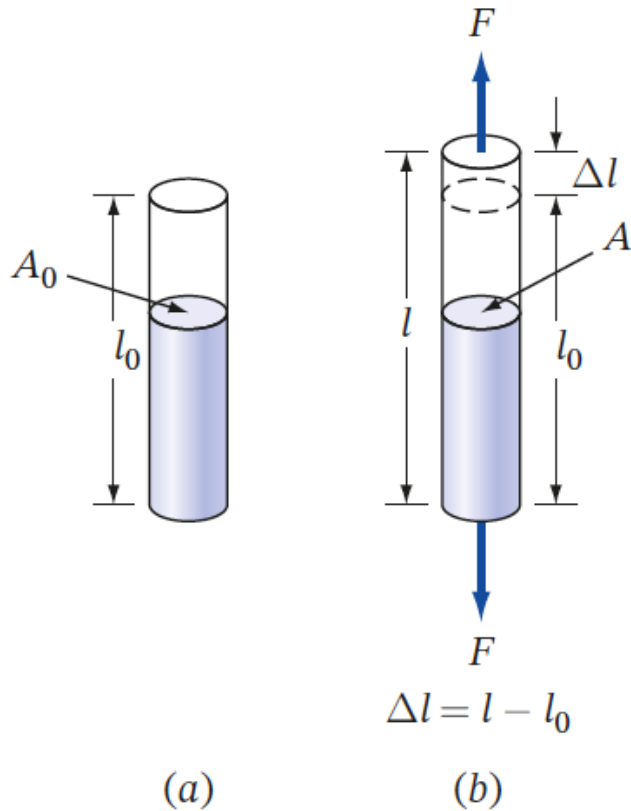


Sforzo e deformazione nominale

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)

$$1 \text{ psi} = 6.89 \times 10^3 \text{ Pa}$$



Deformazione nominale $= \varepsilon = \frac{\text{Variazione lunghezza}}{\text{Lunghezza iniziale}}$
 $= \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l}$

Unità della deformazione: in/in o **m/m**

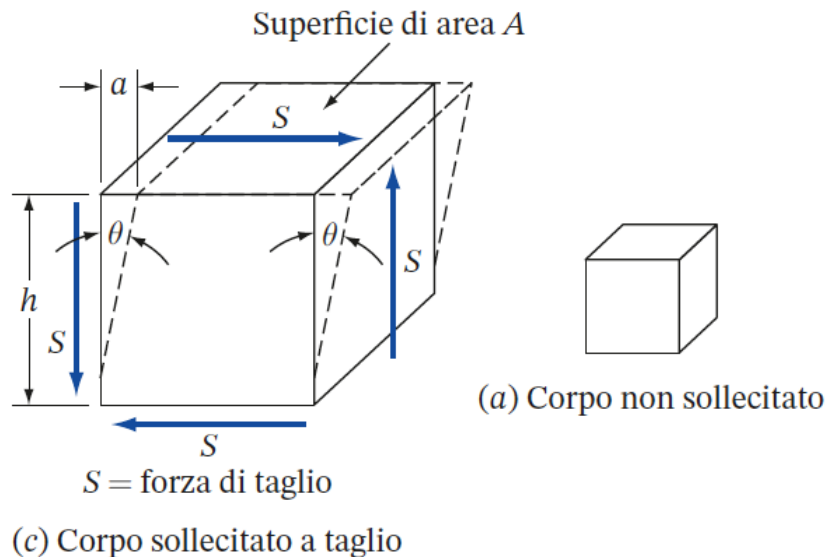
σ e ε sono detti sforzo e deformazione 'normali' perché agiscono **perpendicolari** alla superficie e determinano una **variazione di lunghezza**

Sforzo e deformazione di taglio

$$\tau = \text{sforzo di taglio} = \frac{S \text{ (forza di taglio)}}{A \text{ (superficie applicazione forza di taglio)}}$$

$$\text{Deformazione di taglio } \gamma = \frac{\text{spostamento a taglio, } a}{\text{distanza "h" sulla quale agisce lo sforzo}} = \tan \theta$$

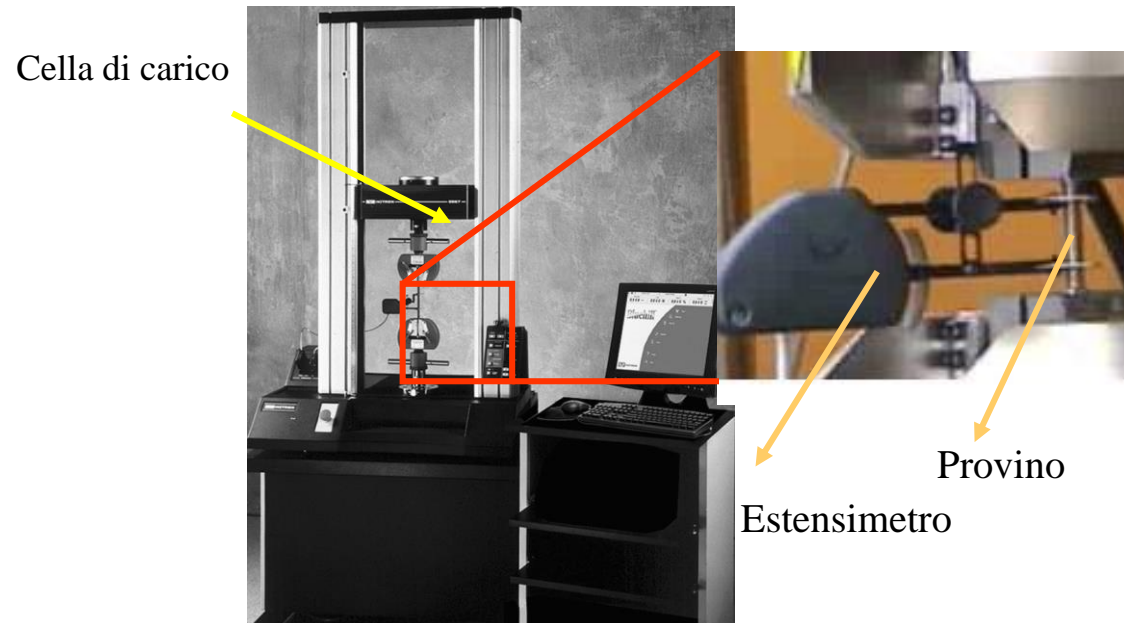
*per piccoli angoli $\theta = \tan \theta$



τ e γ sono detti sforzo e deformazione 'di taglio'; si noti che τ è **parallelo** alla superficie γ rappresenta una deviazione dall'angolo di 90° o una **variazione di forma**

Prova a trazione - 1

- Importanti proprietà dei materiali possono essere determinate svolgendo una prova a trazione, ottenendo un diagramma sforzo-deformazione

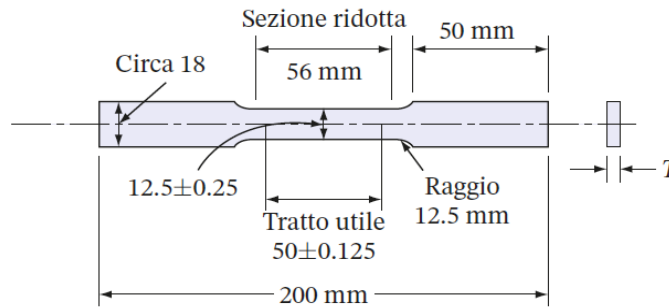
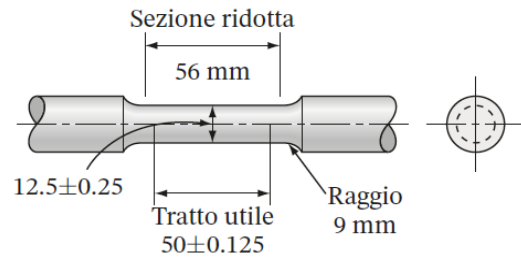


I dati di forza sono ottenuti dalla **cella di carico**

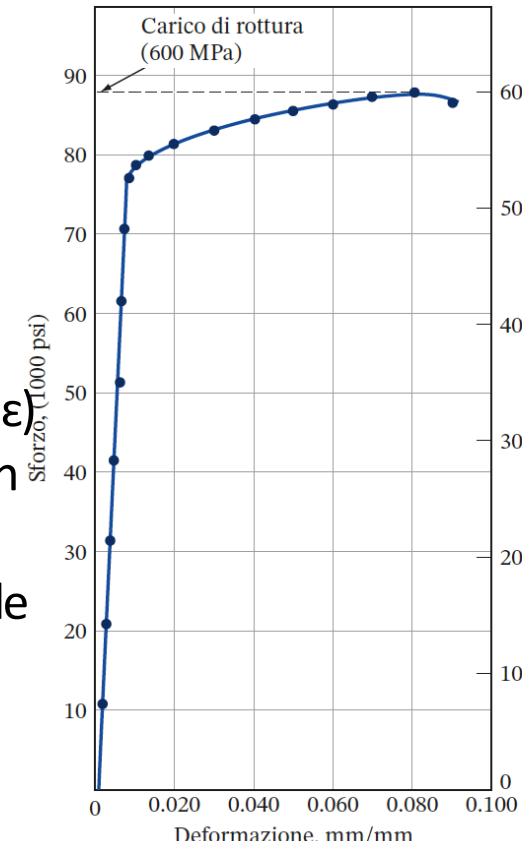
I dati di deformazione sono ottenuti dall'**estensimetro**

Prova a trazione - 2

Provini standard ad osso di cane cilindrici (sinistra) e piatti (destra) usati nelle prove a trazione



Tipica curva sforzo/deformazione per un metallo duttile



La macchina di prova applica uno spostamento al campione
Il campione reagisce sviluppando uno sforzo (σ) e una deformazione (ϵ)
 σ è determinato dividendo la forza F (misurata dalla cella di carico) con la sezione trasversale iniziale del provino, A_0
 ϵ è determinato dividendo l'allungamento ($\Delta \ell$) per la lunghezza iniziale del tratto utile, ℓ_0
Ad ogni incremento vengono tracciate le corrispondenti coppie $\sigma - \epsilon$
Viene prodotto il diagramma finale sforzo-deformazione nominale

Diagramma sforzo-deformazione nominali (s-e)

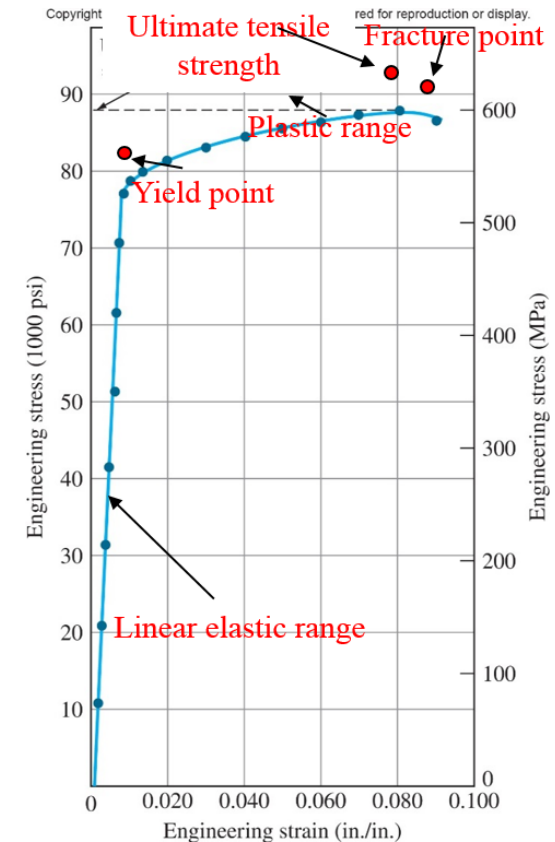
Il diagramma σ - ϵ ha molte caratteristiche rilevanti:

1. Intervallo ad elasticità lineare:

- σ ed ϵ sono correlati in modo lineare; $\sigma = E \epsilon$, **Legge di Hooke**
- Elastico significa che la deformazione generata è **recuperabile**: si rimuove il carico e la deformazione viene recuperata
- E è il modulo di elasticità o la costante di proporzionalità nell'intervallo lineare

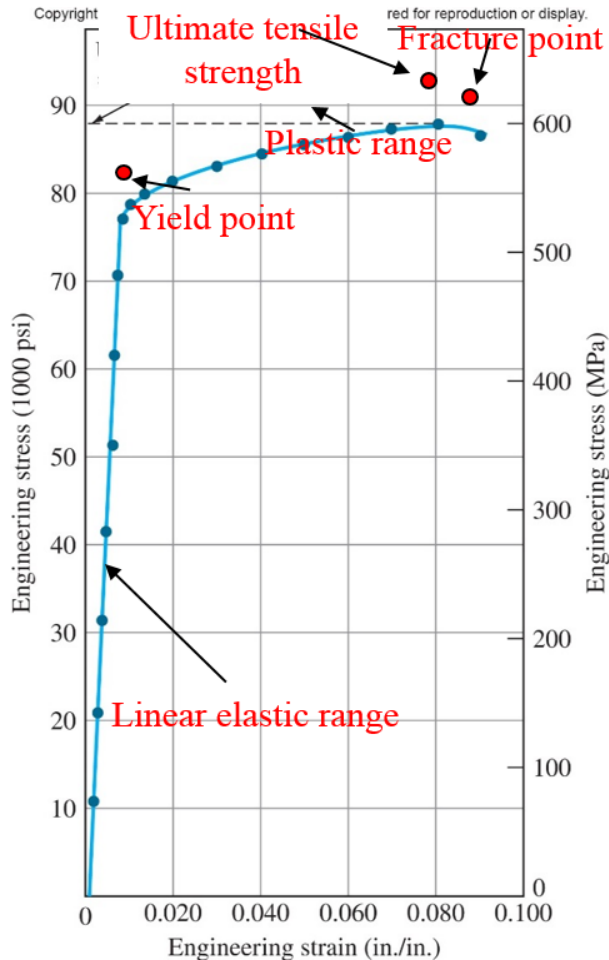
2. Punto di snervamento

- Il punto sulla curva nel quale termina l'**intervallo elastico**
- Dopo questo punto, ogni ulteriore deformazione non è recuperabile ed è **permanente**
- L'intervallo plastico inizia dopo il punto di snervamento e termina con il punto di rottura



Tipica curva sforzo/deformazione per un metallo duttile

Diagramma sforzo-deformazione nominali (σ - ϵ)



Il diagramma σ - ϵ ha molte caratteristiche rilevanti:

3. Sforzo a rottura a trazione:

- è il punto massimo della curva σ - ϵ
- rappresenta lo sforzo maggiore che il provino possa raggiungere prima di rompersi

2. Punto di rottura

- Il punto sulla curva nel quale il provino si rompe

La curva σ - ϵ può essere utilizzata per ottenere informazioni sul comportamento dei materiali testati e sui dati relativi alle proprietà meccaniche

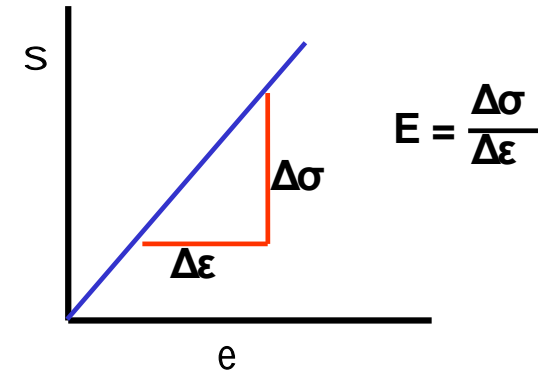
Tipica curva sforzo/deformazione per un metallo duttile

Proprietà Meccaniche Ottenibili dalla Prova a Trazione – Modulo di Elasticità, E

- **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 è il modulo di elasticità
- *Esempi:* Modulo di elasticità dell'acciaio: 207 GPa
Modulo di elasticità dell'alluminio: 76 GPa
- Questo significa che l'acciaio è **più rigido** dell'alluminio e si **deforma meno (elasticamente)** sottoposto allo stesso carico

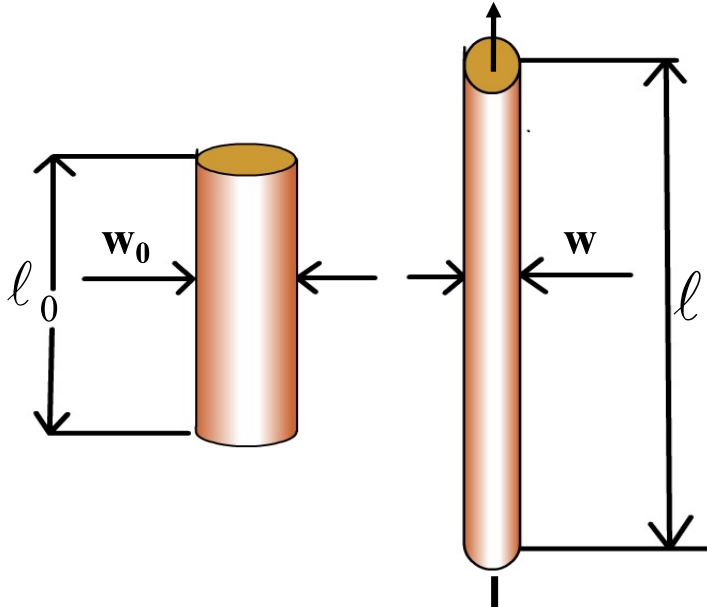


Porzione lineare della curva sforzo/deformazione

Proprietà Meccaniche Ottenibili dalla Prova a Trazione – Rapporto di Poisson, ν

Quando un campione è allungato elasticamente sotto un carico di trazione, il suo diametro deve diminuire. Questo produce il **rapporto di Poisson, ν**

