

Università degli Studi di Trieste
Dipartimento di Ingegneria e Architettura
A.A. 2019-2020

Corso di Laurea in Ingegneria Civile ed Ambientale
Corso di Chimica e Tecnologia dei Materiali

Modulo 2: Tecnologia dei Materiali

- Lezione 5: Proprietà meccaniche dei materiali

Barbara Codan
bcodan@units.it

Dipartimento di Ingegneria e Architettura
Università degli Studi di Trieste

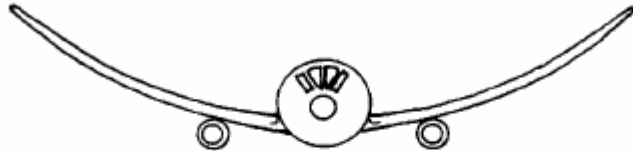
Obiettivi

- Introdurre i concetti base delle proprietà meccaniche dei materiali
- Identificare i principali fattori che influenzano le proprietà meccaniche
- Introdurre alcuni dei principali metodi di caratterizzazione delle proprietà meccaniche

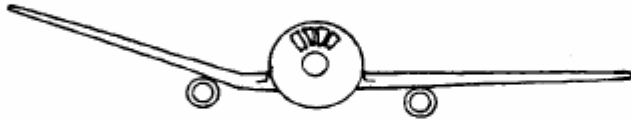
Alcune proprietà meccaniche fondamentali



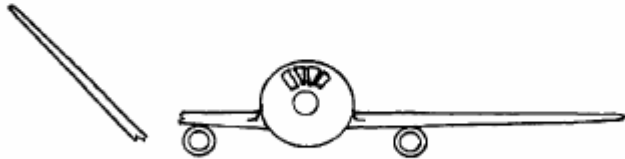
← **Stiff**
Strong
Tough
Light } **All OK !**



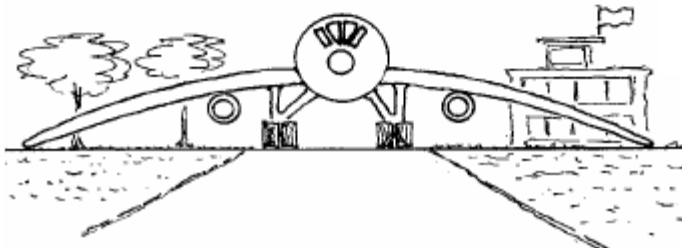
← Not stiff enough (need bigger E)



← Not strong enough (need bigger σ_y)



← Not tough enough (need bigger K_{ic})



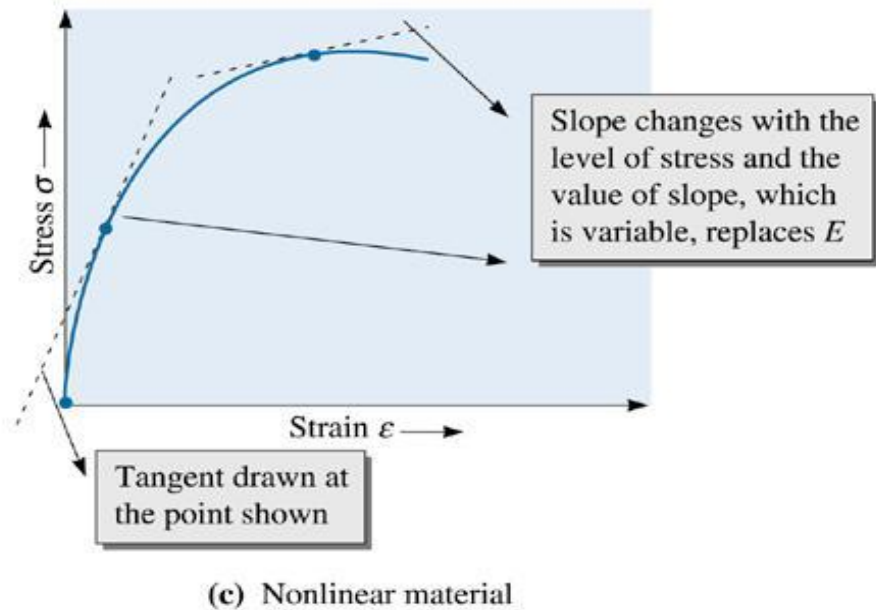
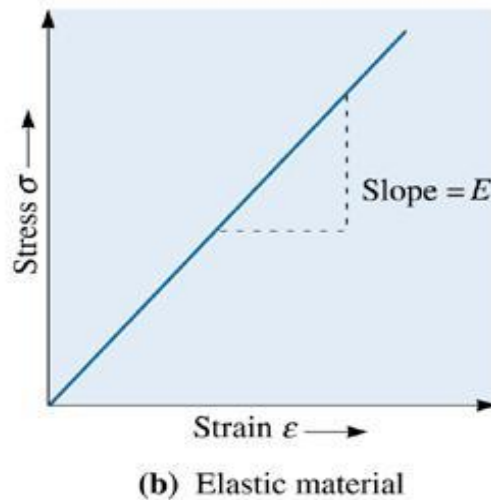
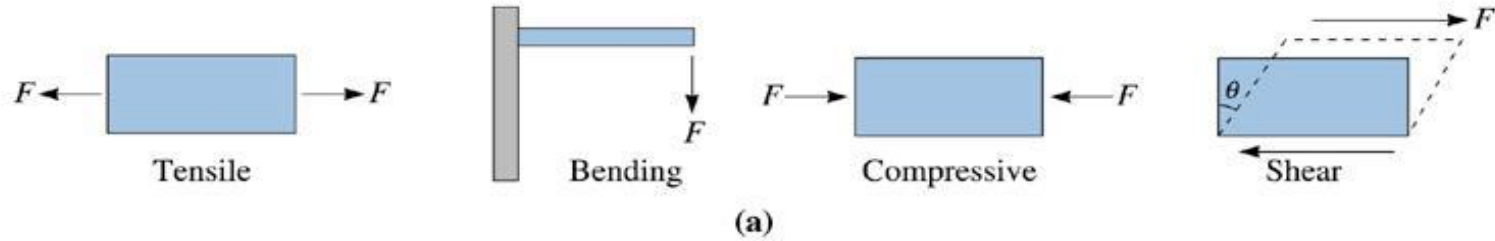
← Too heavy (need lower ρ)

Terminologia per le proprietà meccaniche

- **Sforzo o stress:** Forza o carico per unità di area della sezione trasversale su cui agisce la forza o il carico.
- **Deformazione:** Variazione di allungamento della dimensione per unità di lunghezza.
- **Modulo di Young o Modulo elastico (E):** La pendenza della parte lineare della curva sforzo-deformazione nella regione elastica, uguale al modulo di elasticità
- **Modulo di taglio (G):** La pendenza della parte lineare della curva di deformazione da taglio e da taglio.
- **Viscosità (η):** Misura della resistenza al flusso, definita come il rapporto tra sollecitazione di taglio e velocità di deformazione di taglio (unità Poise o Pa-s).
- **Comportamento tissotropico o tixotropico:** Materiali variano la loro viscosità quando vengono sottoposti a sollecitazioni di taglio

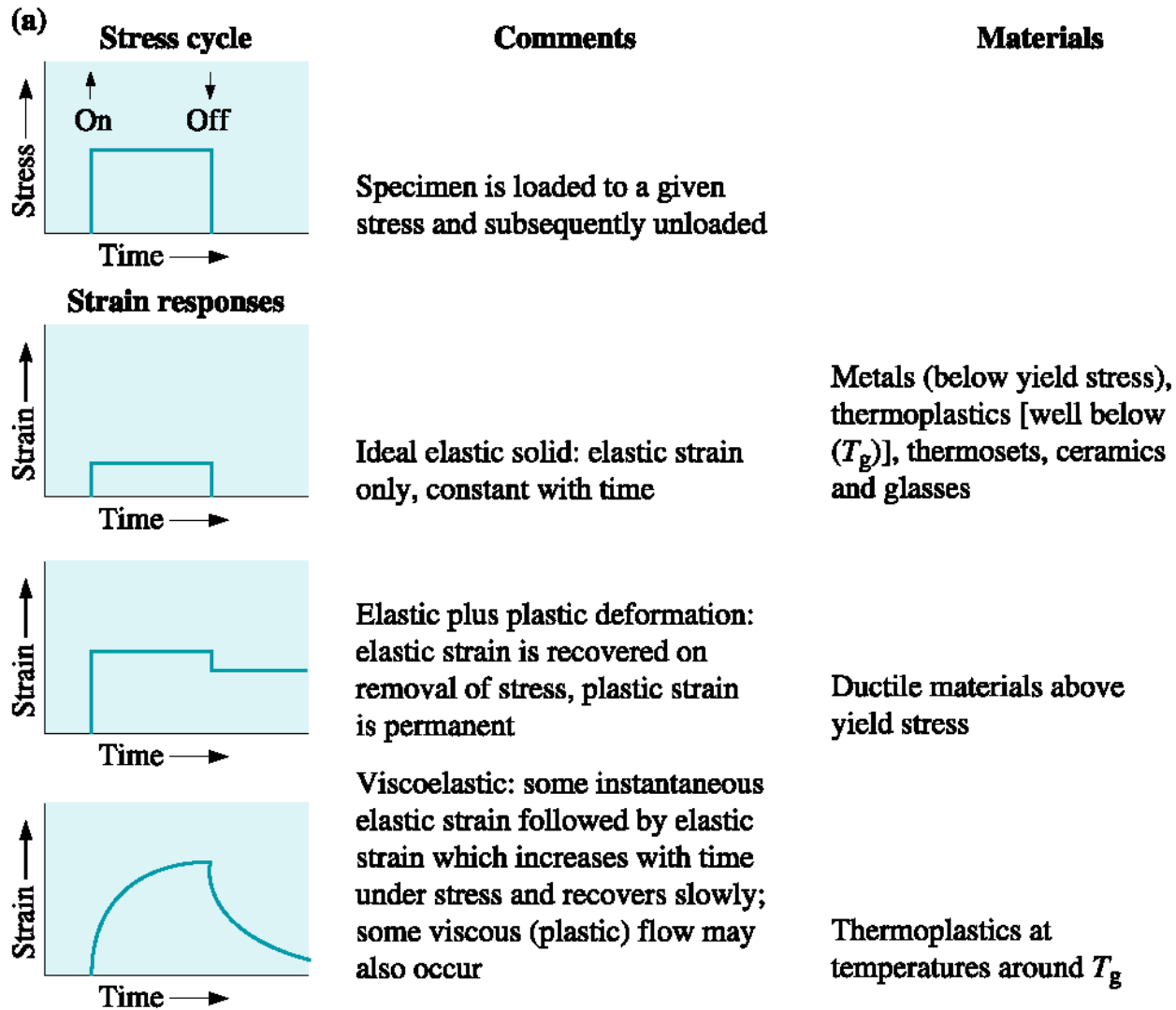
Comportamento meccanico dei materiali

(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning_{sm} is a trademark used herein under license.



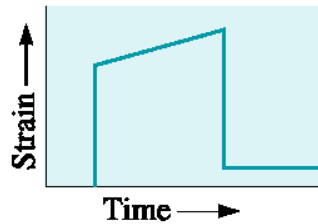
(a) Sollecitazioni a trazione, compressione, taglio e flessione. (b) Definizione del modulo di Young per il materiale elastico. (c) Per materiali non lineari, si usa la pendenza di una tangente come quantità variabile che sostituisce la costante di modulo di Young

Comportamento meccanico dei materiali



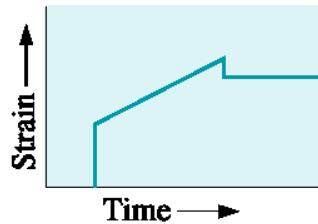
Vari tipi di sollecitazione in risposta a uno stress imposto. (Source: Reprinted from Materials Principles and Practice, by C. Newey and G. Weaver (Eds.), 1991 p. 300, Fig. 6-9. Copyright © 1991 Butterworth-Heinemann. Reprinted with permission from Elsevier Science.)

Comportamento meccanico dei materiali



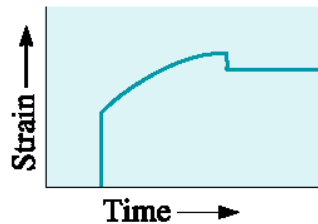
Rubbery: extensive elastic strain plus some nonrecoverable (plastic) strain

Elastomers (rubbers) and some thermoplastics at temperatures above the viscoelastic range



Viscous flow: behaves like a viscous liquid, plastic flow increases with time, small elastic recovery when stress is removed

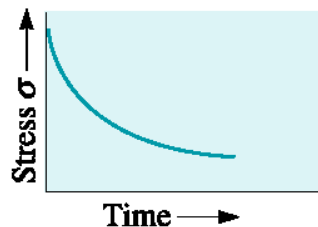
Thermoplastics and glasses well above T_g , some metals above $0.5 T_m$ under special conditions



Creep: plastic strain increasing with time, some elastic recovery when stress is removed

Metals and ceramics above about $0.4 T_m$

(b) Stress response



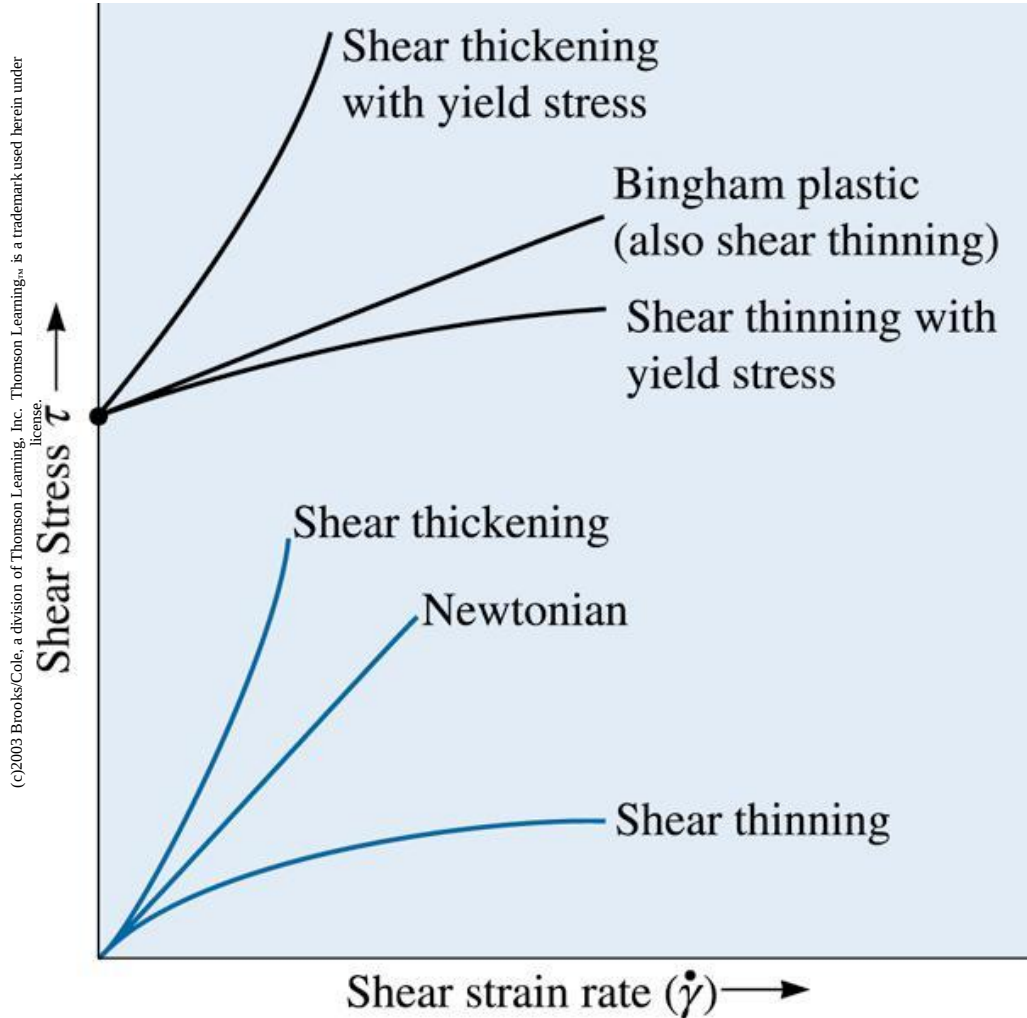
Strain is constant, stress decreases with time.

Thermoplastics

Vari tipi di sollecitazione in risposta a uno stress imposto. (Source: Reprinted from Materials Principles and Practice, by C. Newey and G. Weaver (Eds.), 1991 p. 300, Fig. 6-9. Copyright © 1991 Butterworth-Heinemann. Reprinted with permission from Elsevier Science.)

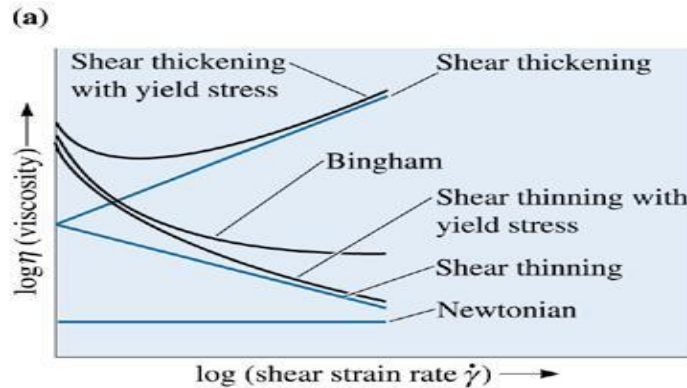
Tipo di deformazione	Risposta nel tempo	Recupero della deformazione	Relazione $\sigma\varepsilon$
Elastica pura	istantanea	reversibile	lineare
Elastica		reversibile	
Plastica	istantanea	permanente	Non lineare
viscoelastica	Dipendente dal tempo	Ritardata <i>permanente</i>	Non lineare

Comportamento reologico dei materiali



Rapporti tra
deformazione e
sollecitazione a taglio
per materiali
newtoniani e non
newtoniani

Comportamento reologico dei materiali



Viscosità apparente in funzione della velocità di deformazione del ceppo di taglio (velocità di taglio $\dot{\gamma}$)

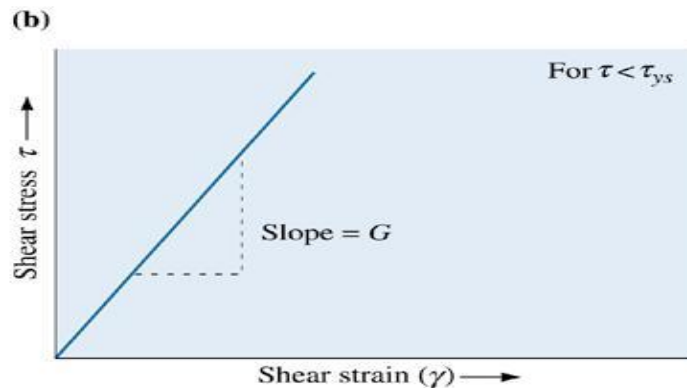
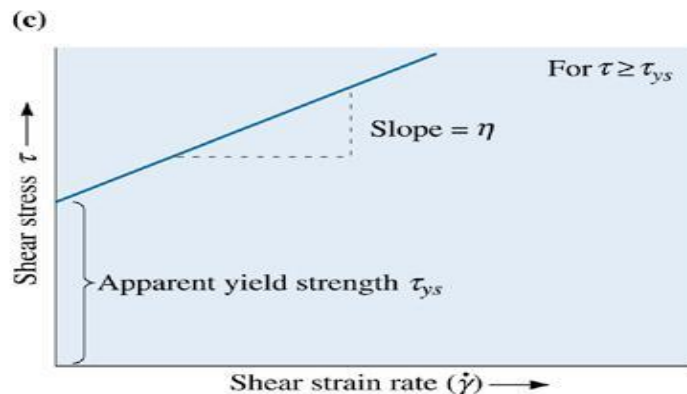


Illustrazione di una plastica di Bingham, ovvero dei fluidi che presentano comportamento di tipo plastico ed iniziano a scorrere solo dopo che la forza di taglio ha superato un certo valore soglia, σ_0 , che prende il nome di "limite di scorrimento".



Notare che l'asse x su (b) è una deformazione di taglio

Sforzo e deformazione

- **Sforzo**: definito come la sollecitazione che agisce su un elemento unitario di un corpo soggetto ad un sistema di forze (e connesse reazioni vincolari).
- La corretta valutazione dello sforzo che agisce su un corpo può derivare dalla misurazione della **deformazione** del corpo ovvero della variazione della forma rapportata alla forma iniziale.

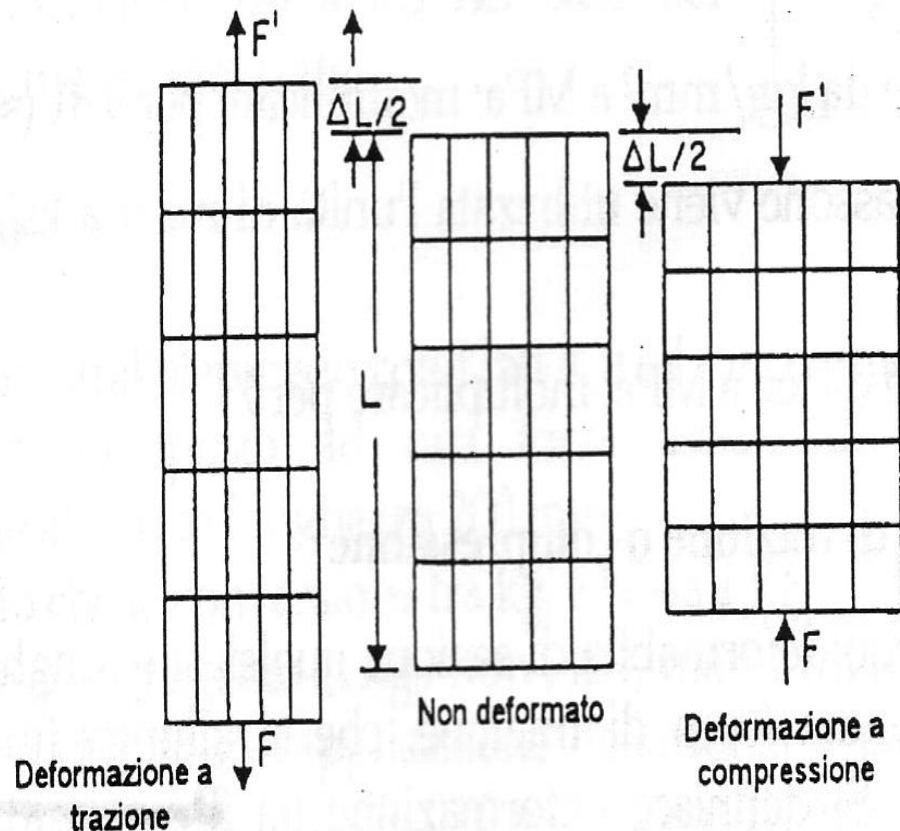
Sforzo e deformazione

I quattro principali tipi di sforzo e connessa deformazione sono:

1. Trazione e compressione
2. Taglio
3. Flessione
4. Torsione

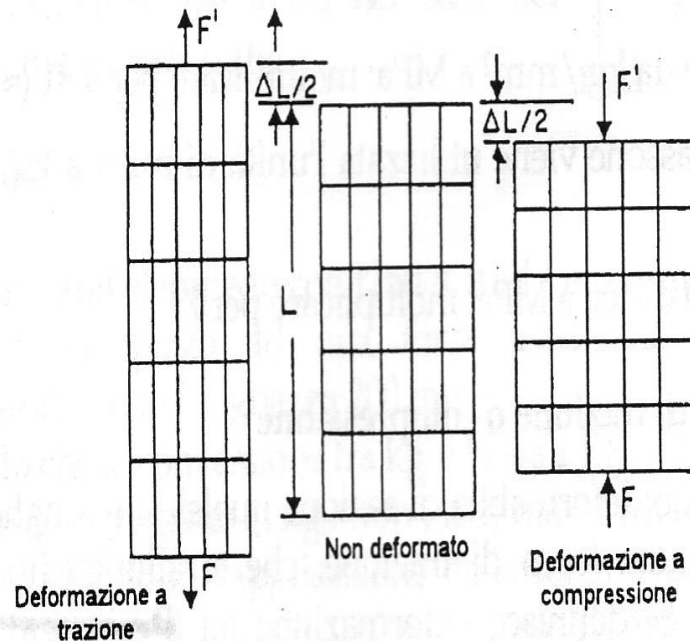
Trazione e compressione assiale

Un corpo è soggetto a trazione (o compressione) quando viene sollecitato da due forze esterne (o da una forza ed una reazione vincolare) allineate tra loro ma opposte e della stessa entità.



