

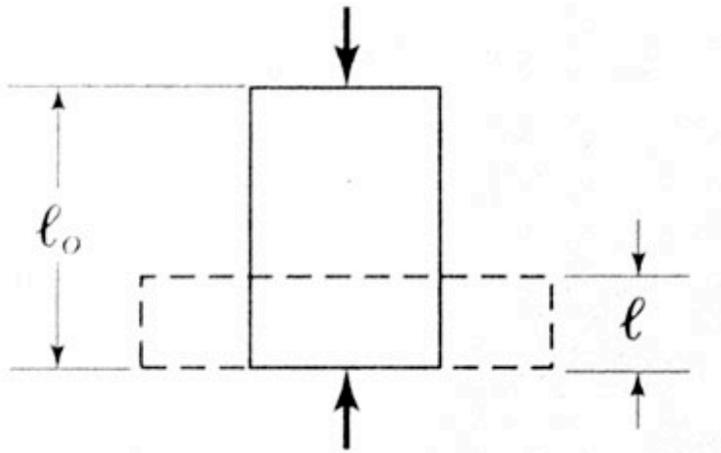
Outline: argomento continua

- Introduzione
- **Tensione e compressione**
- Torsione
- Flessione
- Durezza
- Fatica
- Creep
- Resistenza ad impatto
- Sforzi residui
- Criteri di snervamento
- Lavoro di deformazione

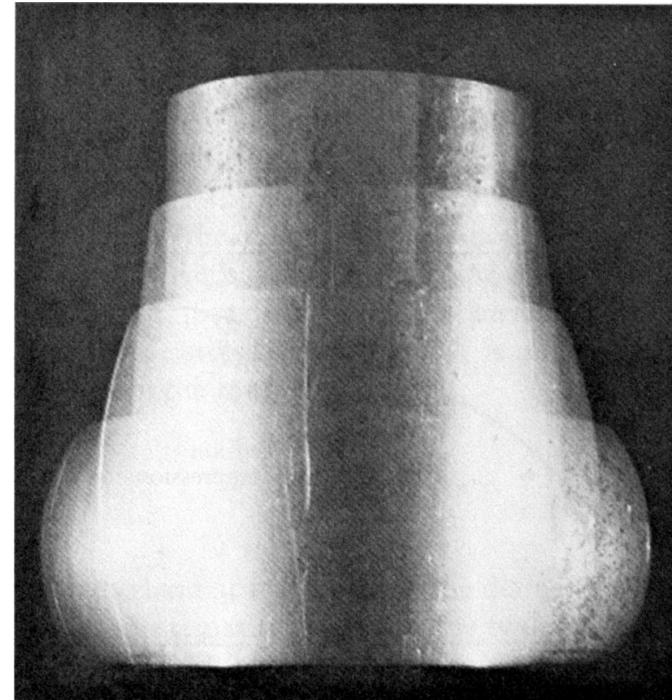
Compressione

- Sforzi di compressione vengono utilizzati per diversi processi come forgiatura, laminazione ed estrusione.
- Il test di compressione da molte informazioni utili per tali processi.

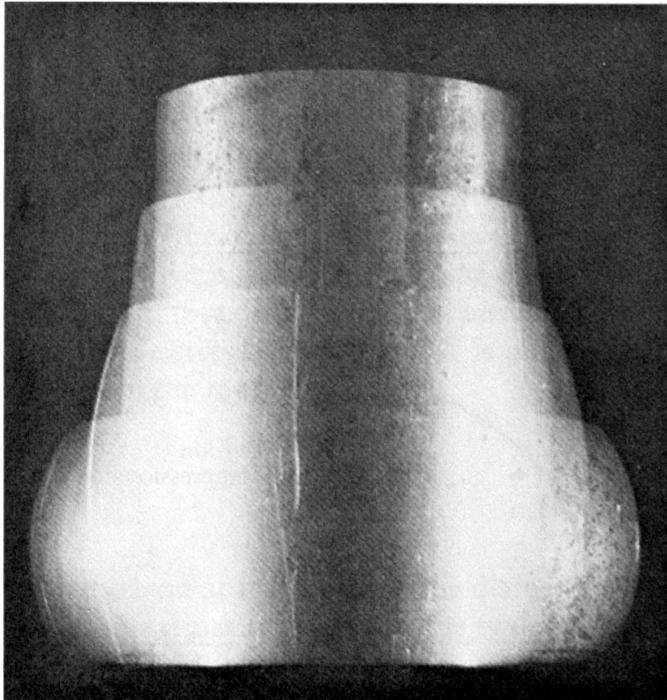
Test ideale



Test reale: barreling



Test di compressione: barreling



- Il barreling indica una deformazione maggiore delle sezioni più lontane dai punti di applicazione dello sforzo
- La deformazione non uniforme è dovuta all'attrito sulla superficie di applicazione del carico
- Si può ridurre con opportuna lubrificazione

Velocità di compressione: v

- Se v è presa come velocità assoluta i test vengono condotti a velocità di deformazione costante:
- La velocità di deformazione ingegneristica:

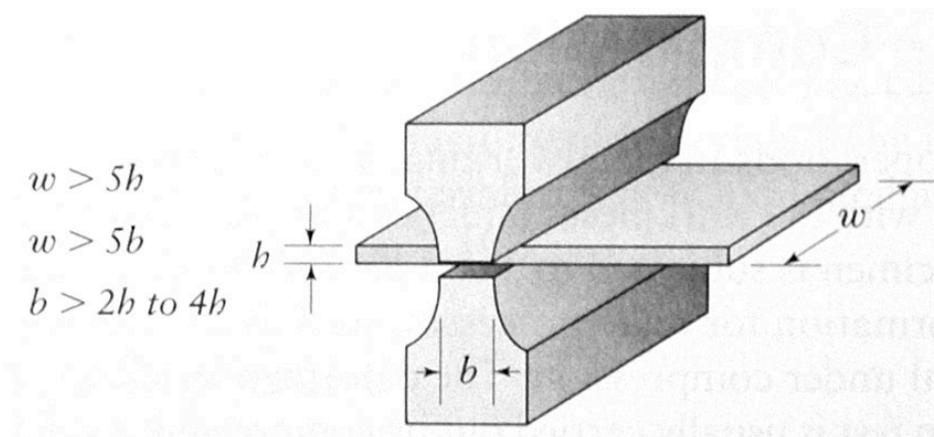
$$\dot{\epsilon}_E = -\frac{v}{l_0}$$

- La velocità di deformazione reale (o vera):

$$\dot{\epsilon}_T = -\frac{v}{l}$$

- Nei test di compressione è più facile misurare la duttilità in quanto non si ha formazione di strizione a deformazioni relativamente basse.

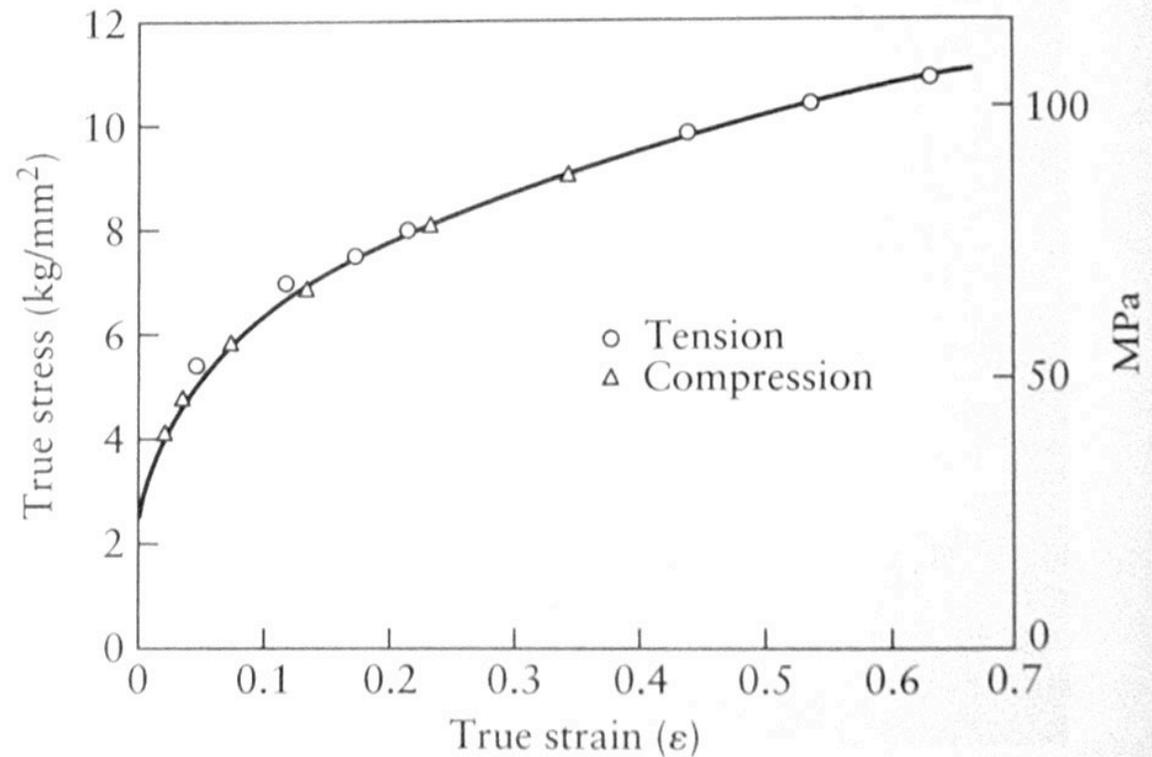
Test di compressione in deformazione piana



- Utile per simulare le deformazioni per forgiatura e laminazione
- Deformazione piana: w rimane costante, deformazione per h e b .
- Lo sforzo di snervamento Y si può calcolare da quello ottenuto per deformazione piana Y' :

$$Y = \frac{\sqrt{3}}{2} Y'$$

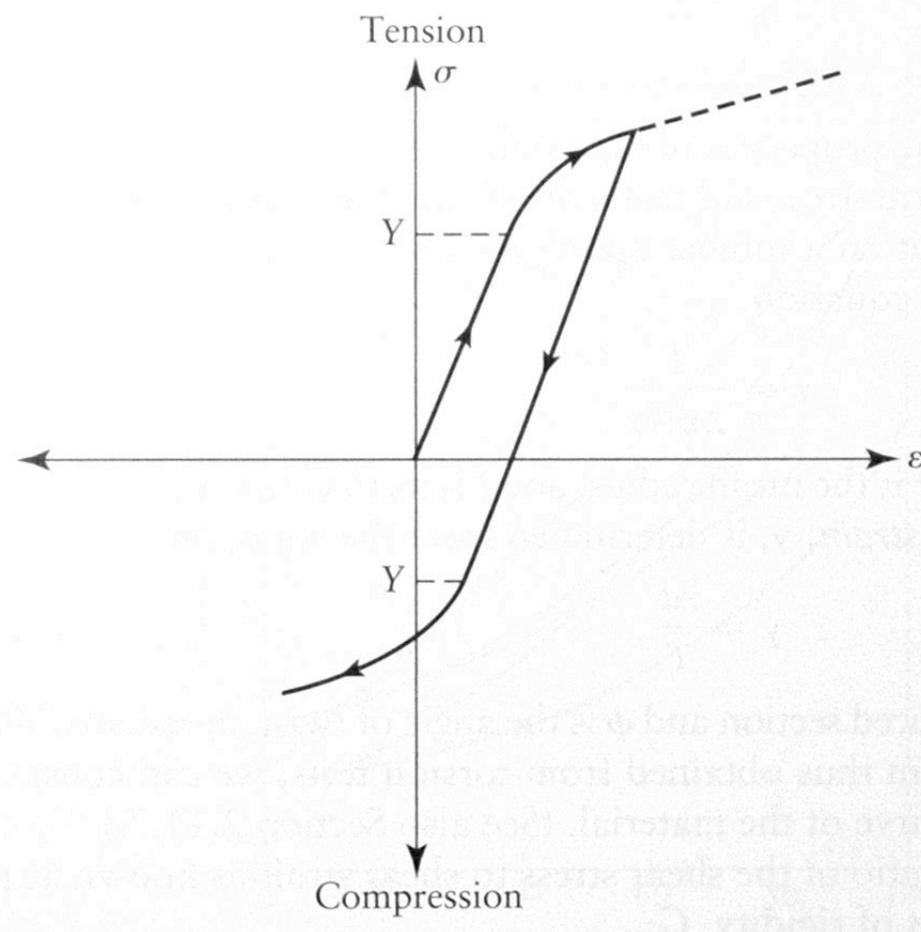
Tensione-compressione



- I due test coincidono per materiali duttili se riportati in valori assoluti di sforzo e deformazione
- Non coincidono per materiali fragili

