

Comportamento meccanico dei materiali

Riferimento: capitolo 2 del Kalpakjian

Importante per comprendere il comportamento dei materiali
durante le lavorazioni

Outline

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

Outline: argomento seguente

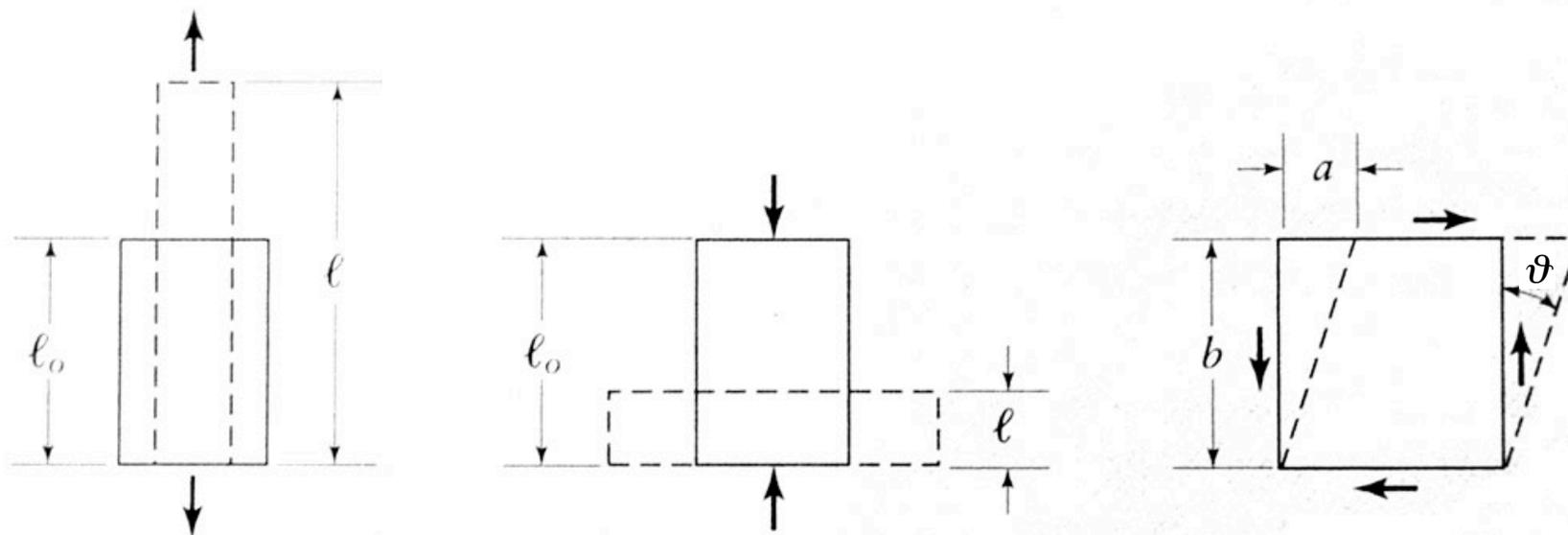
- **Introduzione**
- Tensione e compressione
- Torsione
- Flessione
- Durezza
- Fatica
- Creep
- Resistenza ad impatto
- Sforzi residui
- Criteri di snervamento
- Lavoro di deformazione

Introduzione al comportamento meccanico

- Conoscere il comportamento meccanico è importante per le lavorazioni per deformazione plastica. Le lavorazioni plastiche comprendono:
 - deformazione pezzi spessi (forgiatura, laminazione, estrusione, trafilatura in barre e fili);
 - deformazione lamiera (piegatura, stiratura, centrifugazione, imbutitura, lavoro di pressa).
- Inoltre è importante conoscere le relazioni sforzo/deformazione/rottura per progettare stampi, scegliere utensili e progettare l'equipaggiamento opportuno.

Aspetti fondamentali

- Tipicamente per produrre un filo mettiamo il materiale in tensione,
- per un albero motore usiamo la compressione,
- per fare un foro per punzonatura, sottoponiamo il materiale a taglio.