Trazione e compressione assiale

Lo sforzo di trazione o compressione (σ) è pari alla forza applicata (F) diviso la sezione resistente (A_0).



Lo sforzo è di trazione se le forze tendono ad allungarlo, di compressione se tendono ad accorciarlo.

Sforzo

Lo sforzo si misura in N/m^2 , cioè in Pascal.

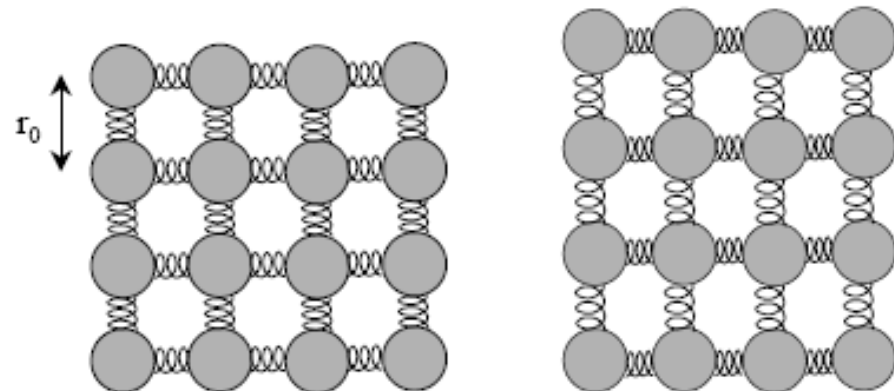
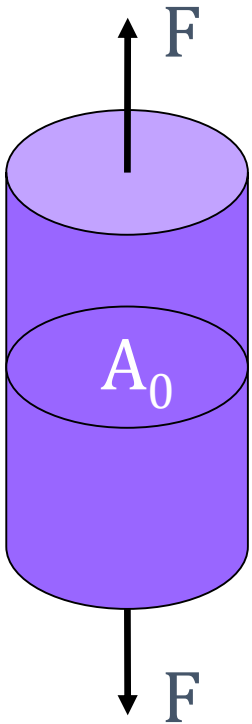
$$1Mpa = 10^6 Pa = 10^6 N / m^2 = 1N / mm^2$$

$$1Gpa = 10^9 Pa = 10^9 N / m^2 = 10^3 N / mm^2$$

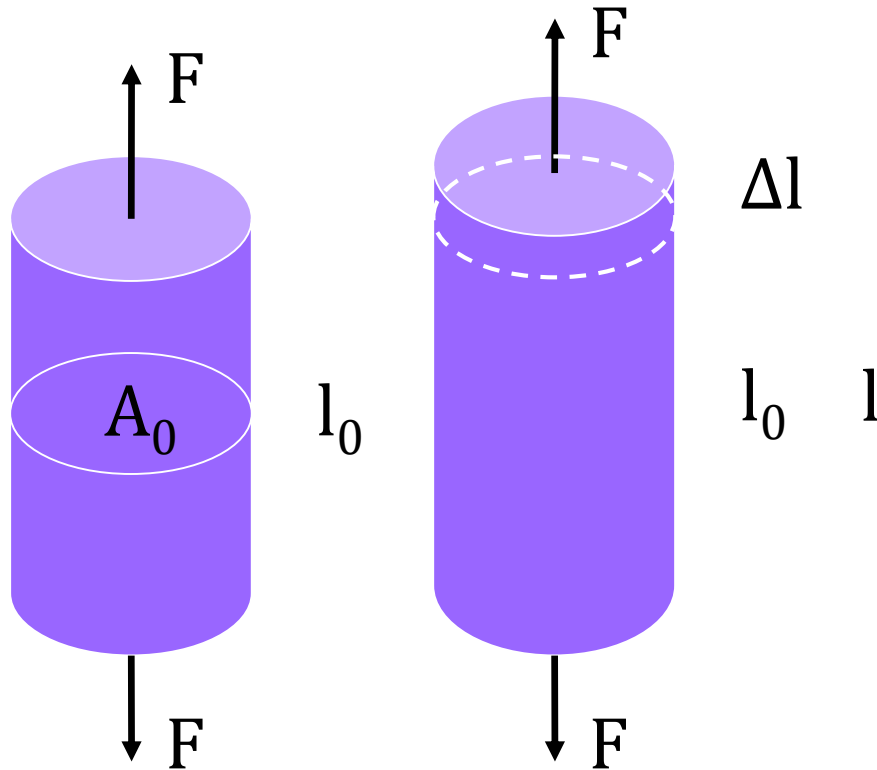
$$1kg_f = 9,81N$$

$$1kg_f / mm^2 = 9,81N / mm^2 = 9,81Mpa$$

$$1ksi = 7Mpa$$



Deformazione di trazione o compressione



Deformazione

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

Deformazione percentuale

$$\varepsilon\% = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100 = \varepsilon \cdot 100$$

Relazione sforzo – deformazione

Modulo di elasticità

E' stato sperimentalmente provato (**legge di Hooke**) che, finché si resta nel campo delle piccole deformazioni, esiste una relazione di proporzionalità tra sforzo e deformazione.

$$\sigma = E \varepsilon \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

E = Modulo di elasticità o modulo di Young (MPa)

- diamante: 1000 GPa
- materiali metallici: 70-230 GPa
- polimeri comuni: 2-8 GPa

Esercizio

Esercizio numerico

Domande:

Un parallelepipedo con i lati a , b ed l_0 inizialmente di lunghezza 10, 20 e 100 mm è soggetto ad una forza F di 8150 kg_f allineata con l'asse l_0 . Sapendo che il modulo di elasticità del materiale è 200 GPa, calcolare la deformazione, la deformazione percentuale e la lunghezza finale l del parallelepipedo.

Contrazione laterale: coefficiente di Poisson

Se un corpo è soggetto ad una forza di trazione lungo z , esso subisce un allungamento ε_z in tale direzione e una contrazione laterale lungo gli assi x ($-\varepsilon_x$) ed y ($-\varepsilon_y$).

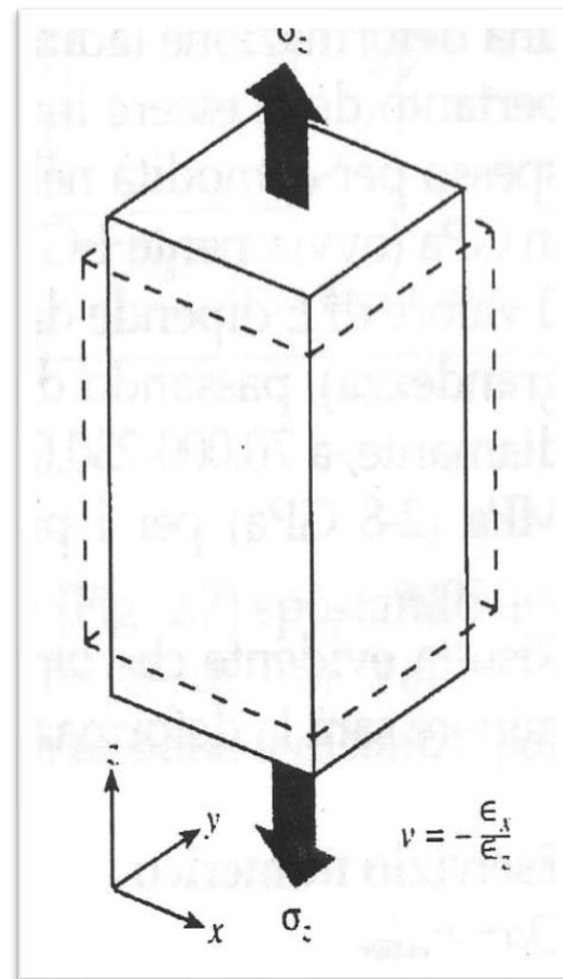
Se il corpo ha comportamento isotropo ε_x ed ε_y sono uguali.

Si definisce coefficiente di Poisson (ν) il rapporto tra la contrazione laterale ε_x ed ε_y e l'allungamento longitudinale ($+\varepsilon_z$):

$$\nu = \frac{\varepsilon_{laterale}}{\varepsilon_{longitudinale}} = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z}$$

Metalli: $\nu \sim 0.25-0.4$

Polimeri: $\nu \sim 0.4$



Relazione lineare tra sforzo applicato e deformazione laterale

$$\varepsilon_x = -\varepsilon_y / \nu$$

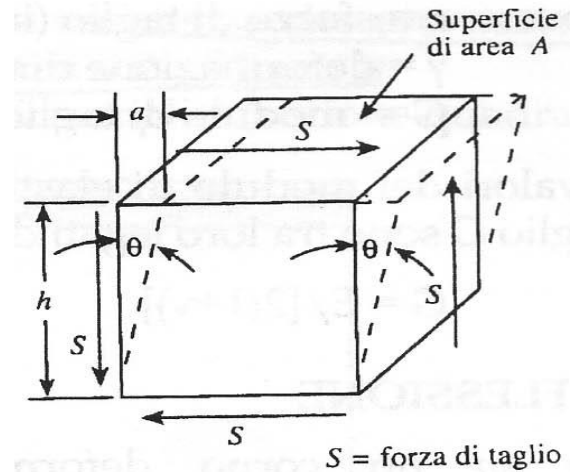
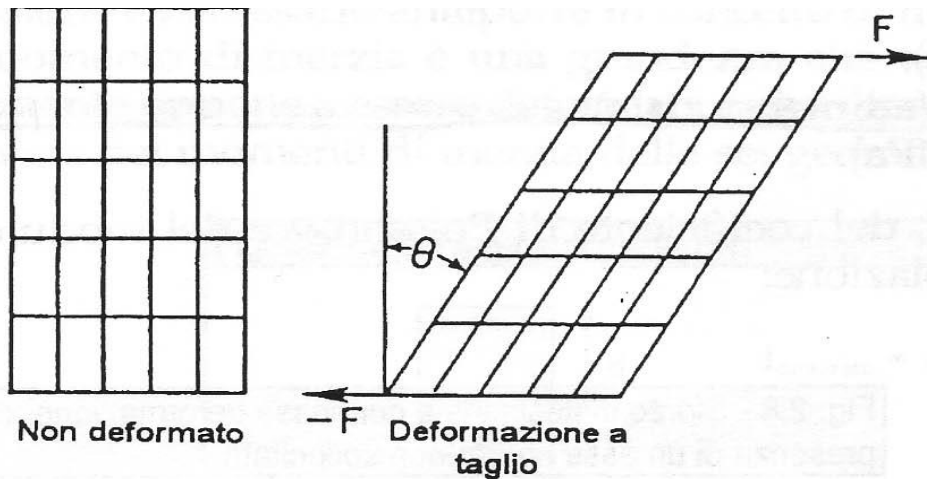
$$\sigma_x = E \varepsilon_x$$

$$\sigma_x = -\varepsilon_y \frac{E}{\nu}$$

<i>Metalli</i>	Modulo di Poisson ν	<i>Polimeri</i>	Modulo di Poisson ν	<i>Ceramici</i>	Modulo di Poisson ν
Argento	0.38	Polistirene	0.40	TiC	0.19
Titanio	0.36	Polietilene	0.40	MgO	0.19
Acciaio dolce	0.29	Gomma naturale	0.49	Al ₂ O ₃	0.23
Ottone (70Cu – 30Zn)	0.34	Resina epossidica	0.33	Vetro di silice	0.20

Taglio

Un corpo deformabile è soggetto a taglio quando su di esso agiscono due forze esterne (o una forza e una reazione) tra loro uguali e contrarie poste su due piani paralleli.



Se su una superficie di area A agiscono due forze S uguali e contrarie posizionate su due piani paralleli, esso è soggetto ad uno sforzo di taglio τ pari a:

$$\tau = \frac{\text{forza di taglio}}{\text{sezione interessata}} = \frac{S}{A}$$

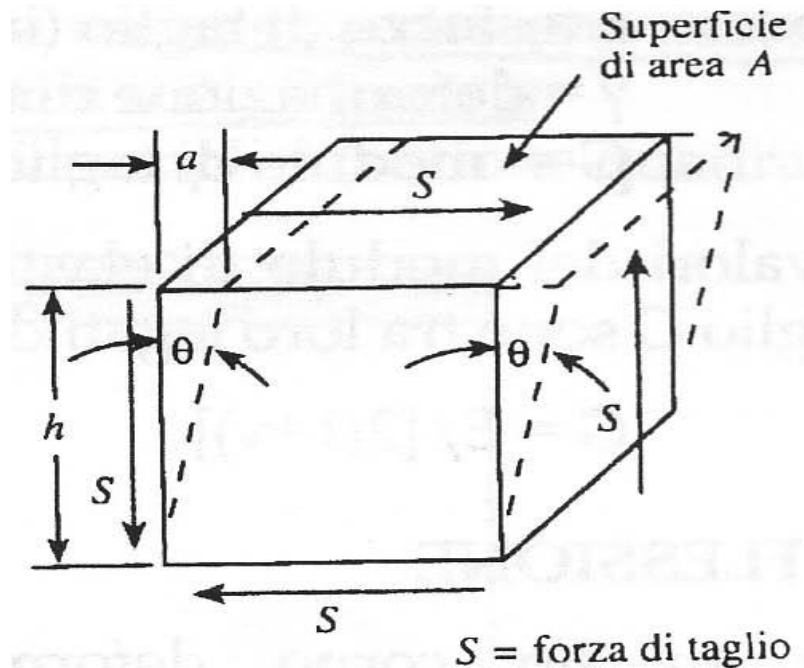
Deformazione di taglio

Un corpo soggetto a sforzo di taglio si deforma spostando uno rispetto all'altro i due piani di applicazione della forza di un valore a . Se le superfici di applicazione delle forze sono distanti h , si definisce deformazione di taglio:

$$\gamma = \frac{\text{spostamento}}{\text{distanza}} = \frac{a}{h} = \tan \Theta$$

Poiché Θ normalmente è molto piccolo, in prima approssimazione

$$\tan \Theta = \Theta \quad \Rightarrow \quad \gamma = \Theta$$

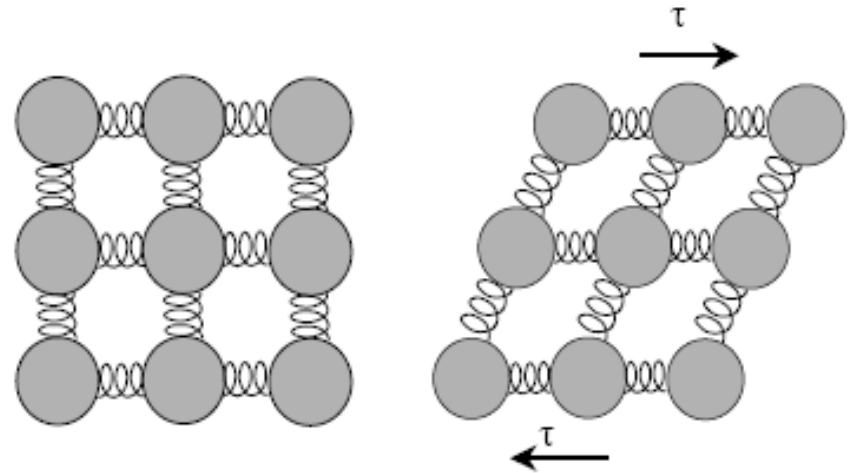


Relazione sforzo – deformazione

Modulo di taglio

Se il taglio è puramente elastico, esiste una relazione di proporzionalità tra lo sforzo τ e la deformazione γ di taglio.

G = Modulo di taglio



Esercizio

Esercizio numerico

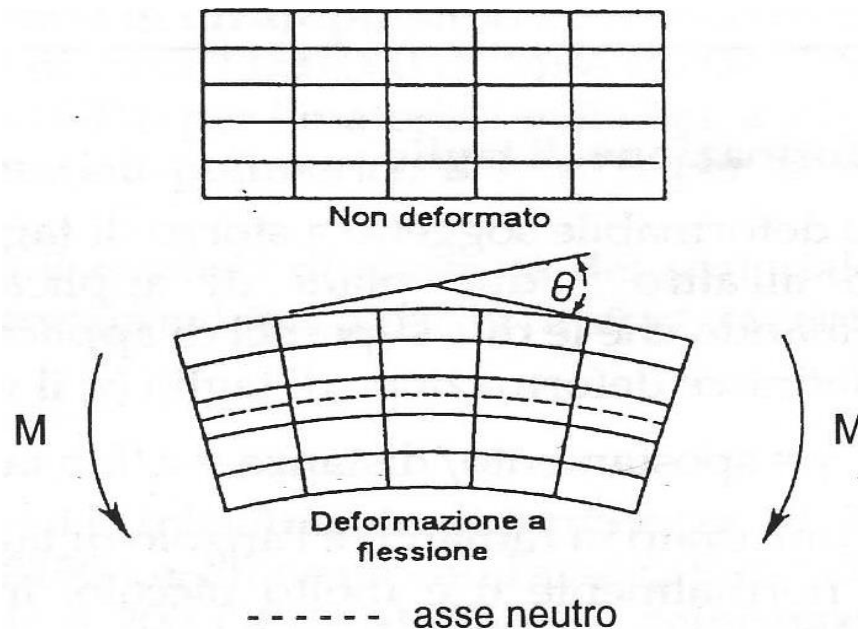
Domande:

Si consideri un parallelepipedo con i lati a , b e l di lunghezza 5, 10 e 40 cm soggetto a due forze S_1 e S_2 uguali ed opposte pari a 200 kN che agiscono sulle superfici parallele a - b .

1. Calcolare lo sforzo di taglio τ in MPa ed in kgf/mm^2 .
2. Ipotizzando che la deformazione di taglio sia pari al 2%, calcolare di quanto trasla il punto di applicazione di S_2 rispetto a quello di applicazione di S_1 .

Flessione

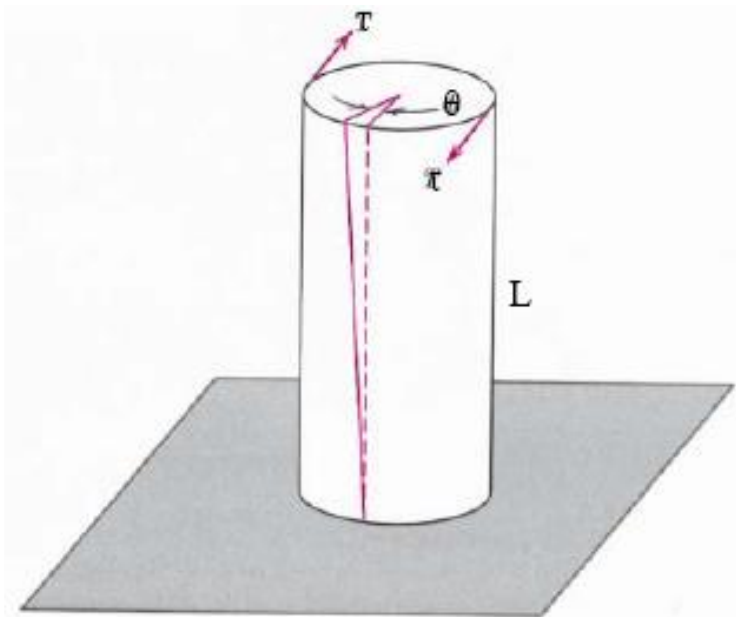
Se su un corpo deformabile agiscono due momenti uguali ed opposti, esso è soggetto ad un momento flettente, che determina una deformazione di flessione.



In disegno, nella metà superiore le fibre sono tese, nella metà inferiore le fibre sono compresse. Lungo l'asse neutro le fibre non sono sollecitate.

Torsione

La torsione è la sollecitazione che si verifica quando la forza applicata è perpendicolare all'asse ma non passa per esso. Viene determinata una deformazione a torsione.



Deformazione: angolo determinato dalla torsione

$$\gamma \approx \tan \gamma = \frac{\theta r}{L}$$

sforzo di taglio $\tau = \mathbf{G} \gamma$

G = modulo elastico tangenziale o di rigidità

Relazioni tra i moduli elastici

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

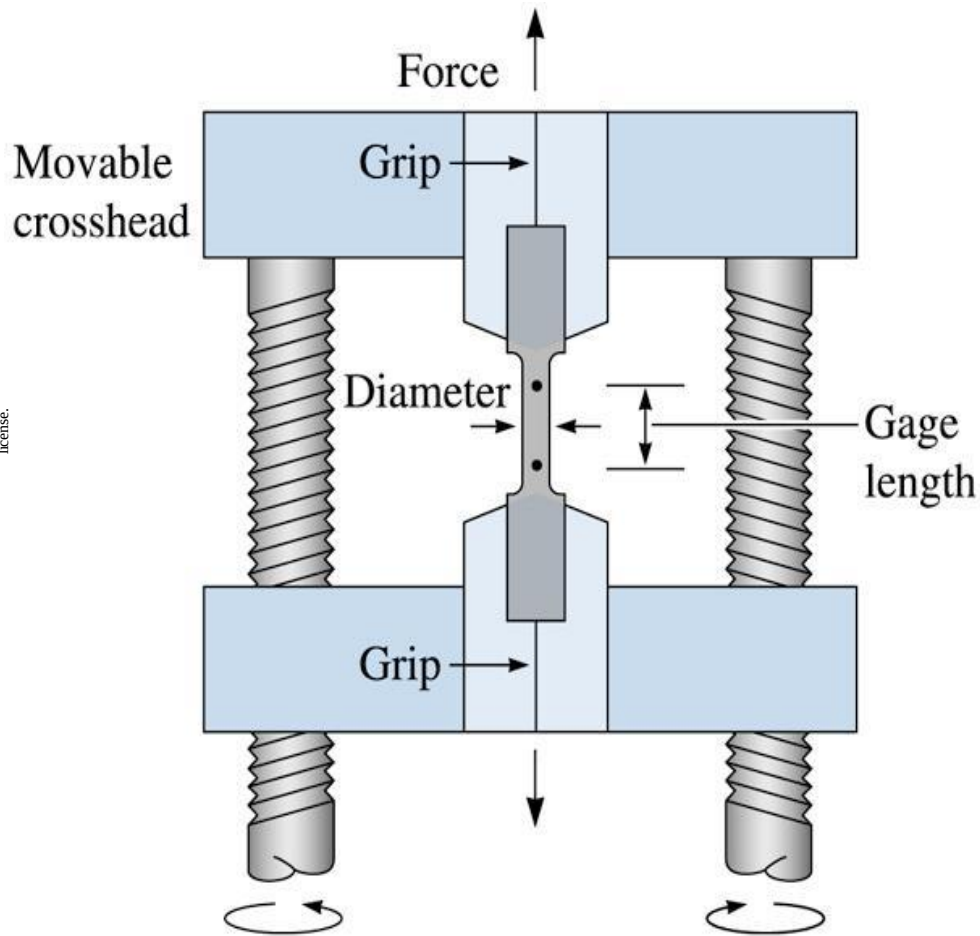
Solo per materiali isotropi e omogenei

Il test a trazione e il diagramma sforzo-deformazione

Terminologia:

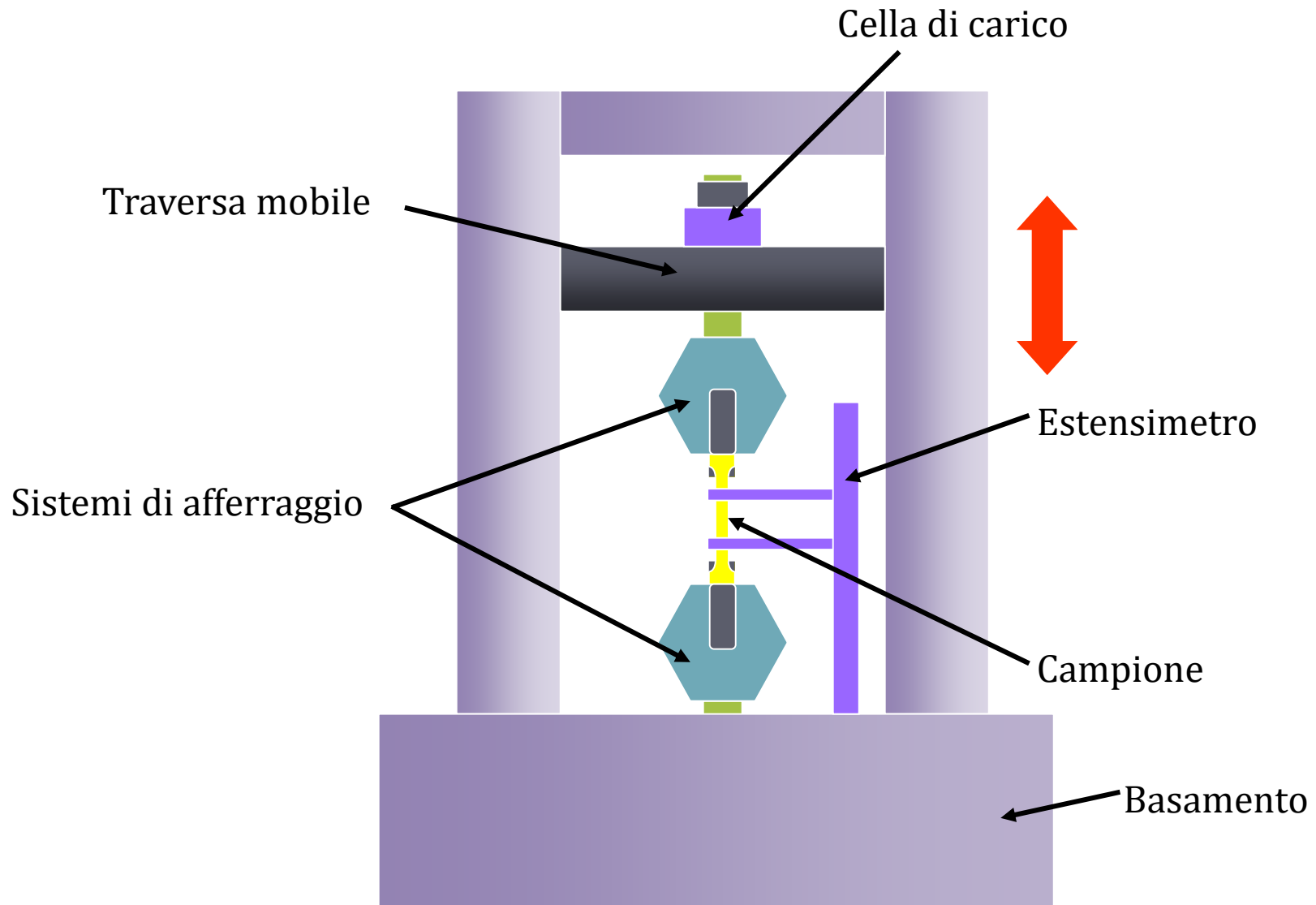
- **Carico:** forza applicata a un materiale durante il test.
- **Estensimetro o strain gage:** un dispositivo utilizzato per misurare i cambiamenti di lunghezza e quindi la deformazione.
- **Stress o sforzo ingegneristico** - Il carico applicato, o forza, diviso per l'area della sezione trasversale originale del materiale.
- **Deformazione ingegneristica** - La quantità di deformazione di un materiale per unità di lunghezza in una prova di trazione.