Effetto Bauschinger

- L'applicazione di un carico di trazione seguito da compressione risulta in uno sforzo di snervamento inferiore
- Lo stesso accade per compressione seguita da trazione
- In inglese si chiama work o strain softening opposto a work hardening (incrudimento)

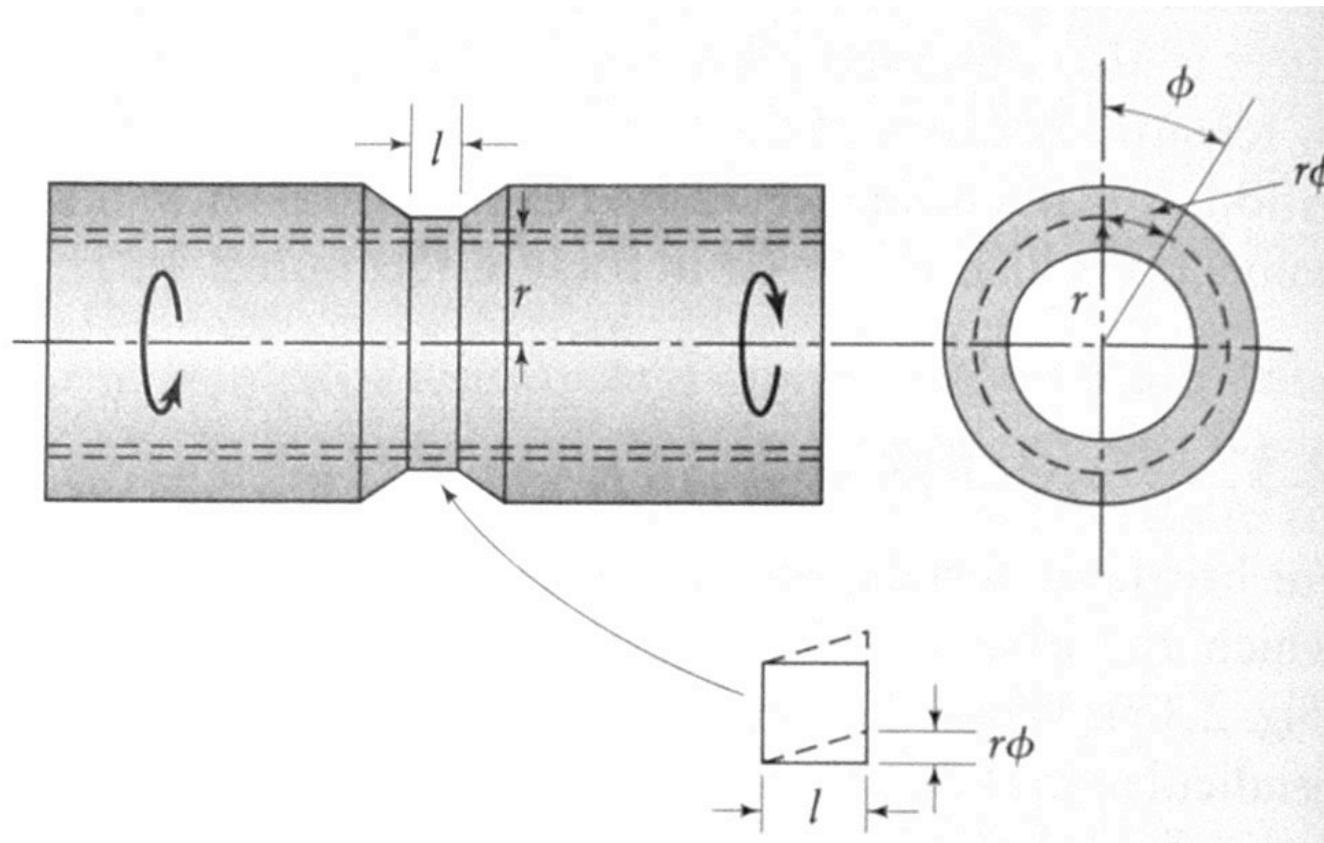


Outline: argomento seguente

- Introduzione
- Tensione e compressione
- **Torsione**
- Flessione
- Durezza
- Fatica
- Creep
- Resistenza ad impatto
- Sforzi residui
- Criteri di snervamento
- Lavoro di deformazione

Torsione

- Il test di torsione viene utilizzato per analizzare la resistenza al taglio. Il test viene condotto su un tubo in una sezione ridotta dello stesso (T=momento torcente, t=spessore parete tubo):



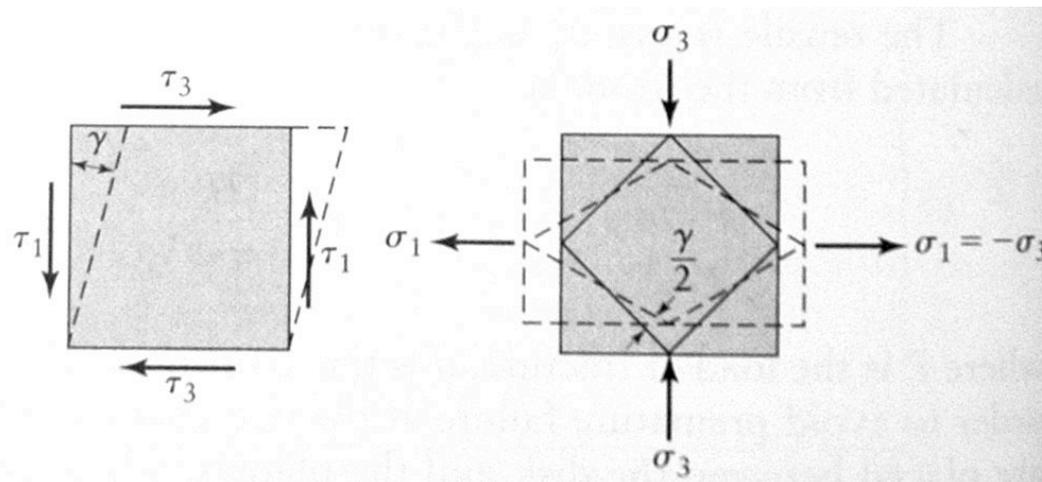
$$\tau = \frac{T}{2\pi r^2 t}$$

$$\gamma = \frac{r\phi}{l}$$

$$G = \frac{\tau}{\gamma}$$

Modulo di taglio (taglio puro)

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

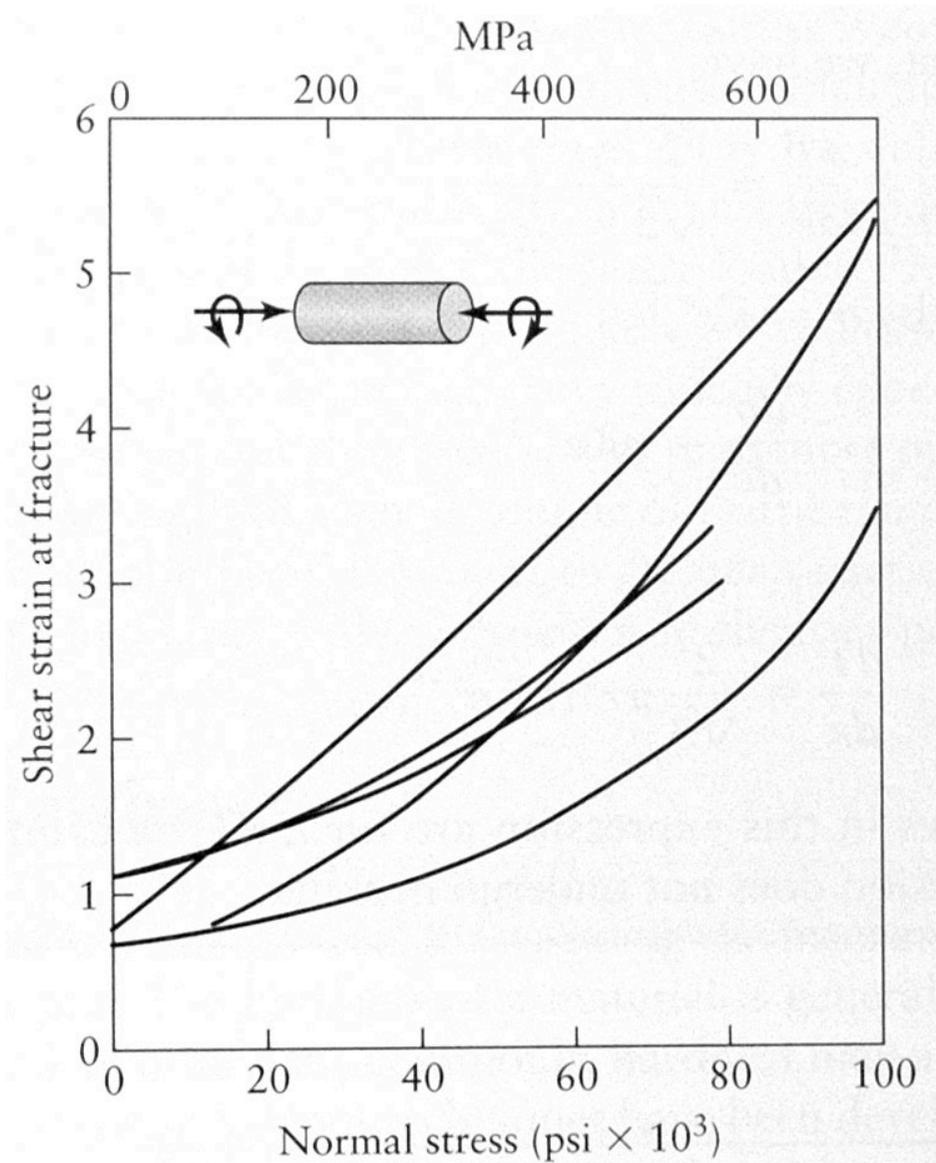


- Il modulo di taglio si può calcolare confrontando il taglio semplice con il taglio puro.
- Il taglio semplice è uguale al taglio puro più una rotazione di $\frac{\gamma}{2}$

Test di torsione

- Il test di torsione su tubo a pareti sottili non è soggetto a instabilità in quanto non si ha diminuzione della sezione.
- Il test viene eseguito ad alta temperatura per determinare la forgiabilità dei metalli.
- Si può condurre il test anche mettendo in compressione assialmente il cilindro. All'aumentare della compressione cresce la duttilità osservata per torsione.
- Tale test mostra come la compressione tende ad aumentare la deformazione massima (duttilità) raggiungibile dai materiali.