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



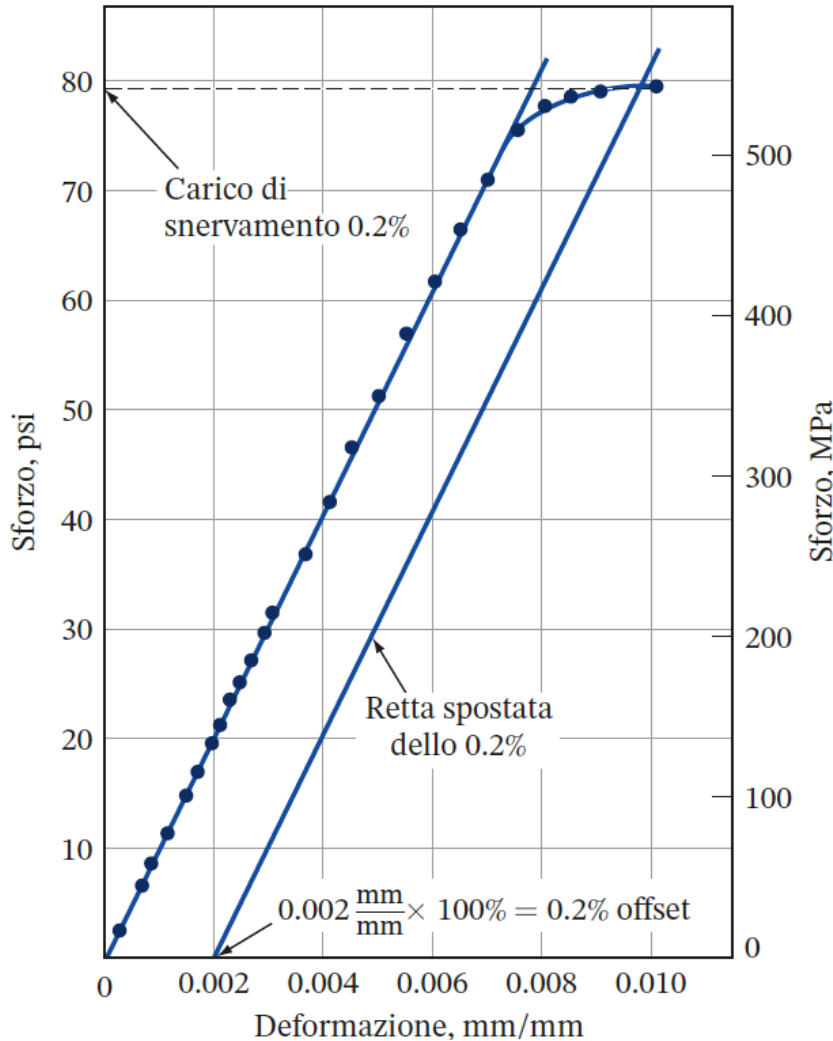
$$\nu = -\frac{(w - w_0) / w_0}{(l - l_0) / l_0}$$

Il rapporto di Poisson è sempre positivo nei materiali isotropi e varia tra 0.25 e 0.4

Esempi: Acciaio inossidabile 0.28

Rame 0.33

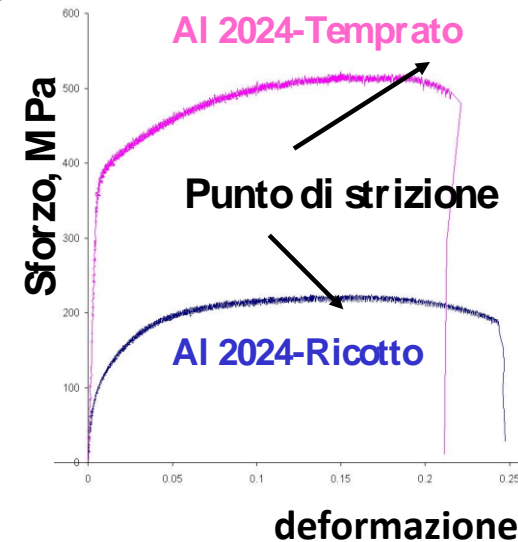
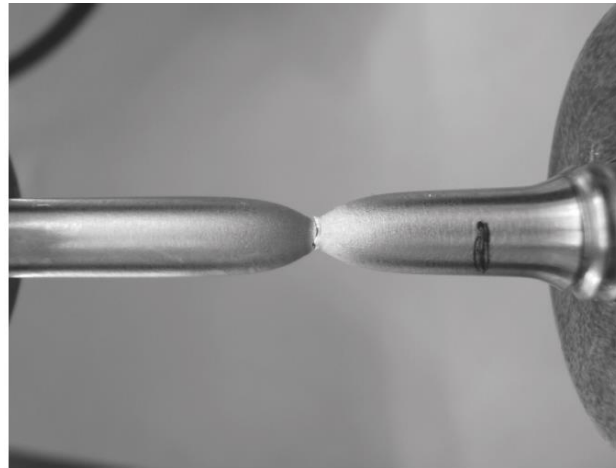
Proprietà Meccaniche Ottenibili dalla Prova a Trazione – Sforzo di snervamento, σ_y



- Lo **sforzo di snervamento**, σ_y , è lo sforzo al quale il materiale inizia ad avere una deformazione **permanente o plastica**
- La posizione dello sforzo di snervamento non è sempre chiara e precisa
- **Offset sforzo di snervamento a 0.2%** è usato per identificare lo sforzo di snervamento
- Linea di costruzione: partendo dallo 0.2% di deformazione (0.002), si traccia una linea **parallela** al campo elastico
- Lo sforzo al quale la linea interseca la curva $\sigma-\varepsilon$ è l'offset dello sforzo di snervamento

Proprietà Meccaniche Ottenibili dalla Prova a Trazione – Sforzo a rottura, σ_r

- 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



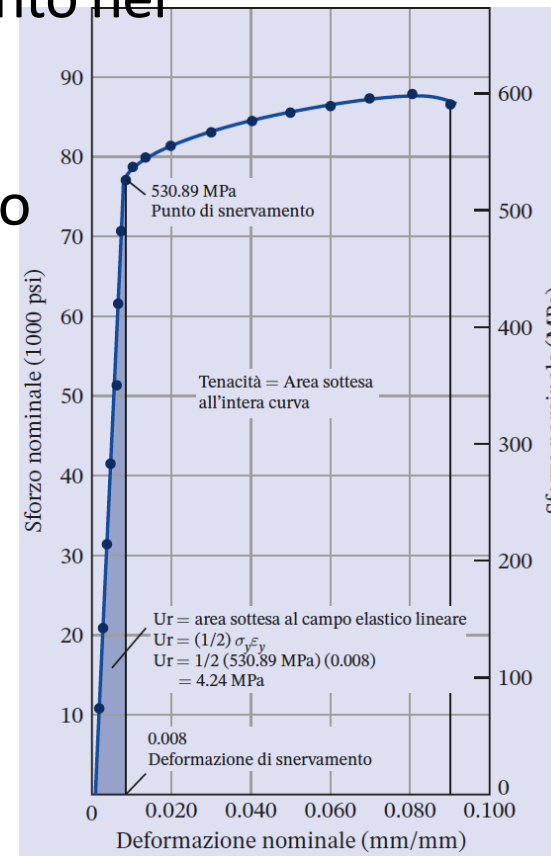
- Più duttile è il metallo, maggiore è la strizione prima della rottura.
 - Lo sforzo aumenta fino a rottura. La diminuzione nella curva σ/ε è dovuta al calcolo dello sforzo basato sull'area iniziale
- Curve σ/ε Al 2024 con due diversi trattamenti termici

Proprietà Meccaniche Ottenibili dalla Prova a Trazione – Modulo di Resilienza, U_r

- Il **modulo di resilienza**, U_r , è una misura della quantità di energia necessaria per causare lo snervamento nel materiale
- Questa energia è quasi completamente recuperata una volta che il carico viene rimosso
- U_r è misurato calcolando l'area sottostante l'intervallo elastico lineare della curva σ - ϵ

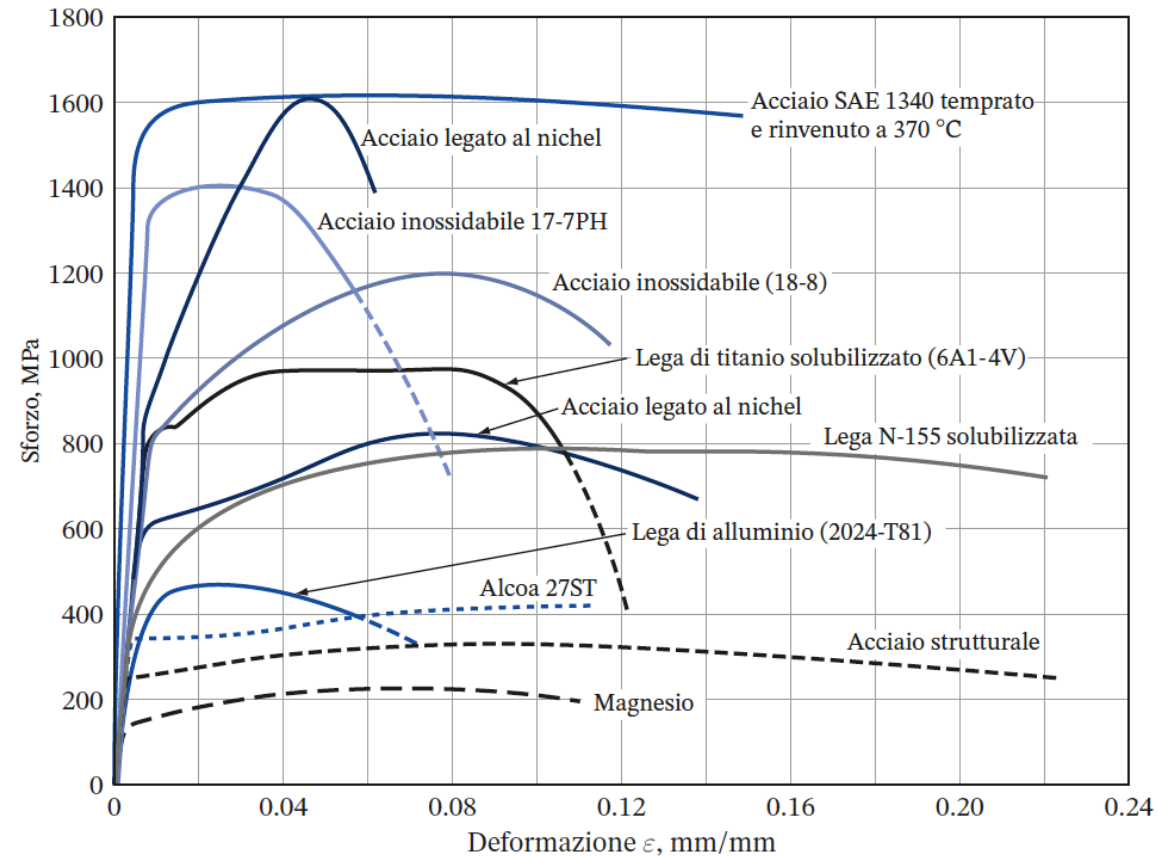
$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_y \epsilon_y$$

- La **tenacità** è la quantità di energia necessaria per rompere il materiale. È una misura di combinazione di resistenza e duttilità
- Si misura determinando l'area sottostante l'intera curva



Le unità di misura per U_r e tenacità sono J/m^3 ($\text{lb}_f \cdot \text{in}/\text{in}^3$) o N/m^2 (lb_f/in^2)

Confronto tra le Proprietà di Diversi Metalli

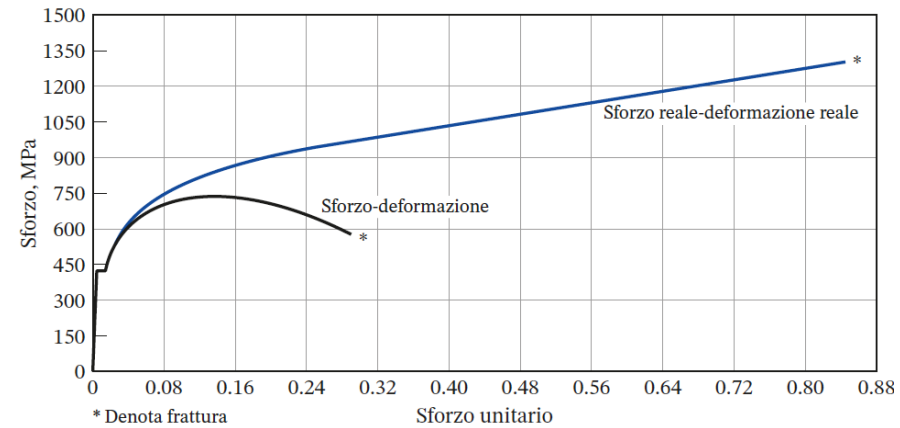


Curve σ/ϵ per diversi metalli

Puoi confrontare le proprietà dei vari metalli? Qual è il più resistente?
Qual è il più duttile? Qual è il più rigido? Qual è il più tenace?

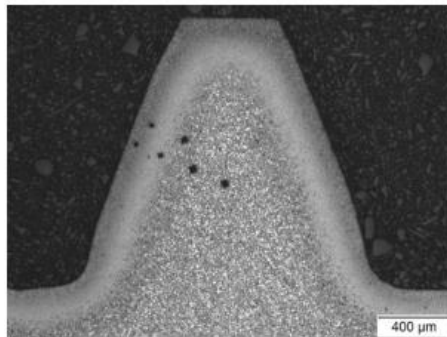
Sforzo e Deformazione Reali

- Lo **sforzo** e la **deformazione reali** si basano sull'area resistente **istantanea** e la lunghezza istantanea
- Questo è in contrasto con lo sforzo nominale che è determinato sulla base dell'area della sezione trasversale originale
- Sforzo reale = $\sigma_t = \frac{F}{A_i}$
- Deformazione reale = $\varepsilon_t = \int_{\ell_0}^{\ell_i} \frac{d\ell}{\ell} = \ln \frac{\ell_i}{\ell_0} = \ln \frac{A_0}{A_i}$
- Lo sforzo reale è sempre maggiore dello sforzo nominale, perché si considera l'area istantanea (che è sempre minore)
- Questa differenza, però, **non è significativa nel campo elastico**



Durezza e Prova di Durezza di Materiali

- La durezza è una misura della resistenza di un metallo alla deformazione **plastica localizzata** o **indentazione**
- La durezza è importante in applicazioni nelle quali un componente si articola su un altro, causando usura

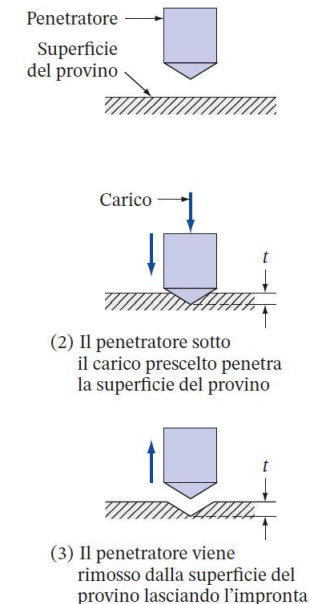


Indentazioni di una prova di durezza condotta sul dente di un ingranaggio

- I materiali più duri si consumano meno
- Il materiale più duro in natura è il diamante
- Le indentazioni sulla superficie e all'interno del dente dell'ingranaggio hanno diverse dimensioni. **Cosa ti dice questo?**



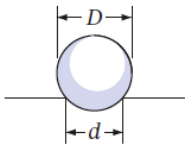

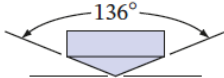
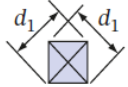
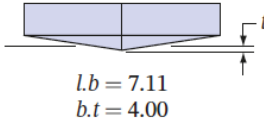
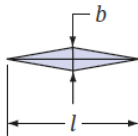
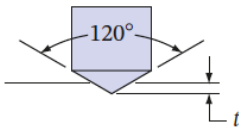

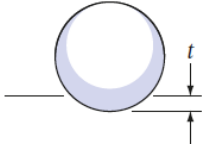

(a)



Strumento per la durezza Rockwell e fasi della prova

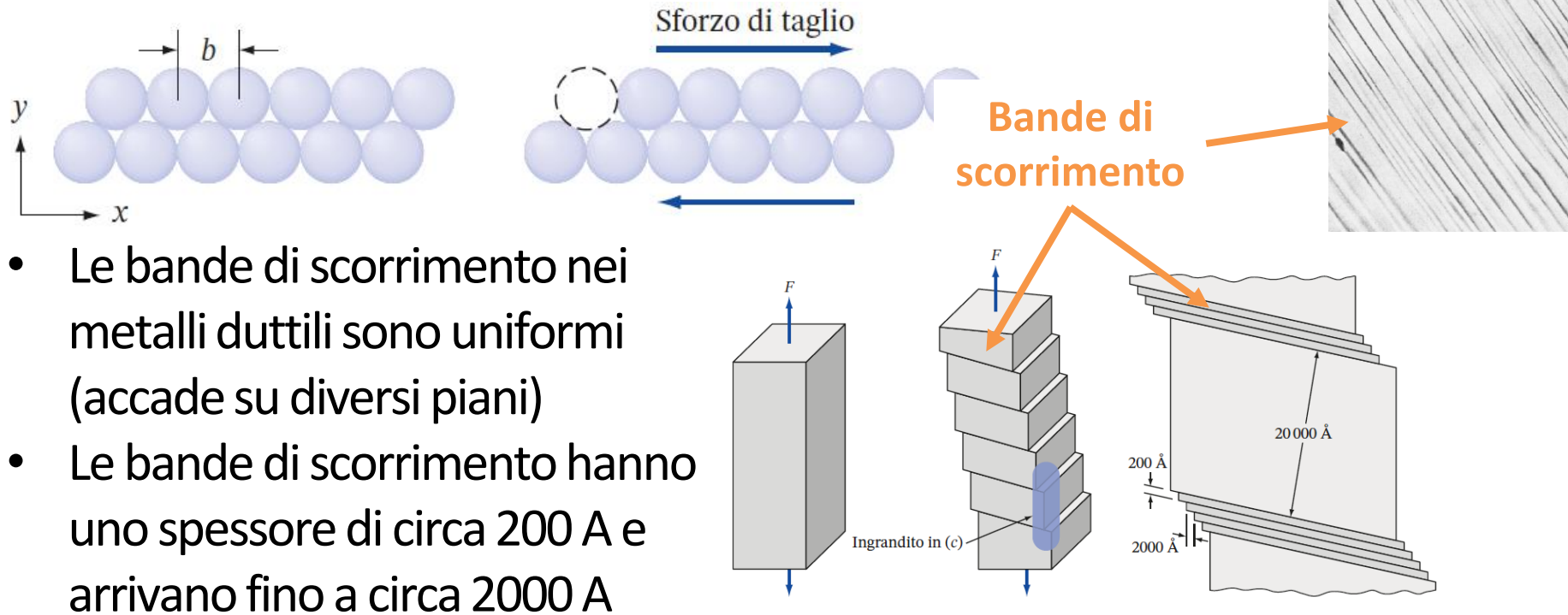
Prove di durezza e Scale

Tabella 7.2 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			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	R_E