Il test a trazione

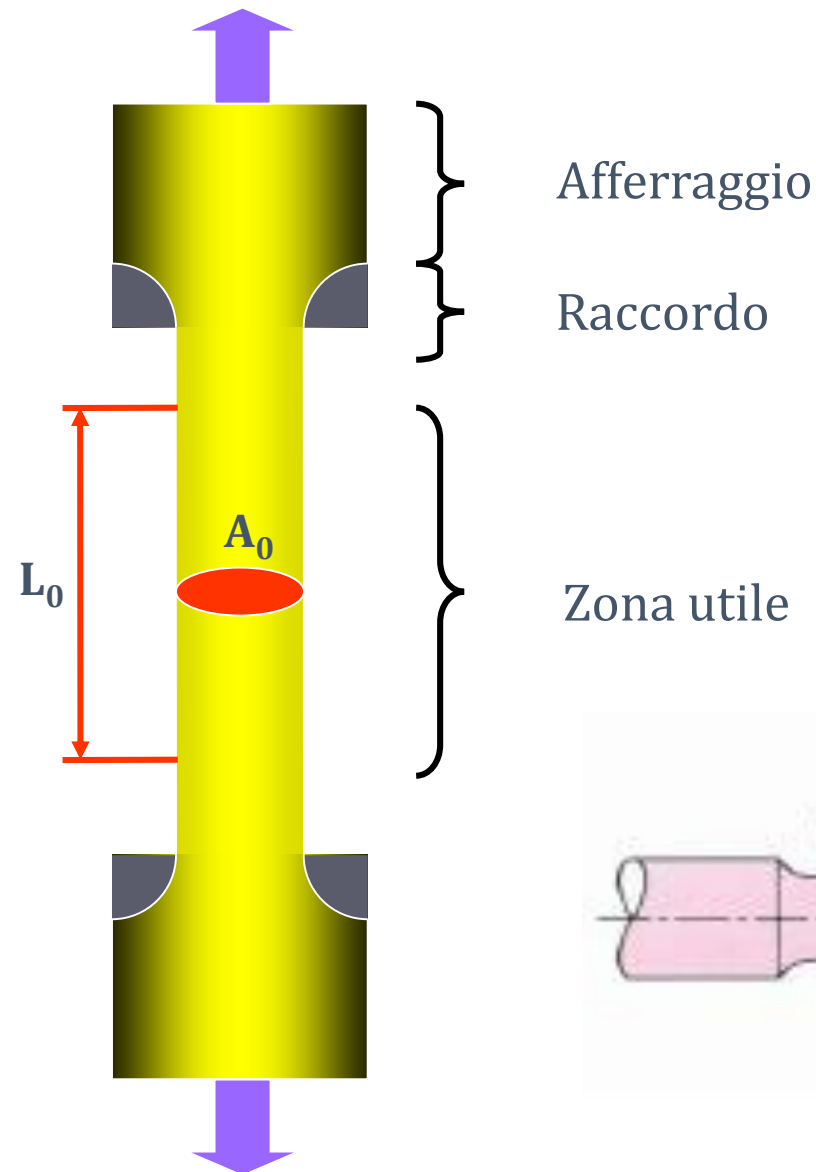


Una forza unidirezionale viene applicata a un campione nella prova di trazione mediante la traversa mobile. Il movimento della testa a croce può essere eseguito mediante viti o un meccanismo idraulico

Prova di trazione

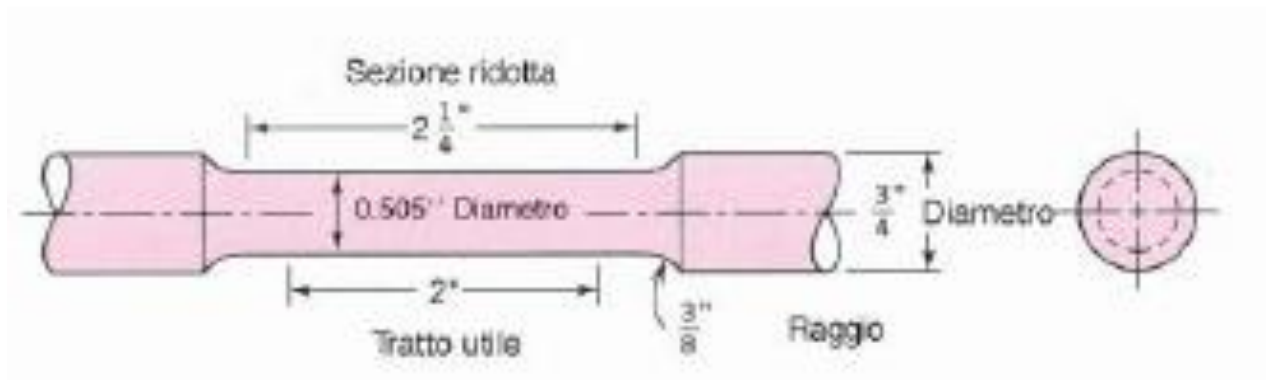


Prova di trazione

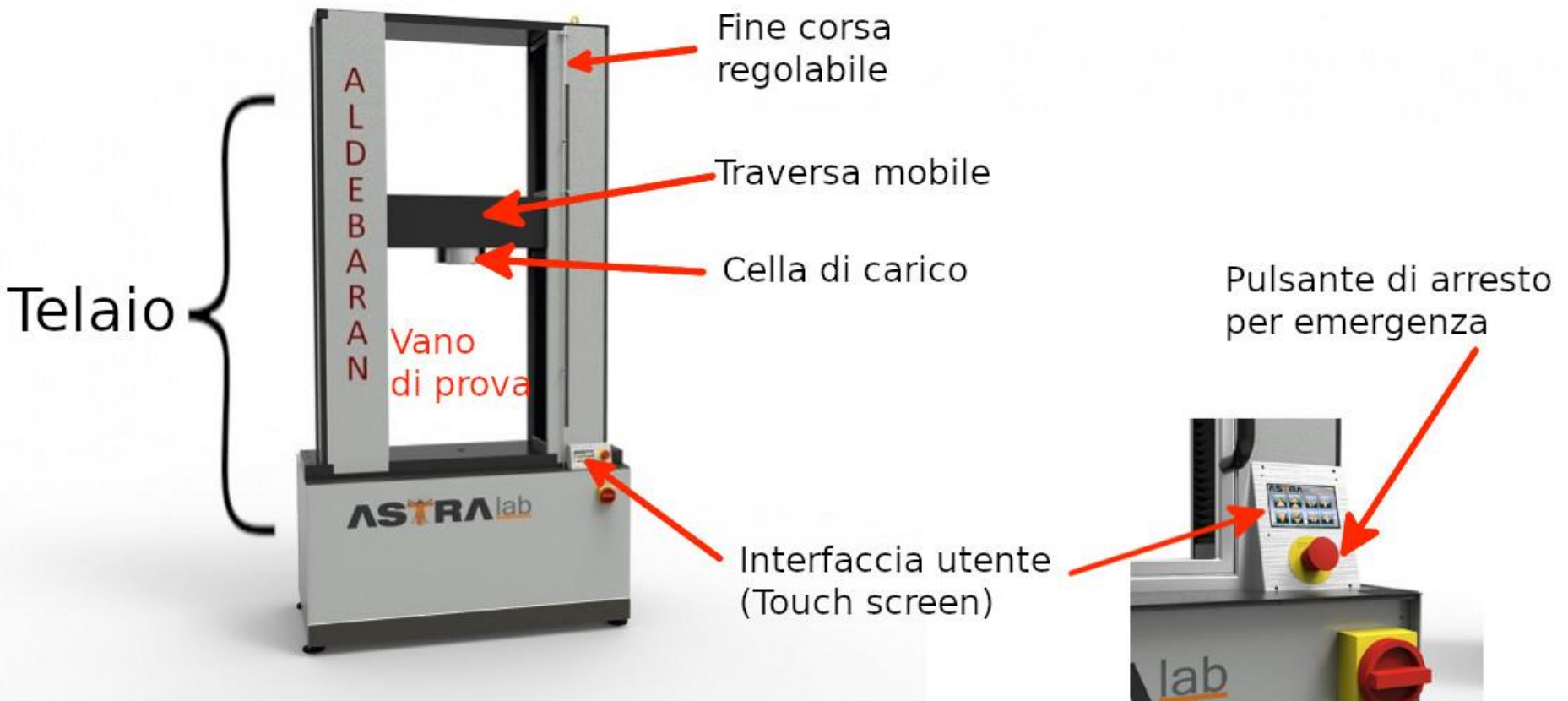


$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

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



Macchina di prova universale



Macchina di prova universale



Macchina di prova universale



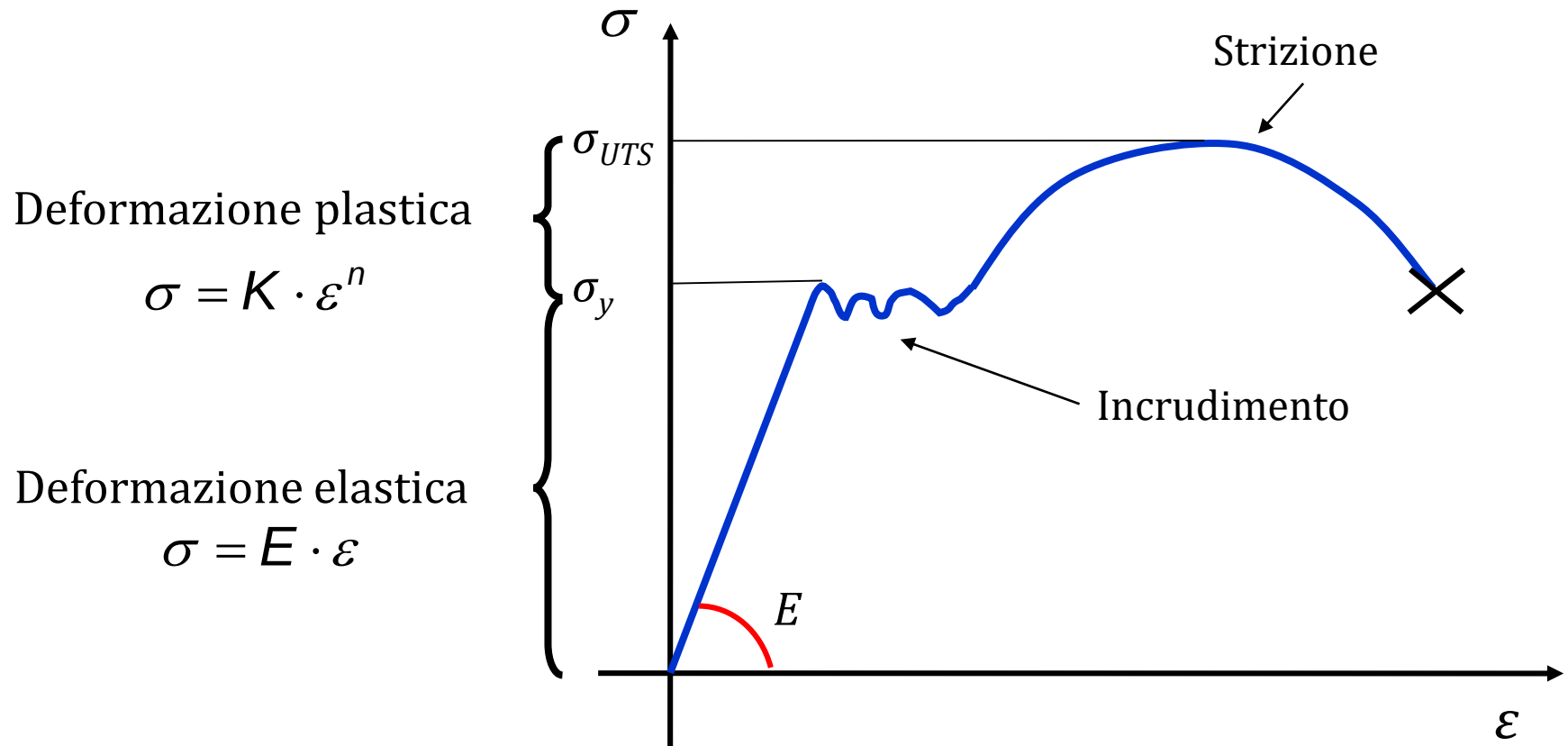
Esempio di risultati sperimentali ottenuti dal test a trazione

TABLE 6-1 ■ *The results of a tensile test of a 0.505-in. diameter aluminum alloy test bar, initial length (l_0) = 2 in.*

Measured Change in Length (Δl)		Calculated	
		Stress (psi)	Strain (in./in.)
Load (lb)	(in.)		
0	0.000	0	0
1000	0.001	5,000	0.0005
3000	0.003	15,000	0.0015
5000	0.005	25,000	0.0025
7000	0.007	35,000	0.0035
7500	0.030	37,500	0.0150
7900	0.080	39,500	0.0400
8000 (maximum load)	0.120	40,000	0.0600
7950	0.160	39,700	0.0800
7600 (fracture)	0.205	38,000	0.1025

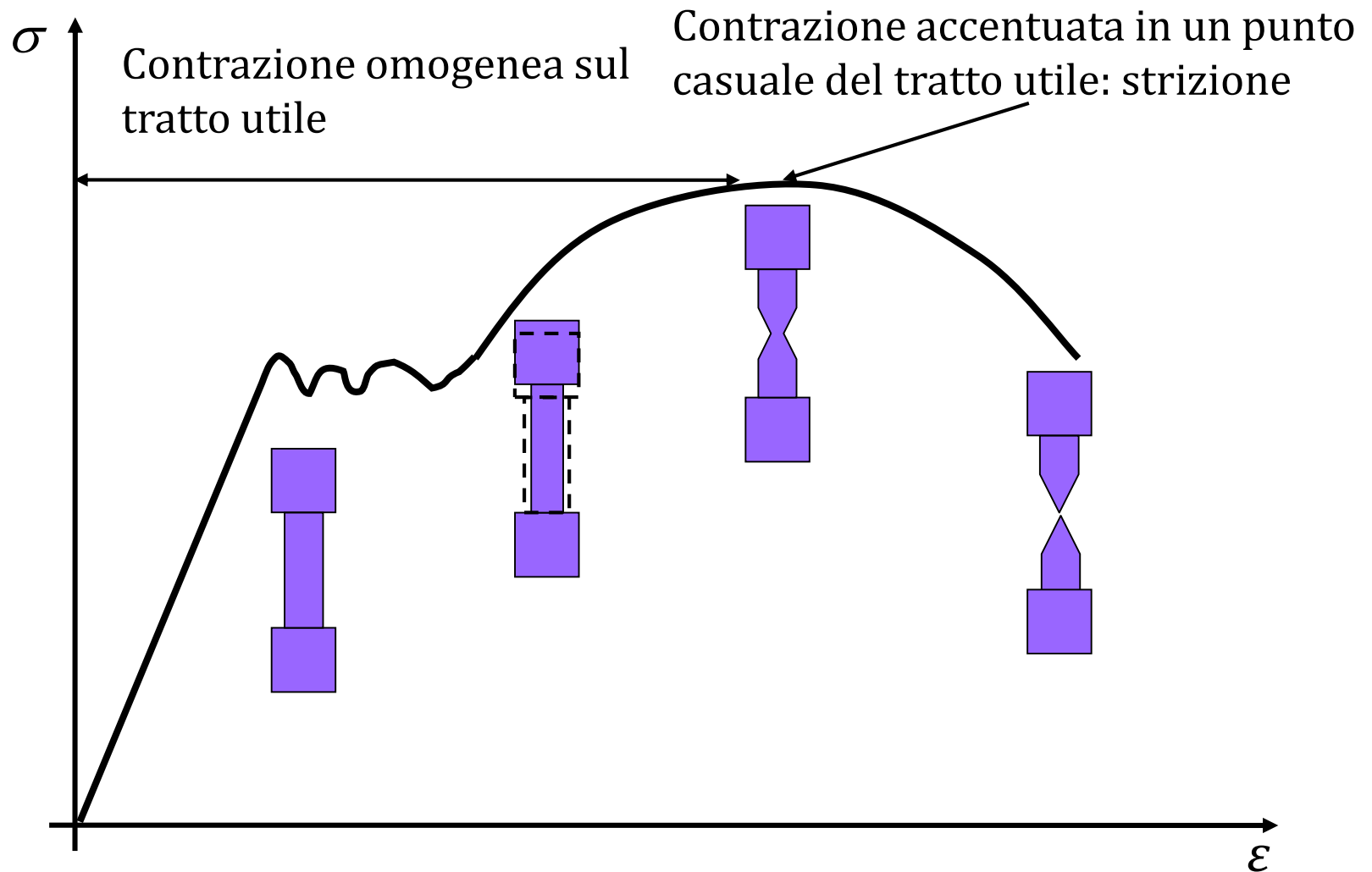
Prova di trazione

Prova di trazione a freddo di materiali metallici

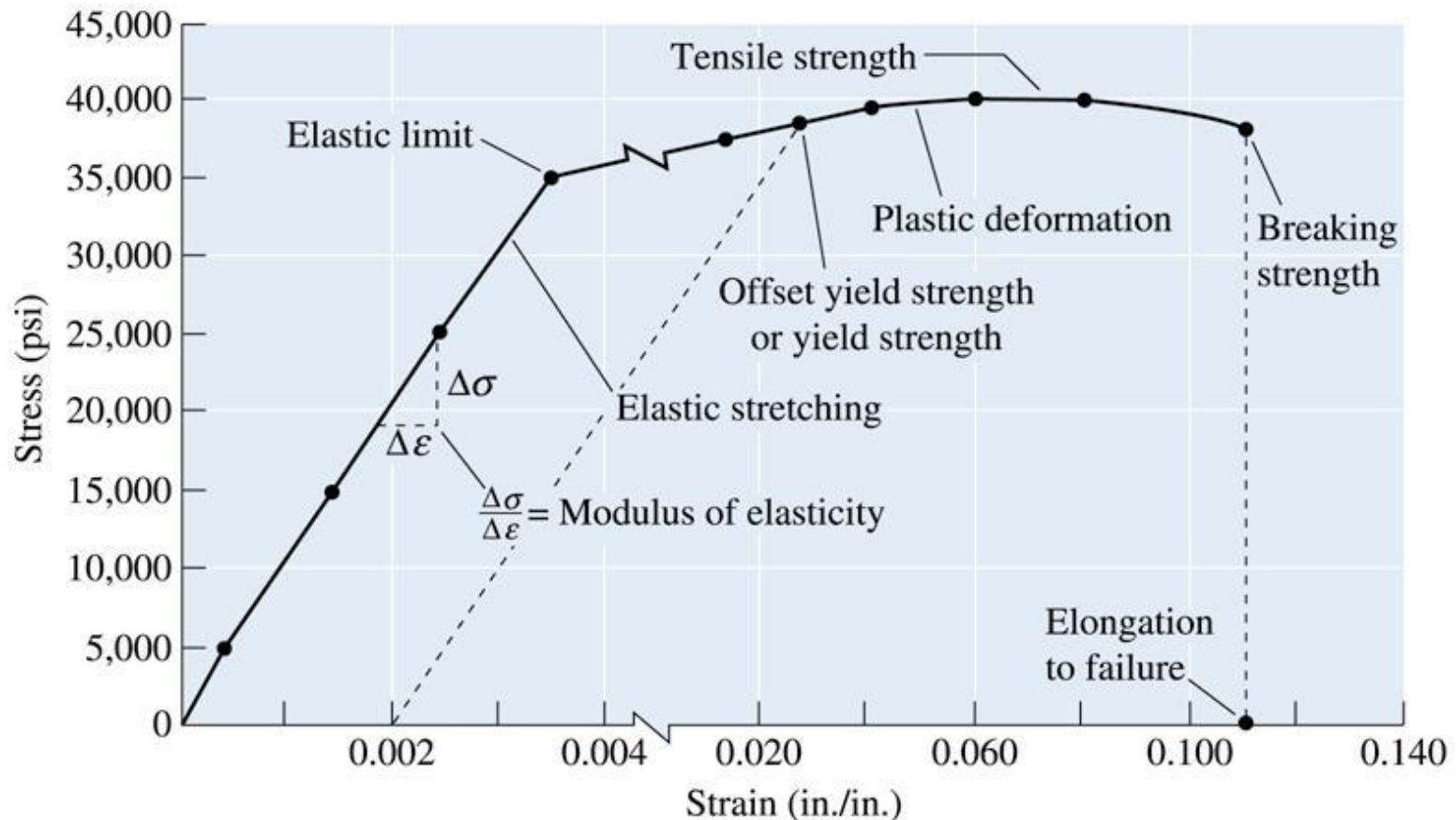


σ_y : valore dello sforzo nominale a partire dal quale il materiale comincia a deformarsi plasticamente (spesso si usa un carico di snervamento convenzionale)

Prova di trazione



Esempio di risultati sperimentali ottenuti dal test a trazione (espressi in forma grafica: diagramma sforzo-deformazione)

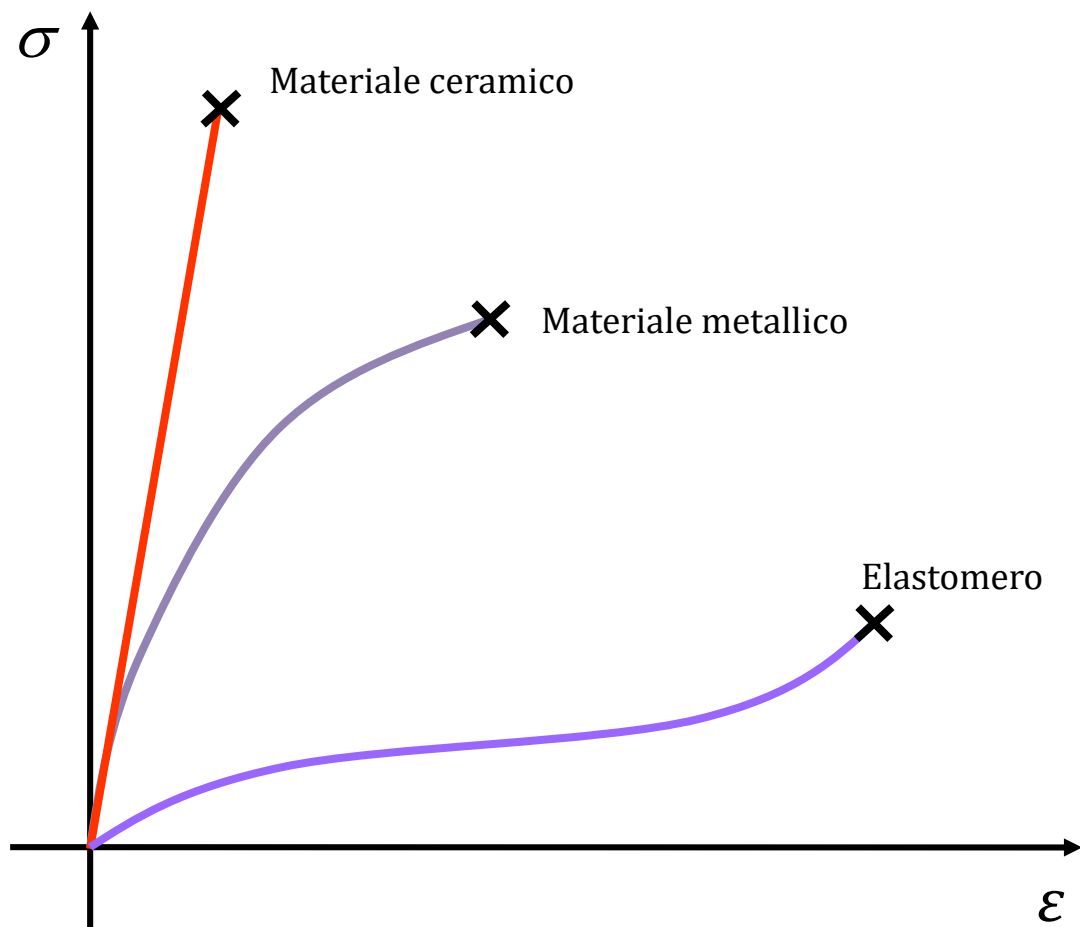


(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning, Inc. is a trademark used herein under license.