Torsione-compressione

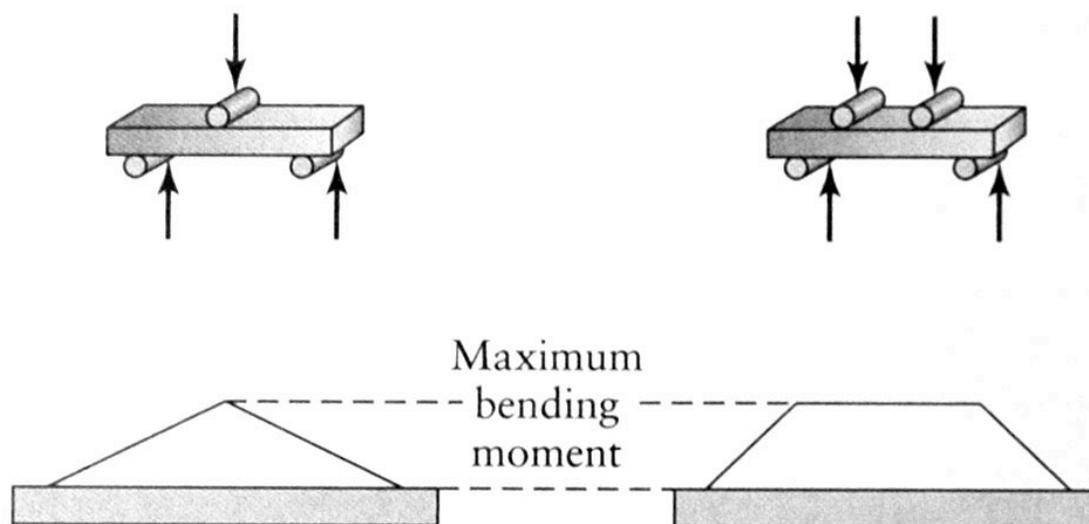


Outline: argomento seguente

- Introduzione
- Tensione e compressione
- Torsione
- **Flessione**
- Durezza
- Fatica
- Creep
- Resistenza ad impatto
- Sforzi residui
- Criteri di snervamento
- Lavoro di deformazione

Test di flessione

- Il test di flessione viene utilizzato per materiali molto fragili (ceramici) per i quali il test di trazione è difficoltoso (problemi afferraggi e allineamento carico).
- Viene condotto come test in flessione a tre punti o quattro punti.



Flessione

- Il test di flessione in 4 punti porta ad avere una parte consistente del campione sottoposto a carico massimo invece di un punto solo. Flessione in 4 punti da migliori valori statistici e inferiori a quella in 3 punti
- Nel test di flessione la parte superiore risulta in compressione mentre la parte inferiore in trazione.
- Lo sforzo di rottura misurato viene denominato come resistenza di rottura al trasverso (transverse rupture strength):

$$\sigma = \frac{Mc}{I}$$

- M è il momento flettente, c è pari allo spessore del pezzo diviso 2 e I è il momento d'inerzia della sezione

Domande

- Perché il test in flessione in 4 punti misura valori inferiori di quello in 3 punti?
- Come si calcola il momento di inerzia della sezione?

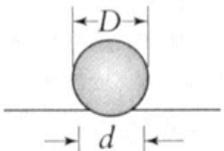
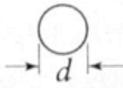
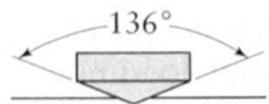
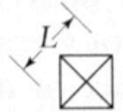
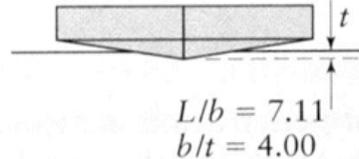
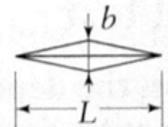
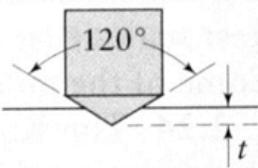
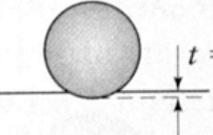
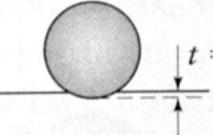
Outline: argomento seguente

- Introduzione
- Tensione e compressione
- Torsione
- Flessione
- **Durezza**
- Fatica
- Creep
- Resistenza ad impatto
- Sforzi residui
- Criteri di snervamento
- Lavoro di deformazione

Durezza

- La durezza è definita come la resistenza di un materiale alla indentazione permanente.
- Non è una grandezza fondamentale, poichè il suo risultato dipende da vari fattori, come la forma dell'indentatore, il tempo di applicazione del carico, etc.
- Esistono diversi tipi di test di durezza. In genere alcuni sono più adatti a materiali più duri, altri per materiali più teneri.
- I più comuni sono Brinell, Rockwell, Vickers, Knoop.
- La più famosa è la scala Mohs invece, che però dà solo un'informazione qualitativa e non quantitativa.

Test principali di durezza

| Test | Indenter | Shape of indentation | | Load P | Hardness number | |
|-------------------|--|--|---|------------------------------|---|------------|
| | | Side view | Top view | | | |
| Brinell | 10-mm steel or tungsten carbide ball |  |  | 500 kg 1500 kg 3000 kg | $HB = \frac{2P}{(\pi D) (D\sqrt{D^2 - d^2})}$ | |
| Vickers | Diamond pyramid |  |  | 1-120 kg | $HV = \frac{1.854P}{L^2}$ | |
| Knoop | Diamond pyramid |  $L/b = 7.11$ $b/t = 4.00$ |  | 25g-5kg | $HK = \frac{14.2P}{L^2}$ | |
| Rockwell | | | | kg | | |
| A } C } D } | Diamond cone |  |  | 60 | HRA } HRC } HRD } | = 100-500t |
| | | | | 150 | | |
| | | | | 100 | | |
| B } F } G } | $\frac{1}{16}$ -in-diameter steel ball |  |  | 100 | HRB } HRF } HRG } | = 130-500t |
| | | | | 60 | | |
| | | | | 150 | | |
| E | $\frac{1}{8}$ -in-diameter steel ball |  |  | 100 | HRE | |

Durezza Brinell

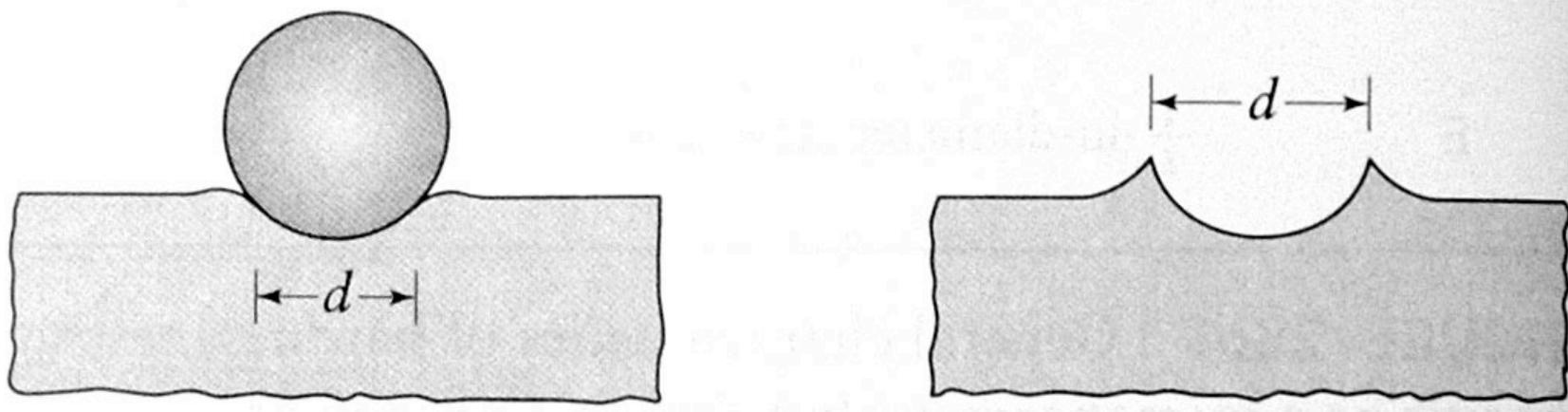
- Nel test Brinell si usa una sfera di acciaio o WC
- Tre pesi: 500, 1000 o 1500Kg
- La durezza è espressa come:

$$HB = \frac{2P}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \text{ kg/mm}^2$$

- dove D è il diametro della sfera indentatrice e d dell'impronta.
- Il modulo di elasticità della sfera influisce sul risultato. Si usa WC per migliorare.
- La durezza misurata dipende dal carico che va citato.

Durezza Brinell

- Materiali incruditi e non si comportano in maniera differente alla periferia dell'impronta, per cui la misura di d va fatta come in figura:



- Per materiali duri, bisogna aumentare il carico in modo da produrre un'impronta sufficiente, altrimenti la misura è poco precisa e accurata

Durezza Rockwell

- Nella durezza Rockwell si misura la profondità dell'impronta.
- Si misura prima la profondità con un carico basso, poi con uno alto e la durezza è data dalla differenza in penetrazione (vedi formula tabella).
- Una durezza Rockwell pari a 60 letta sulla macchina nella scala C, si scrive come 60HRC.

Durezza Vickers

- Utilizza un indentatore di diamante piramidale
- Tipici carichi vanno da 1 Kg a 120 Kg
- Il valore della durezza è poco dipendente dal carico, quindi è un test molto affidabile
- Viene utilizzato infatti per diversi tipi di materiali, soprattutto quelli molto duri.
- Il numero di Vickers si calcola come (L=lunghezza diagonale):

$$HV = \frac{1.854P}{L^2}$$

Test Knoop

- Usa sempre un'indentatore diamante con forma piramidale allungata
- Il carico va da 25 g a 5 Kg
- E` chiamato anche test di microdurezza, l'impronta viene letta con un microscopio (richiede una preparazione accurata della superficie che deve essere ben levigata).
- E` molto usato per materiali molto duri e fragili (vetri, ceramici etc.).
- Il numero di durezza Knoop è calcolato come (L diagonale maggiore):