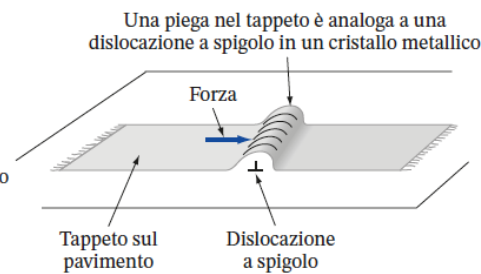
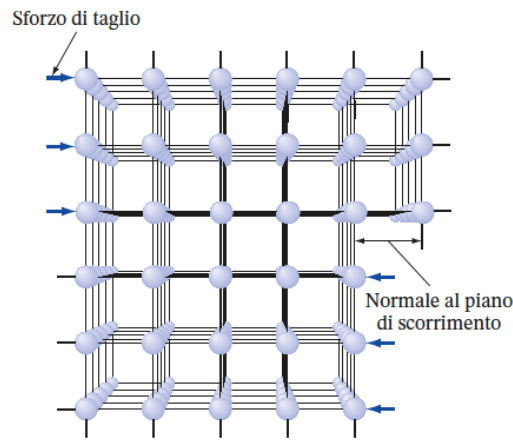
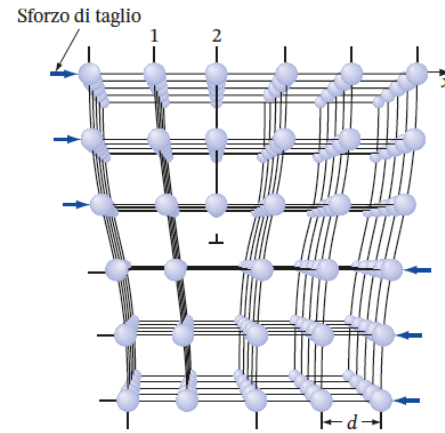
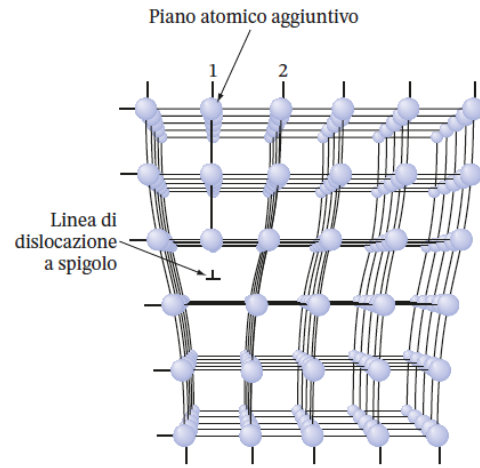
Deformazione Plastica in Monocristalli

- La deformazione plastica di un monocristallo provoca la formazione di bande dette **bande di scorrimento**
- Atomi su specifici piani cristallografici (piani di scorrimento) e in direzioni specifiche **scorrono** per formare queste bande



- Le bande di scorrimento nei metalli duttili sono uniformi (accade su diversi piani)
- Le bande di scorrimento hanno uno spessore di circa 200 \AA e arrivano fino a circa 2000 \AA

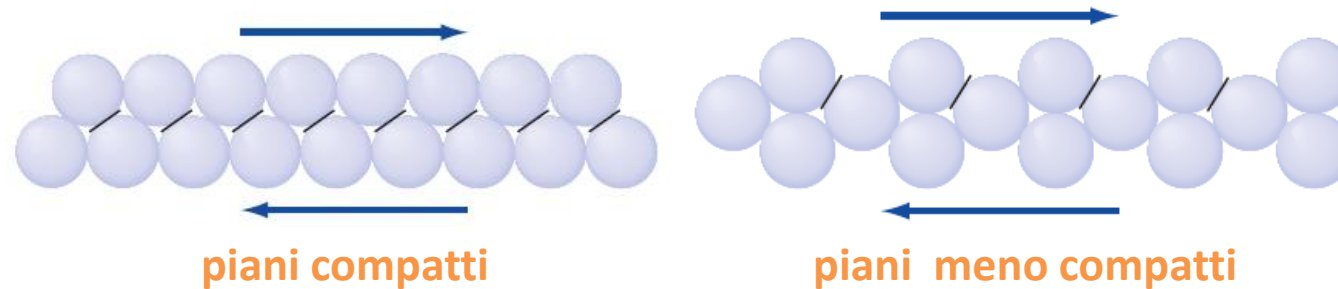
Meccanismo di Scorrimento



- Lo **scorrimento** è causato dall'applicazione di sforzi di taglio sul grano
- Il meccanismo con il quale avviene lo scorrimento è la formazione di **dislocazioni e il loro movimento**
- Il movimento di una dislocazione è simile al movimento di una piega in un tappeto
- Come si muove la piega in un tappeto, così fa la dislocazione in un grano
- Una volta che la dislocazione raggiunge la fine del grano, si forma un passo unitario di scorrimento

Meccanismo di Scorrimento

- Lo scorrimento avviene più facilmente sui **piani strettamente impaccati** e lungo le **direzioni più compatte** su quei piani



- Una sollecitazione di taglio minore è necessaria perché lo scorrimento si verifichi su piani densamente impaccati perché lo scorrimento di passo unitario (distanza tra punti rossi consecutivi) è minore nei piani impaccati
- Per muovere gli atomi su piani più densi è necessaria meno energia
- Se lo scorrimento è limitato nei piani vicini, allora i piani meno densi diventano operativi

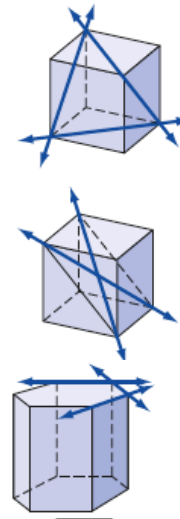
Sistemi di Scorrimento

- Pertanto, i metalli hanno un sistema di scorrimento **preferito**: una combinazione di un piano densamente impaccato e una direzione densamente impaccata
- Ogni cristallo ha una serie di sistemi di scorrimento caratteristici in base alla sua struttura
- Ad esempio, nel cristallo CFC, lo scorrimento avviene in piani ottaedrici $\{111\}$ e in direzioni $\langle 110 \rangle$

4 tipi di piani $\{111\}$ e
 3 tipi di direzione $\langle 110 \rangle$
 $4 \times 3 = 12$ sistemi di scorrimento.

Tabella 7.3 Sistemi di scorrimento osservati nelle strutture cristalline

Struttura	Piano di scorrimento	Direzione di scorrimento	Numero di sistemi di scorrimento
CFC: Cu, Al, Ni, Pb, Au, Ag, Fe- γ	$\{111\}$	$\langle 1\bar{1}0 \rangle$	$4 \times 3 = 12$
CCC: Fe, W, Mo, ottone- β	$\{110\}$	$\langle \bar{1}10 \rangle$	$6 \times 2 = 12$
EC: Cd, Zn, Mg, Ti, Be,	$\{0001\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$1 \times 3 = 3$



Si noti che i cristalli CCC hanno anche 12 sistemi di scorrimento, ma i cristalli EC hanno solo 3 sistemi di scorrimento in condizioni normali. **Cosa ti dice**

11/10/20

Legge di Schmid

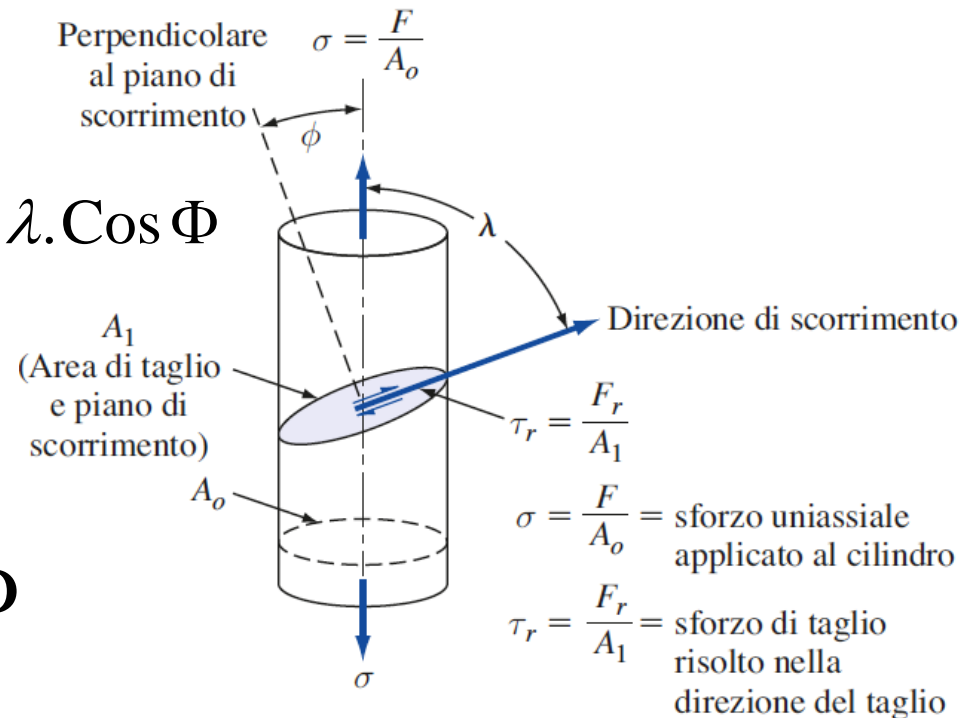
- La relazione tra l'azione di sforzo uniassiale su un singolo cilindro di un monocristallo di metallo puro e lo sforzo di **taglio risultante**, τ_r , prodotto su un sistema di scorrimento è data da

$$\tau_r = \frac{F_r}{A_1} = \frac{F \cdot \cos \lambda}{A_0 / \cos \lambda} = \frac{F}{A_0} \cos \lambda \cdot \cos \Phi$$

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

$$\tau_r = \sigma \cos \lambda \cos \Phi$$

Legge di Schmid



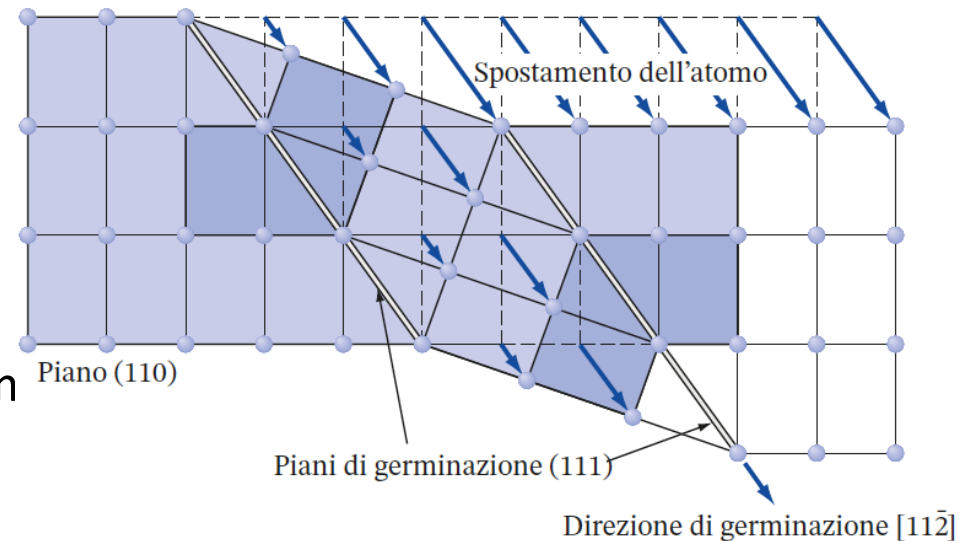
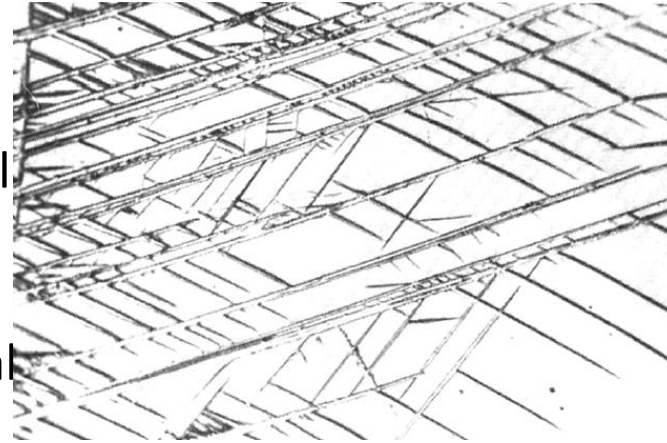
Sforzo di taglio critico, τ_c

- Lo **sforzo critico di taglio**, τ_c , è lo sforzo di taglio richiesto per provocare scorrimento in un monocristallo di metallo puro
- Dipende da:
 - struttura cristallina;
 - caratteristiche di legame atomico;
 - temperatura;
 - orientamento di piani di scorrimento relativi a sforzo di taglio
- Lo scorrimento inizia quando lo sforzo di taglio nel piano di scorrimento nella direzione di scorrimento raggiunge uno sforzo di taglio critico
- Questo è equivalente allo sforzo di snervamento
- *Esempi:*

Zn	EC	99.999% puro	0.18 Mpa
Ti	EC	99.99% puro	13.7 Mpa
Ti	EC	99.9% puro	90.1 MPa

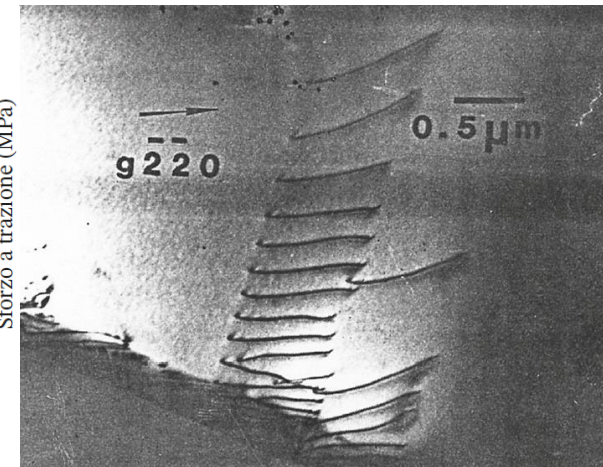
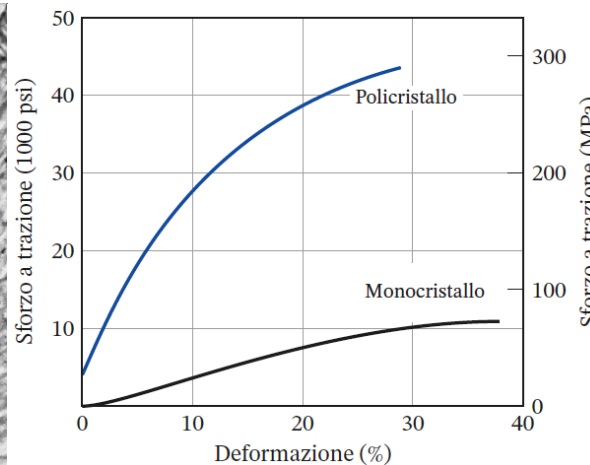
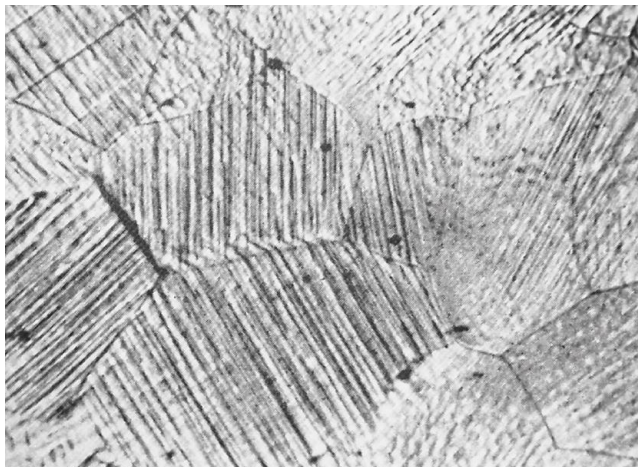
Geminati

- In un ***geminato***, una parte del reticolo cristallino è deformato e forma una immagine speculare del reticolo vicino
- La distanza mossa da atomi è proporzionale alla loro distanza dal piano di geminato
- La deformazione tra geminati è piccola
- Il geminato riorienta il sistema di scorrimento
- Il geminato è importante nella deformazione nei cristalli EC a causa del minore numero di sistemi di scorrimento
- La figura mostra geminati nel titanio puro



Effetto dei Bordi di Grano sulla Resistenza Meccanica di un Metallo

- I **bordi di grano** bloccano il movimento delle dislocazioni e quindi rafforzano i metalli (si veda l'impilamento di dislocazioni in figura a sinistra)
- La dimensione di grani fini è desiderabile per proprietà uniformi e alta resistenza meccanica a temperatura ambiente, quindi i metalli sono prodotti con grani più fini (si veda in confronto nel rame, figura al centro)



- Nei metalli policristallini, le bande di scorrimento sono parallele nei grani, ma cambiano direzione tra i grani per la diversa orientazione dei grani (si veda la figura a destra)