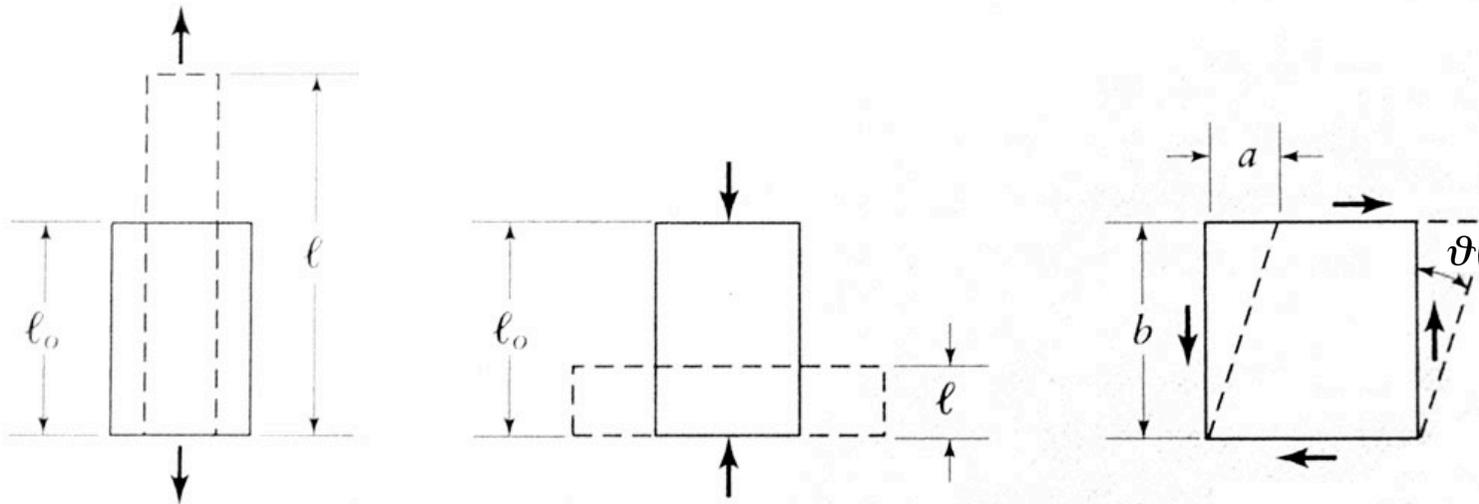
Allungamenti e deformazioni

- Allungamento: $\Delta l = l - l_0$

Piccole deformazioni

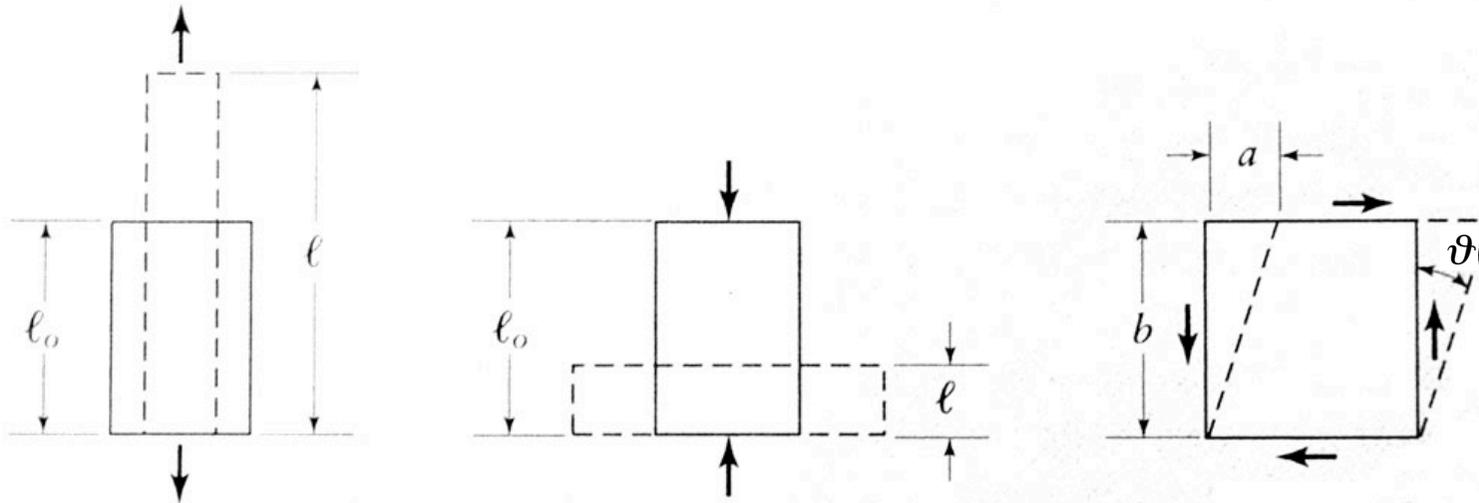
- Deformazione lineare (def. ingegneristica): $\varepsilon_E = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0}$