$$HK = \frac{14.2P}{L^2}$$

Durezza Mohs

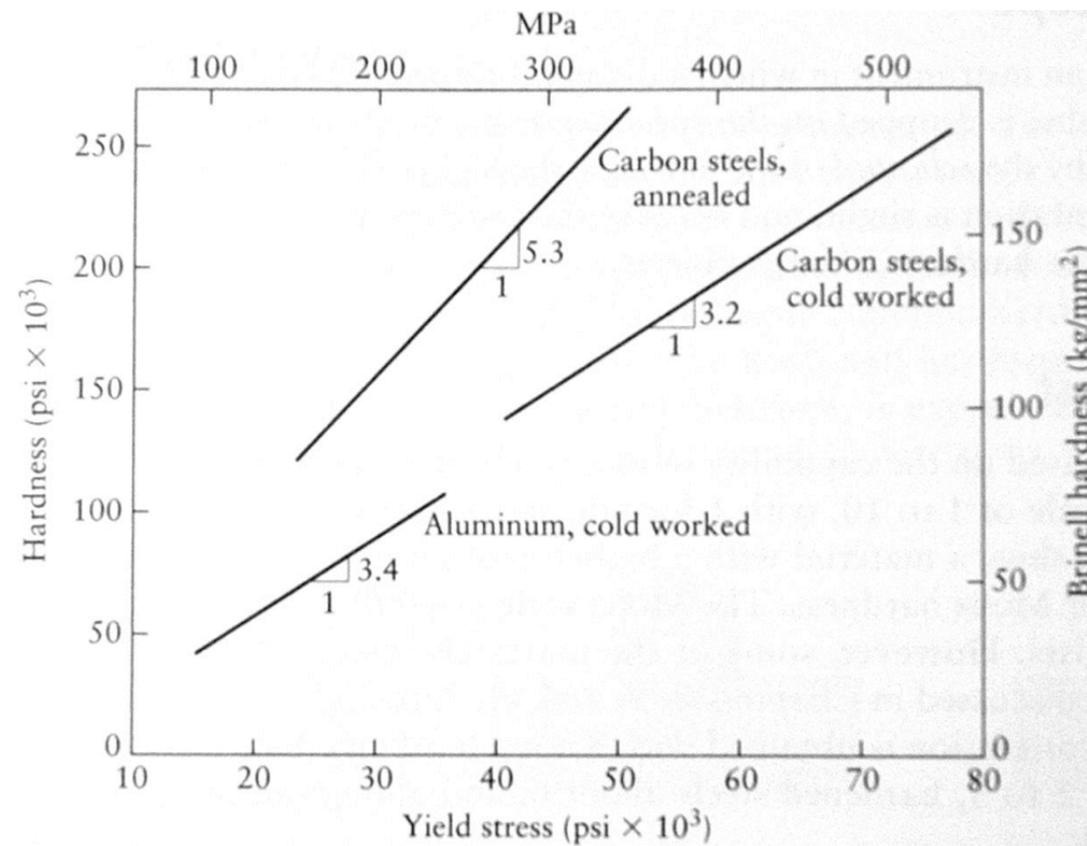
- La durezza è relativa e si determina in base alla capacità di un materiale di scalfire o essere scalfito da un materiale più tenero o più duro.
- Esiste una scala da 1 a 10, che va dal talco al diamante.
- E' una misura qualitativa, però si correla bene con la durezza Knoop.

Durometro

- Viene usato per gomme e polimeri, i quali tendono a non lasciare impronta per via della loro visco-elasticità.
- Un'indentatore viene premuto velocemente contro la superficie e si misura la profondità di penetrazione dopo un secondo.
- Con la scala A si usa un'indentatore meno appuntito e carichi da 1 Kg
- Con la scala D indentatore più appuntito e 5 Kg di carico.

Durezza e resistenza

- Ci si aspetterebbe che la durezza risulti proporzionale al carico di snervamento.

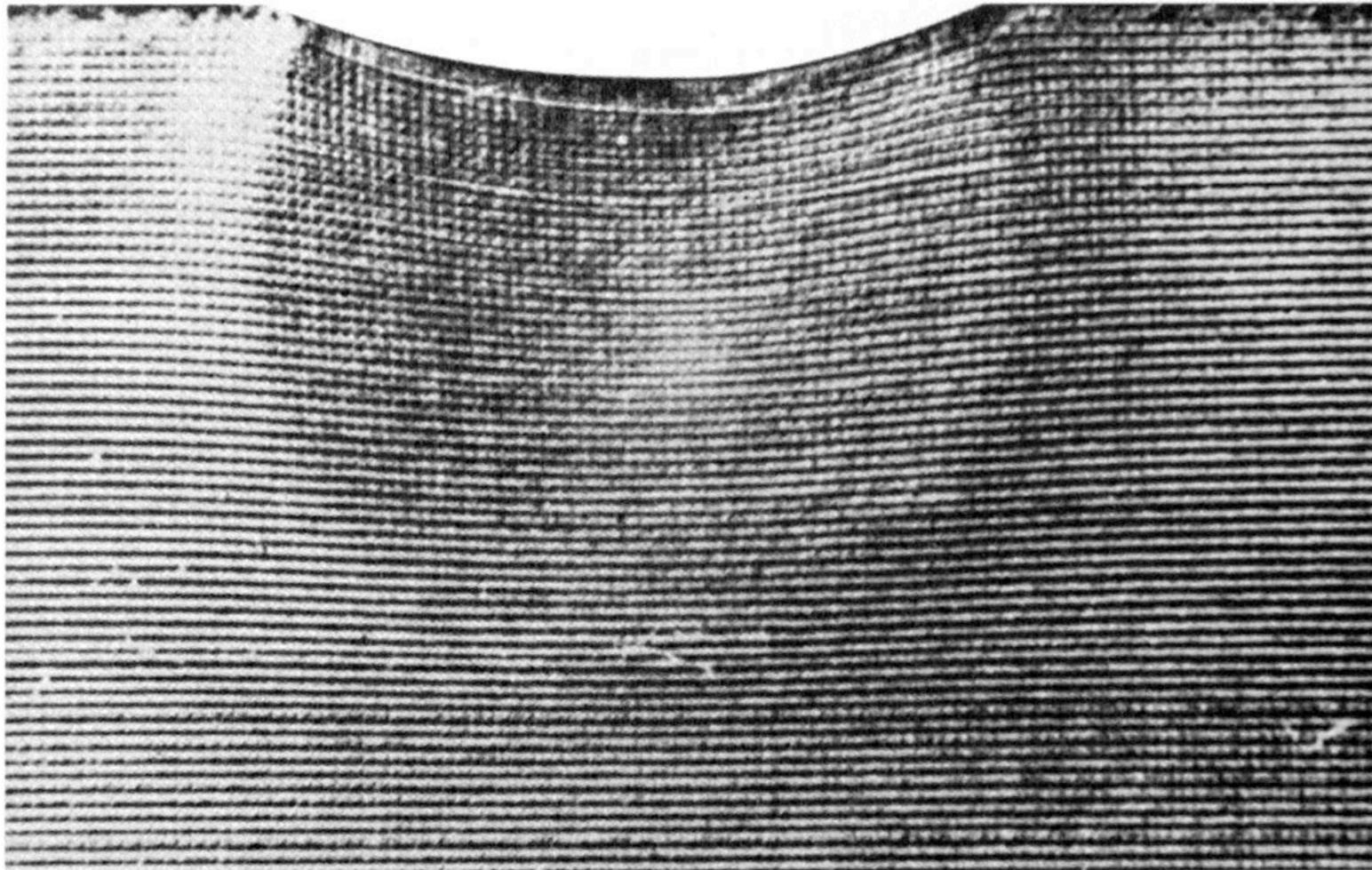


Durezza e resistenza

- In realtà si è trovato da studi teorici che misura sempre uno snervamento più elevato della prova di trazione.
- Questo è dovuto al vincolo della massa che sta intorno al volume interessato alla deformazione.
- Più correttamente è stata trovata una relazione tra la durezza Brinell e il carico ultimo (nel S.I.):

$$UTS = 3.5(HB)$$

Durezza e deformazione nella massa

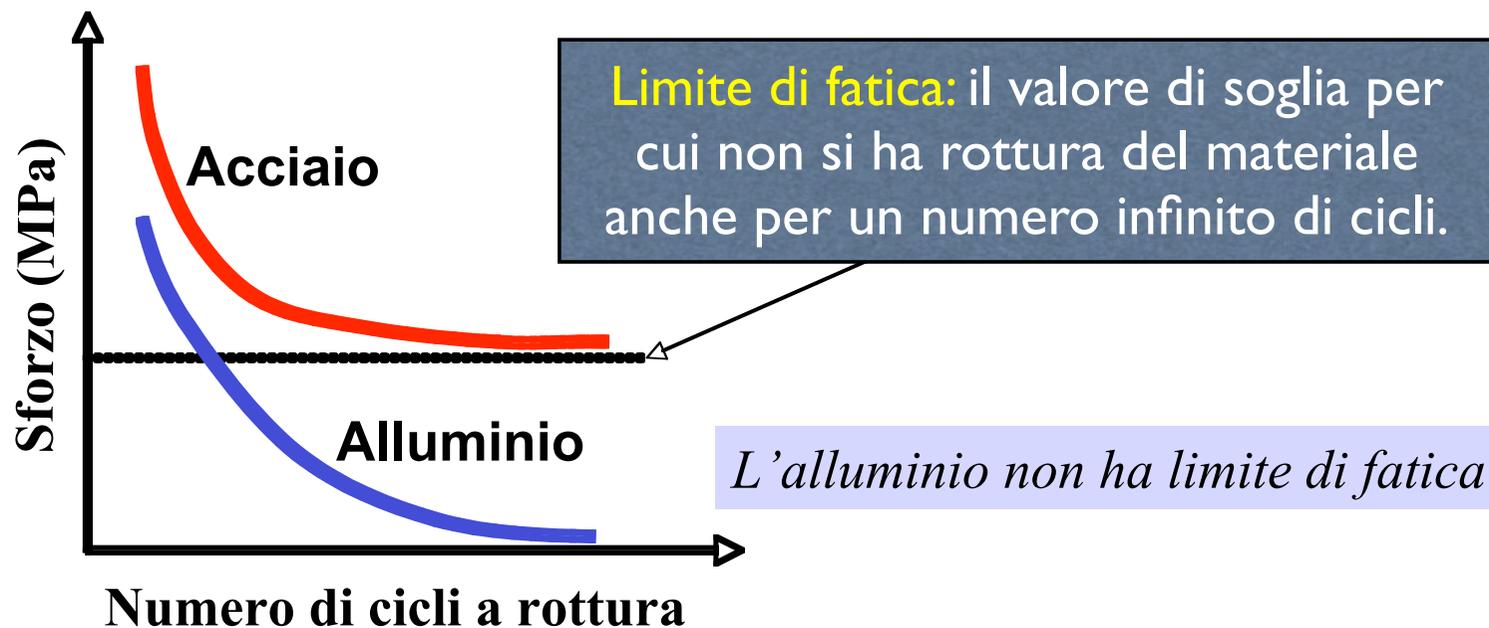


Outline: argomento seguente

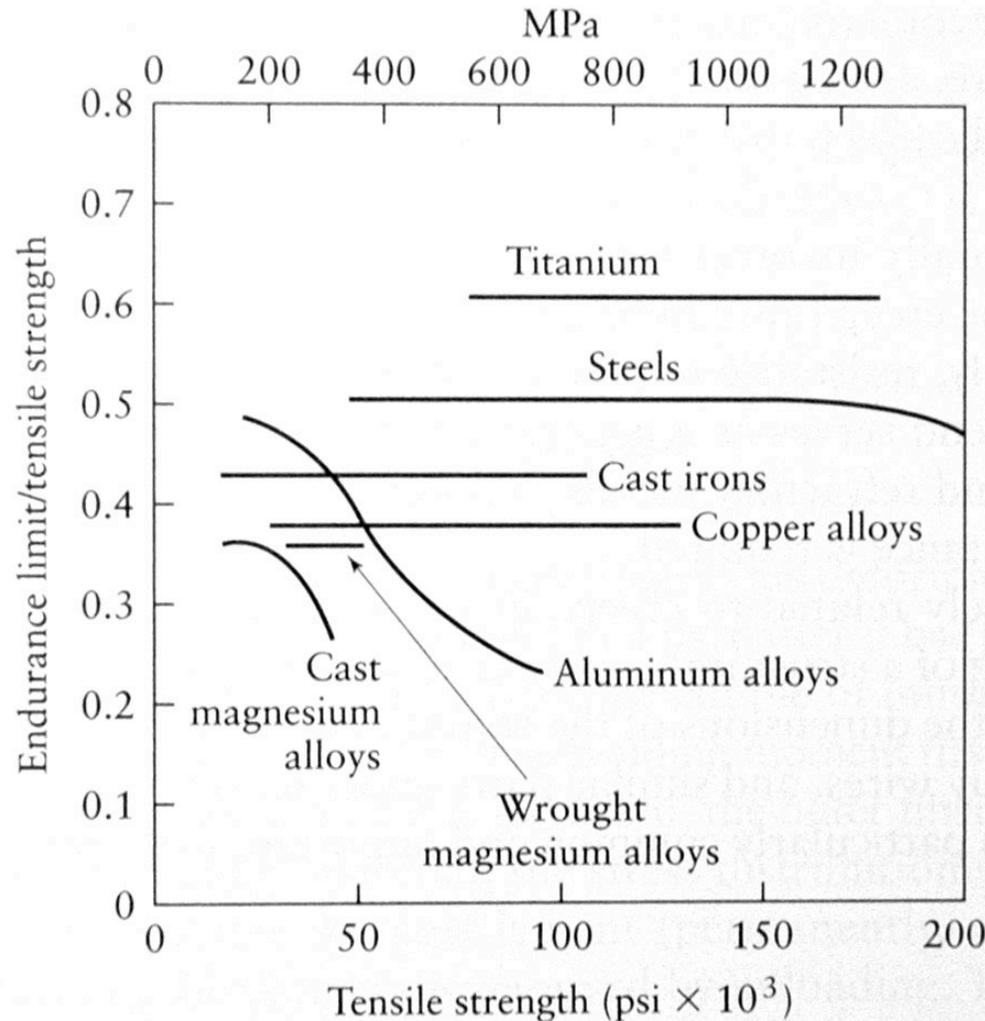
- Introduzione
- Tensione e compressione
- Torsione
- Flessione
- Durezza
- **Fatica**
- Creep
- Resistenza ad impatto
- Sforzi residui
- Criteri di snervamento
- Lavoro di deformazione