Equazione di Hall Petch

- Più fini i grani in un metallo, maggiori sono le proprietà meccaniche (a temperatura ambiente)
- **Equazione di Hall-Petch** è un'equazione empirica che relaziona la resistenza meccanica alla dimensione dei grani (diametro)

$$\sigma_y = \sigma_0 + k / (d)^{1/2}$$

σ_y = sforzo di snervamento
 d = diametro medio dei grani

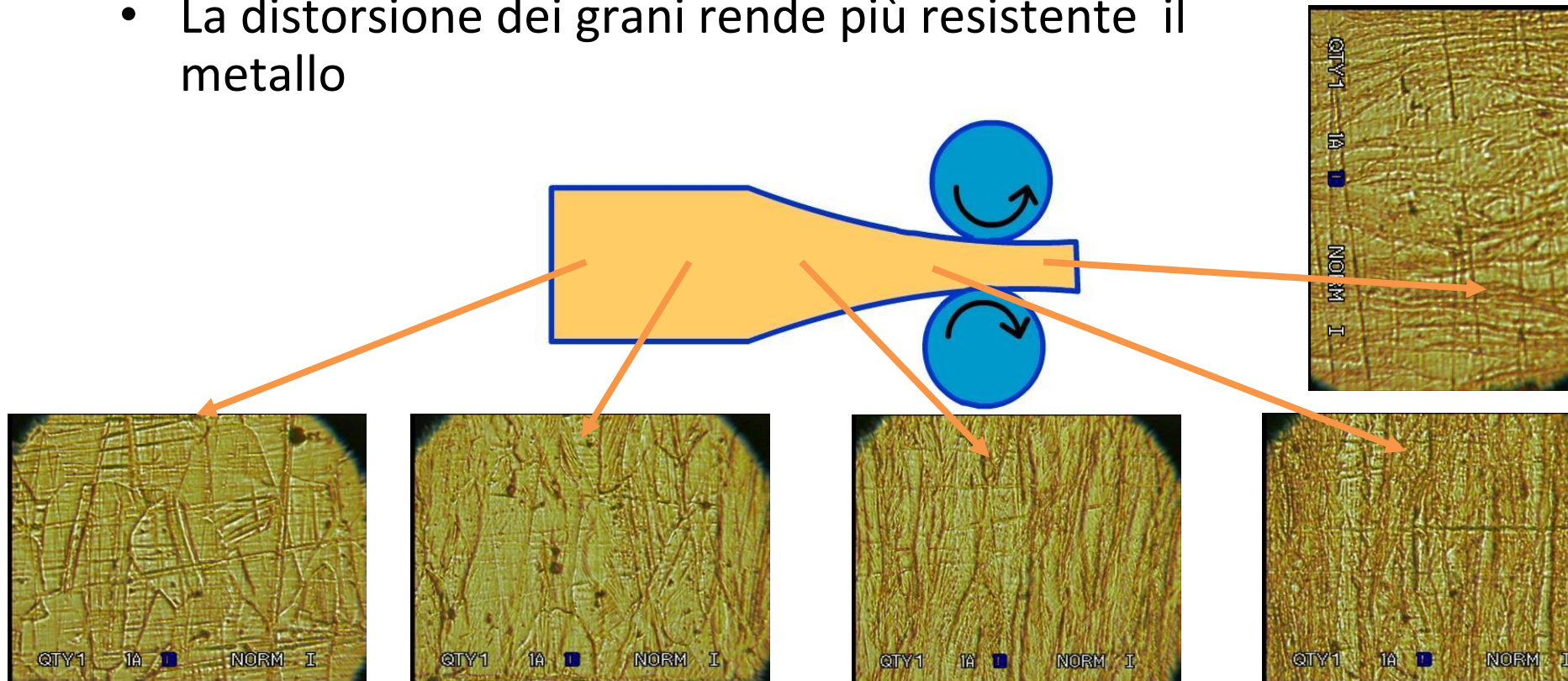
σ_0 e k sono costanti per un metallo

$\sigma_0 = 70$ MPa e $k = 0.74$ MPa m^{1/2} per acciaio dolce

- Oltre ad aumentare la resistenza meccanica, grani più fini permettono:
 - proprietà più uniformi e isotropiche
 - minore resistenza alla corrosione e al creep

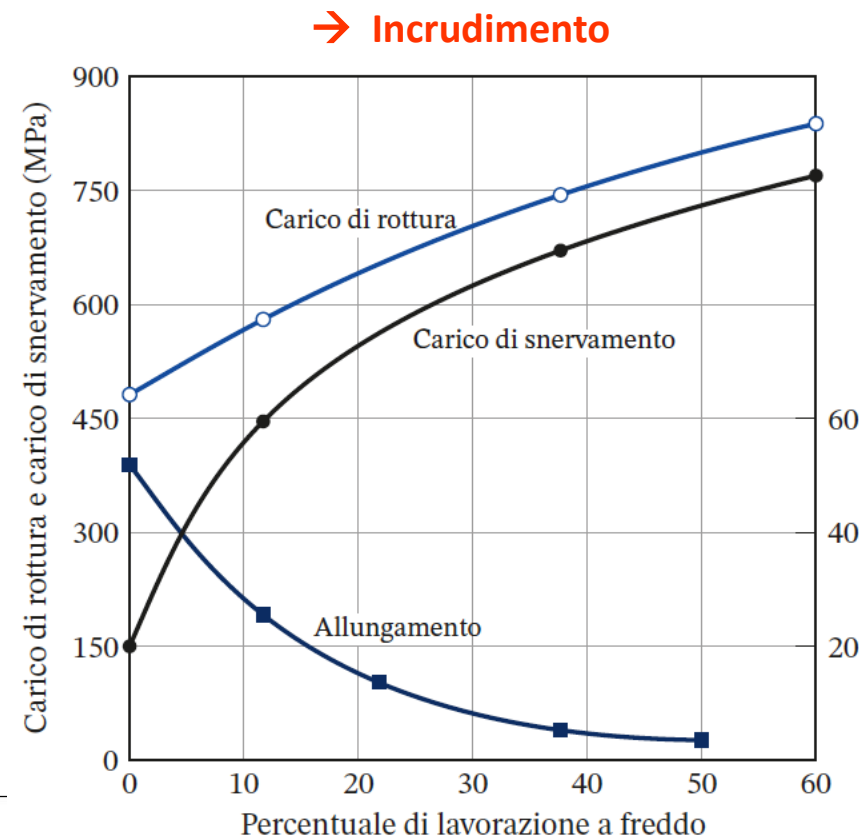
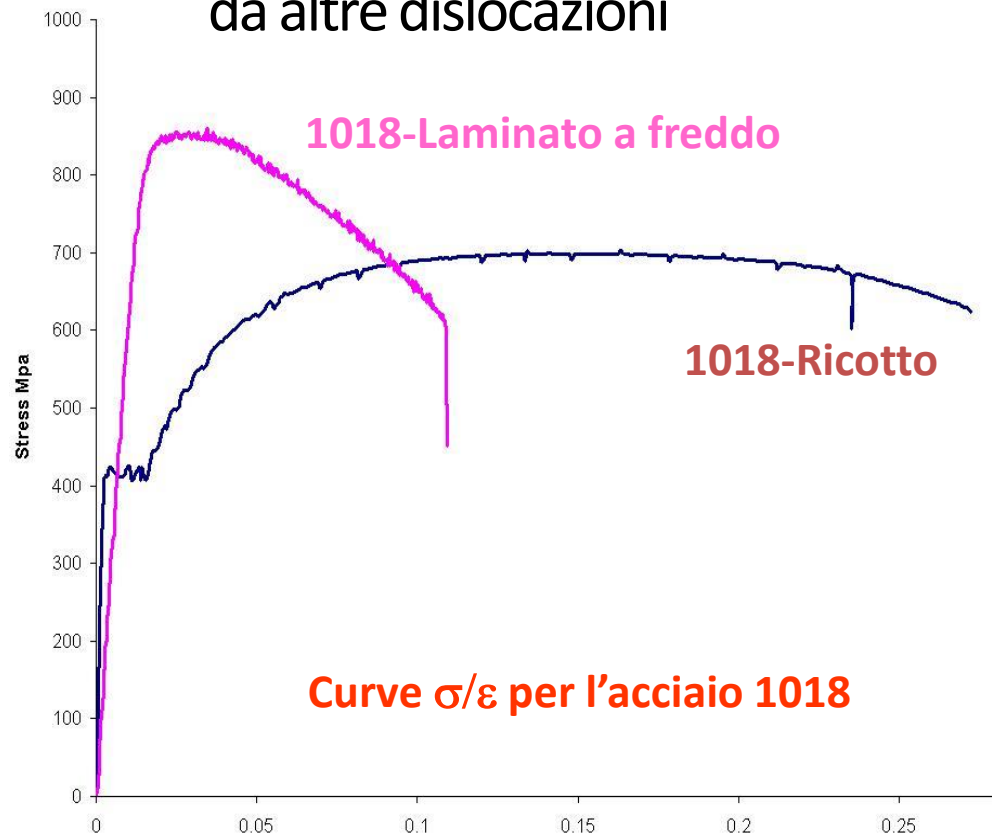
Effetto della Deformazione Plastica

- La deformazione plastica porta ad uno sforzo di taglio dei grani l'uno con l'altro
- I grani si allungano nella direzione della laminazione
- La distorsione dei grani rende più resistente il metallo



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



Rafforzamento per Soluzione Solida

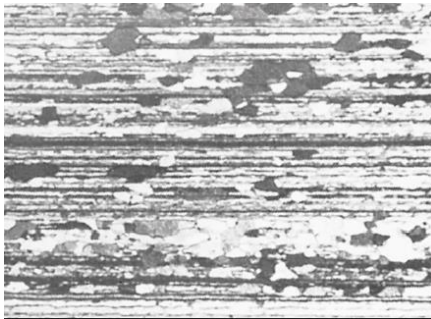
- Nelle **soluzioni solide**, l'aggiunta di uno o più metalli (soluto) può aumentare la resistenza meccanica dei metalli
- Gli atomi di soluto formano campi di sforzo attorno a loro ed impediscono il movimento delle dislocazioni. Questo rafforza il metallo di base
- Anche la distorsione del reticolo e cluster di atomi impediscono il movimento delle dislocazioni
- Atomi di lega prevengono la propagazione dello scorrimento
- Esempio: la soluzione solida 70% Cu in peso e 30% Zn in peso (ottone cartridge) ha resistenza meccanica a trazione pari a 500 MPa. La resistenza meccanica a trazione del rame non legato è pari a 330 MPa

Ricottura: Recovery e Ricristallizzazione e Crescita di Grano - 1



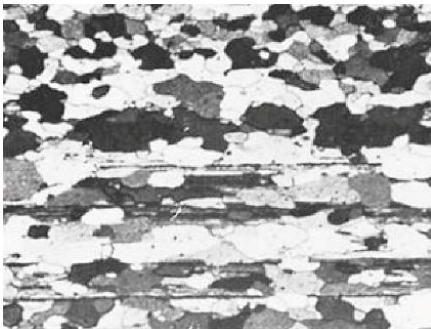
Lega Al 85% CW:

- grani allungati
- indurito



Lega deformata e mantenuta a 302 °C per 1 ora:

- inizio ricristallizzazione
- ridotti sforzi residui



Lega dopo ricottura a 316 °C per 1 ora:

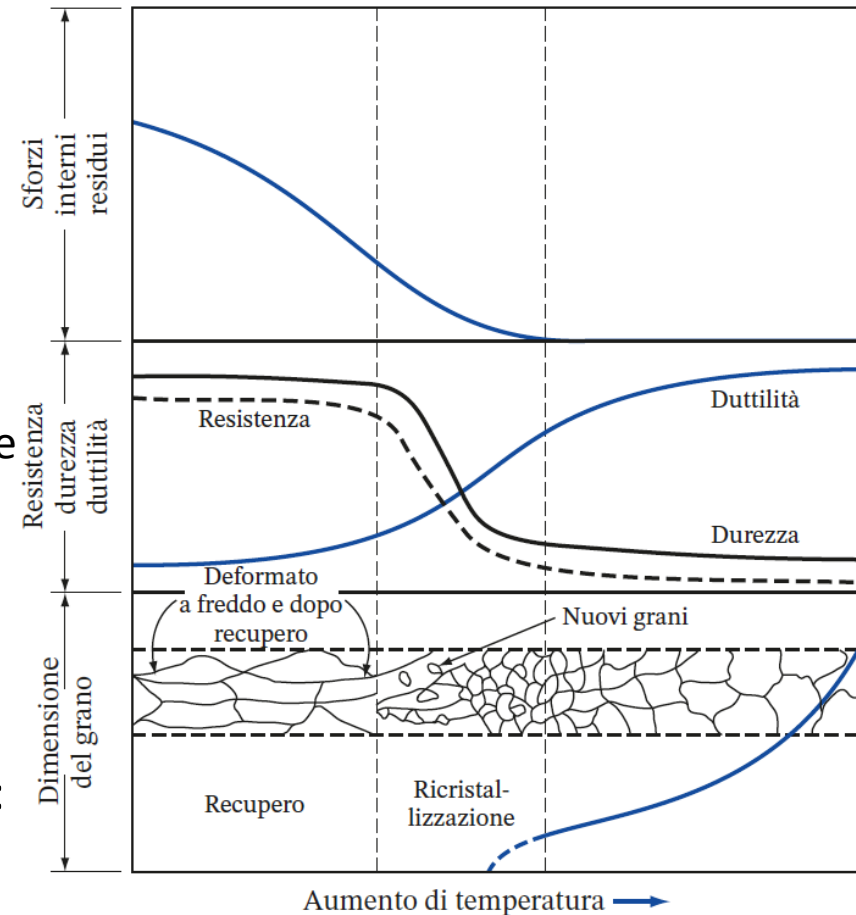
- maggiore ricristallizzazione
- maggiore crescita dei grani

- La **ricottura** è un trattamento termico applicato ad un metallo indurito o lavorato a freddo per **rimuovere gli sforzi residui, far crescere nuovi grani equiassici e ammorbidire il metallo**
- Le tre fasi del processo di ricottura sono: **recovery, ricristallizzazione e crescita di grano**
- La ricottura avviene sopra la temperatura di ricristallizzazione, T_R , per un'ora

Ricottura: Recovery e Ricristallizzazione e Crescita dei Grani - 2

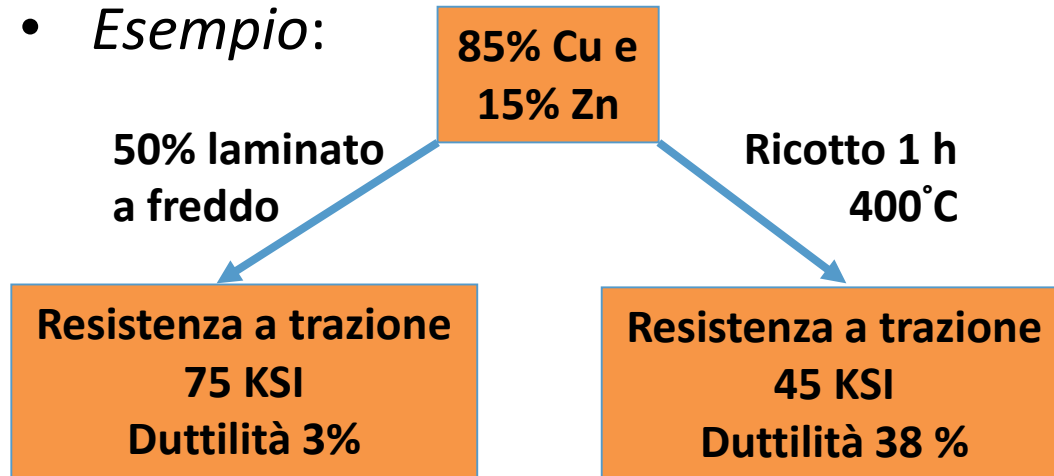
- Durante la fase di recupero:
 - Le dislocazioni si riorganizzano per formare configurazioni di energia inferiore (**poligonizzazione**)
 - Gli sforzi residui diminuiscono in modo significativo
 - Forza e duttilità cambiano molto poco
- Durante la fase di ricristallizzazione:
 - La diffusione dissolve la dislocazione
 - Resistenza meccanica e durezza diminuiscono significativamente
 - La duttilità aumenta significativamente
 - Iniziano a crescere nuovi grani
- Durante la fase di crescita del grano:
 - La crescita dei grani equiassici aumenta significativamente

Impatto della temperature su recovery, ricristallizzazione e crescita di grano

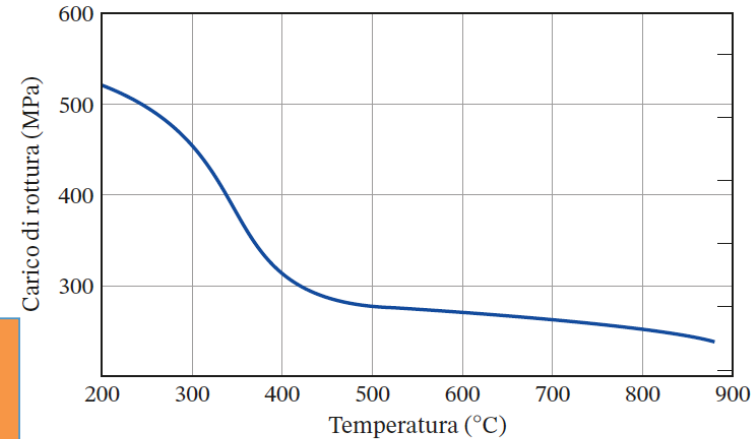


Effetti della Ricottura sulle Proprietà Meccaniche

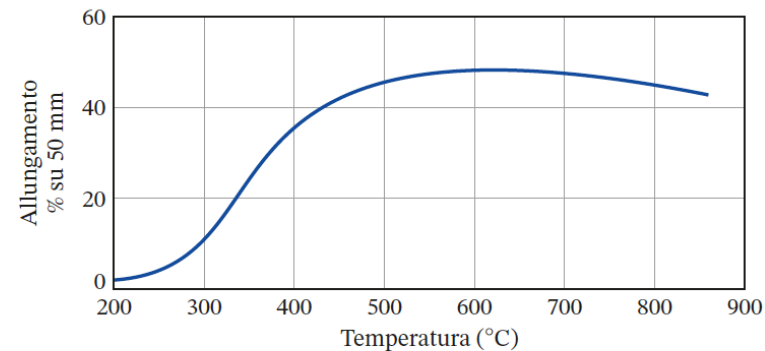
- La ricottura diminuisce la resistenza meccanica a trazione, aumenta la duttilità
- *Esempio:*