- Deformazione lineare (def. vera): $\varepsilon_T = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon_E)$



Deformazione a taglio

- Deformazione angolare: $\tan \vartheta = \frac{a}{b} = \gamma$



Carichi e sforzi

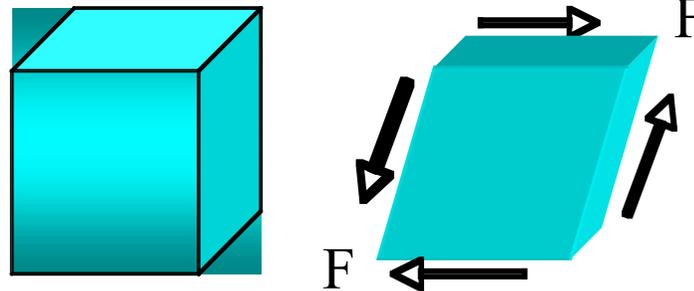
$$\sigma_E = \frac{F}{A_o}$$



$$\sigma_T = \frac{F}{A}$$

$$\sigma_T = \sigma_E (1 + \varepsilon_E)$$

$$\tau = \frac{F}{A}$$



Sforzi e deformazioni

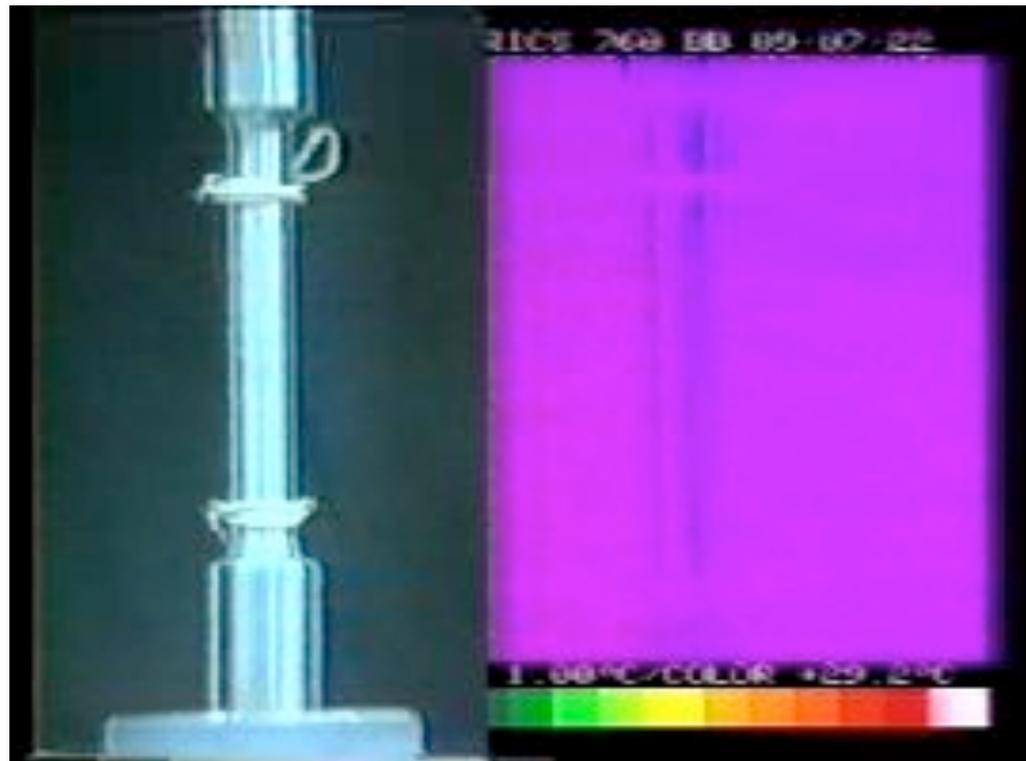
- In meccanica si preferisce usare:
 - sforzi al posto dei carichi
 - deformazioni al posto di allungamenti
- Sforzi e deformazioni e la legge che li lega sono dipendenti dal materiale ma indipendenti dalla forma e dimensioni
- Carichi e allungamenti invece dipendono anche dalla forma e dimensione del pezzo