Fatica

- L'applicazione di un carico ciclico, tipicamente un'oscillazione o una vibrazione.
- Il carico può oscillare tra due valori, un minimo e un massimo; minimo e massimo possono avere anche segno opposto (es. trazione-comprensione)
- Tipiche sorgenti di fatica sono i motori, onde (terremoti), macchine utensili, etc.



Limite di fatica-resistenza



- Il limite di fatica per gli acciai corrisponde a circa 0.5 volte la resistenza a rottura per trazione.
- Per altri materiali si hanno valori differenti, ma il rapporto rimane in genere costante.
- Per i materiali senza limite di fatica si prende il valore per 10^7 cicli e il rapporto non è costante.

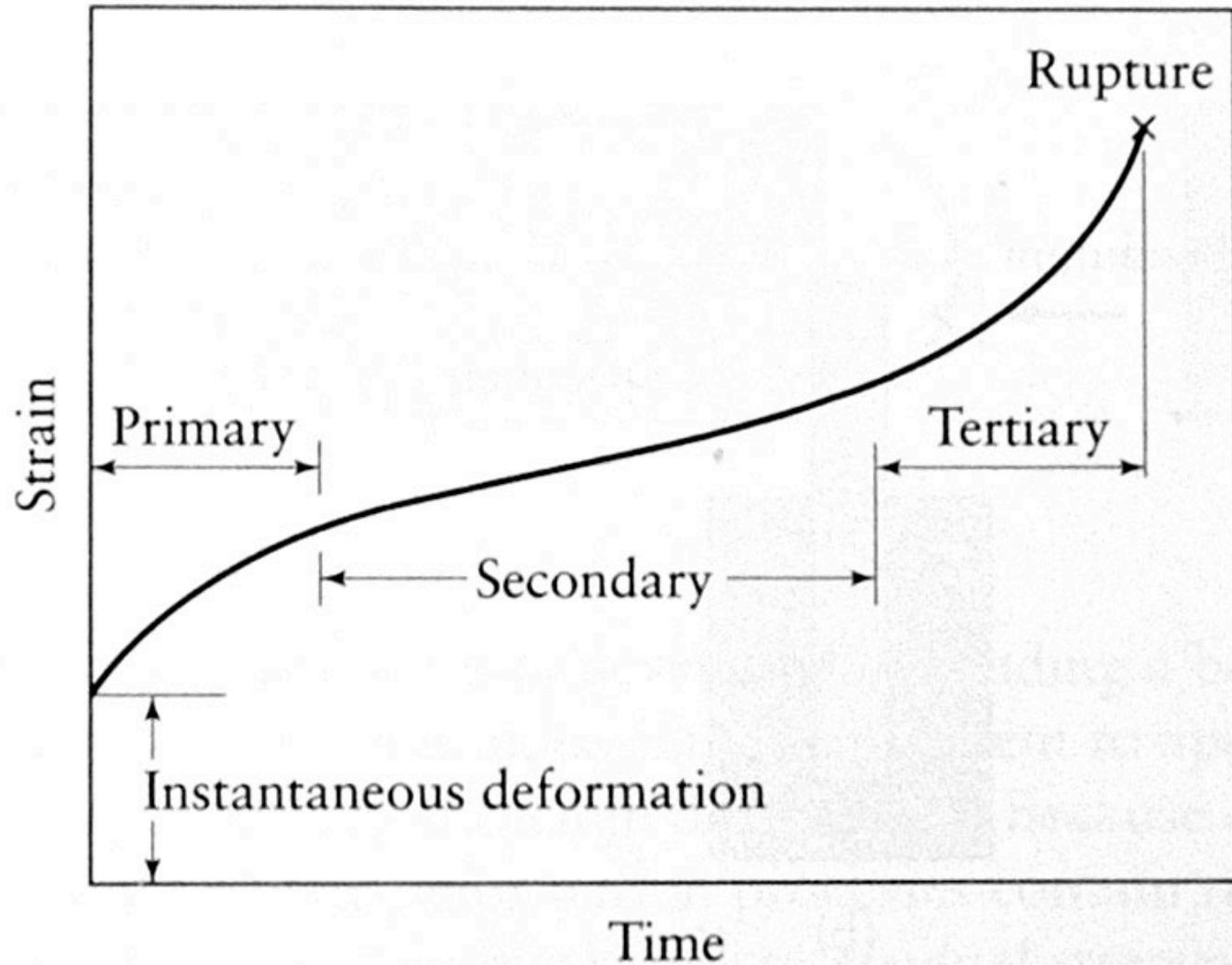
Outline: argomento seguente

- Introduzione
- Tensione e compressione
- Torsione
- Flessione
- Durezza
- Fatica
- Creep
- Resistenza ad impatto
- Sforzi residui
- Criteri di snervamento
- Lavoro di deformazione

Creep (scorrimenti viscosi)

- Il creep è un allungamento a carico costante che avviene nel tempo
- E' un fenomeno dominato da movimenti atomici (diffusivi) a bordo grano (anche per T basse), movimenti di dislocazioni (T intermedie) e diffusione di massa (T elevate).
- I materiali amorfi sono più soggetti a creep a temperature non troppo elevate.
- I metalli soffrono il creep a temperature medio-elevate
- Una grana grossa (poco bordo grano) rallenta il creep nei metalli.

Fasi del creep nel tempo



Caratteristiche del creep

- La zona di creep secondario è lineare e quindi in genere utilizzabile per calcolare e/o progettare la vita di un pezzo.
- Il creep è molto pericoloso per componenti meccanici che lavorano ad alta temperatura:
 - palette turbine a gas, motori, motori razzo
 - tubazioni e componenti in centrali termoelettriche e termonucleari
- Per ridurre il creep si usano metalli refrattari, superleghe e materiali ceramici.
- Nelle lavorazioni si può invece sfruttare il creep per: lavorazioni superplastiche a T elevata, rilassamenti nei materiali.

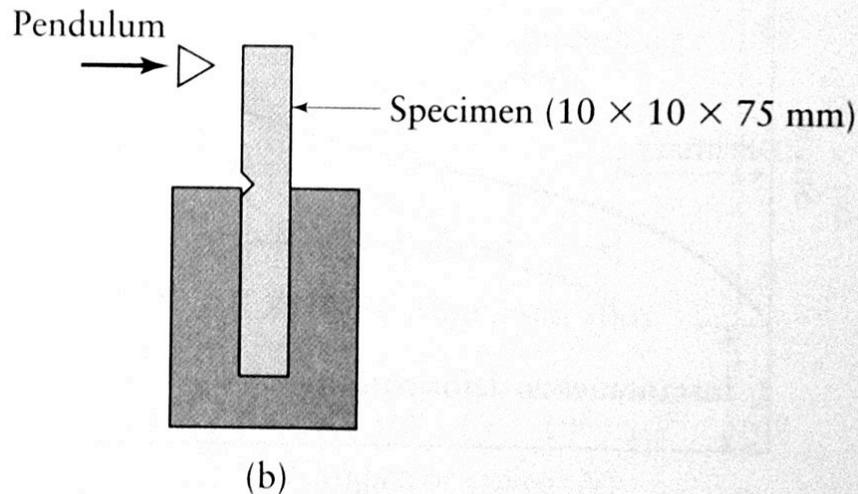
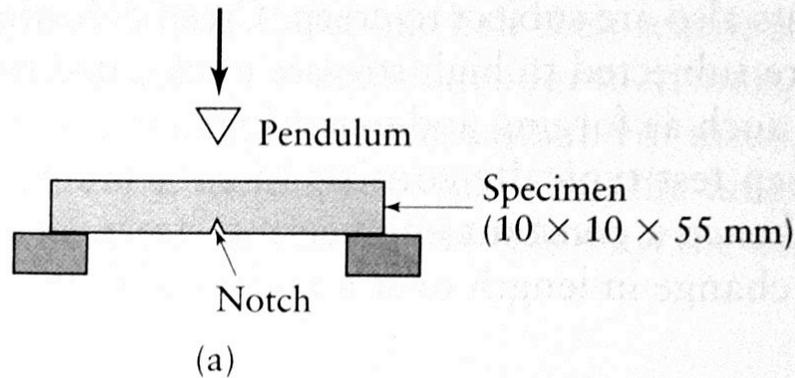
Outline: argomento seguente

- Introduzione
- Tensione e compressione
- Torsione
- Flessione
- Durezza
- Fatica
- Creep
- **Resistenza ad impatto**
- Sforzi residui
- Criteri di snervamento
- Lavoro di deformazione

Resistenza ad impatto

- I materiali e pezzi possono essere soggetti ad impatto durante la loro vita o anche nel processo di lavorazione
- Alcuni pezzi/materiali vengono progettati espressamente per la resistenza ad impatto (caschi, giubbetti, paraurti etc.)
- La resistenza ad impatto si misura attraverso test opportuni.
- I più comuni per metalli sono il test di Charpy e quello di Izod.

Test di Charpy e Izod



a. Test di Charpy: l'intaglio viene praticato dalla parte opposta rispetto al punto di impatto. Si misura l'energia persa dal pendolo nell'impatto dalla differenza di altezza tra il punto di partenza e di arrivo.

b. Test di Izod: l'intaglio è dalla stessa parte. Si misura sempre la differenza in altezza, conoscendo il peso del pendolo (perde energia cinetica che si trasforma in potenziale nella risalita).

Test di impatto

- I test di impatto sono molto utili per misurare la tenacità ad impatto.
- Si può determinare, con prove a bassa temperatura, la temperatura di transizione duttile-fragile, sia nelle leghe che nei polimeri.
- Si usano intagli per determinare anche la sensibilità al difetto superficiale.