- Fattori che influenzano la ricristallizzazione:
 - Quantità di deformazione pregressa
 - Temperatura e tempo
 - Dimensione iniziale di grano
 - Composizione del metallo



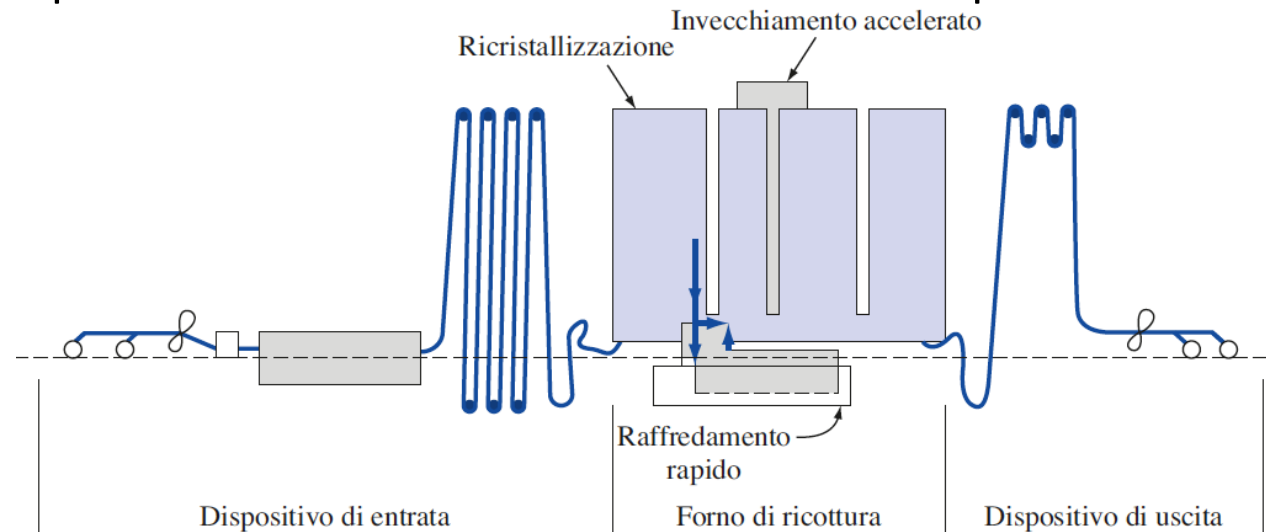
(a)



(b)

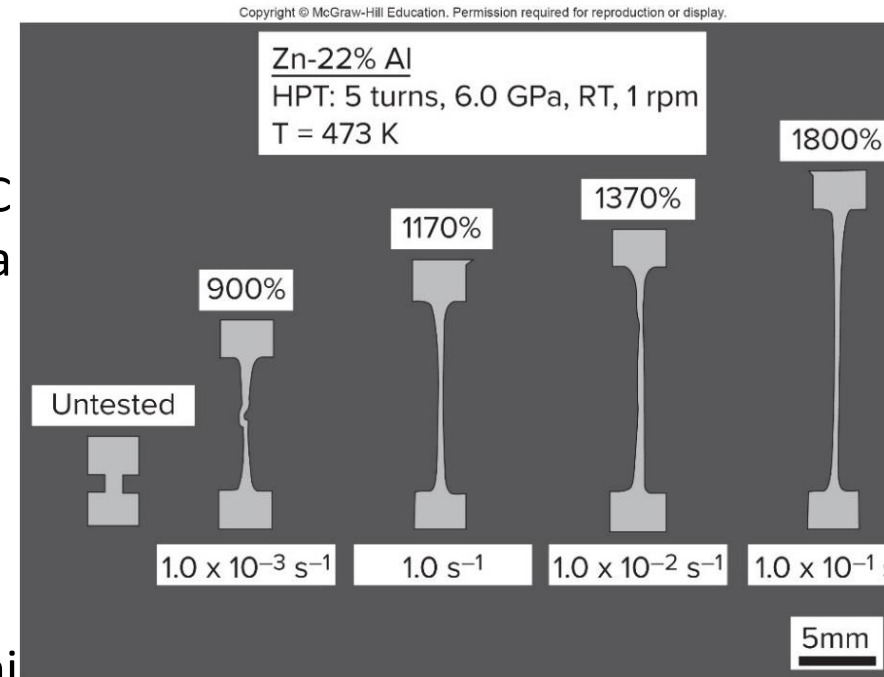
Ricristallizzazione

- È necessario un minimo di deformazione per iniziare il processo
- Minore la deformazione, maggiore la temperatura di ricristallizzazione richiesta
- Maggiore la temperatura, minore è il tempo richiesto
- Maggiore il grado di deformazione, più piccoli sono i grani ricristallizzati
- Più grande la dimensione iniziale di grano, maggiore la quantità di deformazione richiesta per produrre una temperatura equivalente
- La temperatura di ricristallizzazione aumenta con la purezza dei metalli



Superplasticità nei metalli

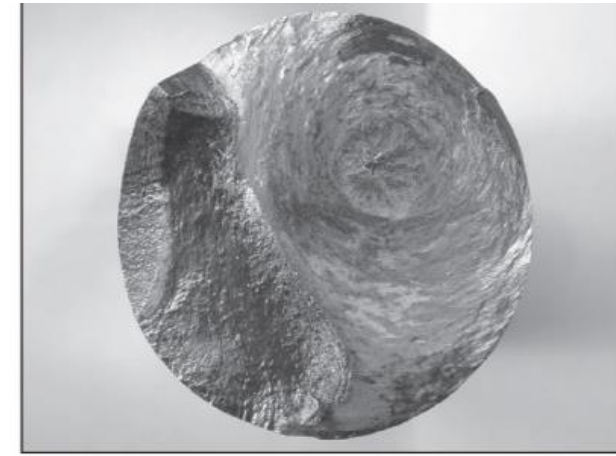
- Ad elevata temperatura e lento carico, alcune leghe si deformano del 2000%
- Lega Ti *ricotto*
 - si deforma del 12% a temperatura ambiente
 - si deforma fino a 1170% a 870°C e ad una velocità di carico pari a $1.3 \times 10^{-4} / s$
- Condizioni favorevoli per la superplasticità:
 - * dimensioni di grano molto fine (5-10 micron)
 - * molto sensibile alla deformazioni
 - * temperatura sopra a $0.5 T_m$
 - * bassa velocità di deformazione



Superplasticità di una lega Zn-Al

Fallimento di Materiali e Componenti

- Nella scelta dei materiali per i vari componenti, l'ingegnere deve sempre essere consapevole della possibilità di **fallimento**

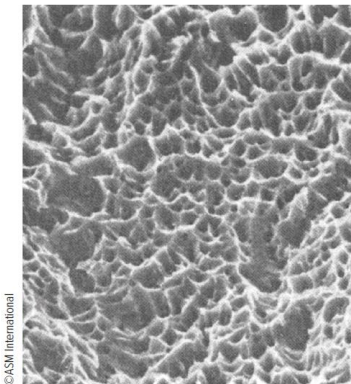
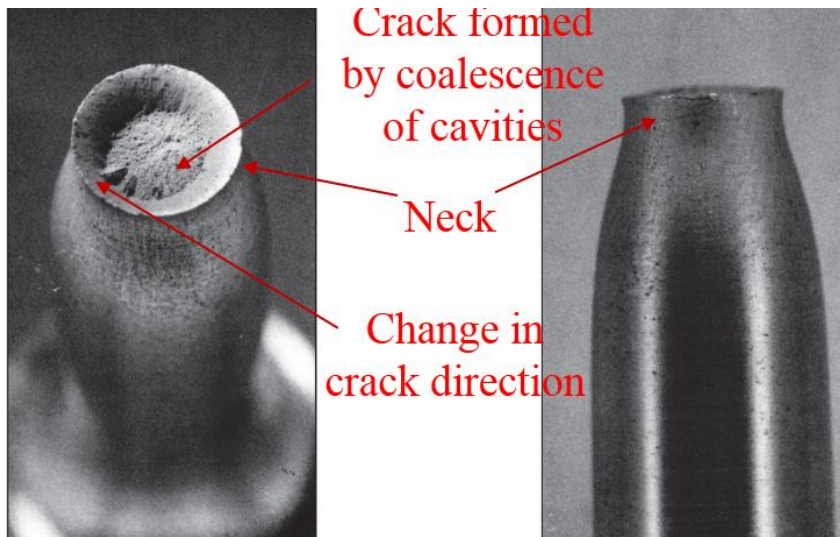


- Il fallimento è generalmente definito come l'incapacità di un componente di eseguire in modo sicuro e affidabile la funzione prevista
- Dal punto di vista dei materiali e della meccanica, la frattura può assumere forme diverse tra cui **cedimento, frattura, instabilità, usura e corrosione**
- La frattura è il tipo più catastrofico di fallimento ed è definito come formazione di nuove superfici sotto sforzo (vedi la frattura e le superfici di nuova formazione sopra) e la separazione in più parti



Frattura dei Metalli – Frattura Duttile

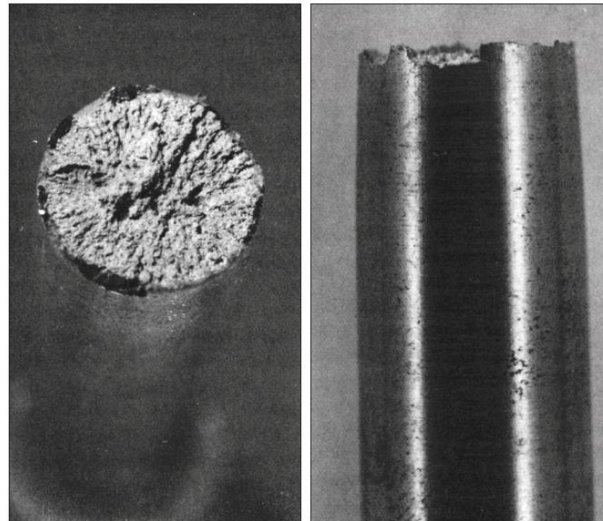
- La frattura può essere classificata in fragile e duttile
- La **frattura duttile** è accompagnata da un'estesa deformazione plastica e da una lenta propagazione della cricca
- Tre stadi di frattura duttile in un provino a trazione:
 - Il campione forma un colletto e cavità all'interno del colletto. Si noti la differenza di diametro lungo il provino
 - Le cavità formano delle cricche che si propagano verso la superficie, perpendicolarmente allo sforzo
 - La direzione delle cricche cambia di 45° risultando in una **frattura coppa-cono**



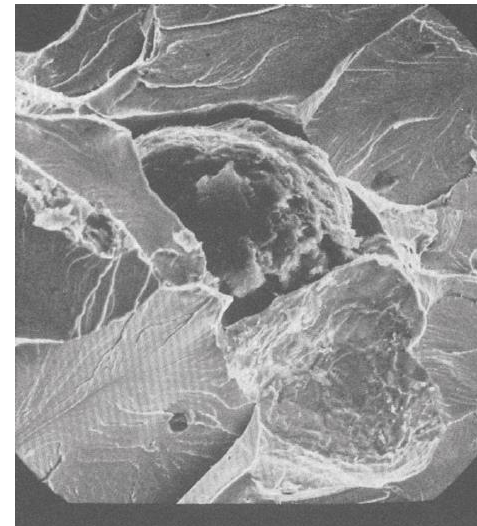
Superficie di frattura duttile – si notino le fossette dovute alla formazione del vuoto **intergranulare** e alla coalescenza

Frattura dei Metalli – Frattura Fragile - 1

- La **frattura fragile** è accompagnata da una bassa o nulla deformazione plastica e da una propagazione molto rapida delle cricche
- La frattura fragile procede lungo i **piani di scorrimento** (vedi figura a destra) sotto uno sforzo normale a quel piano



©ASM International



©ASM International

- Molti metalli EC e CCC si rompono in modo fragile a temperatura ambiente
- La frattura fragile è **transgranulare** o **intragranulare** - si propaga attraverso la matrice del cristallo (la frattura duttile è intergranulare - si propaga tra i grani, ai bordi di grano)

Frattura dei Metalli – Frattura Fragile - 2

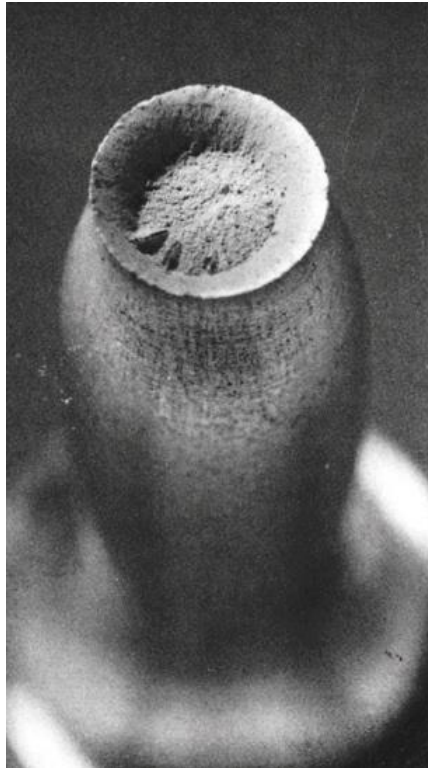
- La **frattura fragile** avviene in tre stadi:
 - Formazione e concentrazione delle dislocazioni lungo i piani di scorrimento
 - Accumulo di sforzo di taglio a causa dell'impilamento di dislocazioni lungo i piani con conseguente nucleazione di microcricche
 - Propagazione di microcricche e rilascio di energia accumulata
- I **difetti** esistenti in un metallo, la **diffusione dell'idrogeno**, la **corrosione** e l'**insorgenza di sforzi geometrici** danno luogo a fratture fragili
- Basse temperature di funzionamento e velocità di carico possono causare un comportamento fragile
- Le fratture fragili sono molto pericolose perché si verificano con poco preavviso
- Di solito, un grande rumore accompagna la frattura



Frattura fragile in un anello a scatto – si noti la freccia che indica il punto di inizio

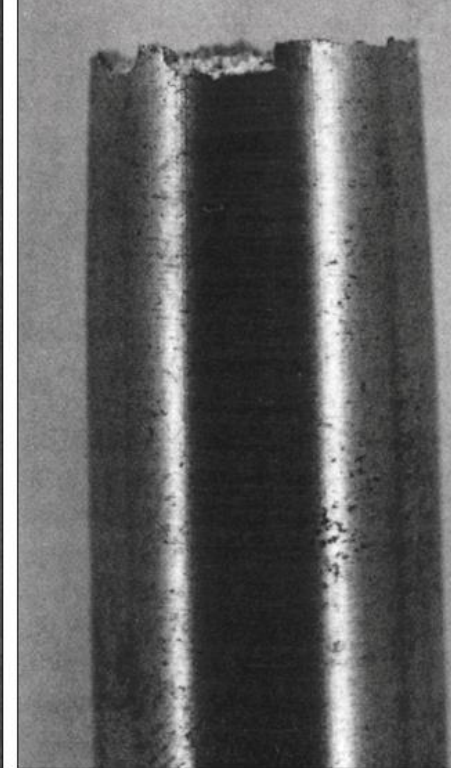
Confronto tra Frattura Duttile e Fragile

Frattura duttile



©ASM International

Frattura fragile

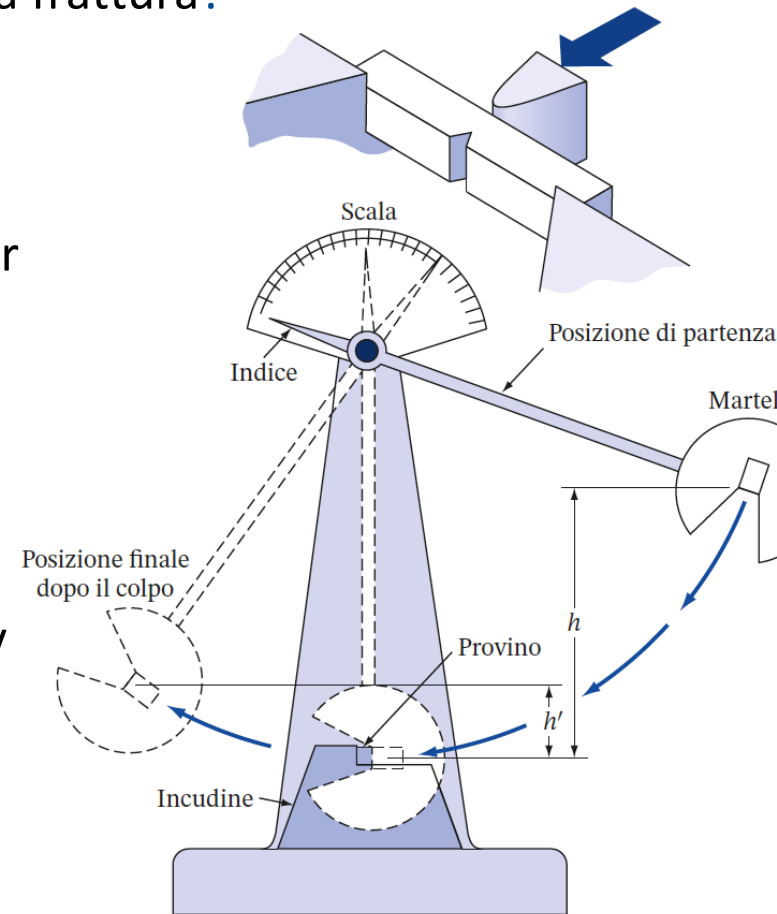


Discussione in classe: Discutete tutte le differenze che osservate tra le figure mostrate sopra

Tenacità e Prova di Impatto

- La **tenacità dinamica** o **d'impatto** è una misura della capacità dei materiali di assorbire **energia** prima della frattura?
- La **tenacità dinamica** o **d'impatto** è una misura della capacità dei materiali di assorbire **energia** prima della frattura
- In situazioni in cui l'impatto ha luogo, per esempio nella collisione di denti di accoppiamento in un ingranaggio, la tenacità gioca un ruolo chiave
- La tenacità dinamica è misurata utilizzando una macchina di prova di impatto e un provino a intaglio-V Charpy
- In generale, i materiali duttili sono più tenaci dei materiali fragili. **Perché?**

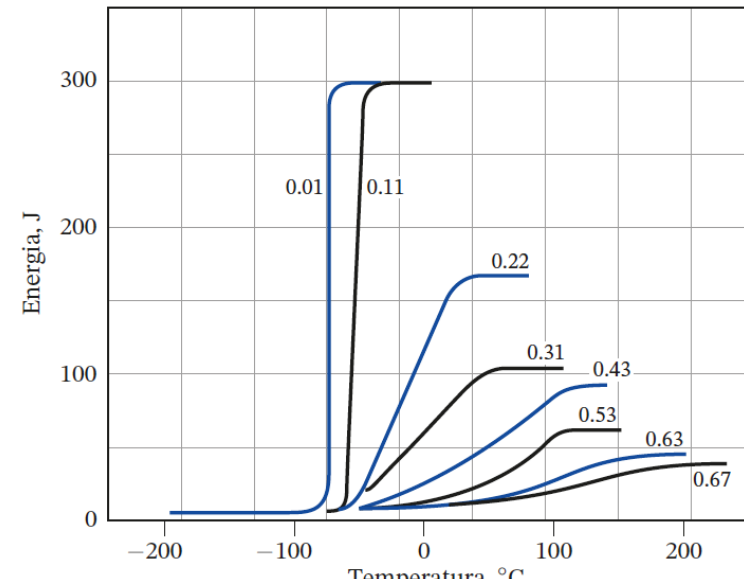
Discussione in classe: Discutete come funziona questa macchina e cosa misura (usare la figura)



Transizione Duttile – Fragile - DBT

- **Affondamento del Titanic:** lo scafo del Titanic era costituito da un acciaio sensibile alle basse temperature
- L'acciaio era duttile a temperatura ambiente, ma divenne altamente fragile a temperature di congelamento
- Il giorno dell'incidente, la temperatura del mare era di -2°C che rendeva il materiale dello scafo altamente fragile
- L'impatto con il grande iceberg e la **transizione duttile-fragile (DBT)** del materiale ha portato ad una catastrofica frattura fragile.