La curva sforzo-deformazione per la lega di alluminio della tabella Table 6-1

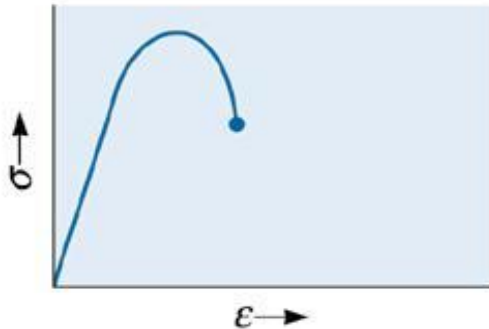
Prova di trazione

Confronto tra vari tipi di materiali

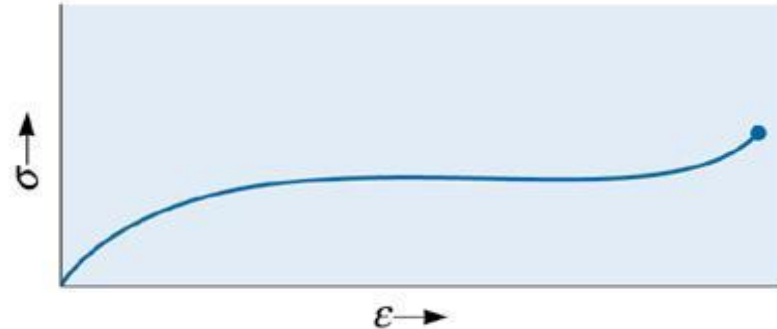


Tipici diagrammi sforzo-deformazione

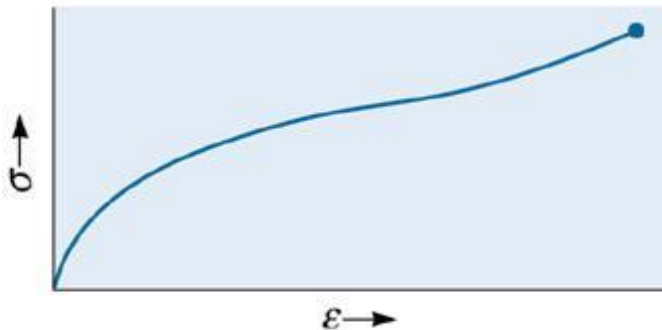
(a) Metal



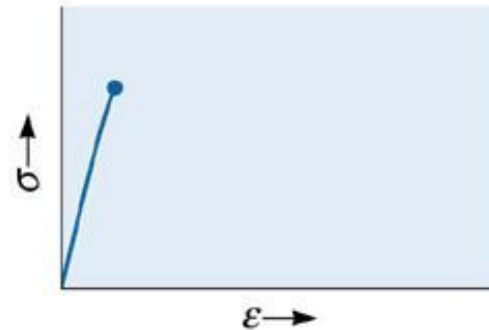
(b) Thermoplastic material above T_g



(c) Elastomer



(d) Ceramics, glasses, and concrete



Curva sforzo-deformazione per diversi classi di materiali.
NB I grafici sono qualitative.

TABLE 6-2 ■ Units and conversion factors

1 pound (lb) = 4.448 Newtons (N)

1 psi = pounds per square inch

1 MPa = MegaPascal = MegaNewtons per square meter (MN/m^2)
= Newtons per square millimeter (N/mm^2) = 1,000,000 Pa

1 GPa = 1000 MPa = GigaPascal

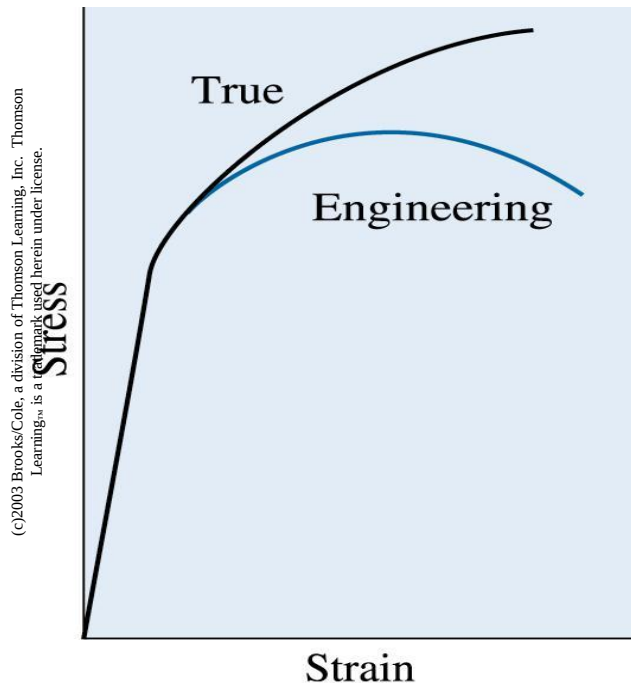
1 ksi = 1000 psi = 6.895 MPa

1 psi = 0.006895 MPa

1 MPa = 0.145 ksi = 145 psi

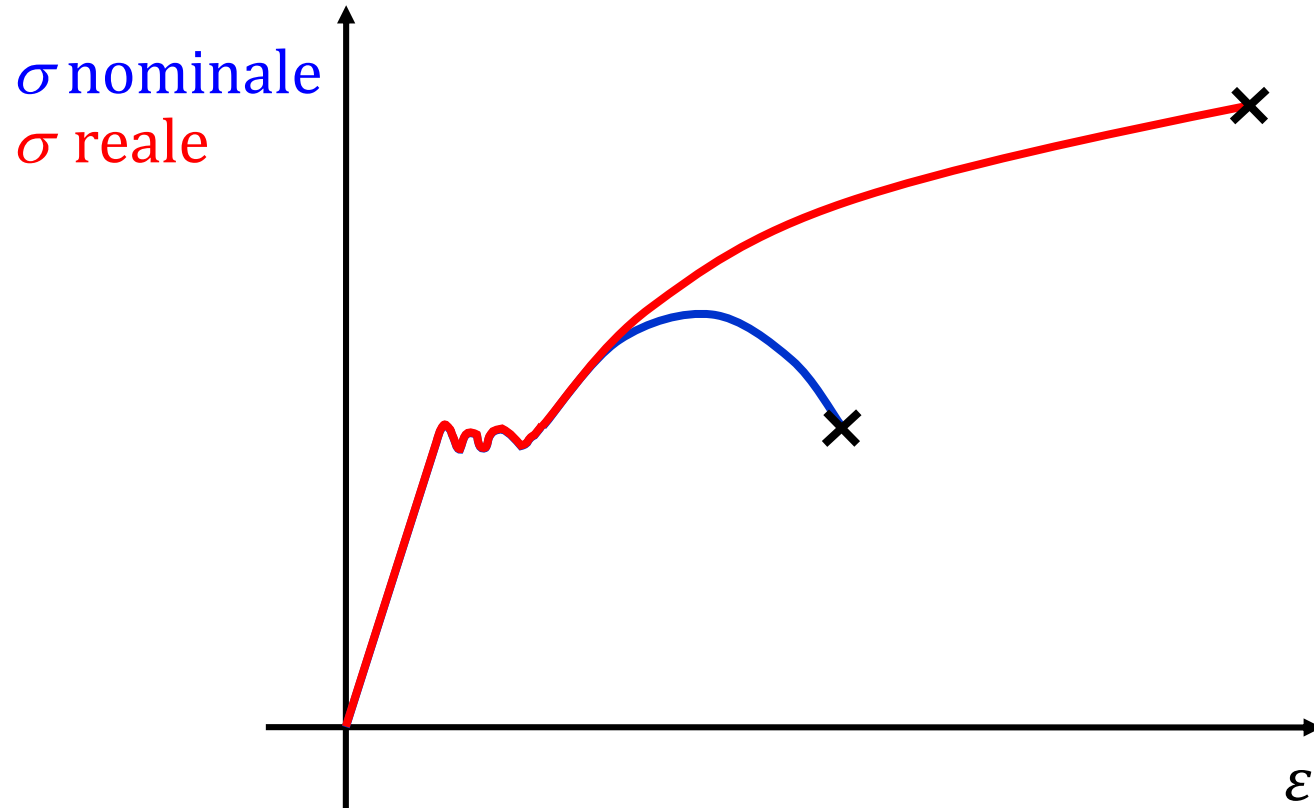
Stress e deformazione reali

- **Stress reale:** Il carico diviso per l'area della sezione trasversale effettiva del campione a quel carico.
- **Deformazione reale:** La deformazione calcolata utilizzando le dimensioni effettive e non originali, data da $\epsilon_t \ln(l/l_0)$.



La relazione tra il diagramma di deformazione – stress reale e il diagramma di deformazione – stress ingegneristico. Le curve sono identiche al punto di snervamento.

Stress e deformazione reali



Proprietà misurabili con il test a trazione

- **Limite elastico** (Elastic limit)
- **Sforzo o limite di snervamento** (Yield stress)
- **Resistenza a trazione** (Tensile strength)
- **Strizione** (Necking)
- **Legge di Hooke**
- **Coefficiente di Poisson** (Poisson's ratio)
- **Modulo di resilienza** (Modulus of resilience) (E_r)
- **Tenacità** (Tensile toughness)
- **Duttilità** (Ductility)

Proprietà misurabili con il test a trazione

Terminologia:

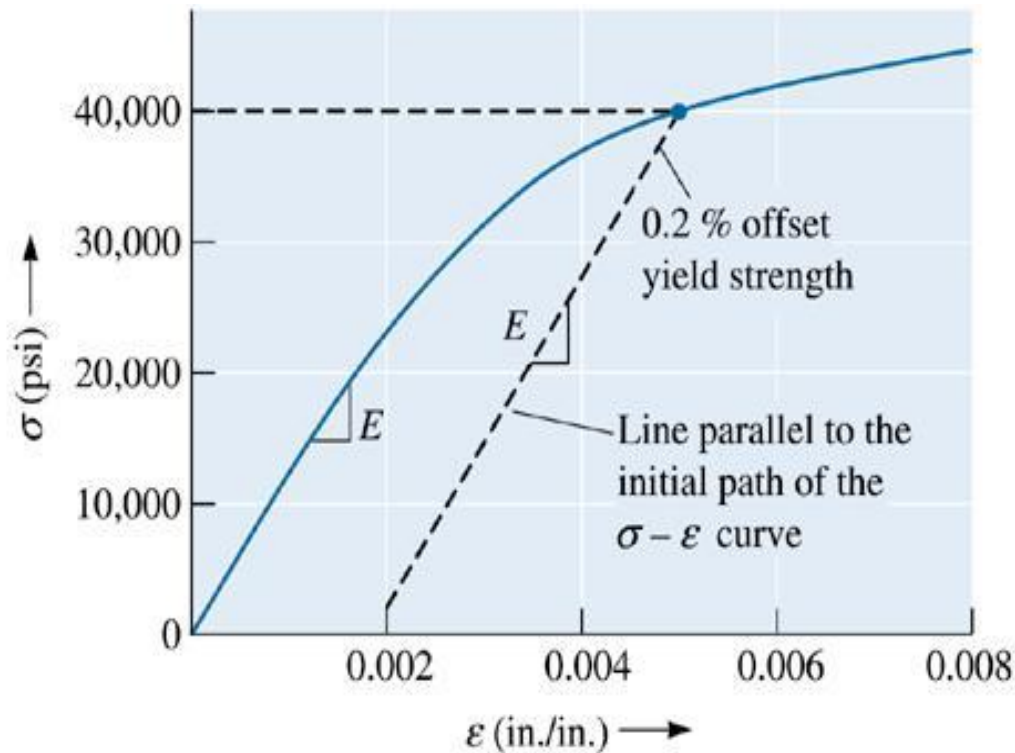
- **Limite elastico** (Elastic limit): valore di tensione in cui la curva $\sigma\varepsilon$ inizia a deviare dalla linea retta, ovvero dal comportamento lineare
- **Sforzo o limite di snervamento** (Yield stress): valore di tensione in corrispondenza del quale si ha un incremento di deformazione molto rapido senza un equivalente incremento di stress. Questo punto equivale al passaggio dallo stato elastico a quello plastico.
- **Resistenza a trazione** (Tensile strength): Carico di rottura (UTS), spesso abbreviato in resistenza alla trazione (TS) o la forza ultima, è lo sforzo massimo che un materiale può sopportare pur essendo sotto a trazione prima della strizione.
- **Strizione** (Necking): se sottoposto ad un certo carico, il provino mostra una contrazione della sezione ed è quella in cui avviene lo snervamento.

Proprietà misurabili con il test a trazione

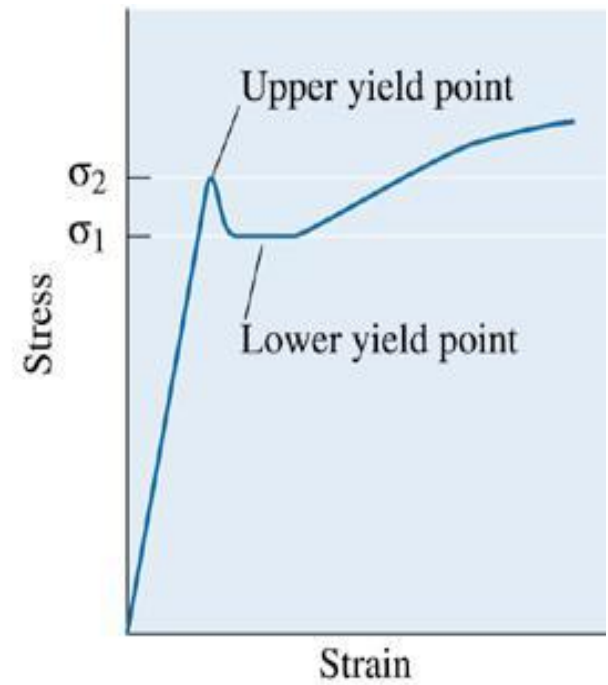
Terminologia:

- **Legge di Hooke:** $\sigma = E\varepsilon$
- **Coefficiente di Poisson** (Poisson's ratio): relazione tra deformazione longitudinale e trasversale
$$\nu = \frac{\varepsilon_{laterale}}{\varepsilon_{longitudinale}} = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z}$$
- **Modulo di resilienza** (Modulus of resilience) (E_r): energia di deformazione ad unità di volume immagazzinata quando la tensione è al limite di proporzionalità.
- **Tenacità** (Tensile toughness): energia assorbita nel campo elasto-plastico prima di arrivare a rottura
- **Duttilità** (Ductility): capacità del materiale di assorbire deformazioni elastiche senza rompersi

Yield Stress-Sforzo (o limite) di snervamento



(a)



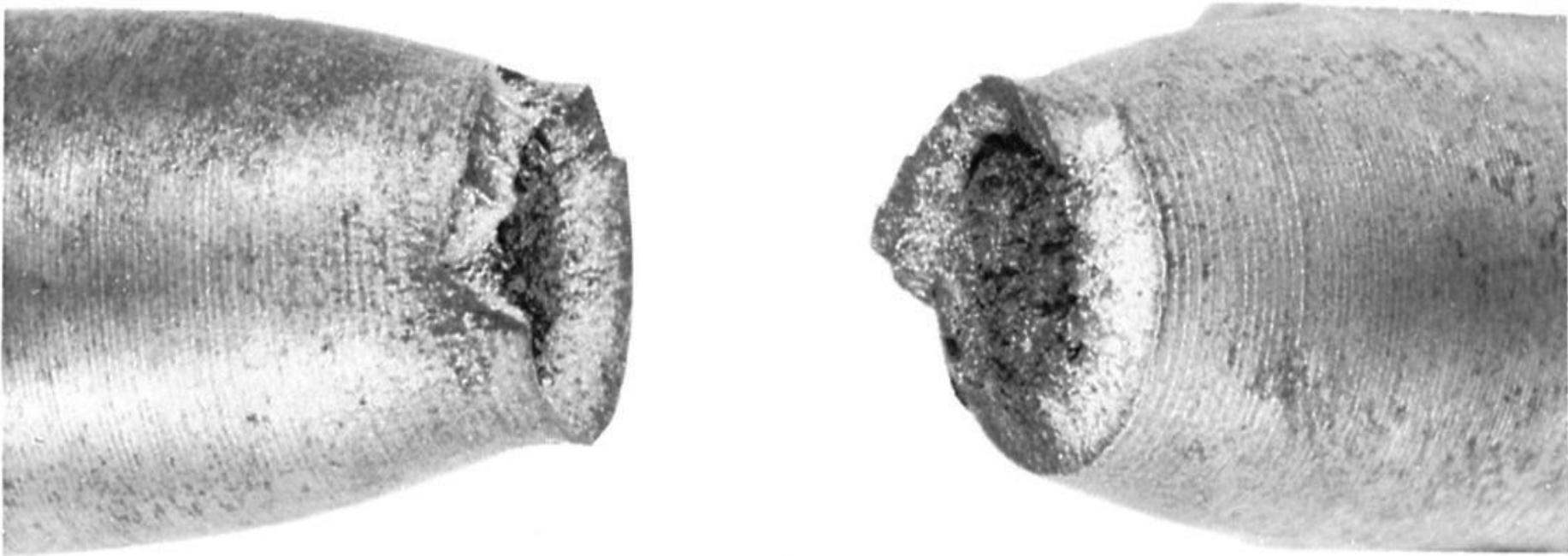
(b)

(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning[™] is a trademark used herein under license.

Valutazione della resistenza allo snervamento a 0,2% di deformazione per una ghisa grigia

Comportamento del punto di snervamento superiore e inferiore in un acciaio a basso tenore di carbonio

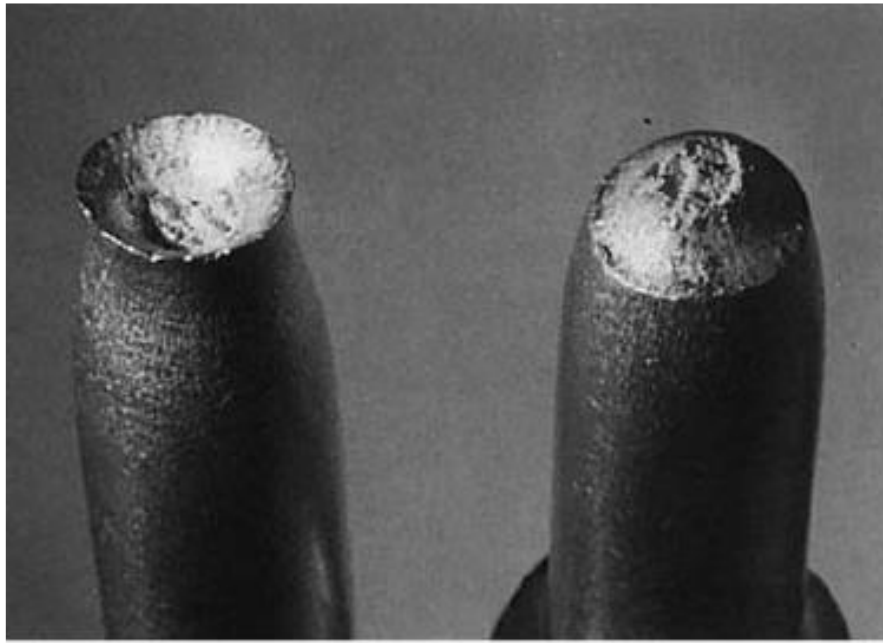
Superficie di frattura di un materiale duttile: coppa-cono



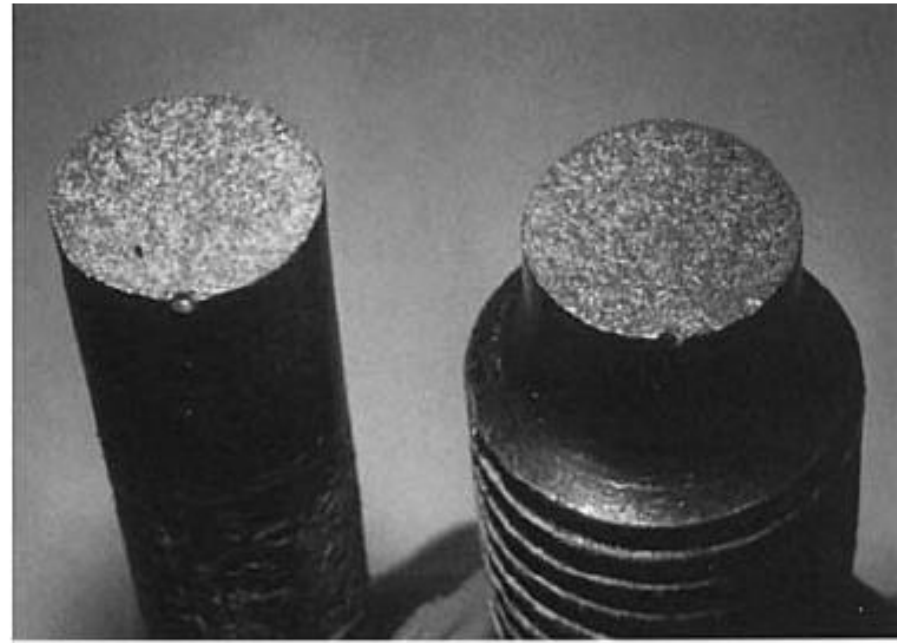
(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning[™] is a trademark used herein under license.

La deformazione localizzata di un materiale duttile durante una prova di trazione produce una regione in cui avviene la strizione. La micrografia mostra la regione del collo in un campione fratturato.