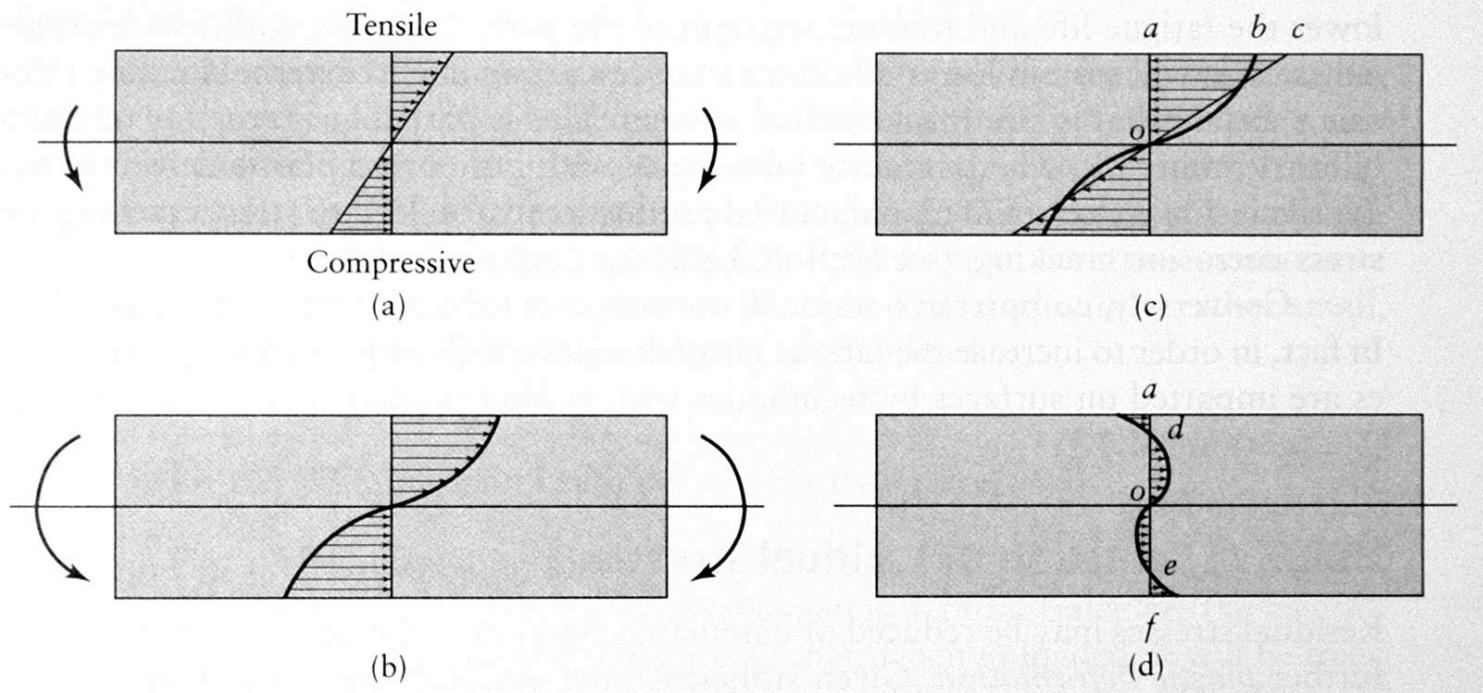
Outline: argomento seguente

- Introduzione
- Tensione e compressione
- Torsione
- Flessione
- Durezza
- Fatica
- Creep
- Resistenza ad impatto
- **Sforzi residui**
- Criteri di snervamento
- Lavoro di deformazione

Sforzi residui

- Gli sforzi residui sono degli stati di sforzo autoequilibrati all'interno di un pezzo anche non soggetto a carico esterno.
- In genere gli sforzi residui derivano da:
 - lavorazioni meccaniche (plastiche)
 - trattamenti termici veloci o non omogenei
 - accoppiamenti di materiali differenti a temperature differenti
 - trattamenti diffusivi o superficiali
 - ritiri da fusione non omogenei
 - transizioni di fase, etc.

Esempio di sforzi residui da lavorazione

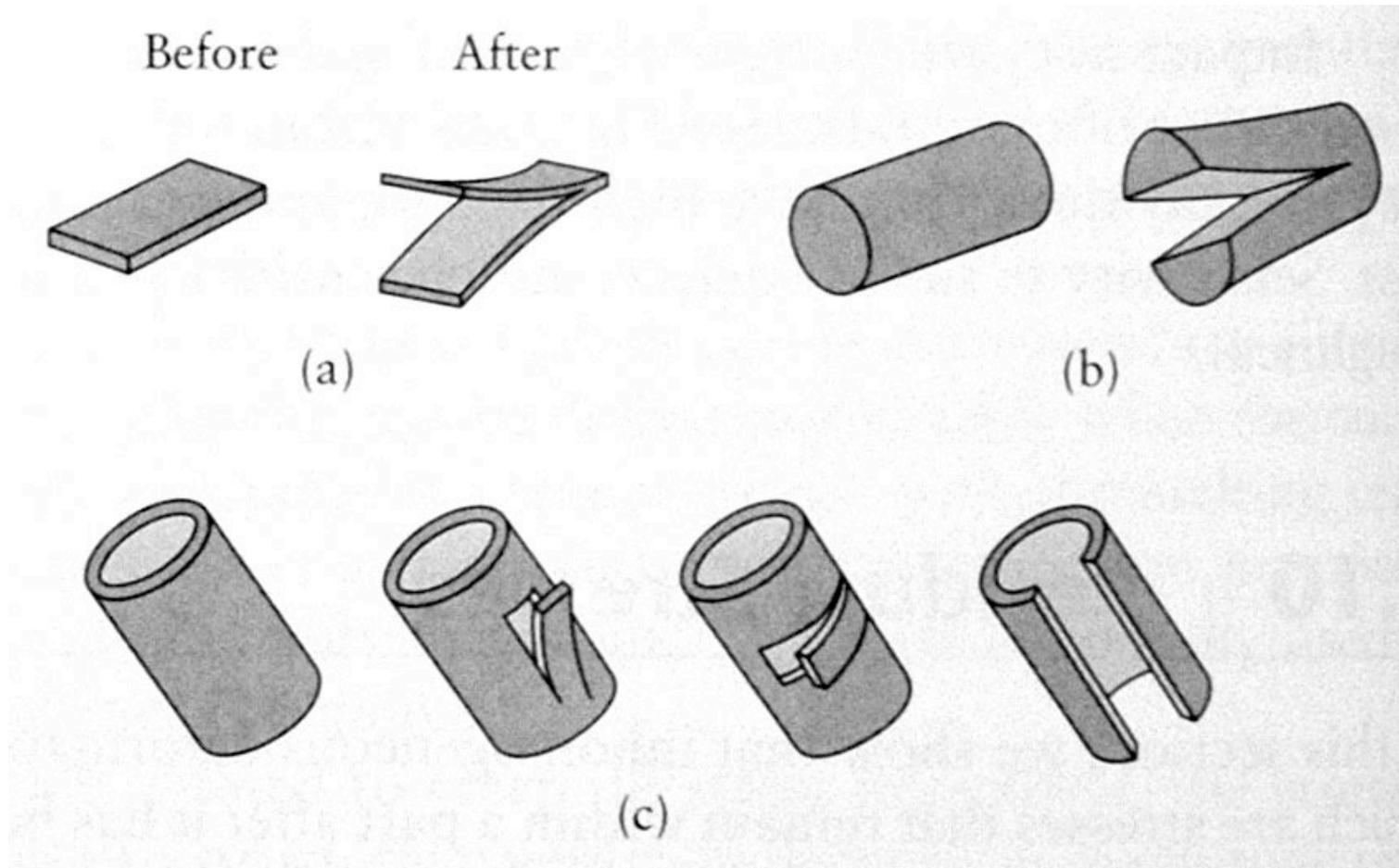


- Si applica uno sforzo di flessione, siamo in campo elastico, tensione e compressione massima sulle superfici esterne
- Aumentiamo la flessione: verso l'asse neutro rimaniamo in campo elastico, verso l'esterno superiamo lo snervamento. Poiché imponiamo una deformazione di flessione, osserviamo che la distribuzione del carico non è più lineare a causa della non linearità della curva sforzi-deformazioni in campo plastico
- Togliamo il carico esterno al pezzo, si ha un recupero lineare elastico. Al centro recupera poco, verso la periferia recupera di più (tratto a-c). Il recupero però è lineare elastico.
- Risultato finale: il pezzo si troverà nella situazione in cui la somma totale degli sforzi è zero, ma rimangono delle zone in trazione equilibrate da zone in compressione.

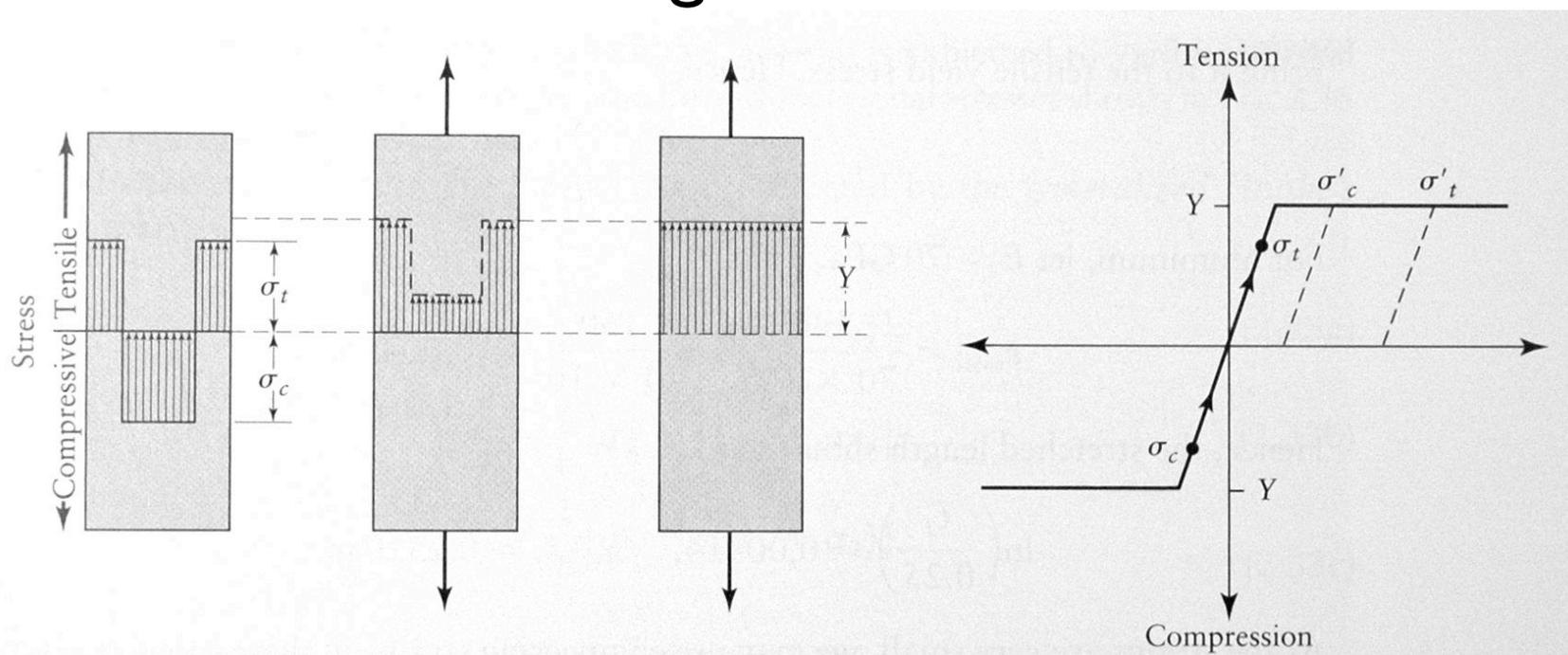
Sforzi residui: svantaggi e vantaggi

- Gli sforzi residui possono causare diversi tipi di problemi:
 - rotture premature dei pezzi, in quanto lo sforzo residuo si somma al carico applicato
 - deformazioni del pezzo non volute a seguito di lavorazioni successive e/o rilasciamenti
 - causano fenomeni di tenso-corrosione
- Alcune volte gli sforzi residui vengono indotti per:
 - mettere in compressione le superfici in modo da diminuire la sensibilità ai difetti superficiali nei materiali (pallinatura, vetri temprati etc.)