Argomento di discussione in classe: Dati i risultati di tenacità all'impatto, discutere l'effetto della temperatura sul comportamento del metallo (concentrarsi sulle curve scure). La differenza tra curve chiare e scure è il contenuto di carbonio, dire qual è la vostra conclusione.

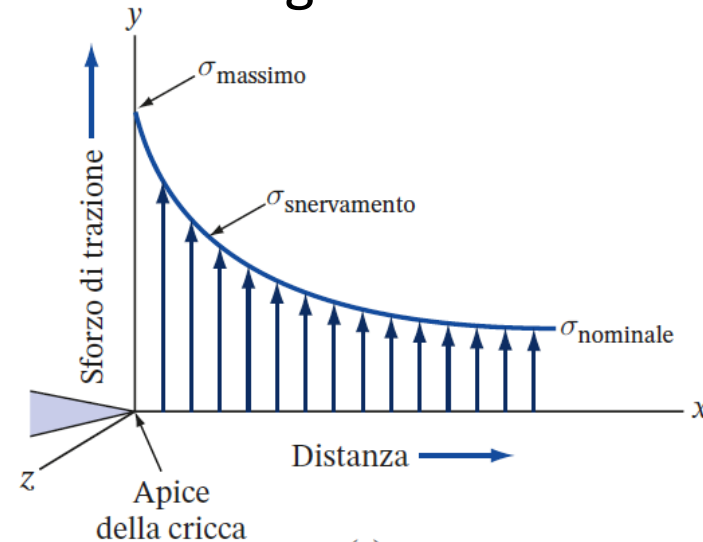


Tenacità a Frattura

- Tutti i materiali hanno piccole cricche e difetti.
- Cricche e difetti preesistenti causano la concentrazione di sforzi (amplificazione). **Il progettista deve sempre considerare la possibilità di cricche e difetti preesistenti**
- Si noti l'apice della cricca in figura; lo sforzo è molto più alto del campo lontano o dello sforzo nominale che dà luogo al **fattore di intensità di sforzo, K_I**

$$K_I = Y \sigma_f \sqrt{\pi a}$$

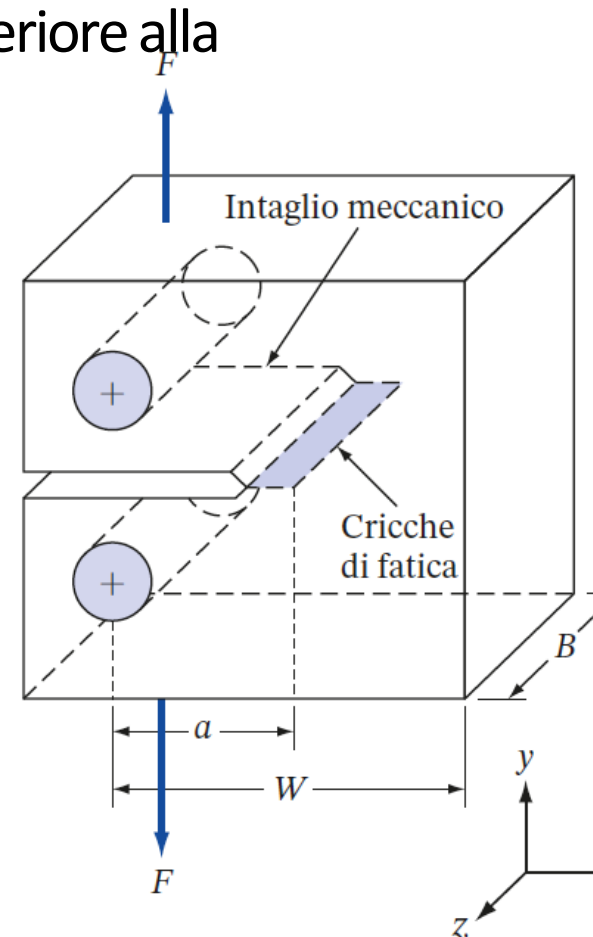
σ_f = sforzo applicato o nominale
 a = lunghezza apice cricca (metà della lunghezza della cricca centrale)
 Y = costante geometrica



- Se il K_I calcolato supera il valore sperimentale del fattore di intensità di sforzo critico, K_{Ic} o **tenacità a frattura**, la cricca si estende

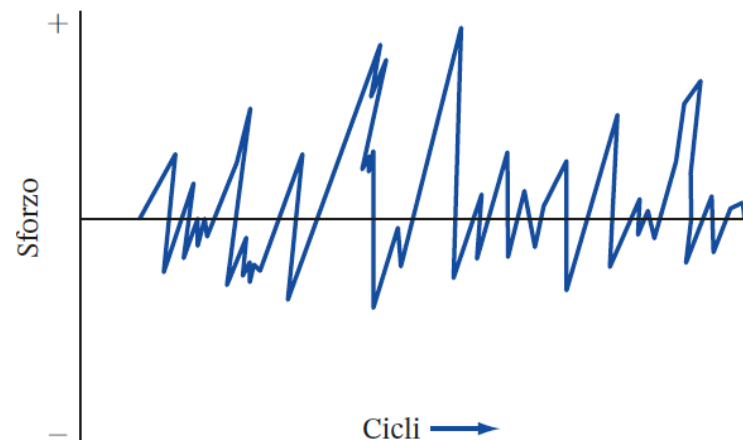
Misura di Tenacità a Frattura

- Viene realizzato un intaglio su un provino di sufficiente spessore B
- Lo spessore B deve essere significativamente superiore alla lunghezza della cricca a
- $B = 2.5(K_{IC}/\text{Limite di snervamento})^2$
- Il provino è sottoposto a prova a trazione a rottura. Maggiore è il valore delle K_{IC} , più duttile sarà il metallo
- Il valore di K_{IC} è utilizzato nella progettazione per trovare una **dimensione ammissibile o critica** della cricca considerando un **fattore di sicurezza**
- Il componente progettato può funzionare in modo sicuro finché le cricche esistenti sono più piccole della dimensione della cricca critica calcolata



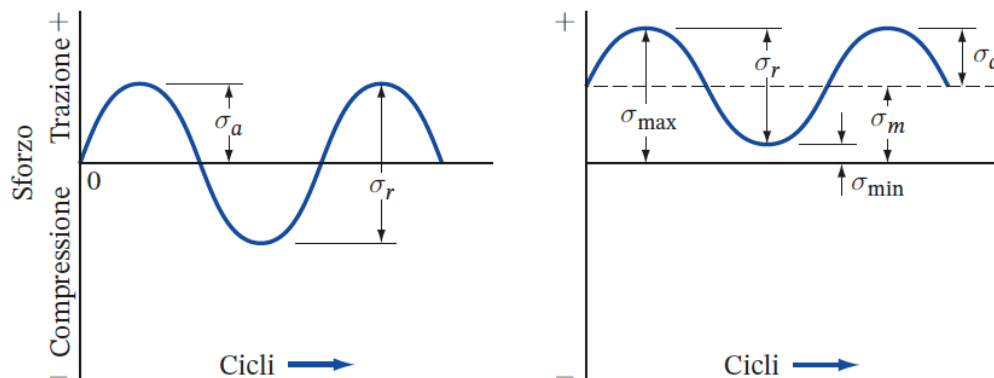
Carico Ciclico e Fatica

- Nelle applicazioni reali di ingegneria, le sollecitazioni applicate ad un componente sono raramente veramente costanti e ci sono sempre fluttuazioni in funzione del tempo
- Questo tipo di **sollecitazione ciclica** con ampiezza e frequenza casuali si incontra spesso nella vita reale. Le sollecitazioni cicliche sono molto pericolose anche in basse ampiezze
- Le sollecitazioni cicliche, anche a ampiezze basse al di sotto del punto di snervamento, quando sono elastiche, possono causare **danni alla fatica o rottura**
- Il danno è quasi sempre interno e nascosto e cresce lentamente nel tempo e con molti cicli
- L'eventuale frattura è improvvisa e catastrofica



Carico Ciclico - 1

- Sono possibili diversi tipi di **sollecitazioni cicliche o fluttuanti** (assiali, torsionali e a flessione)
- Nelle prove di laboratorio, il carico ciclico è controllato in ampiezza e frequenza
- Le principali sollecitazioni applicate sono: σ_{max} e σ_{min}
- Sulla base delle sollecitazioni sopra applicate, possono essere calcolati altri quattro parametri:

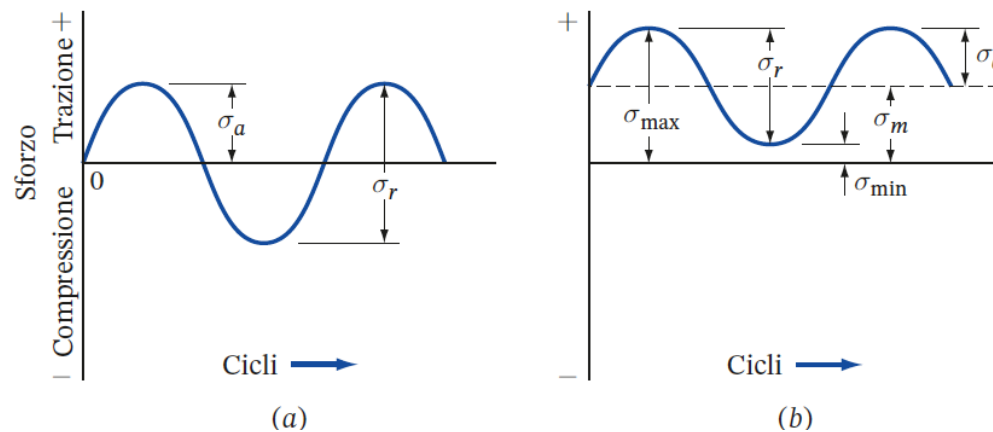


$$\text{Sforzo medio, } \sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} ; \text{ Ampiezza di sforzo, } \sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

$$\text{Rapporto di sforzo, } R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} ; \text{ Intervallo di sforzo, } \sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

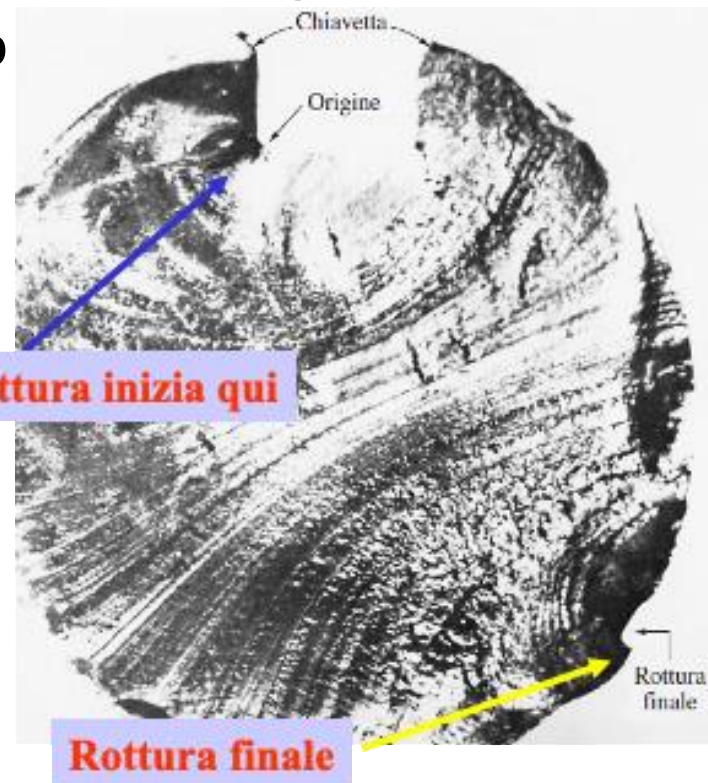
Carico Ciclico - 2

- Se $\sigma_m = 0$, $\sigma_{max} = -\sigma_{min}$ e il carico è detto **completamente invertito**
- Nel caso completamente invertito: σ_r (intervallo di sforzo) = $2\sigma_a$ (ampiezza di sforzo) e R (rapporto di sforzo) = 1
- Se entrambi $\sigma_m \neq 0$, il carico è detto **ripetuto**
- Nel caso di carico ripetuto: sia σ_{max} che σ_{min} possono essere positivi, negativi o con segno diverso
- L'ampiezza dello sforzo, σ_a , gioca un ruolo chiave nella rottura a fatica
- Maggiore è il suo valore, più esteso è il danno
- Lo sforzo medio, σ_m , gioca un minore ruolo nel danno da fatica



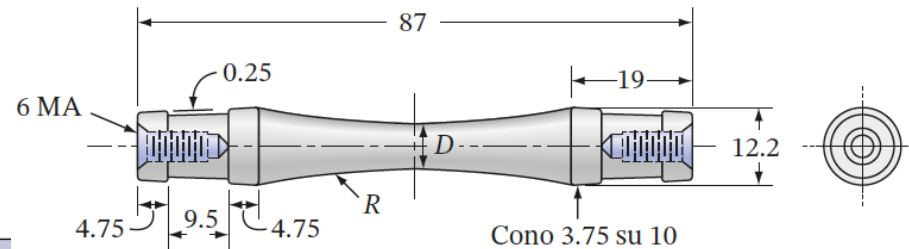
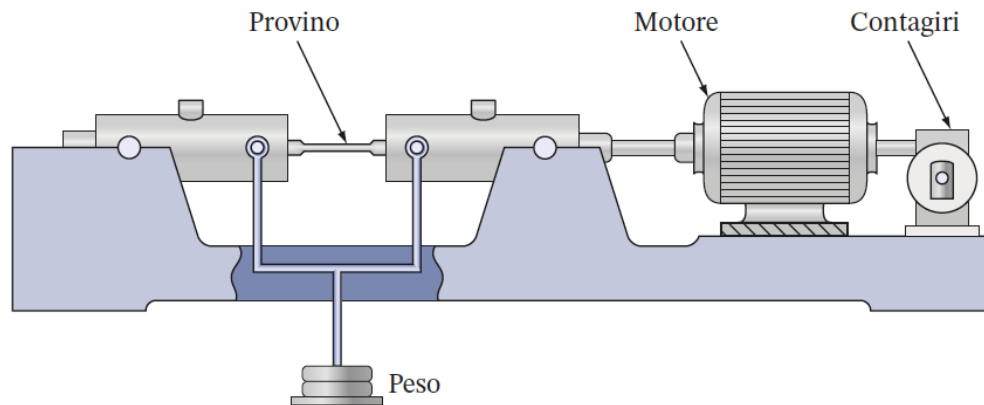
Rottura a Fatica

- Sotto carico ciclico, i componenti spesso falliscono a livelli di sforzo ben al di sotto del limite di snervamento del materiale (lo sforzo è elastico). In queste situazioni, cricche si generano in regioni di concentrazione dello sforzo
- Le regioni di concentrazione di sforzo potrebbero essere intorno a **chiavette lavorate**, posizioni in cui **cambiano i diametri dell'albero**, o intorno a **piccole cricche interne o inclusioni**
- Le cricche continuano a propagarsi ad ogni ciclo fino al cedimento finale quando l'area trasversale rimanente del componente è troppo piccola