Superficie di frattura di un materiale duttile: coppa-cono



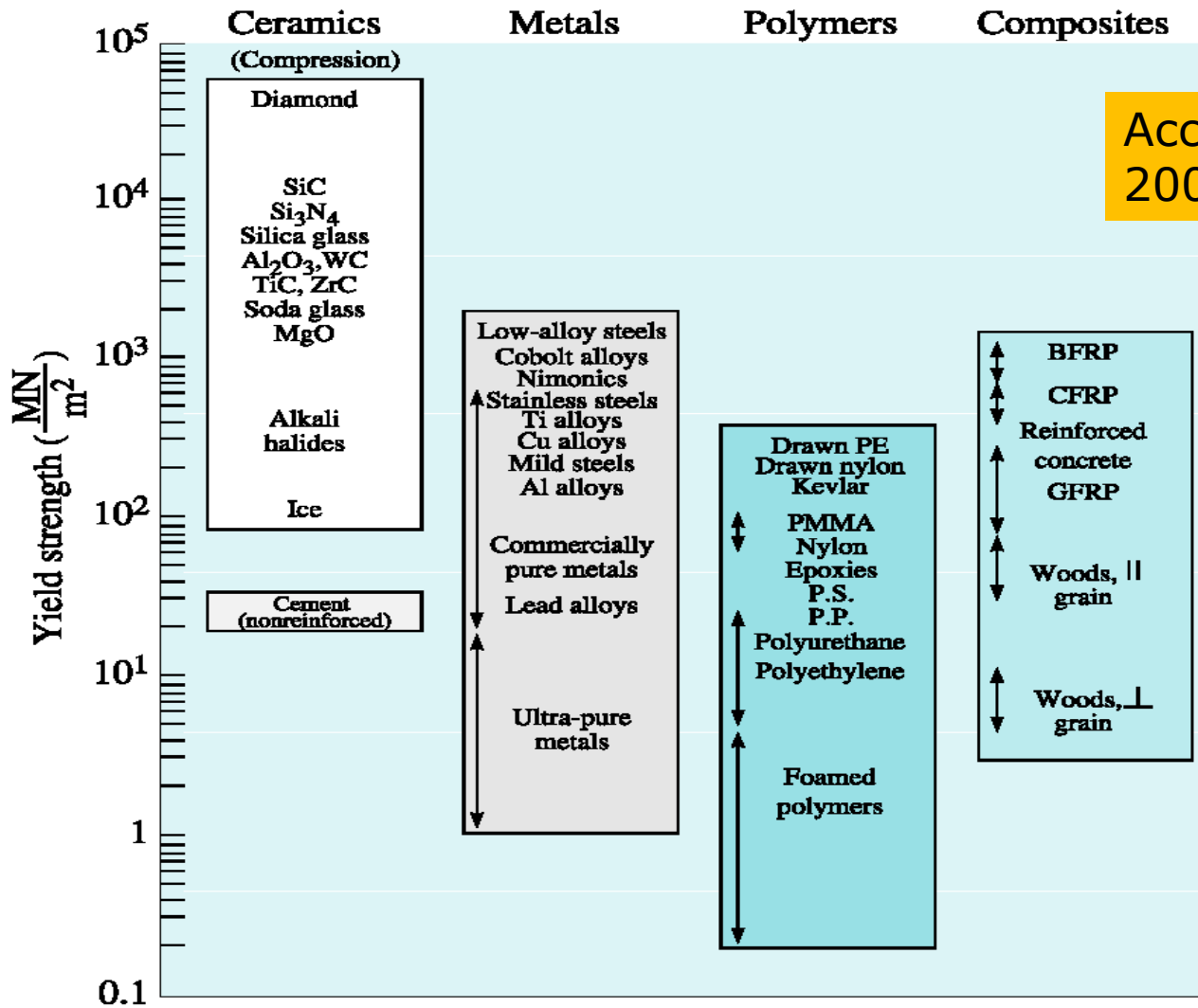
(a)



(b)

(a) Frattura coppa e cono nell'alluminio. (b) Frattura fragile in un acciaio dolce.

Yield Stress o Sforzo di snervamento: valori tipici



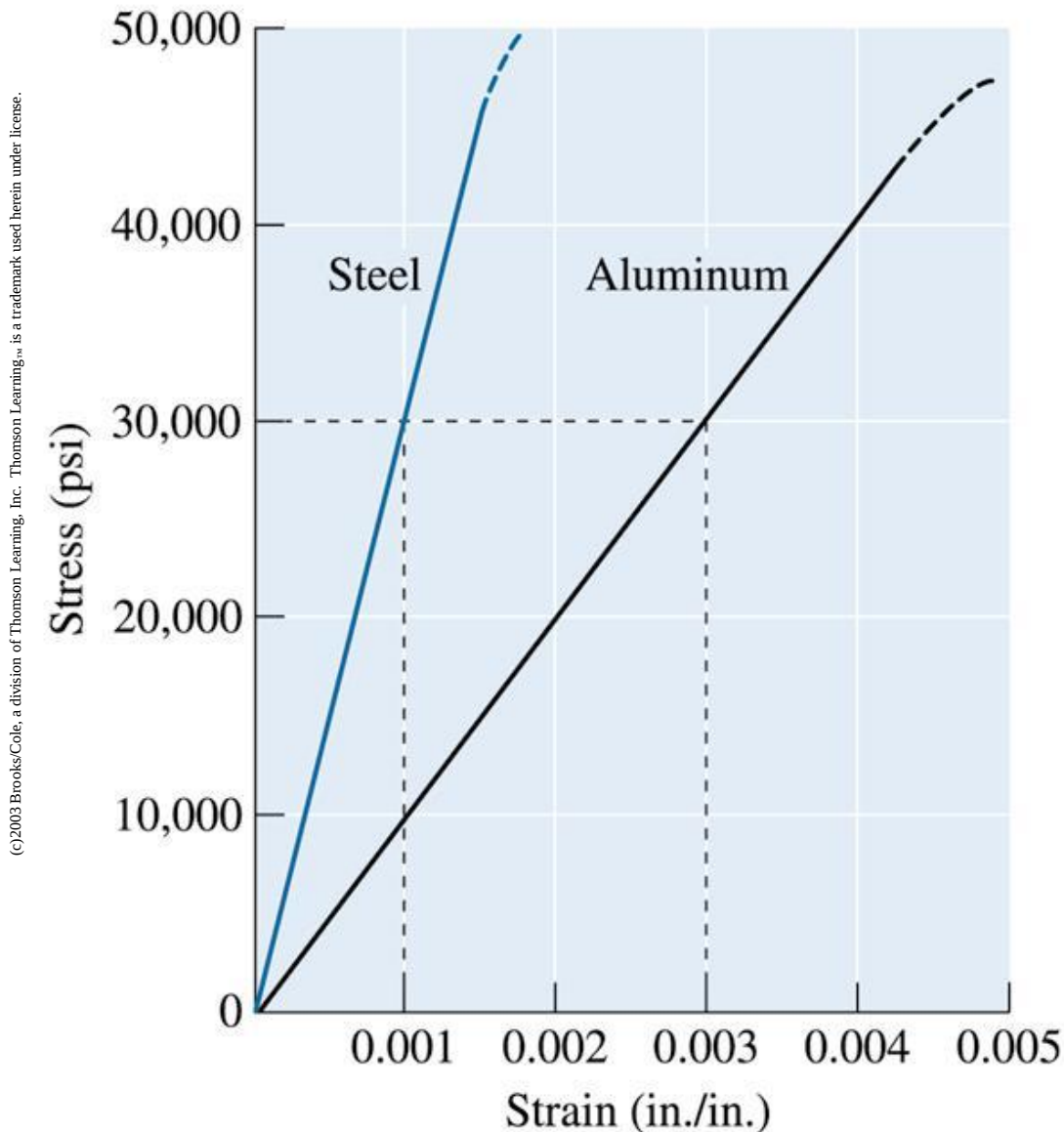
Valori tipici di resistenza allo snervamento per diversi materiali ingegnerizzati.

(Source: Reprinted from Engineering Materials I, Second Edition, M.F. Ashby and D.R.H. Jones, 1996, Fig. 8-12, p. 85. Copyright © Butterworth-Heinemann. Reprinted with permission from Elsevier Science.)

Modulo elastico o modulo di Young, E

E è la pendenza della parte lineare del diagramma sforzo-deformazione

Confronto del comportamento elastico di acciaio e alluminio. Per una data sollecitazione, l'alluminio si deforma in regime elastico tre volte più dell'acciaio



Modulo elastico: valori tipici

(e correlazione con forza di legame e quindi la temperatura di fusione)

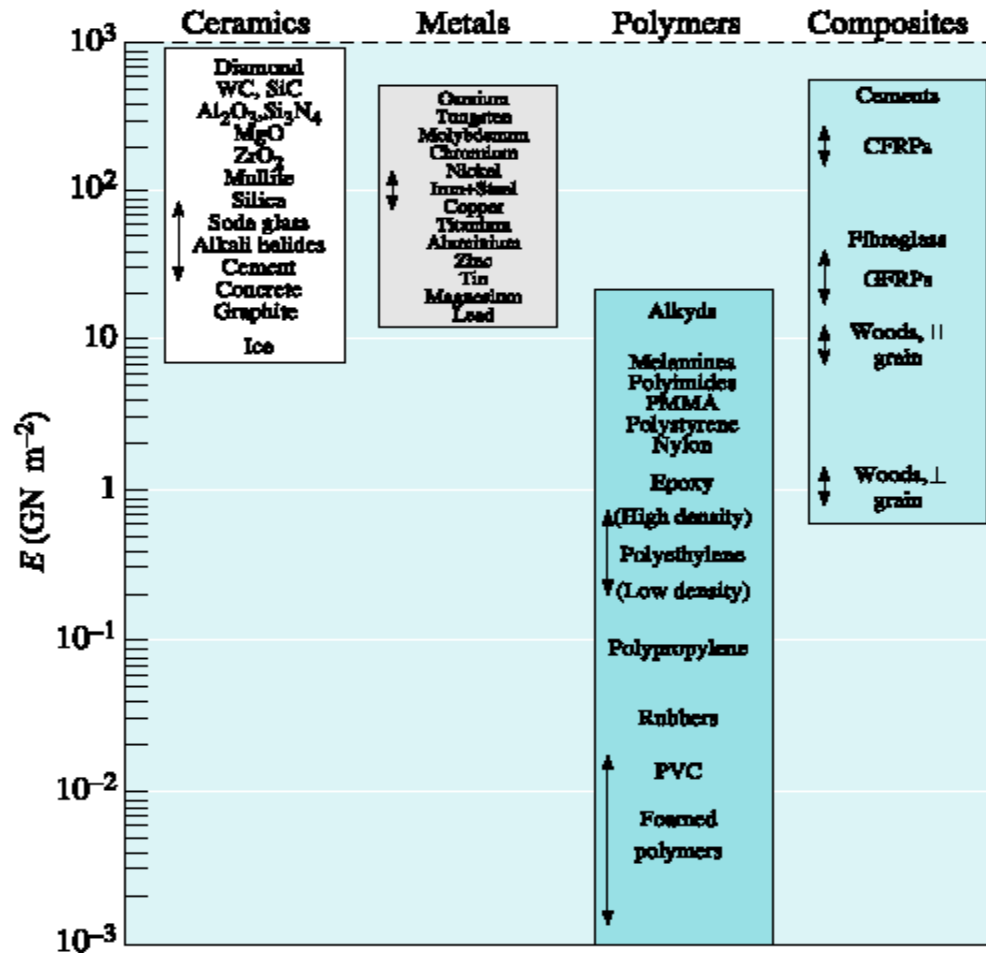
TABLE 6-3 ■ *Elastic properties and melting temperature (T_m) of selected materials*

Material	T_m (°C)	E (psi)	Poisson's ratio (μ)
Pb	327	2.0×10^6	0.45
Mg	650	6.5×10^6	0.29
Al	660	10.0×10^6	0.33
Cu	1085	18.1×10^6	0.36
Fe	1538	30.0×10^6	0.27
W	3410	59.2×10^6	0.28
Al ₂ O ₃	2020	55.0×10^6	0.26
Si ₃ N ₄		44.0×10^6	0.24

Modulo elastici: valori tipici

Metalli	E (GPa)	Polimeri	E (GPa)	Ceramici	E (GPa)
Al e sue leghe	70-80	Resine epossidiche retic.	2.8-4.2	diamante	1000
Au	80	Nylon 6,6	2.6	Vetro sodico calcico (da lastRE)	70
Ottone (70Cu-30Zn)	100	Kevlar 49 (fibre aramide)	131	Fibre di C	230-500
Acciai dolci	195-215	PE media densità	0.7	Fibre di vetro	73-87
Ti e sue leghe	85-130	Polimeri espansi	10^{-3} - 10^{-2}	SiC (carburo di Si)	450-850
Zn e sue leghe	45-95	GFRP polimeri rinf. fibra di vetro	10-40	WC	500-600
Mg e sue leghe	40-45	CFRP polimeri rinf. fibra di C	100-200	TiC	320
Cu e sue leghe	120-150	gomma	≈ 0.001	Allumina (Al_2O_3)	300-400
W	400	polistirene	2	Magnesia (MgO)	300
Bronzo	110	polipropilene	1.5	Legno	13
				Osso	9

Modulo elastici: valori tipici

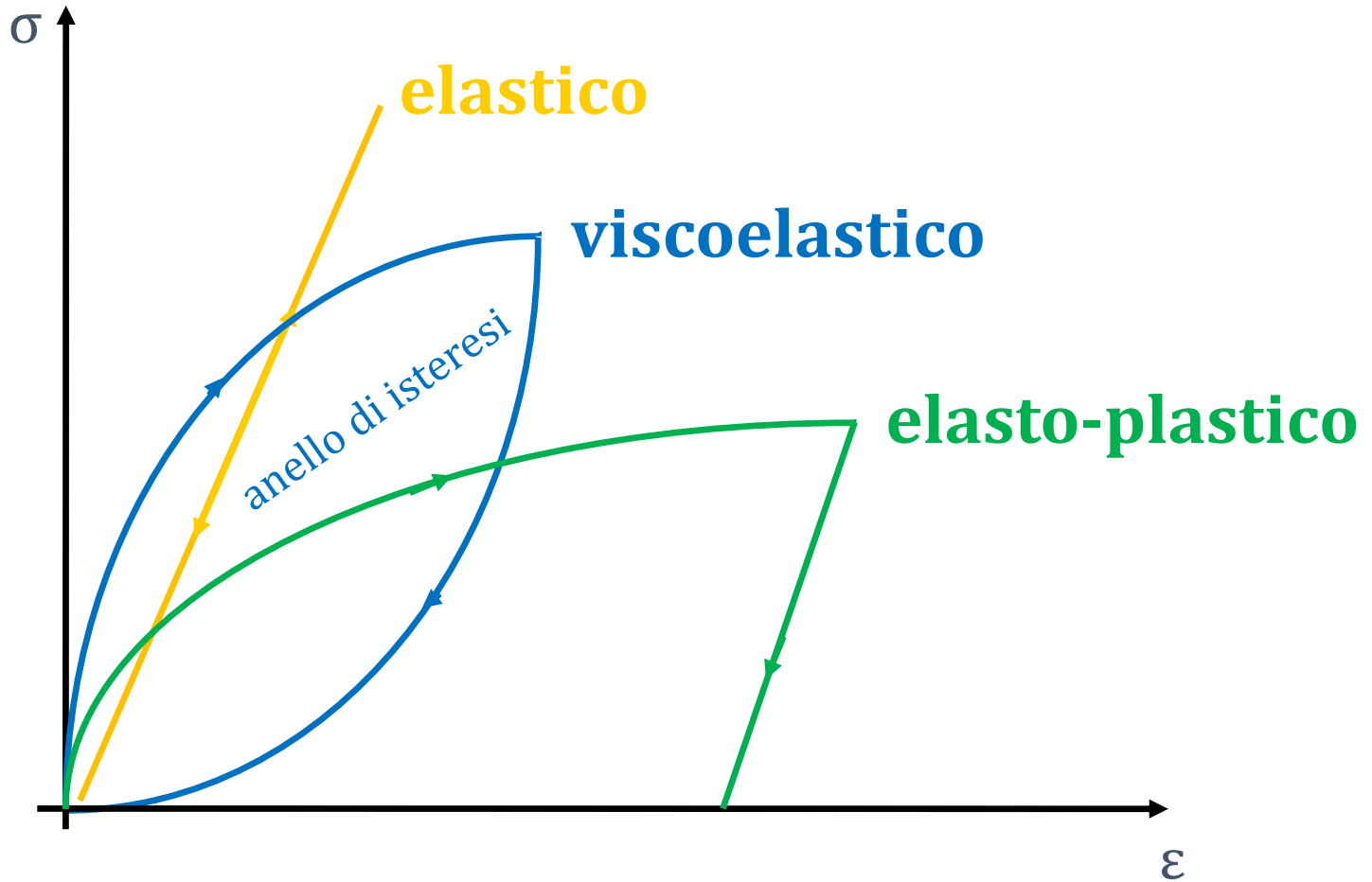


$$E_{\text{acciaio}} = 200 \text{ GPa}$$

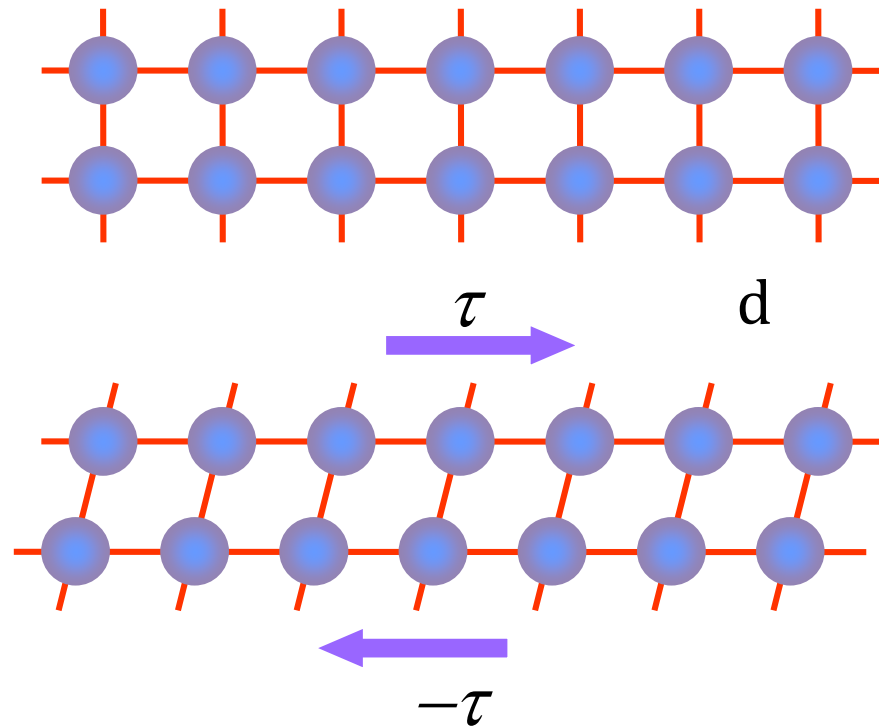
$$E_{\text{alluminio}} = 70 \text{ GPa}$$

Range di moduli elastici per diversi materiali ingegnerizzati. (Source: Reprinted from Engineering Materials I, Second Edition, M.F. Ashby and D.R.H. Jones, 1996, Fig. 3-5, p. 35, Copyright © 1996 Butterworth-Heinemann. Reprinted with permission from Elsevier Science.)

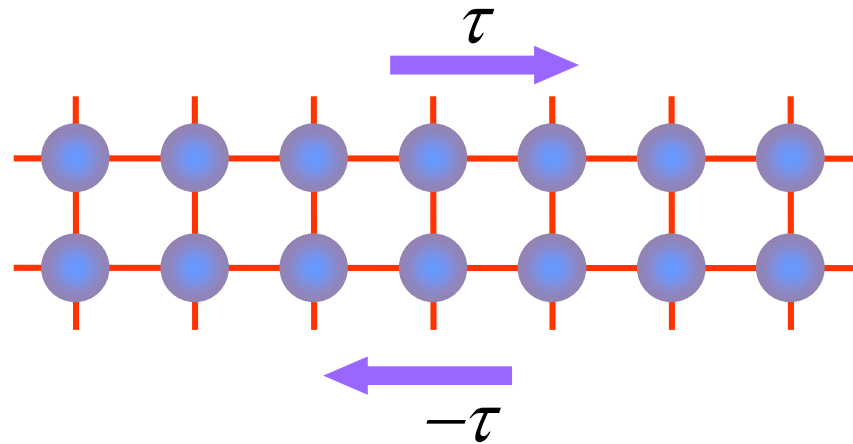
Isteresi ed energia dissipata



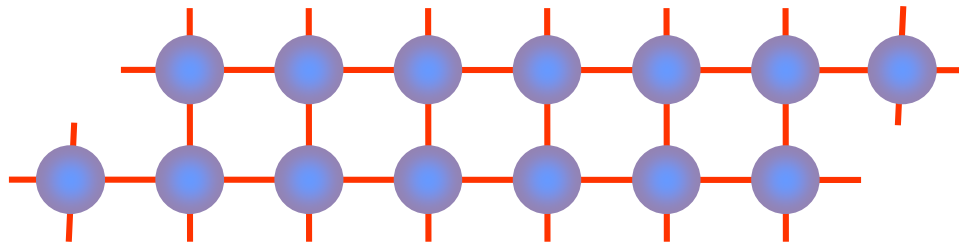
Deformazione elastica



Deformazione elastica



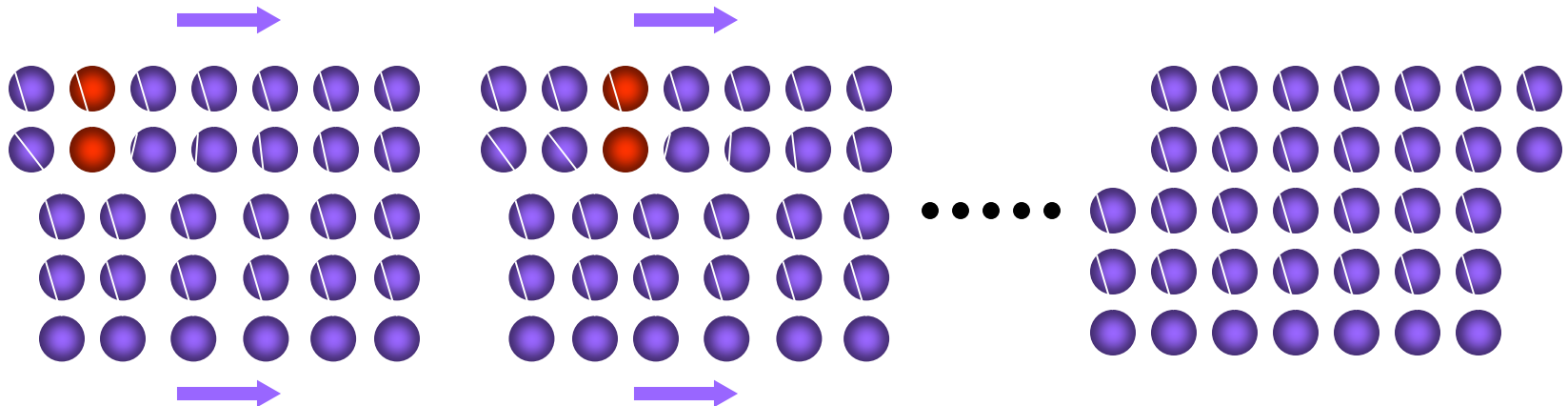
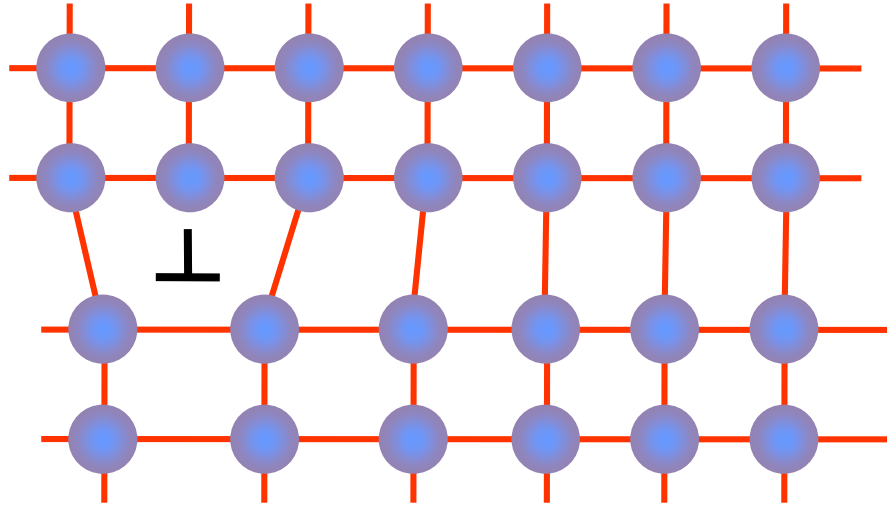
Risultato netto



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

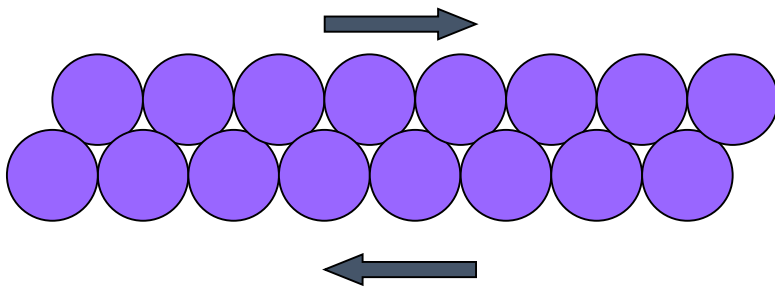
Deformazione elastica

Dislocazione a spigolo

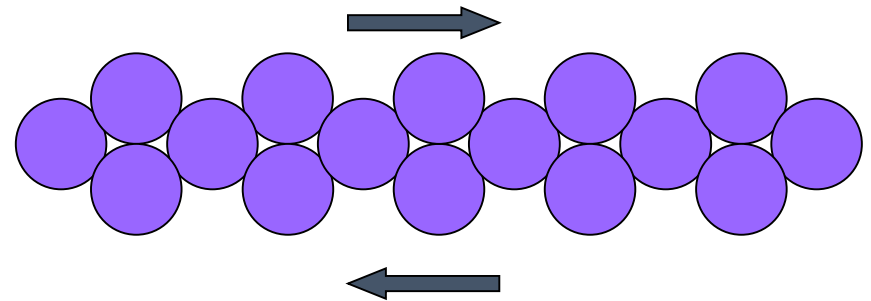


Deformazione elastica

- La deformazione plastica dei cristalli avviene secondo certi piani e certe direzioni preferenziali: **sistemi di scorrimento**.
- I piani preferenziali di scorrimento sono quelli più compatti (è richiesto un minore sforzo di taglio).