Effetti sforzi residui: rilassamenti



Eliminare gli sforzi residui



- Gli sforzi residui si possono eliminare o diminuire tramite:
 - deformazione meccanica supplementare (vedi figura)
 - rilassamenti termici
- In genere è meglio prevenire gli sforzi residui e/o considerarli nella progettazione

Misura degli sforzi residui

- E' importante poter misurare gli sforzi residui per controlli qualità e per poter prevedere la vita finale di un pezzo (e lavorare sulla progettazione di conseguenza)
- Si possono misurare tramite metodi distruttivi:
 - hole drilling (si fa un piccolo buco nel pezzo e si misura il rilassamento della zona circostante)
 - rimozione strati (si rimuove uno strato superficiale e si misura il cambio in curvatura o allungamento del pezzo)
- Misure non distruttive:
 - diffrazione raggi-X: si misurano le distanze interplanari a diverse inclinazioni del pezzo e si ricostruisce la deformazione elastica corrispondente.

Outline: argomento seguente

- Introduzione
- Tensione e compressione
- Torsione
- Flessione
- Durezza
- Fatica
- Creep
- Resistenza ad impatto
- Sforzi residui
- **Criteri di snervamento**
- Lavoro di deformazione

Sforzi triassiali

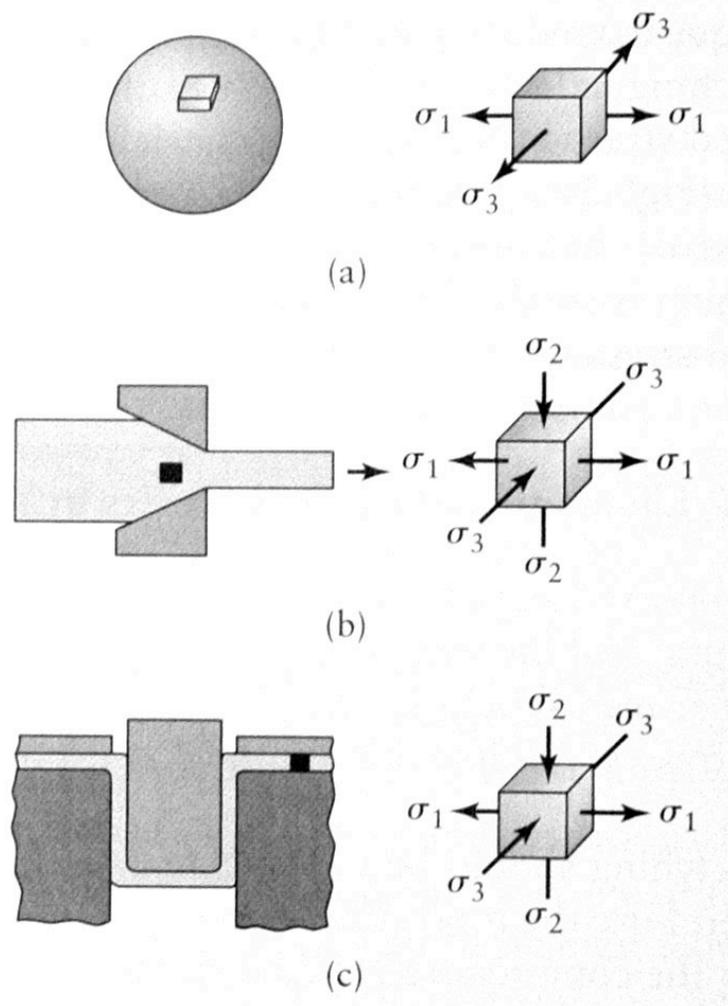
Nelle lavorazioni meccaniche difficilmente abbiamo stati di sforzo uniassiali.

Esempi:

(a) sfera a pareti sottili in pressione internamente

(b) trafilatura attraverso stampo conico

(c) processo di imbutitura



Legge di Hooke generalizzata

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)]$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)]$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)]$$

Nel caso in cui (tensione uniassiale):

$$\sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E}$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\frac{\nu\sigma_1}{E}$$

Criteri di snervamento

- Nel caso di tensione uniassiale è facile determinare quando si ha snervamento, basta superare il limite di snervamento Y perchè il materiale si deformi plasticamente.
- Nel caso di stati di sforzo più complessi occorrono delle relazioni conosciute come criteri di snervamento per predire la deformazione plastica del materiale.
- I criteri più comuni e utilizzati sono quello di Tresca (o massimo sforzo di taglio) e quello di von Mises (o dell'energia di deformazione).

Criterio di Tresca

- Viene chiamato anche criterio dello sforzo di taglio massimo.
- Si assume che il materiale sia continuo, omogeneo ed isotropo.
- Il criterio prevede deformazione plastica quando si supera in un elemento lo sforzo massimo di taglio.
- Quindi si ha snervamento quando: $\tau_{\max} \geq k$
- Il taglio massimo si può determinare usando il cerchio di Mohr per gli sforzi oppure utilizzare le equazioni di trasformazione degli sforzi.

Criterio di Tresca

- Se consideriamo il caso di tensione uniassiale, il taglio massimo corrisponde a metà dello sforzo applicato, quindi:

$$k = \frac{Y}{2}$$

- Il criterio del massimo sforzo di taglio alla fine si può riscrivere come:

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = Y$$

- Una conseguenza di questa riformulazione è che lo sforzo normale intermedio non ha influenza sul raggiungimento dello snervamento.

Criterio di von Mises

- Il criterio di von Mises è detto anche criterio quadratico:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2Y^2$$

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_3\sigma_2 - \sigma_1\sigma_3 = Y^2$$

- Si vede inoltre che in base a questo criterio il termine intermedio è incluso.
- E' un criterio più accurato di quello lineare di Tresca.

Esercizio

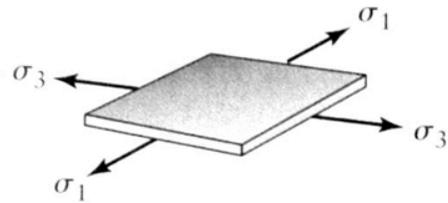
- Una sfera cava con pareti sottili ha una pressione interna pari a p (si trascura la pressione atmosferica). La sfera ha un diametro di 0.2 m e uno spessore di 1 mm. E' costruita in un materiale plastico con uno sforzo di snervamento di 20 MPa. Calcolare la pressione richiesta per portare asnervamento il materiale.
- Ricordiamoci che per una sfera in pressione lo sforzo tangenziale è:

$$\sigma_t = \frac{pr}{2t}, \quad r = \text{raggio}, t = \text{spessore}$$

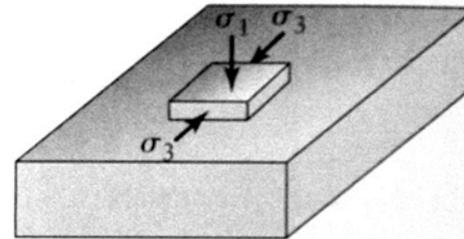
Sforzo e deformazione piani

- E' un caso molto importante. Abbiamo in genere sistemi con sforzi piani, oppure deformazioni piane.
- La torsione di un tubo a pareti sottili è un caso di sforzo e deformazione piani (entrambi).
- Abbiamo deformazione piana quando una delle deformazioni principali è nulla.
- Abbiamo sforzo piano nel caso uno degli sforzi principali sia nullo.

Esempi di sforzi/deformazioni piani o triassiali

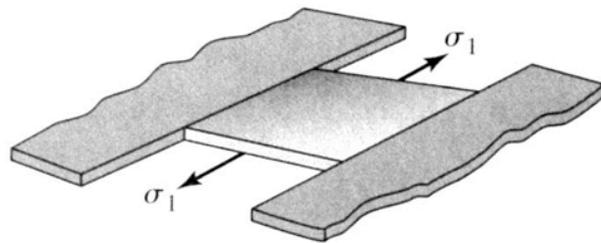


(a)

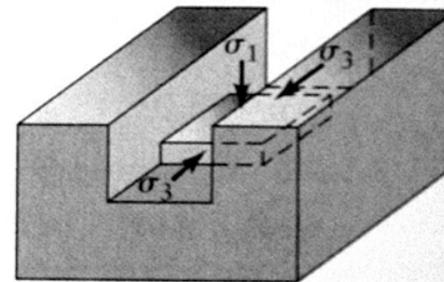


(b)

Sforzo piano

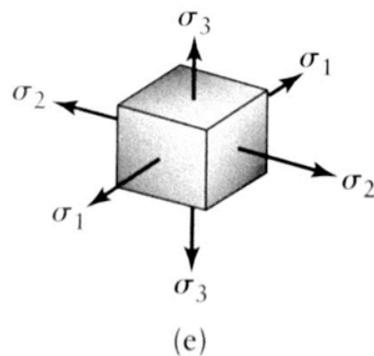


(c)

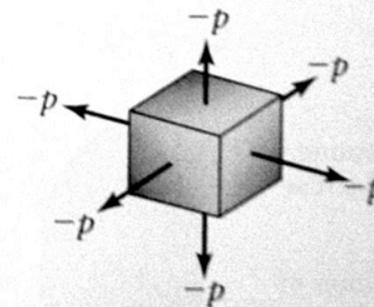


(d)

Deformazione piana



(e)



(f)

Sforzo/deformazione triassiale

Criteri per lo sforzo piano

- Tresca:

$$\sigma_2 = 0$$

$$\text{I quadrante: } \sigma_{\max} - 0 = Y$$

$$\text{II quadrante: } \sigma_3 - \sigma_1 = Y$$

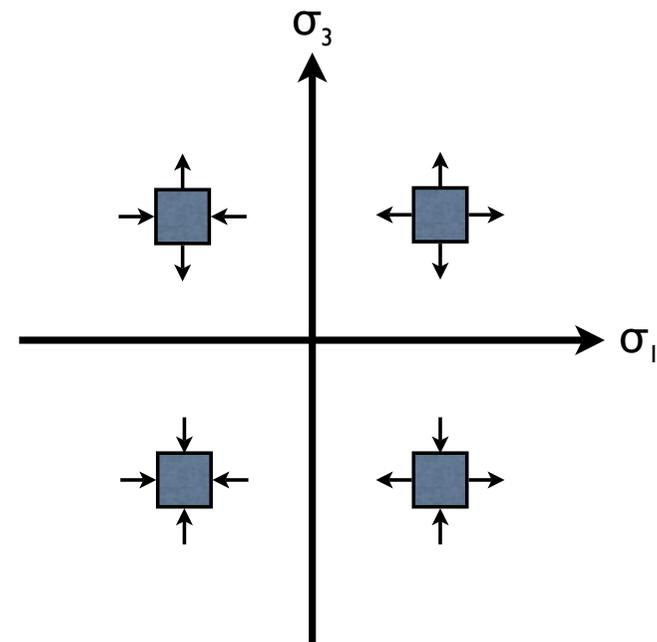
$$\text{III quadrante: } 0 - \sigma_{\min} = Y$$