Prove a fatica

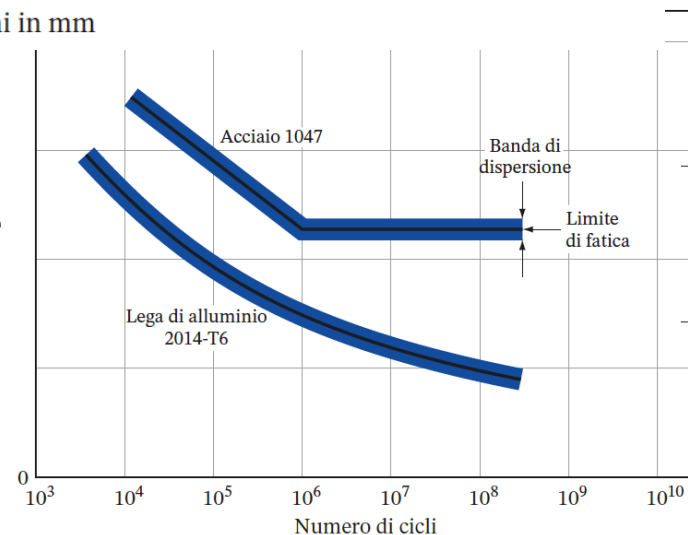
- In una prova di fatica in laboratorio (prova di R.R. Moore), il carico alternato di compressione e trazione viene applicato su un pezzo metallico rastremato verso il centro



D = da 5 a 10 mm in base al carico di rottura del materiale
 R = da 90 a 250 mm

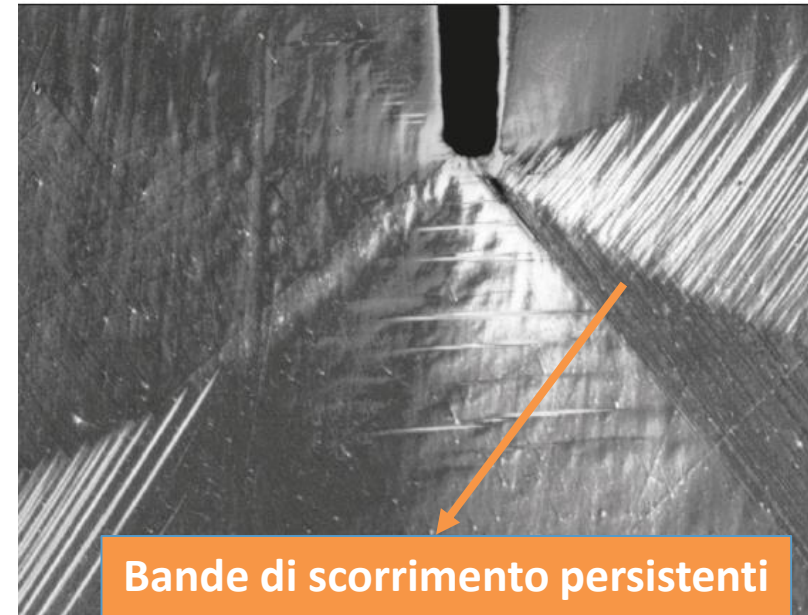
Dimensioni in mm

- Il campione ruota e ogni rotazione completa rappresenta un ciclo
- Lo sforzo applicato, S , è mantenuto costante
- Ad ogni sforzo, S , il numero di cicli, N , necessario per determinare la rottura vengono contati
- I punti S - N sono diagrammati per formare la curva S - N



Variazioni Strutturali nel Processo a Fatica

- Prima avviene la formazione della cricca. Direzioni invertite di propagazione della cricca provocano creste e valli dette **bande di scorrimento** di estrusione e intrusione. Questo è lo stadio I ed è molto lento (10^{-10} m/ciclo).
- La crescita della cricca cambia la direzione per essere perpendicolare allo sforzo massimo a trazione (velocità: micron/sec)
- Il provino si rompe per frattura duttile quando la superficie
- Resistente è piccola per sopportare lo sforzo



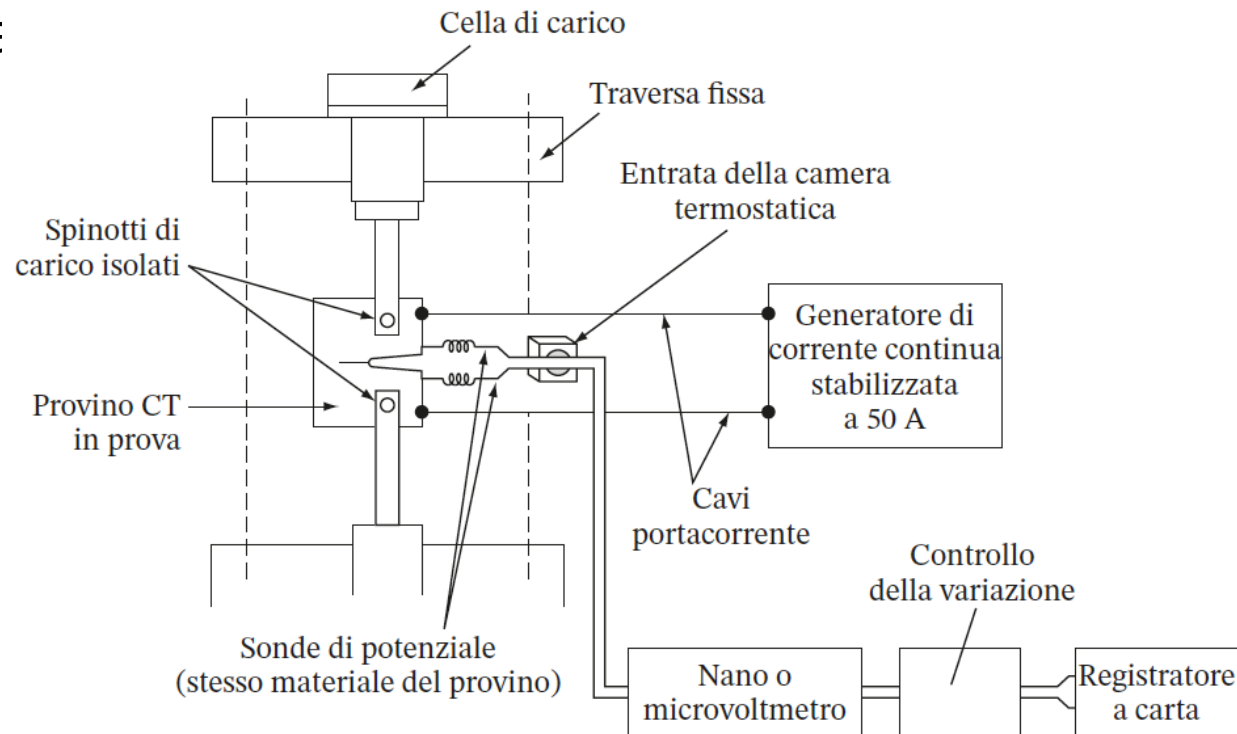
Bande di scorrimento persistenti
in cristallo di rame

Fattori che Influenzano la Resistenza a Fatica

- **Concentrazione di sforzi:** la resistenza a fatica è ridotta quando aumenta la concentrazione degli sforzi
- **Rugosità superficiale:** superfici più lisce aumentano la resistenza a fatica e la vita a fatica
- **Condizioni superficiali:** trattamenti di superfici come carburazione e nitrurazione aumentano la vita a fatica
- **Ambiente:** ambienti chimicamente reattivi, che possono provocare corrosione, diminuiscono la vita a fatica

Velocità di Propagazione di Cricche a Fatica

- Si utilizzano provini intagliati
- Si genera l'azione di fatica ciclica
- Si misura la lunghezza di cricca attraverso la variazione di potenziale prodotta dall'apertura della cricca



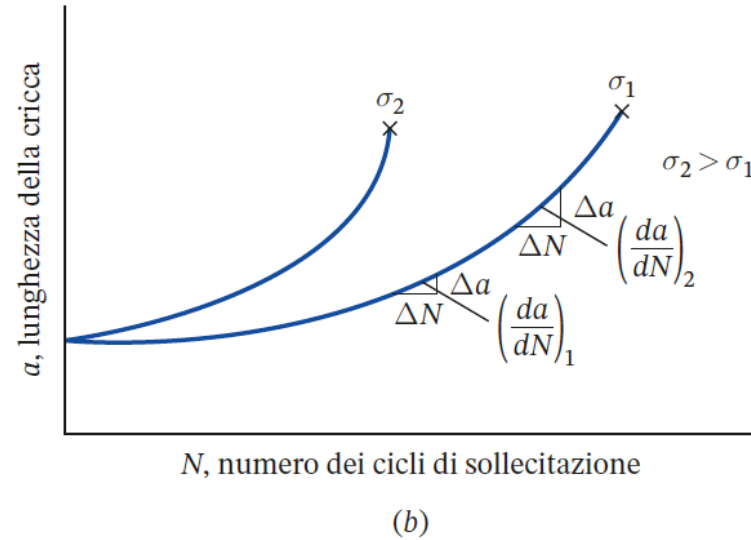
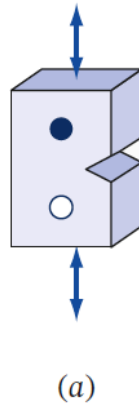
Sforzo e Lunghezza Cricca Propagazione Cricca a Fatica

- Quando 'α' è piccolo, anche da/dN è piccolo
- da/dN aumenta quando aumenta la lunghezza di cricca
- Un aumento di σ , aumenta la velocità di crescita di cricca

$$\frac{da}{dN} = \text{velocità di crescita di cricca a fatica}$$

$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ = intervallo del fattore di intensità di sforzi

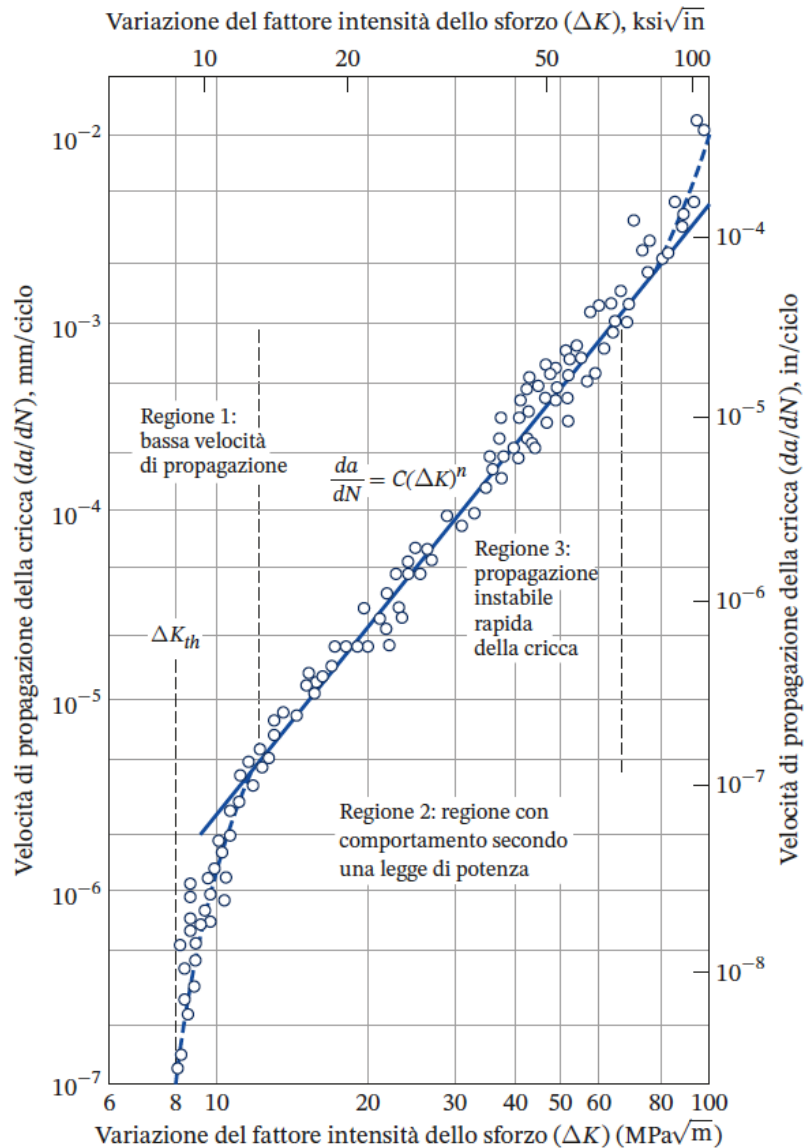
A, m = costanti che dipendono da materiale, ambiente, frequenza, temperatura e rapporto di sforzo



$$\frac{da}{dN} \propto f(\sigma, a)$$

$$= A \Delta K^m$$

Velocità di Crescita Cricca a Fatica ΔK



$$\text{Log}\left(\frac{da}{dN}\right) = \text{Log}(A\Delta K^m)$$

$$= m \cdot \text{Log}(\Delta K) + \text{Log}(A)$$

→ Linea retta con pendenza m

il valore limite di ΔK sotto il quale non è misurabile la crescita della cricca è chiamato valore soglia del fattore di intensità di sforzo ΔK_{th}

Calcolo Vita a Fatica

$$\frac{da}{dN} = A\Delta K^m$$


ma $\Delta K = Y\sigma\sqrt{\pi a}$

quindi $\Delta K^m = y^m \sigma^m \pi^{\frac{m}{2}} a^{\frac{m}{2}}$

quindi $\frac{da}{dN} = A(y^m \sigma^m \pi^{\frac{m}{2}} a^{\frac{m}{2}})$

Integrando dalla dimensione iniziale a_0 e quella finale a_f della cricca al numero di cicli a fatica N_f

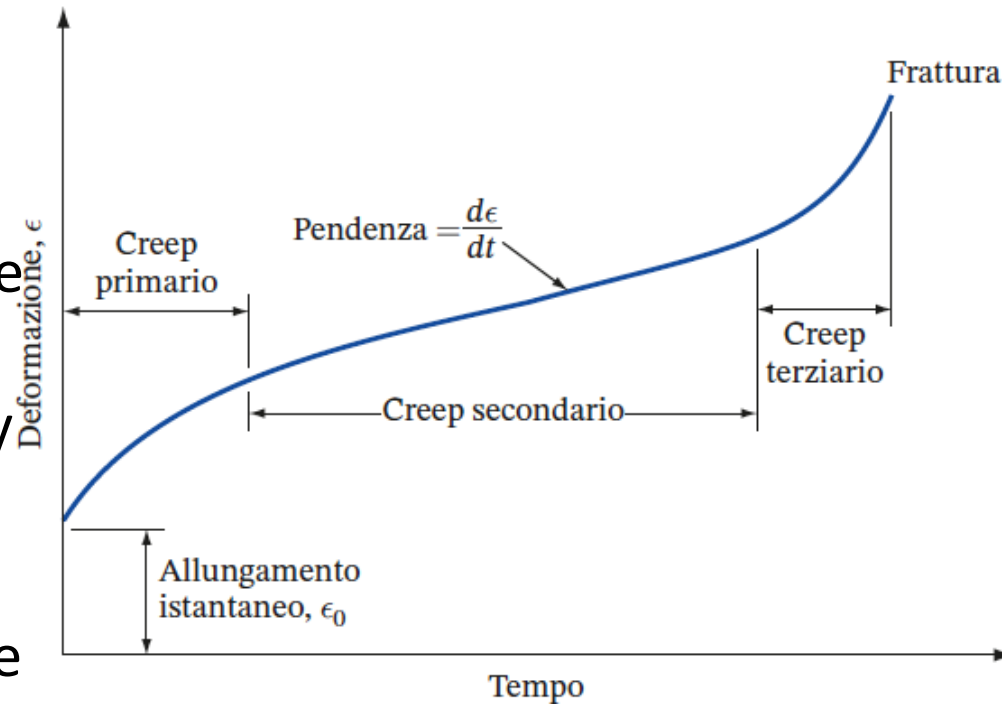
$$\int_{a_0}^{a_f} da = Ay^m \sigma^m \pi^{\frac{m}{2}} a^{\frac{m}{2}} \int_0^{N_f} dN$$

Integrando e risolvendo per N_f  $N_f = \frac{a_f^{-\left(\frac{m}{2}\right)+1} - a_0^{-\left(\frac{m}{2}\right)+1}}{Ay^m \sigma^m \pi^{\frac{m}{2}} \left(-\frac{m}{2} + 1\right)}$

(Assumendo Y indipendente dalla lunghezza di cricca)

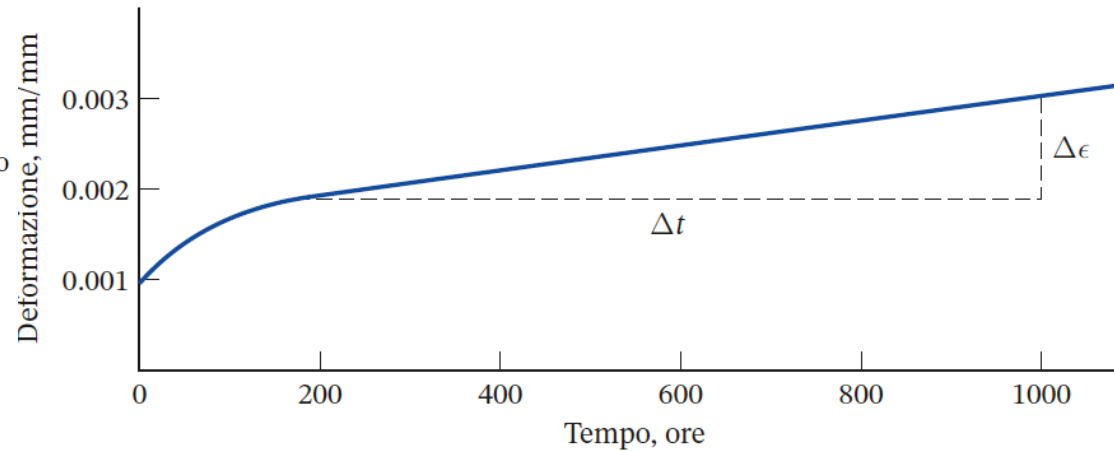
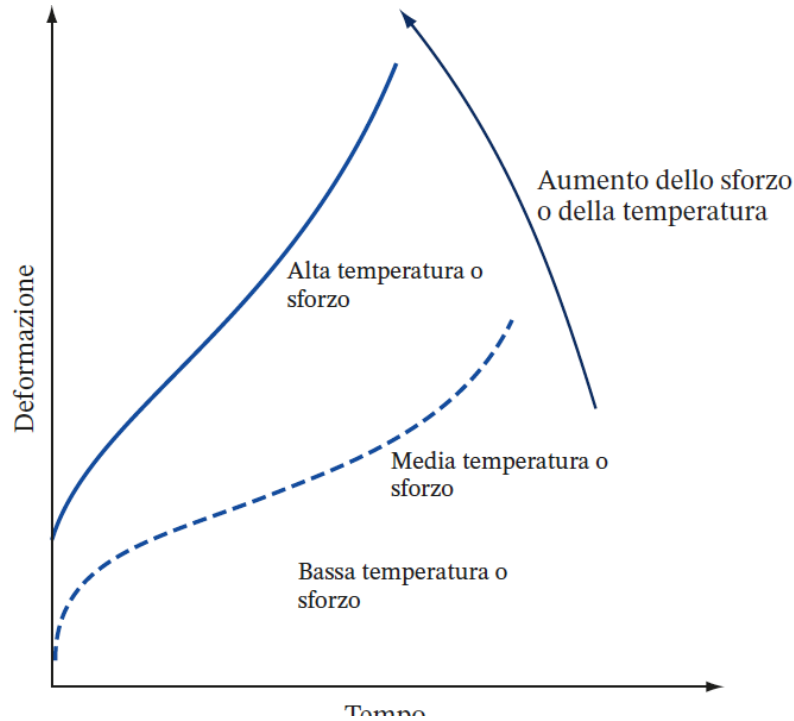
Creep nei Metalli