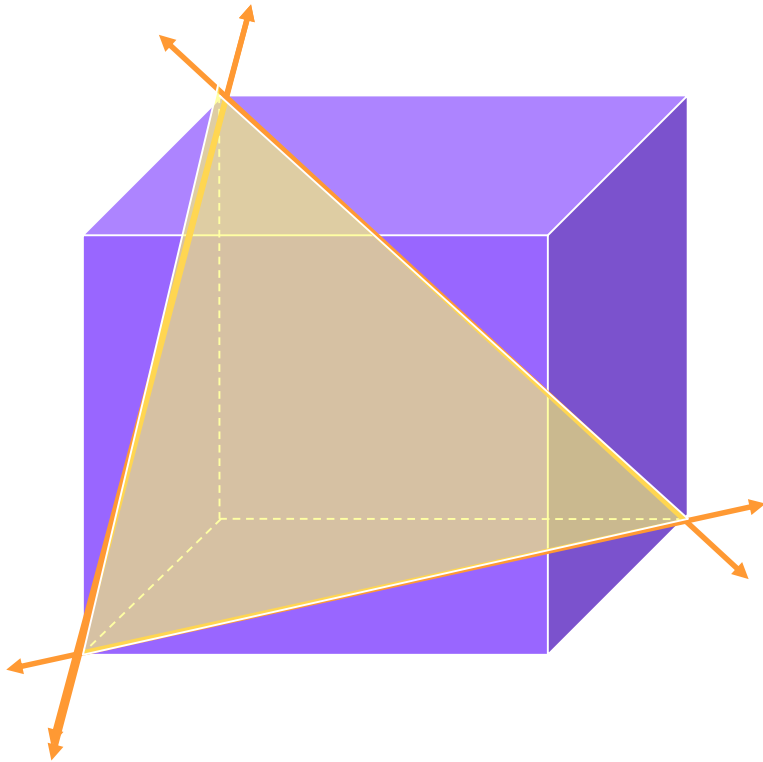


Piano compatto

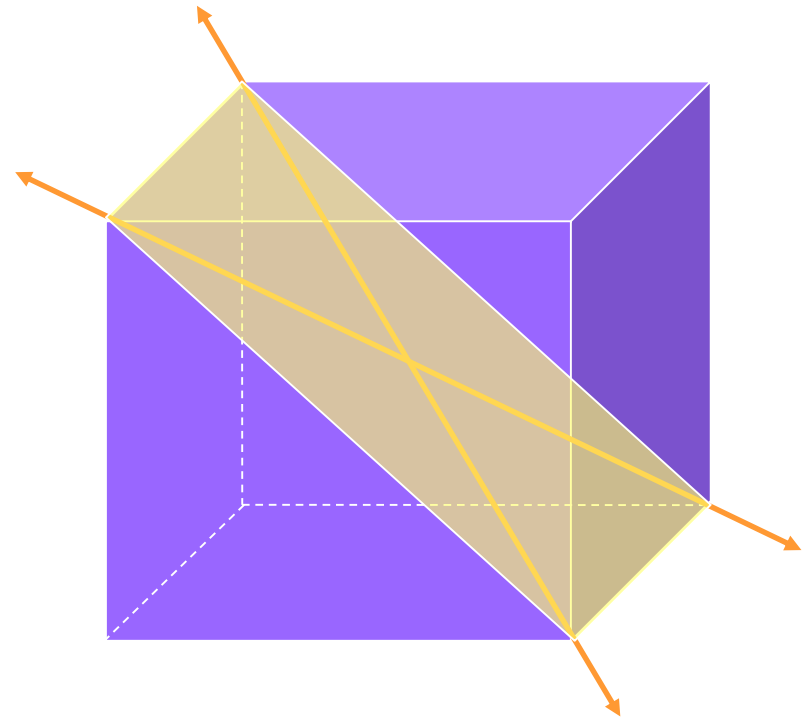


Piano poco denso

Sistemi di scorrimento

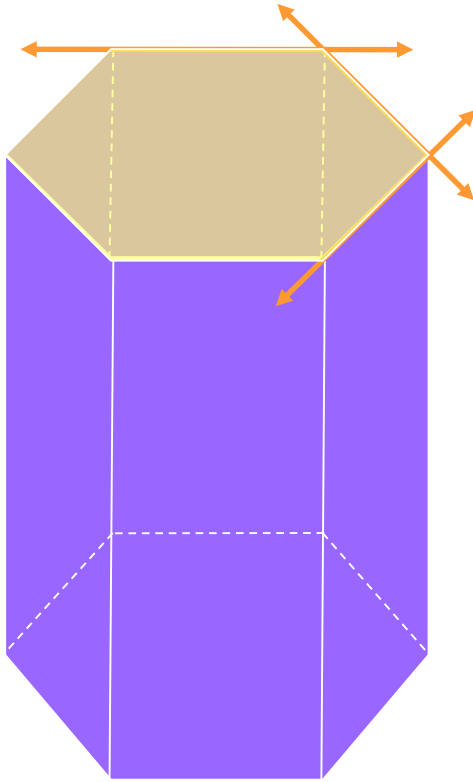


CFC

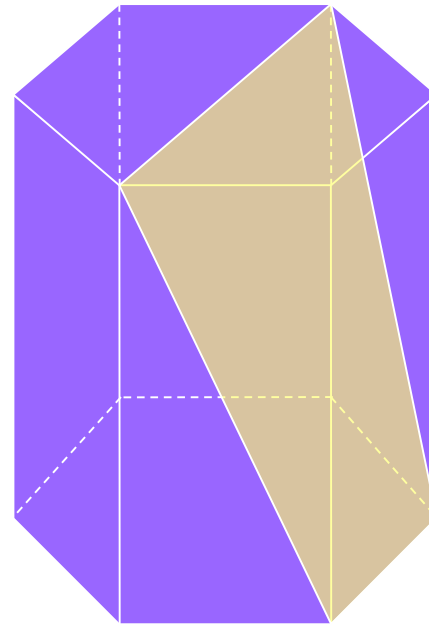


CCC

Sistemi di scorrimento



EC (c/a alto)
Zn, Mg



EC (c/a basso)
Ti, Zr

Sistemi di scorrimento



FIGURA 7.9 Scorrimento in un singolo cristallo di zinco. (Da C.F. Elam, *The Distortion of Metal Crystals*, Oxford University Press, London 1935.)

Deformazione
plastica in un
monocristallo



—————→
e in un materiale
policristallino

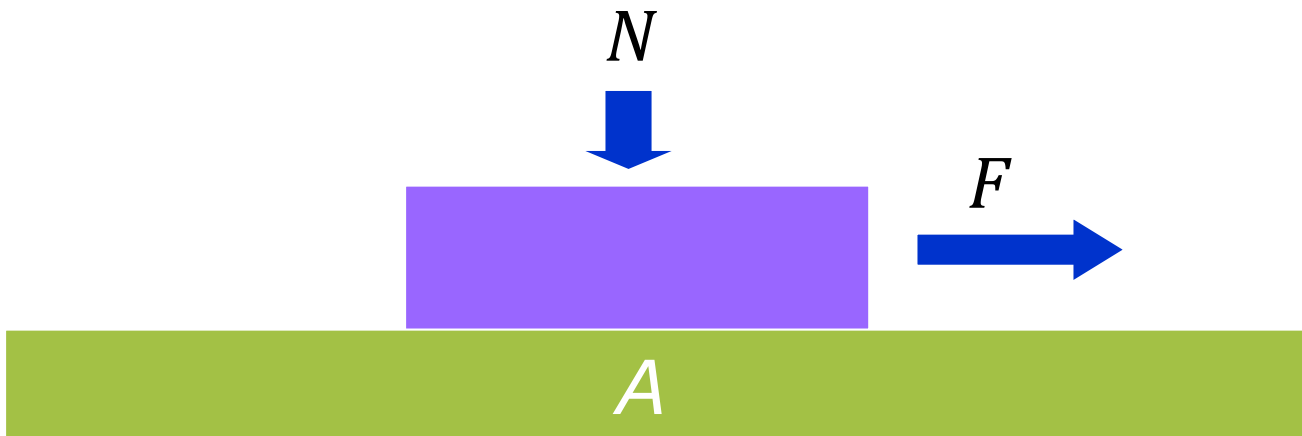


FIGURA 7.10 Linee di scorrimento sulla superficie di un campione di rame policristallino che è stato lucidato ed in seguito deformato. 1750x. (Micrografia per gentile concessione di C. Brady, National Bureau of Standards.)

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.

Prova di compressione

Talvolta il valore di τ viene espresso come frazione della tensione tangenziale di snervamento (in un materiale il massimo sforzo generabile è quello di snervamento).

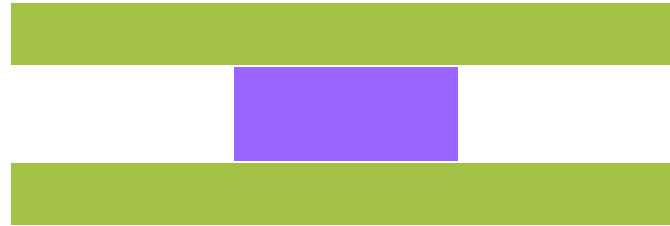
Il valore di m^* dipende essenzialmente dalla coppia di materiali considerati, dalla temperatura e dal tipo di lubrificazione adottata.

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

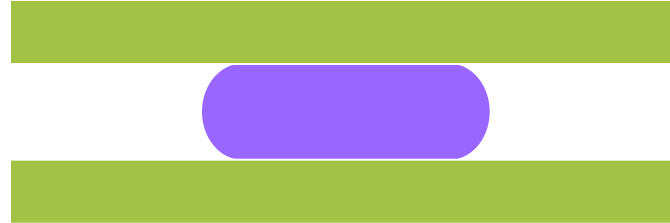
$$0 < m^* < 1$$

Prova di compressione

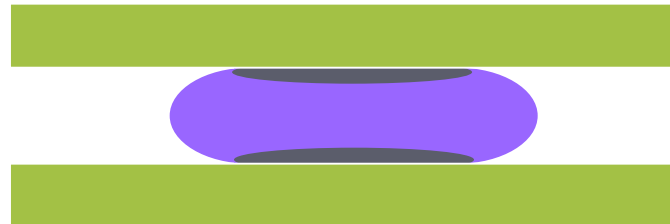
$m^*=0$



$m^*=0.5$

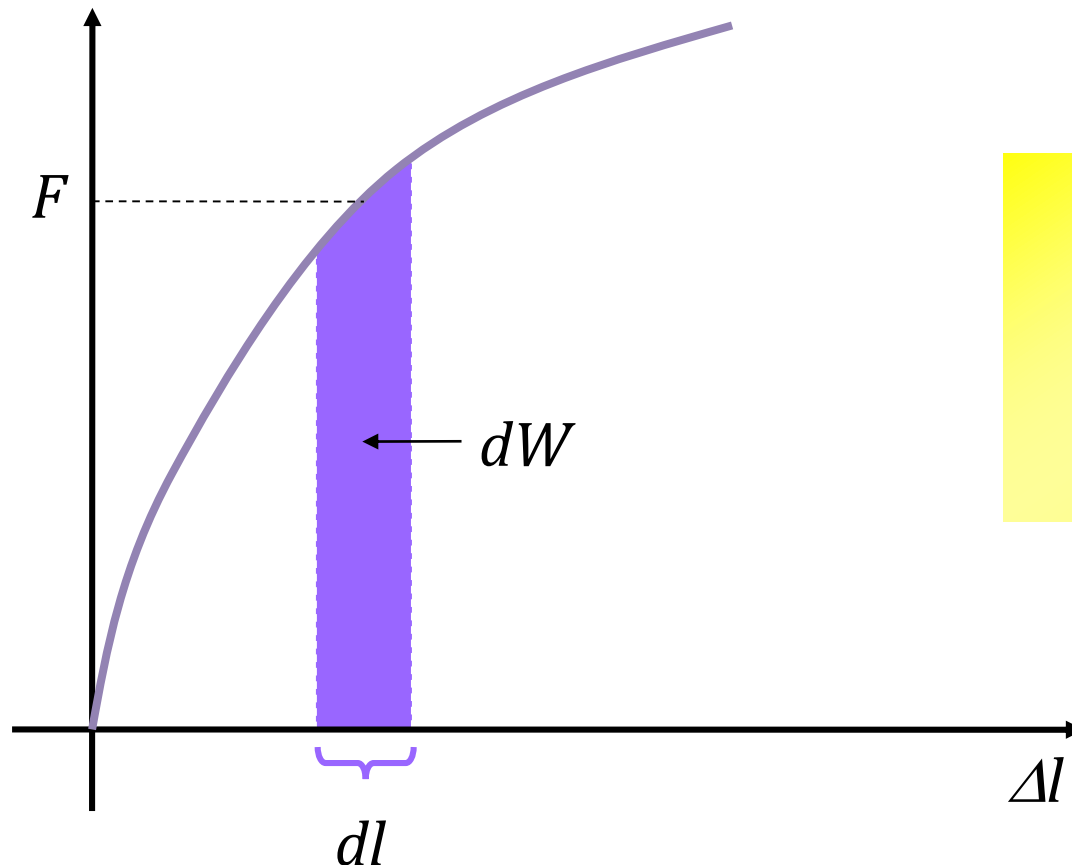


$m^*=1$



Prova di trazione: energia di deformazione

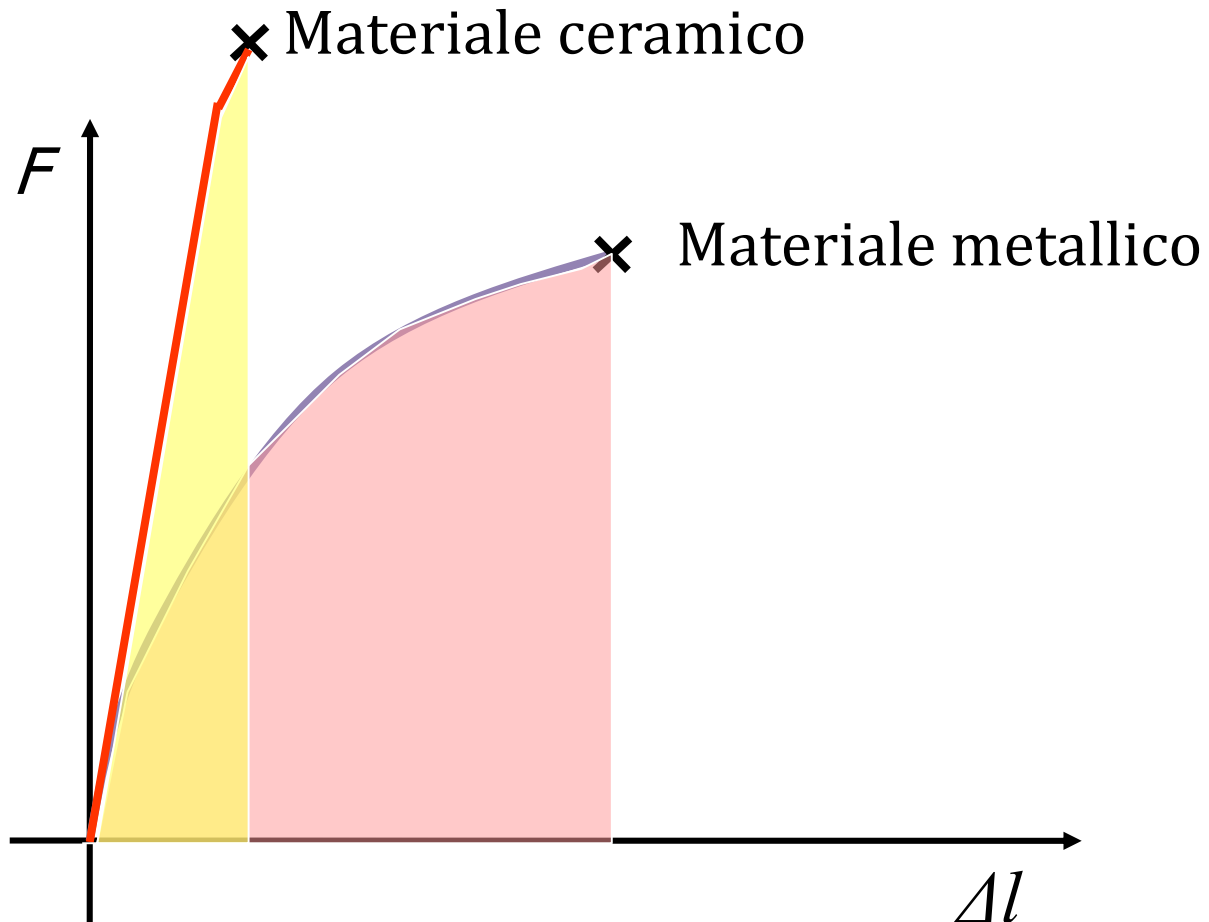
Tenacità: energia assorbita nel campo elasto-plastico prima di arrivare a rottura



$$dW = F \cdot dl$$

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

Prova di trazione



Duttilità

(e l'effetto della temperatura sulla duttilità)

La duttilità è la capacità del materiale di assorbire deformazioni elastiche senza rompersi.

Due modi quantitativi per valutare la duttilità:

Allungamento a rottura

$$\% \text{ allungamento} = 100 \times \frac{l_{finale} - l_{iniziale}}{l_{iniziale}}$$

Riduzione della sezione

$$\% \text{ riduz. sezione} = 100 \times \frac{A_{iniziale} - A_{finale}}{A_{iniziale}}$$

Nota: l_{finale} è quello DOPO la rottura!

rbire
rompersi

Duttilità

(e l'effetto della temperatura sulla duttilità)

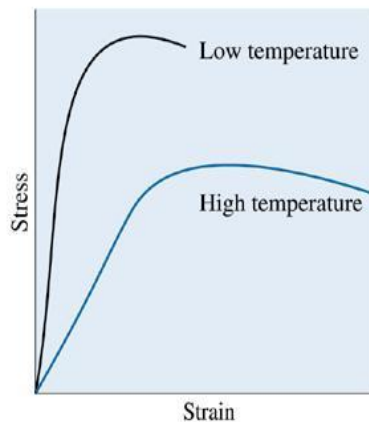
Due modi quantitativi per valutare la duttilità:

Allungamento a rottura

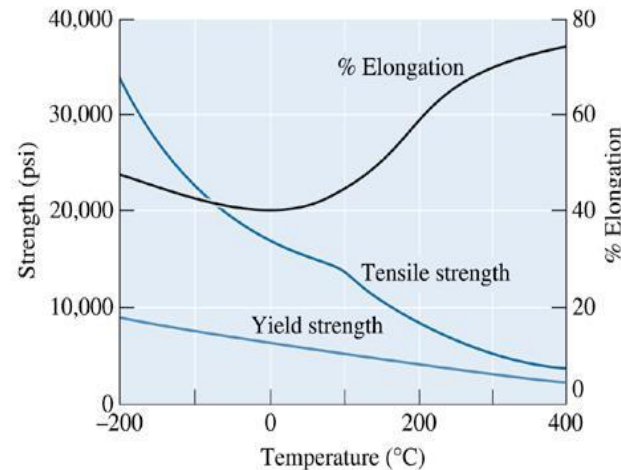
Riduzione della sezione

$$\% \text{ allungamento} = 100 \times \frac{l_{finale} - l_{iniziale}}{l_{iniziale}} \quad \% \text{ riduz. sezione} = 100 \times \frac{A_{iniziale} - A_{finale}}{A_{iniziale}}$$

Nota: l_{finale} è quello DOPO la rottura!



(a)



(b)

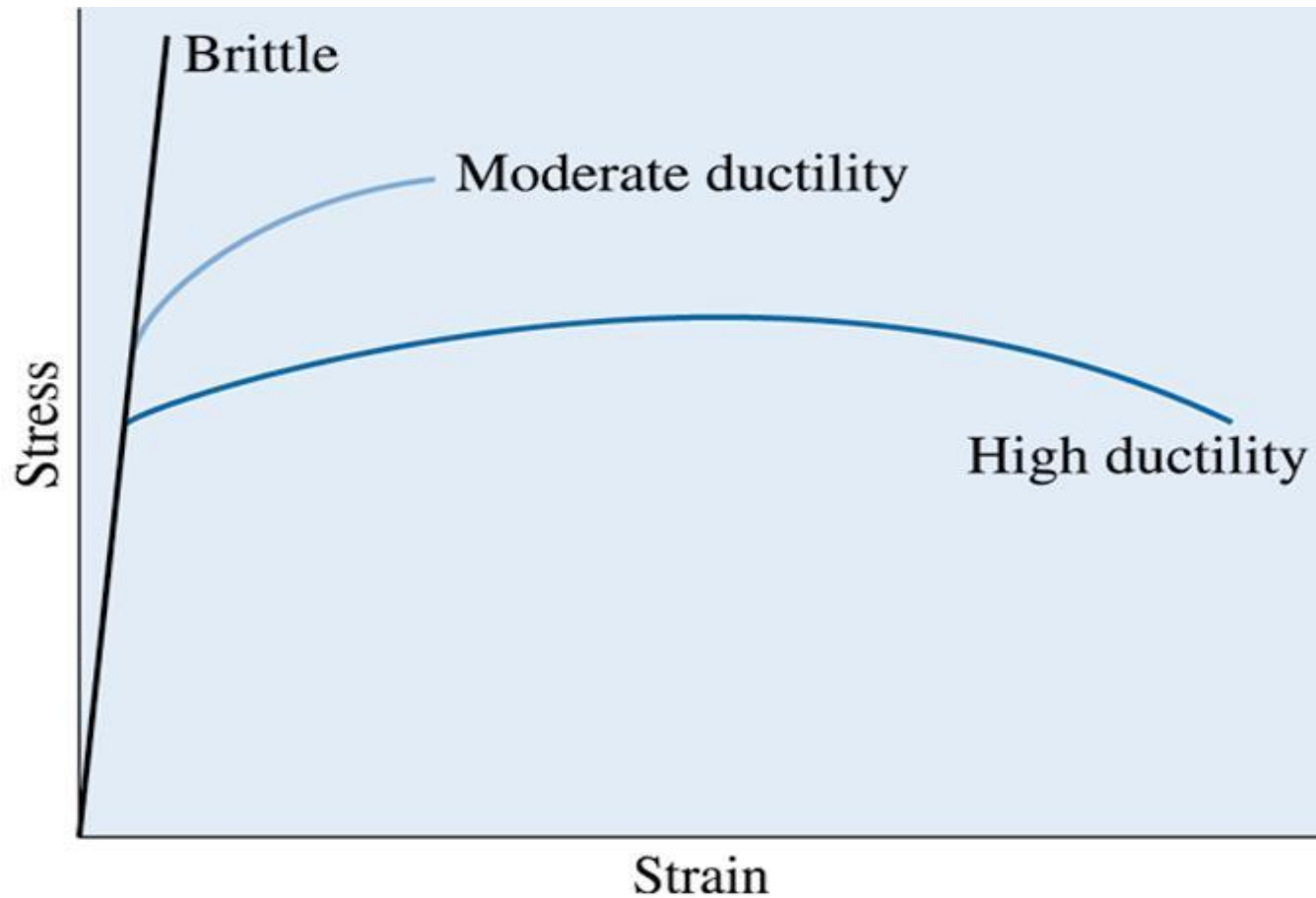
L'effetto della temperatura (a) sulla curva sforzo-deformazione e (b) sulle proprietà di trazione di una lega di alluminio

Test di flessione:

misurare le proprietà meccaniche di materiali fragili

Il test a trazione è inaffidabile per materiali fragili (a duttilità nulla)

- **Test a flessione:** Applicazione di una forza al centro di una barra supportata su ciascuna estremità, per determinare la resistenza del materiale a un carico statico o applicato lentamente.
- **Resistenza alla flessione:** Lo stress richiesto per rompere un campione in un test a flessione.
- **Modulo di flessione:** Il modulo di elasticità calcolato dai risultati di una prova di flessione, fornendo l'inclinazione della curva di sforzo deformazione.