$$\text{IV quadrante: } \sigma_1 - \sigma_3 = Y$$

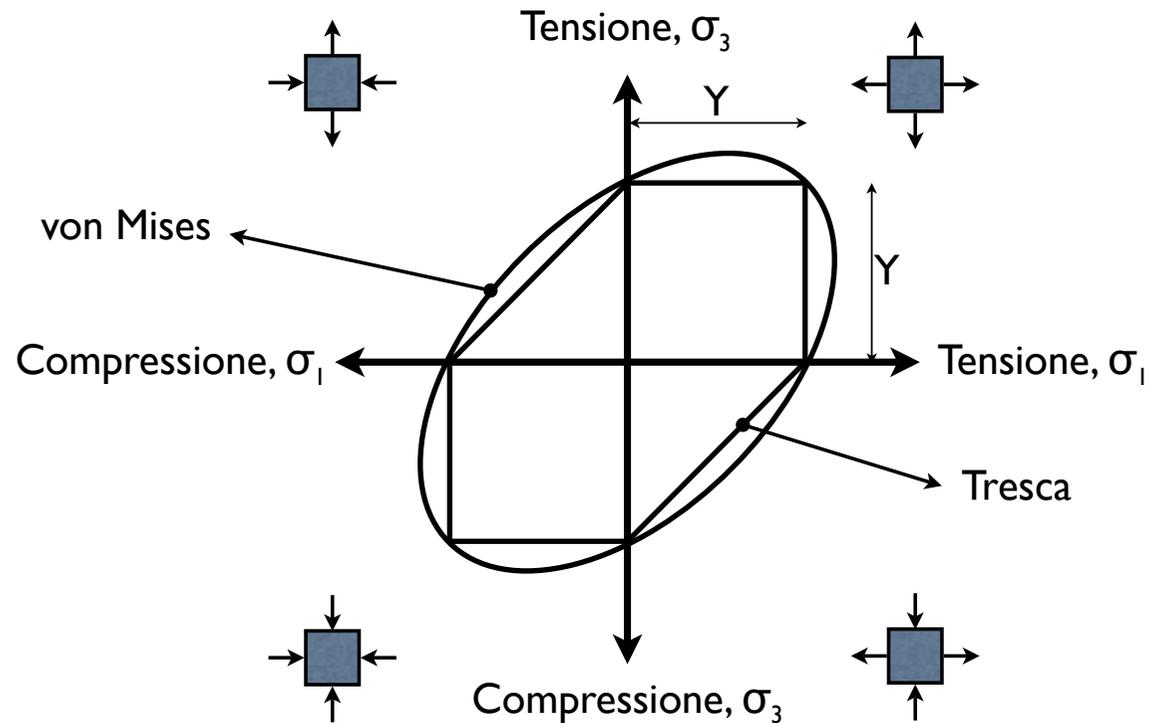
- von Mises (ellisse):

$$\sigma_2 = 0$$

$$\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_3 = Y^2$$



Criteri per lo sforzo piano



- Criteri di Tresca e von Mises nel caso di sforzo piano
- $\sigma_2=0$

Criteri per la deformazione piana

- Nel caso di deformazione piana, assumendo l'asse 2 come indeformato:

$$\varepsilon_2 = 0$$

$$\sigma_2 = \nu(\sigma_1 + \sigma_3)$$

- σ_2 è quindi lo sforzo intermedio per Tresca

- $|\sigma_3 - \sigma_1| = Y$

- Per von Mises:

- $(\sigma_1 + \sigma_3)^2(1 - 2\nu + 2\nu^2) + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2Y^2$

- Abbiamo una soluzione semplice per $\nu=0.5$:

$$\frac{3}{2}(\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2Y^2 \Rightarrow |\sigma_3 - \sigma_1| = \frac{2}{\sqrt{3}}Y = Y'$$

Deformazione di volume

- Usando la legge di Hooke generalizzata:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \frac{1 - 2\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

- Definiamo la deformazione volumetrica come:

$$\Delta = \frac{1 - 2\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

- e il modulo di “bulk”

$$C_B = \frac{\sigma_m}{\Delta} = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3}$$

- dove σ_m è lo sforzo medio.

Sforzo effettivo e deformazione effettiva

| | Tresca | von Mises |
|------------------------|---|---|
| sforzo effettivo | $\bar{\sigma} = \sigma_1 - \sigma_3$ | $\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$ |
| deformazione effettiva | $\bar{\varepsilon} = \frac{2}{3} (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)$ | $\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}$ |

Outline: argomento seguente

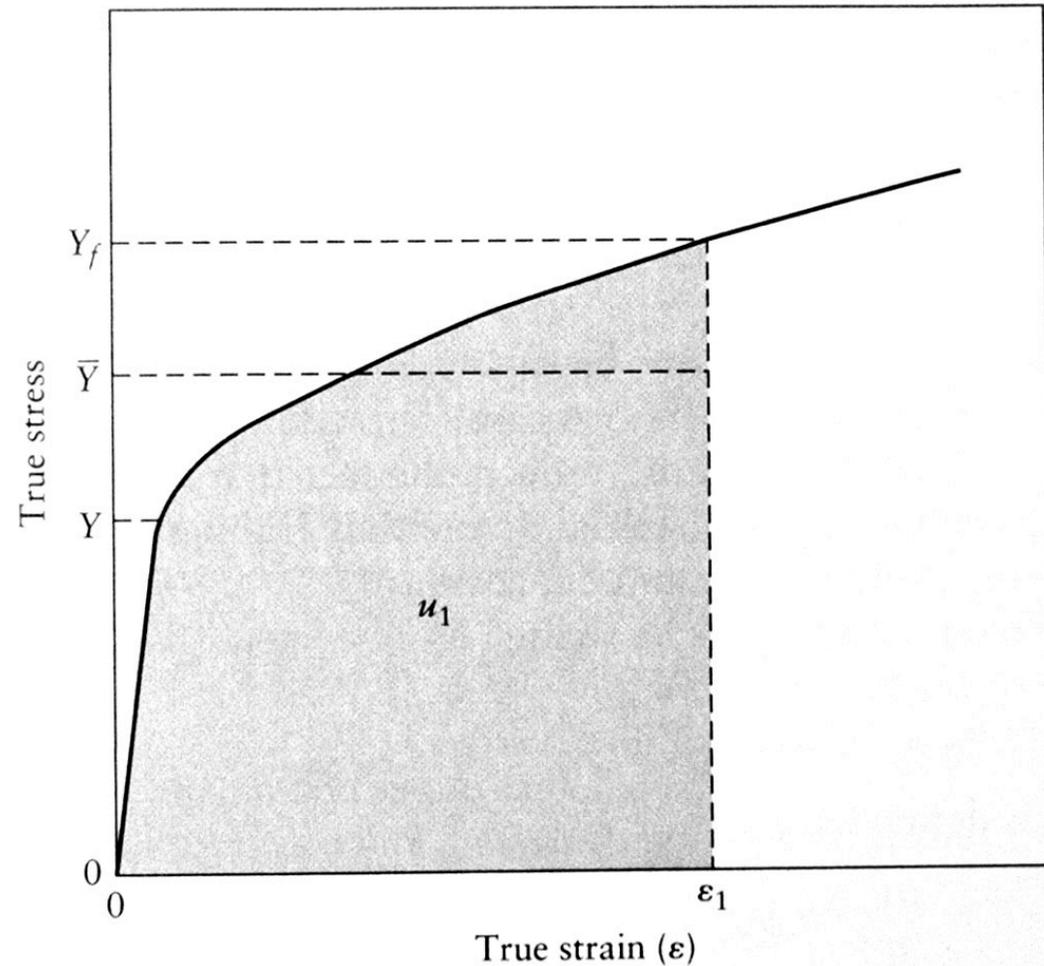
- Introduzione
- Tensione e compressione
- Torsione
- Flessione
- Durezza
- Fatica
- Creep
- Resistenza ad impatto
- Sforzi residui
- Criteri di snervamento
- **Lavoro di deformazione**

Lavoro di deformazione

- L'energia specifica del materiale deformato è definita come:

$$u = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma d\varepsilon$$

- Tale deformazione vale per il caso uniassiale



Caso uniassiale

- Prendendo la curva sforzo reale - deformazione reale:

$$\sigma = K\varepsilon^n$$

- l'energia specifica diventa:

$$u = K \int_0^{\varepsilon_1} \varepsilon^n d\varepsilon$$

- e quindi:

$$u = \frac{K\varepsilon_1^{n+1}}{n+1} = \bar{Y}\varepsilon_1$$

Caso triassiale e lavoro di deformazione

- L'espressione generale per il caso triassiale:

$$du = \sigma_1 d\varepsilon_1 + \sigma_2 d\varepsilon_2 + \sigma_3 d\varepsilon_3$$

- Quindi l'energia per unità di volume nel caso generale si può scrivere utilizzando lo sforzo e la deformazione effettiva:

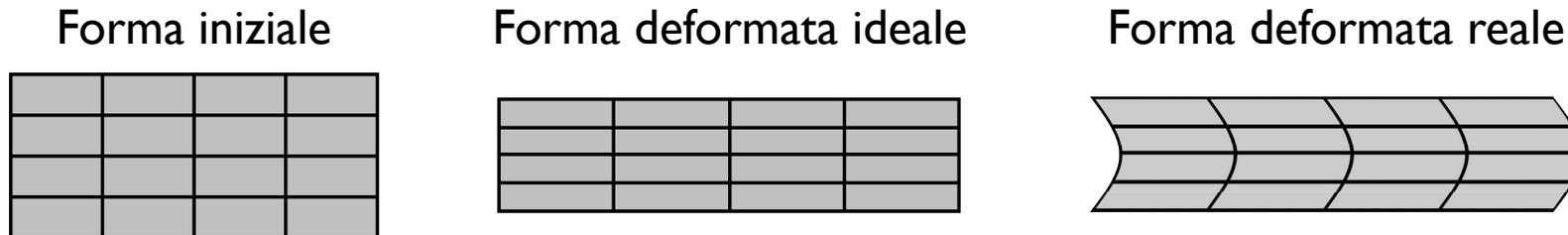
$$u = \int_0^{\varepsilon} \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon}$$

- Infine il lavoro di deformazione è definito come:

$$\text{Lavoro} = u \cdot \text{Volume}$$

- Tale lavoro corrisponde all'energia minima per la lavorazione. A tale valore vanno aggiunti anche il lavoro per l'attrito e quello per deformazioni ridondanti.

Lavoro di deformazione ideale e reale



- Nel caso di laminazione riportato il lavoro di deformazione non è stato quello minimo necessario, ma è stato fatto del lavoro aggiuntivo risultante dal taglio aggiuntivo.
- Nel caso generale l'energia totale diventa:

$$u_{total} = u_{ideal} + u_{attrito} + u_{ridondante}$$

- L'efficienza del processo è pari a: $\eta = \frac{u_{ideal}}{u_{total}}$
- Valori tipici sono:
 - 30-60% per estrusione, 75-95% laminazione

Lavoro e riscaldamento del pezzo

- Il lavoro di deformazione plastica viene convertito quasi interamente in calore, il resto (da un 5-10% tipico ad un massimo del 30% per alcune leghe) viene immagazzinato come energia elastica (sforzi residui).
- Tale calore provoca un riscaldamento del pezzo pari a:

$$\Delta T = \frac{u_{total}}{\rho c}$$

- Dove ρ è la densità del pezzo e c il calore specifico.
- In realtà parte del calore viene dissipato nell'ambiente esterno attraverso gli stampi, l'aria etc. altrimenti nel caso di un processo completamente adiabatico potrebbe portare in alcuni casi a fusione incipiente.