- Il **creep** è la deformazione progressiva a sforzo costante
- Importante per applicazioni ad **alta temperatura**
- **Creep primario**: la velocità di *creep* diminuisce col tempo per incrudimento
- **Creep secondario**: la velocità di creep è costante per processi simultanei di incrudimento e di recovery
- **Creep terziario**: la velocità di *creep* aumenta con il tempo portando a strizione e rottura



Prova di Creep - 1

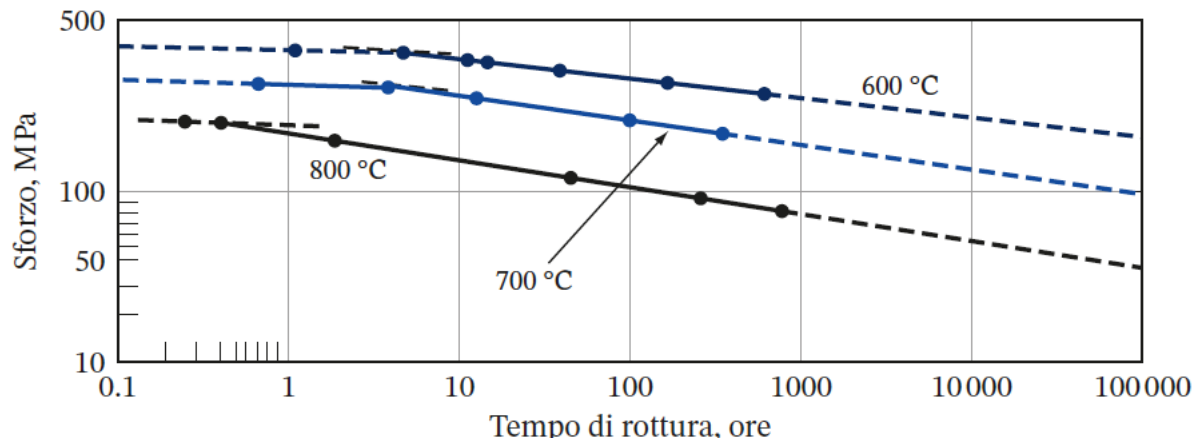
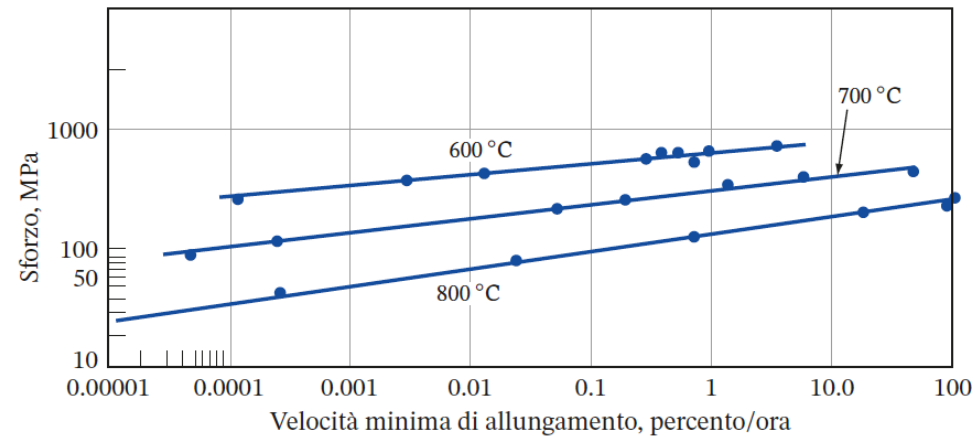
- La prova di *creep* determina l'effetto della temperatura e dello sforzo sulla velocità di *creep*
- I metalli sono testati a sforzi costanti a differente temperatura e a temperatura costante con valori di sforzo



Resistenza al *creep*: Stress per produrre una velocità minima di *creep* di 10^{-5} %/h a una determinata temperatura

Prova di Creep - 2

- La **prova di creep a rottura** è come la prova di *creep*, ma finalizzata alla rottura del provino
- Si diagramma log sforzo vs log tempo di rottura
- Il tempo per la rottura diminuisce con l'aumento di sforzo e temperatura



Parametro di Larsen Miller - 1

- Il **parametro di Larsen Miller** è utilizzato per rappresentare i dati *creep-rottura* sotto sforzo

$$P(\text{Larsen-Miller}) = T[\log t_r + C]$$

T = temperatura (K), t_r = sforzo - tempo rottura (ore)

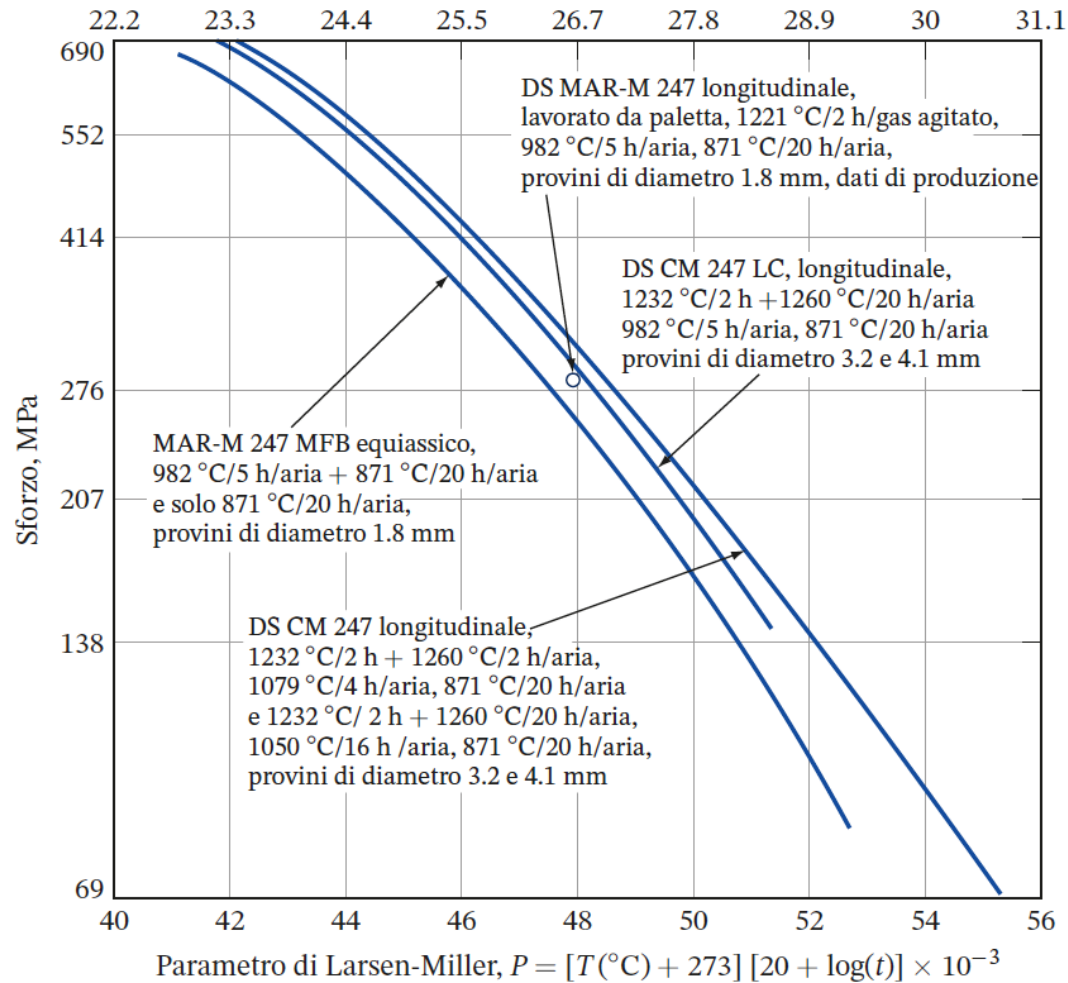
C = costante (ordine di 20)

Inoltre, $P(\text{Larsen-Miller}) = [T (^{\circ}\text{C}) + 273 (20 + \log t_r)]$

oppure $P(\text{Larsen-Miller}) = [T (^{\circ}\text{F}) + 460 (20 + \log t_r)]$

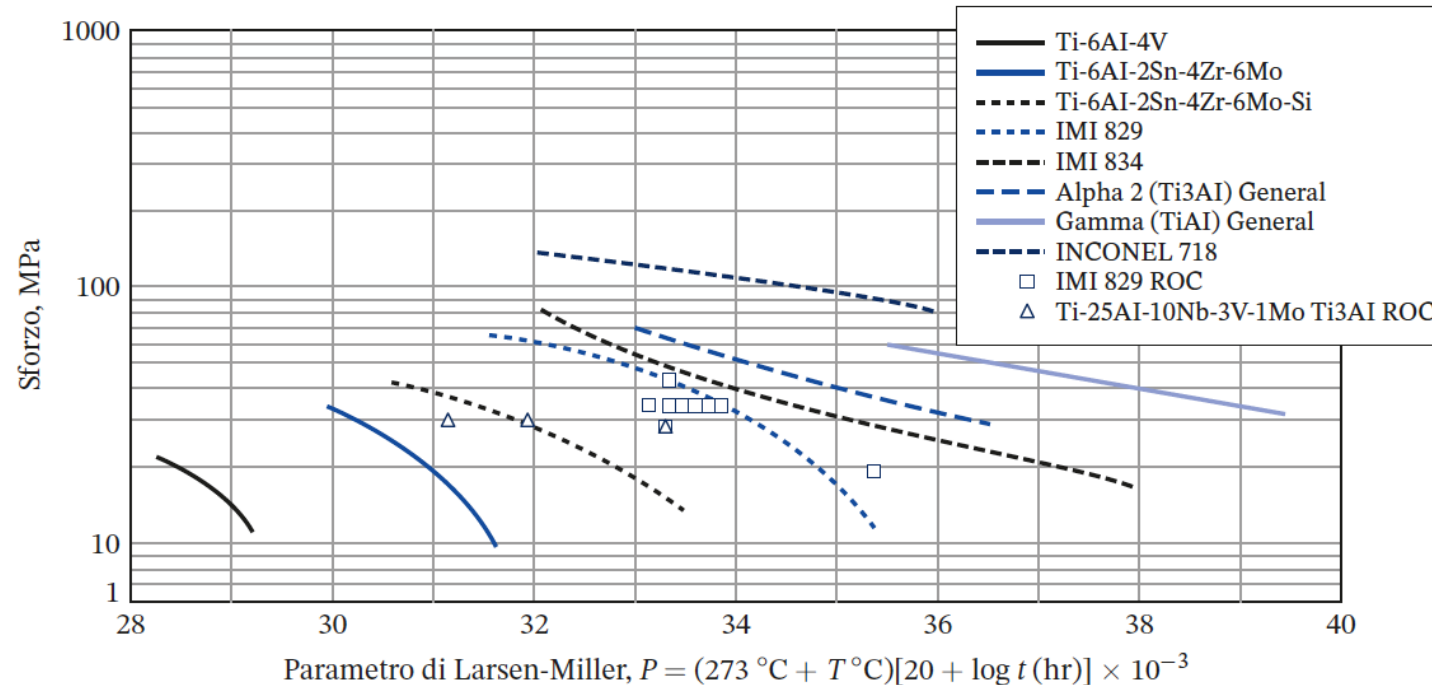
- A un dato livello di sforzo, il log tempo per la rottura da sforzo più la costante moltiplicata per la temperatura rimane costante per un determinato materiale

Parametro di Larsen Miller - 2



- Se sono note due variabili tra tempo a rottura, temperatura e sforzo, può essere determinato il terzo parametro che si adatta al parametro L.M.
- *Esempio:* Per la lega CM, a 207 MPa, il parametro L.M. è 27.8×10^3 K. Quindi, se è nota la temperatura, può essere determinato il tempo a rottura

Diagramma L.M. per Alcune Leghe



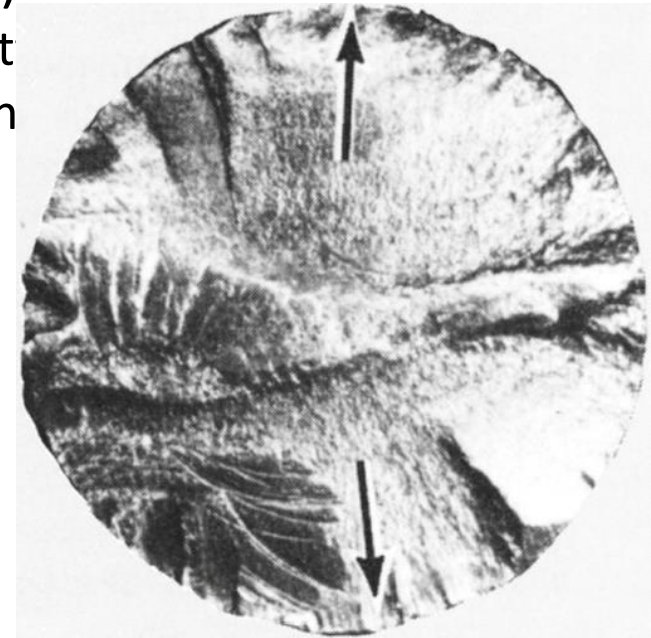
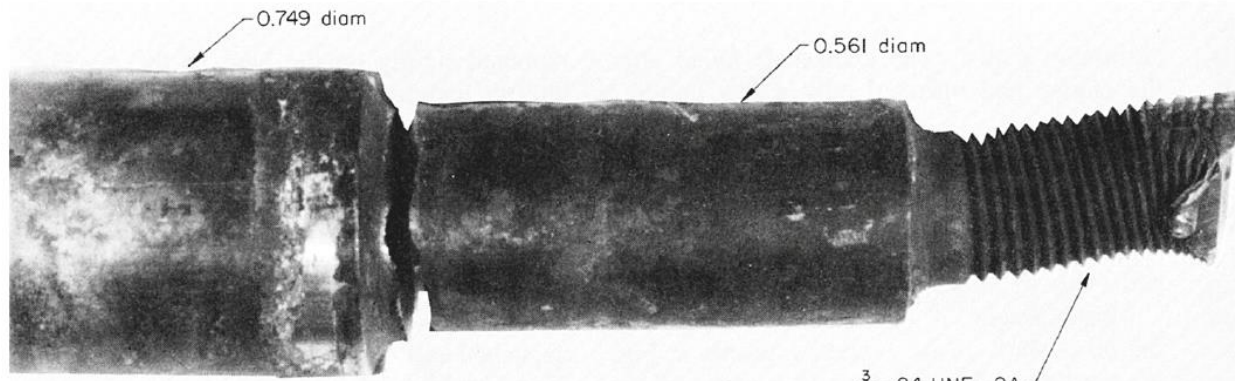
Esempio: Calcolare il tempo per provocare una deformazione a *creep* di 0.2% nell'alluminato di titanio gamma a 276 MPa e 1200 °F

Dalla figura, $p = 38000$

$$38000 = (1200 + 460) (\log t_{0.2\%} + 20) \quad t = 776 \text{ h}$$

Caso di Studio – Analisi di un Asse di Ventola Fratturato

- Requisiti:
 - Funzione - supporto di comando ventola;
 - Materiale - acciaio 1045 trafilato a freddo
 - Resistenza di snervamento - 586 MPa
 - Aspettativa di vita - 6440 km (fallito a 3600 km)
- Esame visivo (evita altri danneggiamenti)
 - La rottura è iniziata in due punti vicino al filet
 - Caratteristiche di frattura per flessione altern



Asse di Ventola Fratturato – Ulteriori Analisi

- Prove a trazione hanno determinato un valore di sforzo di snervamento pari a 369 MPa (inferiore a quello specificato, pari a 586 MPa)
- L'esame metallografico ha rilevato una struttura a grani equiassici (la trafilatura a freddo ha allungato i grani)
- **Conclusione:** Il materiale non è trafilato a freddo – è laminato a caldo!
 - La minore resistenza a fatica e l'insorgenza di sforzi ha causato la rottura dell'asse

Recenti Sviluppi: Resistenza Meccanica + Duttilità

- A grana grossa – Bassa resistenza meccanica, alta duttilità
- Nanocristallino – Alta resistenza meccanica, bassa duttilità (per la rottura dovuta alle bande di taglio)
- Rame duttile nanocristallino: Può essere prodotto per
 - Laminazione a freddo a temperatura dell'azoto liquido
 - Raffreddamenti aggiuntivi ad ogni passaggio
 - Ricottura controllata
- La laminazione a freddo forma dislocazioni ed il raffreddamento blocca il recovery al 25% grani microcristallini in una matrice di nanograni