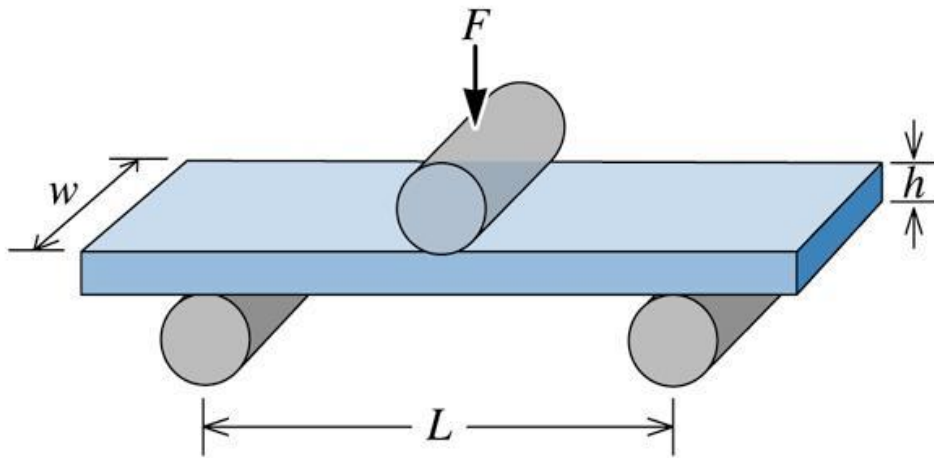


(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning[®] is a trademark used herein under license.

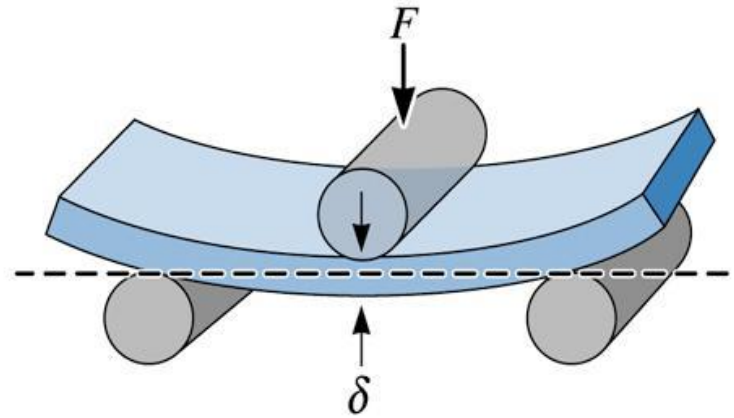
Il comportamento per sforzo e deformazione di un materiale fragile rispetto a uno più duttile.

Test di flessione:

misurare le proprietà meccaniche di materiali fragili



(a)



(b)

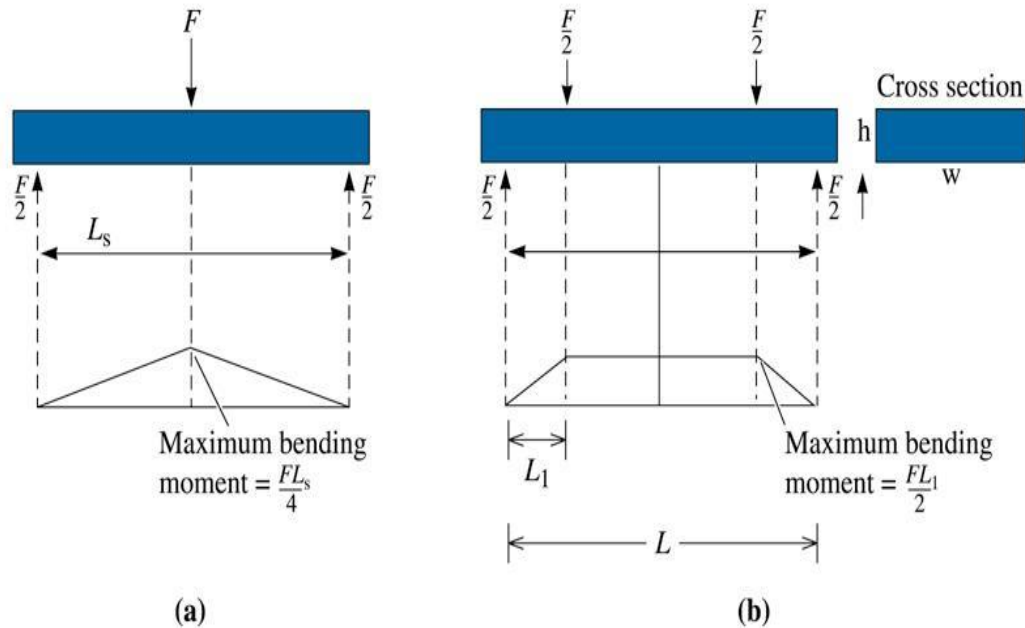
(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning- is a trademark used herein under license.

Il bend test (o flessione a tre punti) viene spesso utilizzato per misurare la resistenza di materiali fragili e (b) la deflessione δ ottenuta dalla flessione

Test di flessione:

misurare le proprietà meccaniche di materiali fragili

Sono possibili due configurazioni: flessione a tre o quattro punti

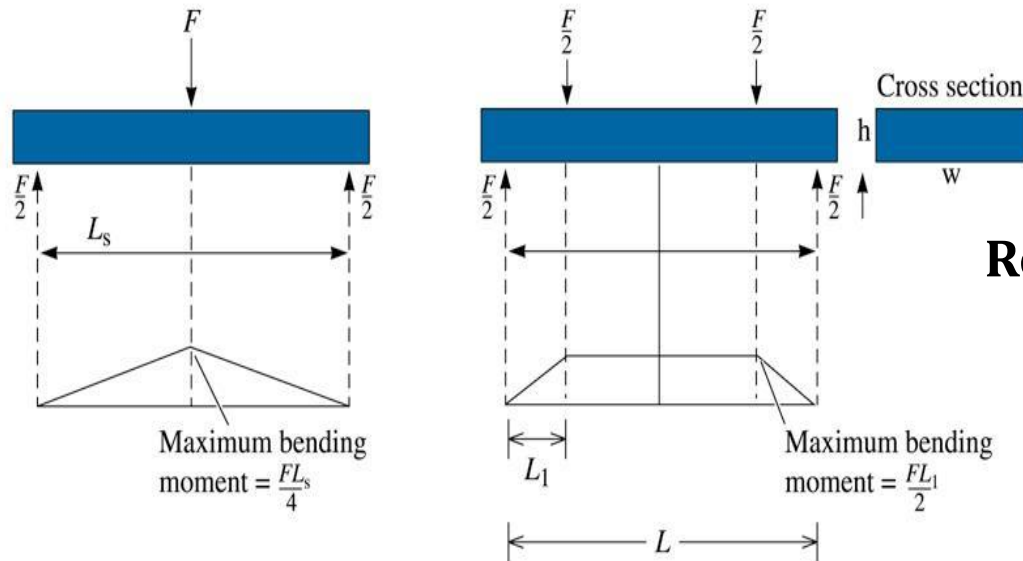


Setup del test a flessione a (a) tre punti e (b) quattro punti

Test di flessione:

misurare le proprietà meccaniche di materiali fragili

Sono possibili due configurazioni: flessione a tre o quattro punti



Resistenza a flessione

$$E_{bend} = \frac{L^3 F}{4wh^3 \delta}$$

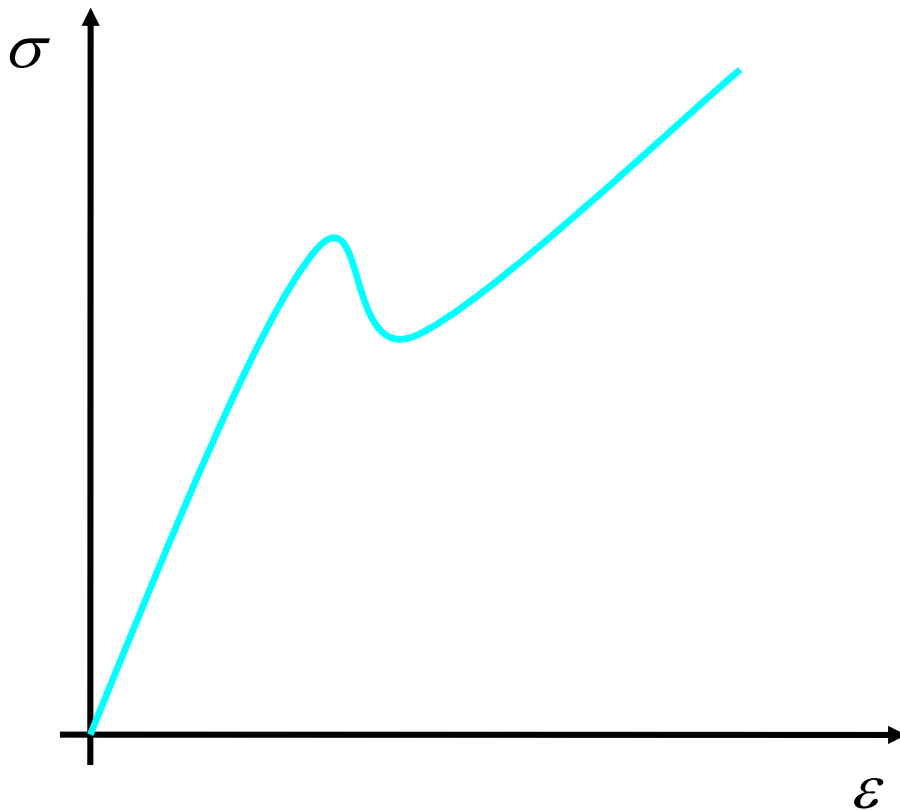
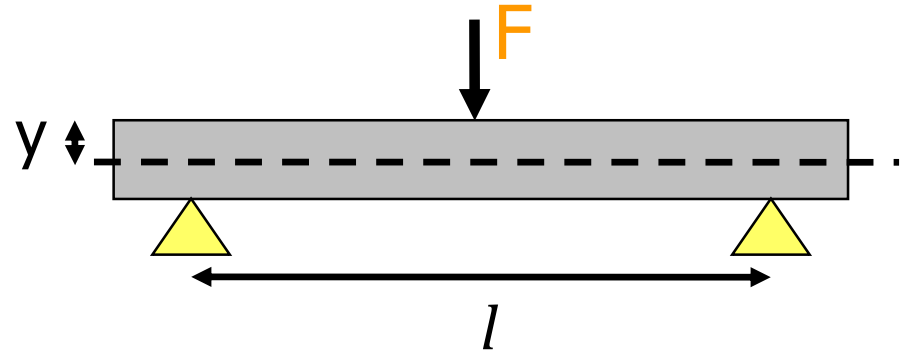
**Resistenza a flessione
(3-point bending)**

$$\sigma_{bend\ 3\ point} = \frac{3FL}{2wh^2}$$

**Resistenza a flessione
(4-point bending)**

$$\sigma_{bend\ 4\ point} = \frac{3FL}{4wh^2}$$

Prova di flessione a tre punti



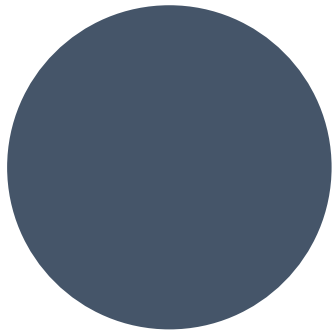
$$M = \frac{F \cdot l}{4}$$

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I}$$

$$f = \frac{1}{48} \frac{F \cdot l^3}{EI}$$

Prova di flessione a tre punti

I = momento d'inerzia



$$I = \frac{\pi r^4}{4}$$



$$I = \frac{\pi(r_e^4 - r_i^4)}{4}$$



$$I = \frac{d^4}{12}$$

TABLE 6-4 ■ Comparison of the tensile, compressive, and flexural strengths of selected ceramic and composite materials

Material	Tensile Strength (psi)	Compressive Strength (psi)	Flexural Strength (psi)
Polyester—50% glass fibers	23,000	32,000	45,000
Polyester—50% glass fiber fabric	37,000	27,000 ^a	46,000
Al ₂ O ₃ (99% pure)	30,000	375,000	50,000
SiC (pressureless-sintered)	25,000	560,000	80,000

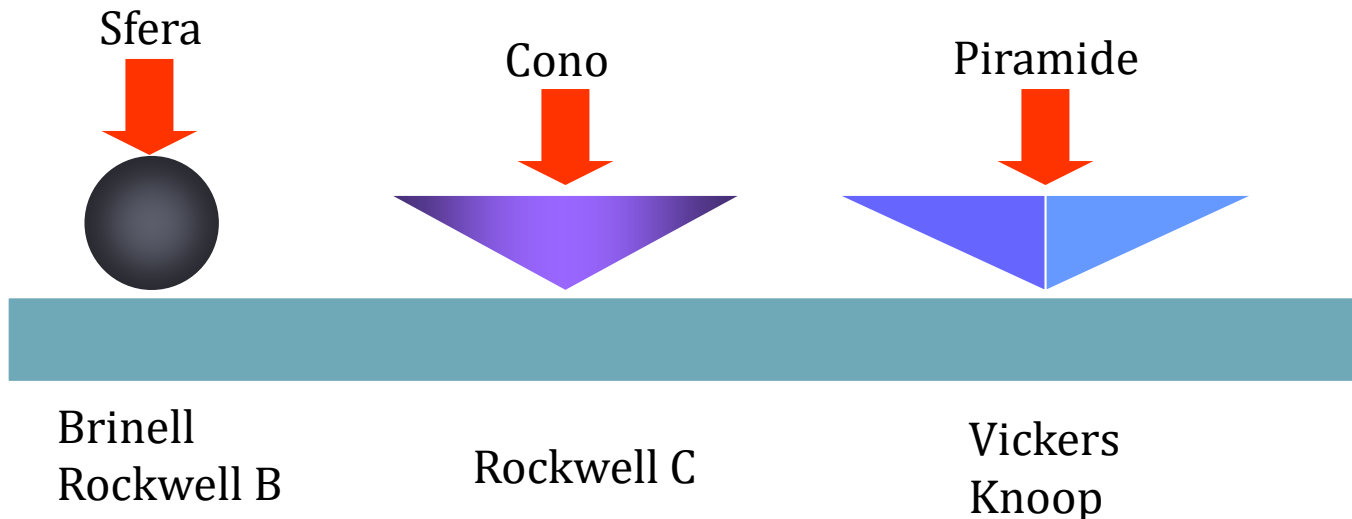
^a A number of composite materials are quite poor in compression.

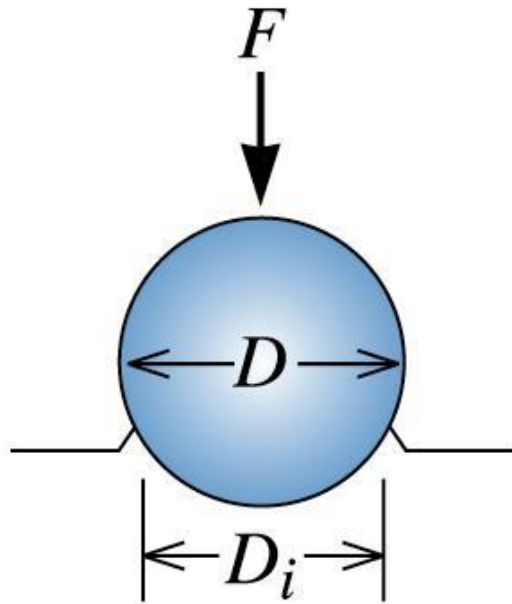
Durezza (Hardness) dei Materiali

- **Test di durezza:** misura la resistenza di un materiale alla penetrazione di un oggetto appuntito.
- **Macro-durezza:** Durezza globale in serie dei materiali misurata con carichi > 2 N.
- **Micro-durezza:** La durezza dei materiali viene generalmente misurata utilizzando carichi inferiori a 2 N utilizzando test quali Knoop (HK).
- **Nano-durezza:** Durezza dei materiali misurata su una scala di lunghezza 1–10 nm usando forze estremamente ridotte ($\sim 100 \mu\text{N}$).

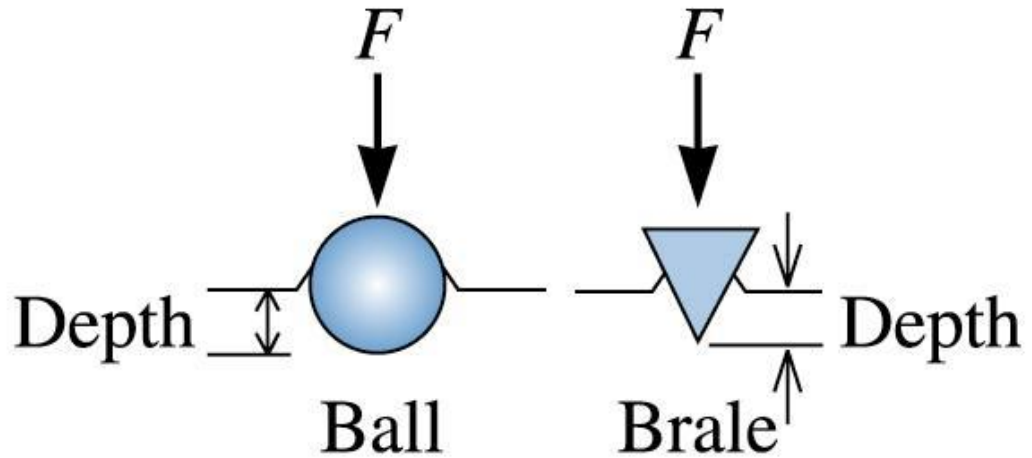
Prova di durezza

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.





Brinell test

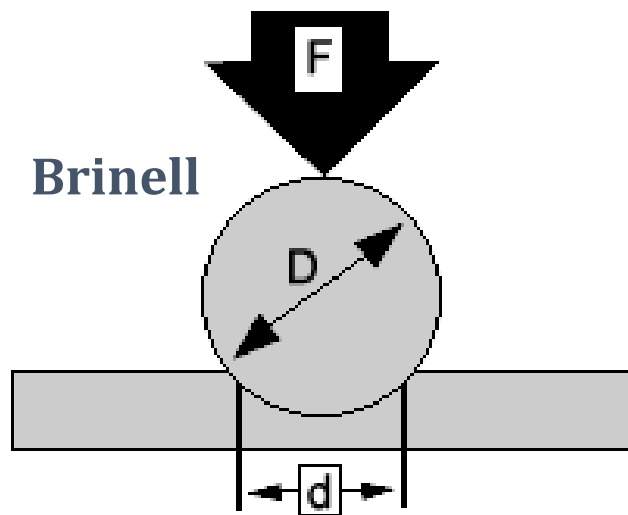


Rockwell test

(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning[®] is a trademark used herein under license.

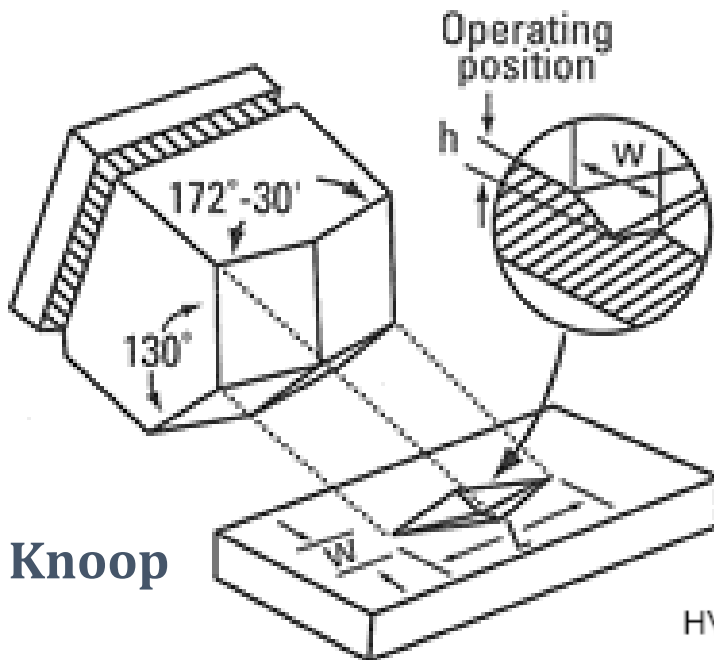
$$HB = \frac{2F}{\pi D \left[D - \sqrt{D^2 - D_i^2} \right]}$$

Indentatori per la prova di durezza Brinell e Rockwell



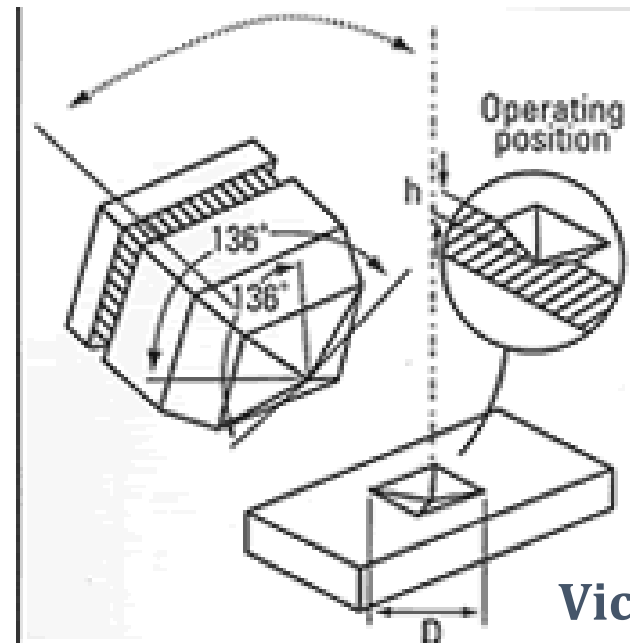
Brinell

$$HB = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$



Knoop

$$HV = 14,2 \frac{F}{l^2}$$



Vickers

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{2 F \sin(\frac{\theta}{2})}{d^2} = 1,854 \frac{F}{d^2}$$

Rockwell C

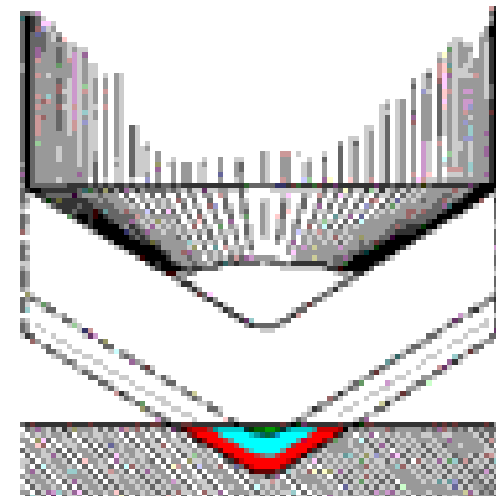


TABLE 6-5 ■ Comparison of typical hardness tests

Test	Indenter	Load	Application
Brinell	10-mm ball	3000 kg	Cast iron and steel
Brinell	10-mm ball	500 kg	Nonferrous alloys
Rockwell <i>A</i>	Brale	60 kg	Very hard materials
Rockwell <i>B</i>	1/16-in. ball	100 kg	Brass, low-strength steel
Rockwell <i>C</i>	Brale	150 kg	High-strength steel
Rockwell <i>D</i>	Brale	100 kg	High-strength steel
Rockwell <i>E</i>	1/8-in. ball	100 kg	Very soft materials
Rockwell <i>F</i>	1/16-in. ball	60 kg	Aluminum, soft materials
Vickers	Diamond pyramid	10 kg	All materials
Knoop	Diamond pyramid	500 g	All materials

Prova di durezza

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 → possibilità di eseguire prove non distruttive.

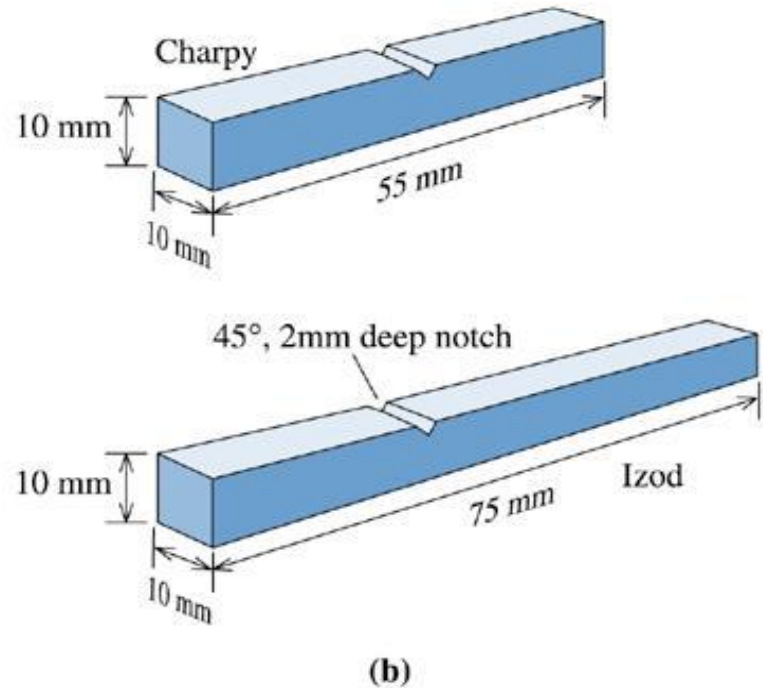
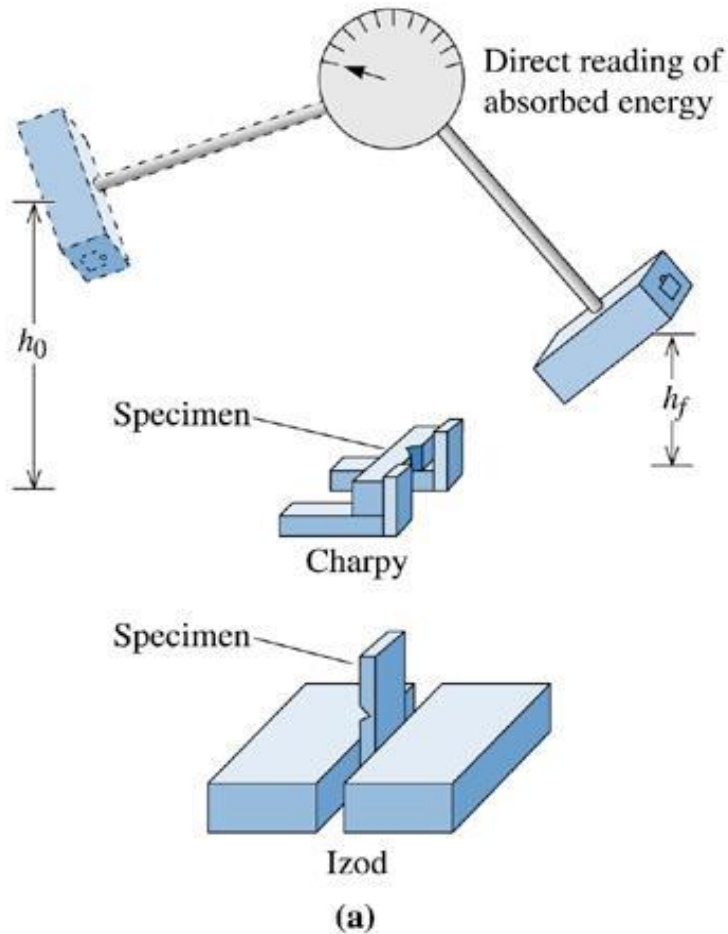
HB	HRC	HRB	HV	HK	Resistenza a trazione [MPa]
780	70		1224		2646
745	68		1116	972	2536
682	64		941	870	2392
653	62		868	822	2232
627	60		804	776	2132
601	58		746	732	2053
555	55	120	650	650	1902
534	53	119	606	612	1833
514	52	119	587	576	1764
495	50	117	551	542	1702
461	47	116	502	510	1577
429	45	115	460	466	1490
415	44	114	435	438	1405
401	42	113	423	426	1350
388	41	112	401	414	1302
341	36	109	344	360	1137
321	34	108	320	334	1068
302	32	107	303	318	1006
293	31	106	292	311	979
277	29	104	278	297	923
262	26	103	261	284	882
248	24	102	249	272	841
241	23	100	240	266	820
229	21	98	228	251	779
223	20	97	222	246	758
217	18	96	217	241	737
207	16	95	208	226	696
197	13	93	197	216	668
192	12	92	192	211	655
183	9	90	183	201	627
174	7	88	174	196	600
166	4	86	166	188	572
159	2	84	159	180	552
146		80	149	172	510
140		78	148	164	490
134		76	146	160	469
131		74	145	157	455
126		72	141	153	441
121		70	138	150	427

Effetto sulle proprietà meccaniche della velocità di deformazione

A tassi di deformazione alti ($\sim 10^3$) la deformazione plastica non ha tempo di avvenire e i materiali tendono ad avere un comportamento più fragile

- **Prova di resilienza (Impact test):** misura la capacità di un materiale di assorbire l'improvvisa applicazione di un carico senza rompersi.
- **Energia d'impatto:** L'energia necessaria per fratturare un campione standard quando il carico viene applicato in modo impulsivo.
- **Resistenza all'urto:** Energia assorbita durante la frattura, da un materiale, di solito indentato, nelle condizioni di un impact test.
- **Resistenza alla frattura:** La resistenza di un materiale alla rottura in presenza di un difetto.

Prove meccaniche ad impatto



(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning, Inc. is a trademark used herein under license.

Test ad impatto: (a) il test di Charpye Izod tests, e (b) dimensioni tipiche di campioni per le prove.

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 ↔ URTO

Resilienza

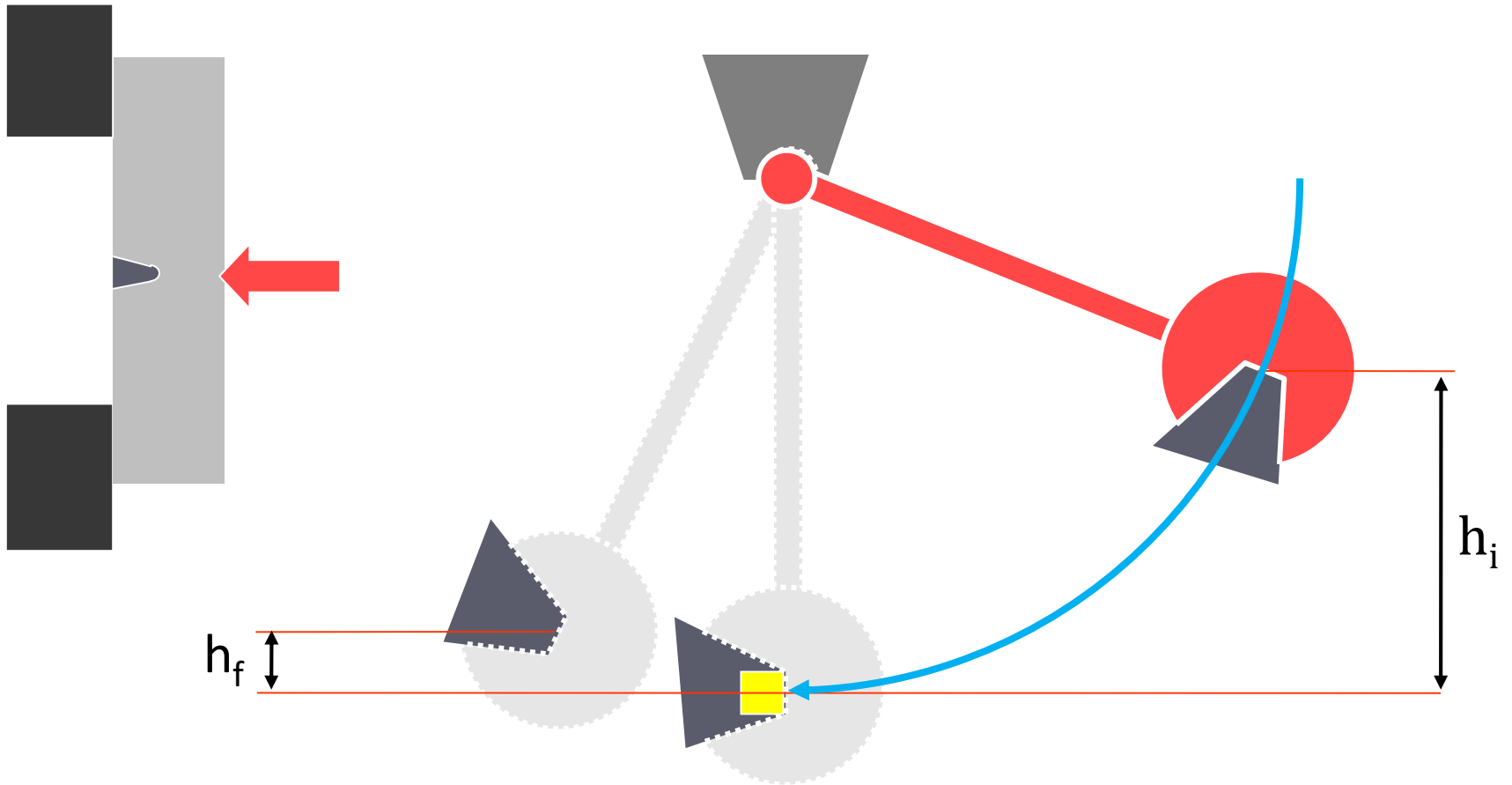
E' una misura dell'energia che un materiale è in grado di assorbire prima di giungere a rottura sotto l'azione di un carico impulsivo.

Eventuali fenomeni di assorbimento energetico la cui cinetica abbia tempi caratteristici relativamente lunghi vengono in tal modo inibiti.

Proprietà ottenibili dalle prove ad impatto

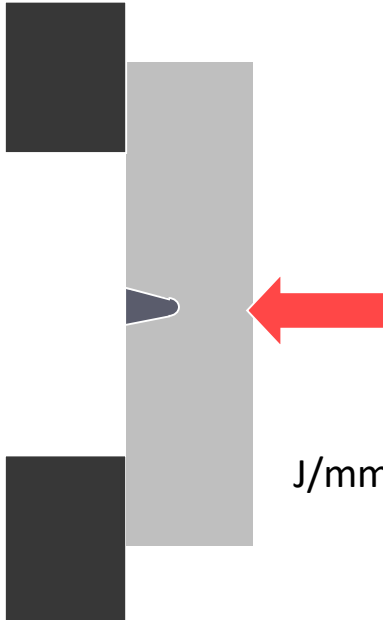
- Energia assorbita dal campione se fratturato a velocità elevate
- Resilienza: energia assorbita da un materiale fino al limite elastico
- Temperatura di transizione da duttile a fragile (Ductile to brittle transition temperature - DBTT) - La temperatura al di sotto della quale un materiale si comporta in modo fragile in una prova d'urto.
- Sensibilità all'intaglio: misura l'effetto di un intaglio, un graffio o altra imperfezione sulle proprietà di un materiale, come la resistenza o la durata a fatica.

Prova di resilienza

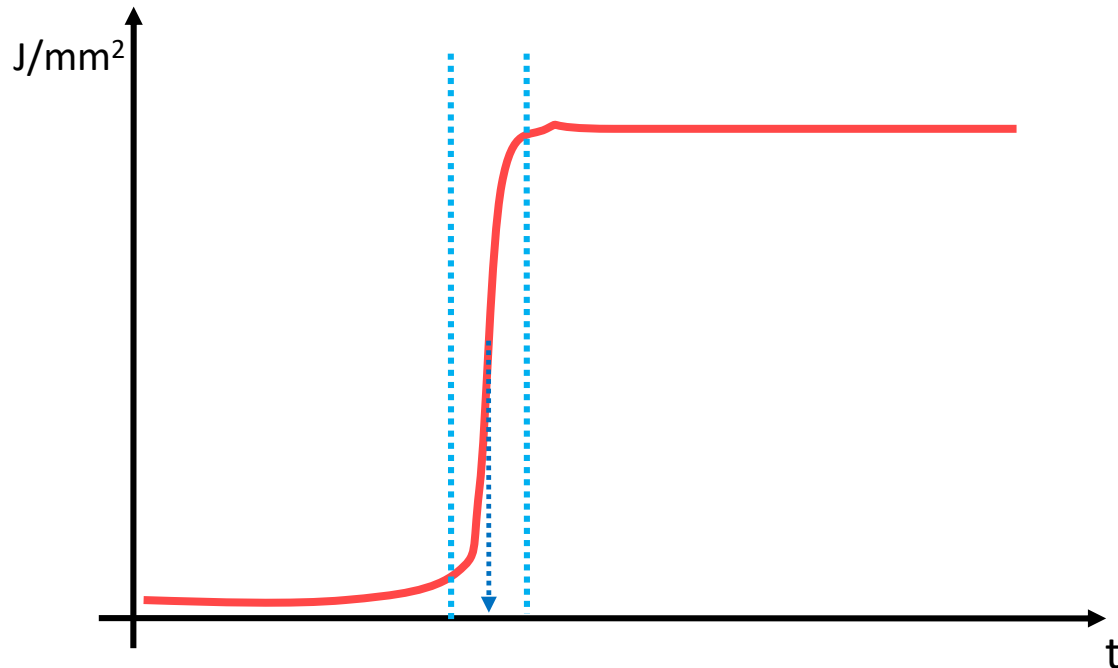


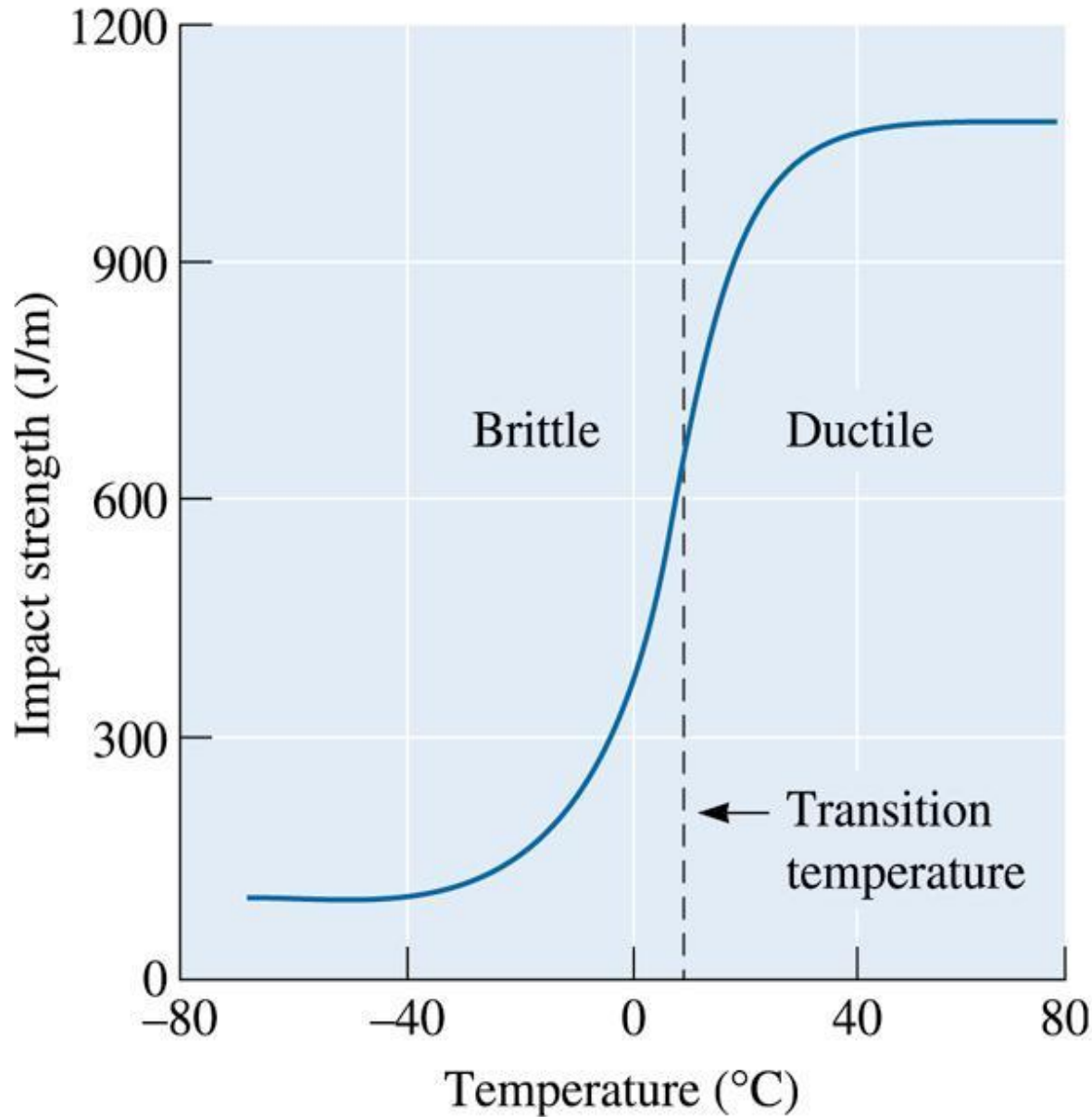
$$\Delta E = m \cdot g \cdot (h_i - h_f)$$

Prova di resilienza

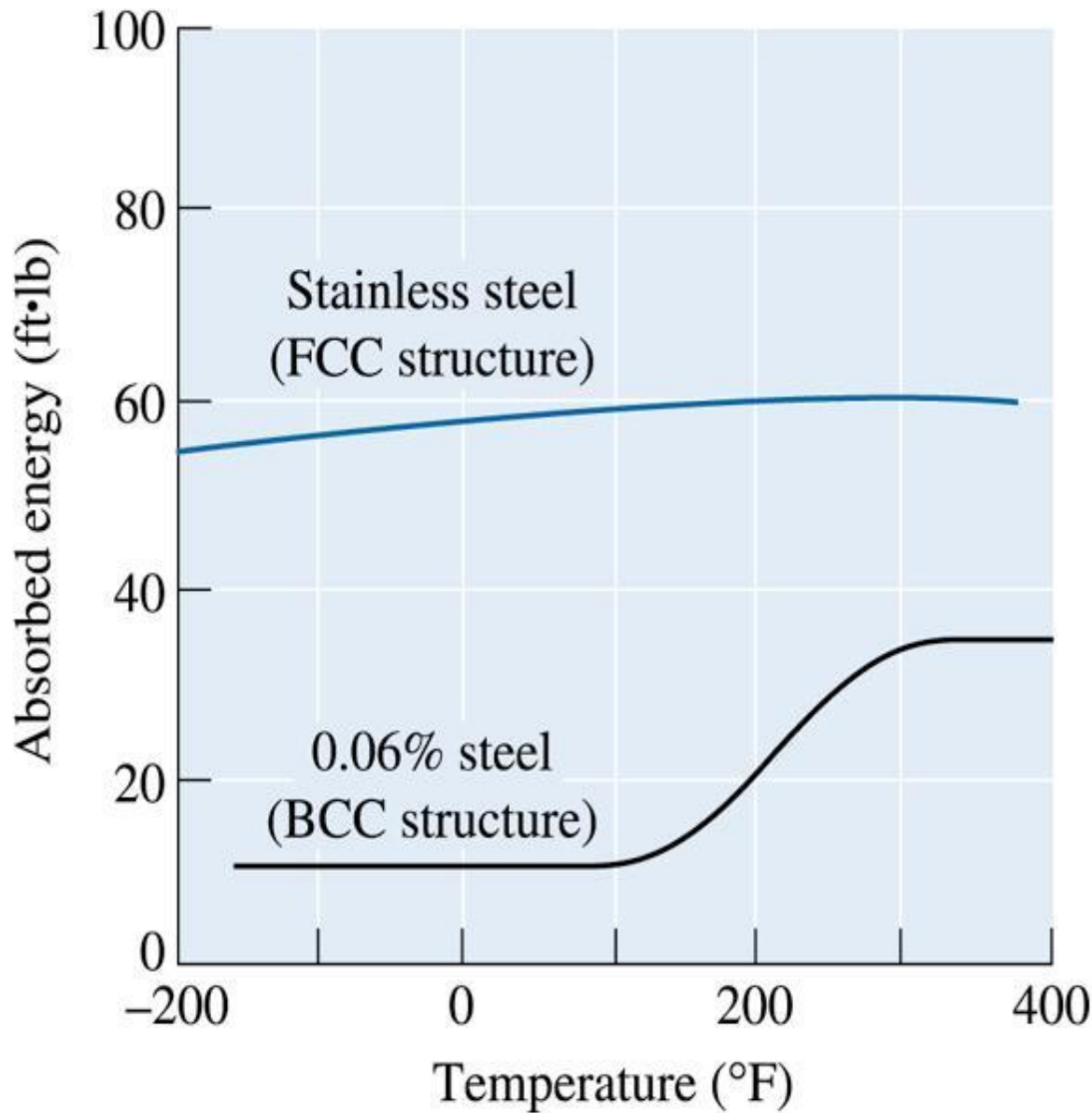


- Caratteristiche del provino e dell'intaglio stabilite dalle norme
- Resilienza=energia assorbita per unità di area
- Determinazione della temperatura di transizione duttile-fragile

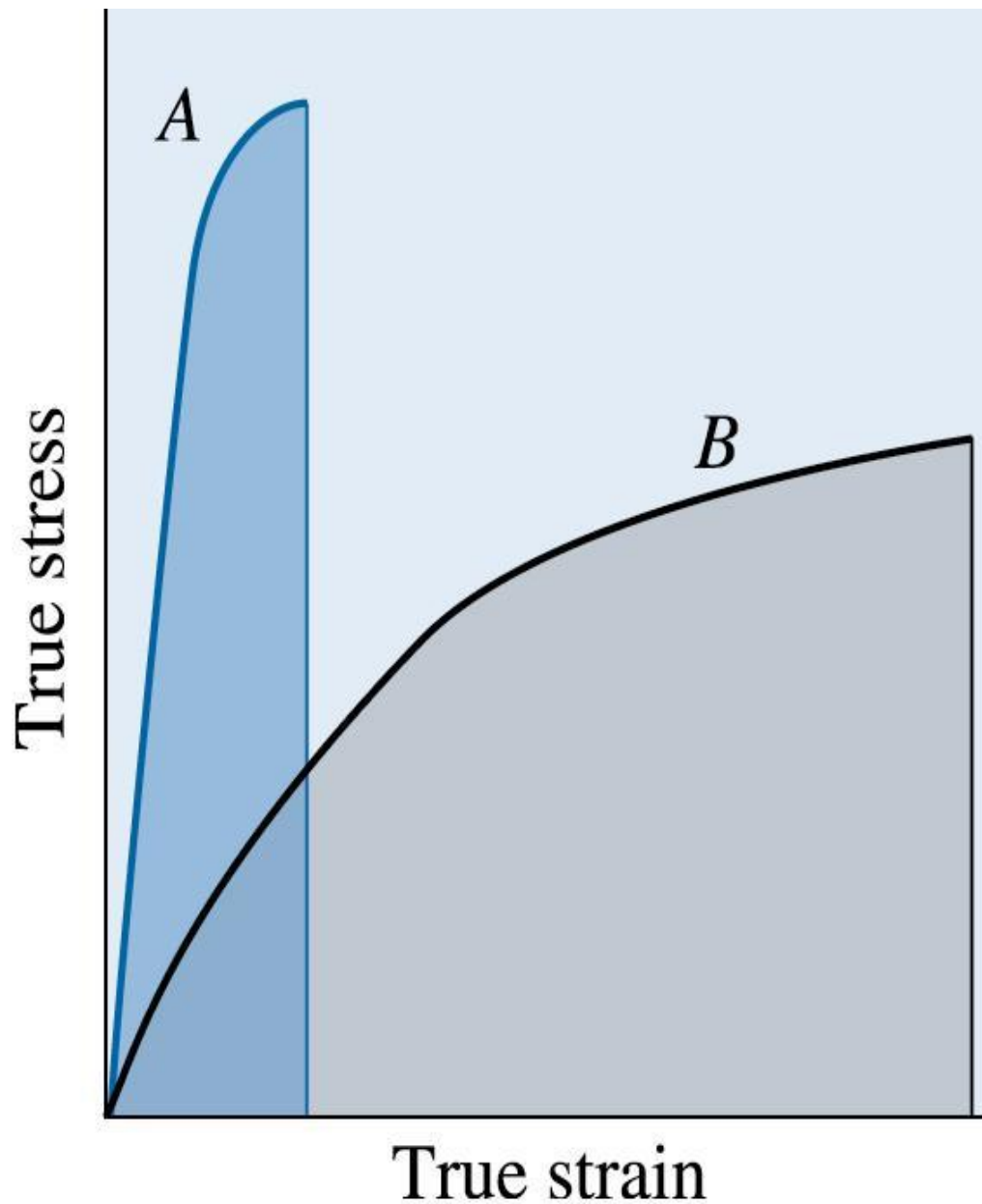




Risultati di una serie di test di impatto Izod per un polimero termoplastico di nylon super resistente



La caratteristica per un test Izod (con intaglio a V) per un acciaio al carbonio BCC e un acciaio inossidabile FCC. La struttura del cristallo FCC assorbe tipicamente energie più elevate e non presenta una temperatura di transizione



L'area sottesa dalla curva di sforzo-deformazione vera è correlata alla resistenza a trazione. Sebbene il materiale B abbia una resistenza allo snervamento inferiore, assorbe un'energia maggiore rispetto al materiale A. Le energie di queste curve potrebbero non essere uguali a quelle ottenute dai dati delle prove di impatto