Outline: argomento seguente

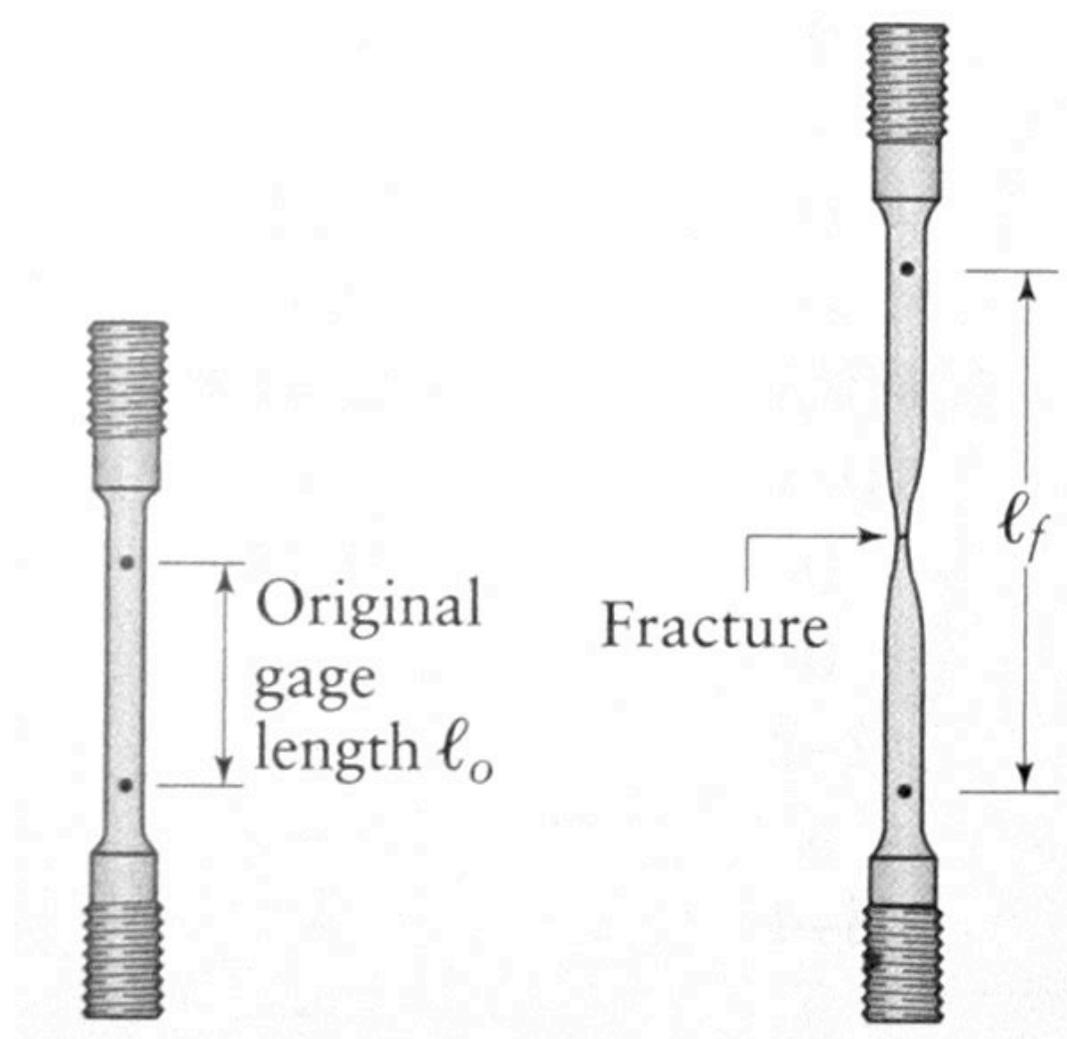
- Introduzione
- **Tensione e compressione**
- Torsione
- Flessione
- Durezza
- Fatica
- Creep
- Resistenza ad impatto
- Sforzi residui
- Criteri di snervamento
- Lavoro di deformazione

Test di tensione

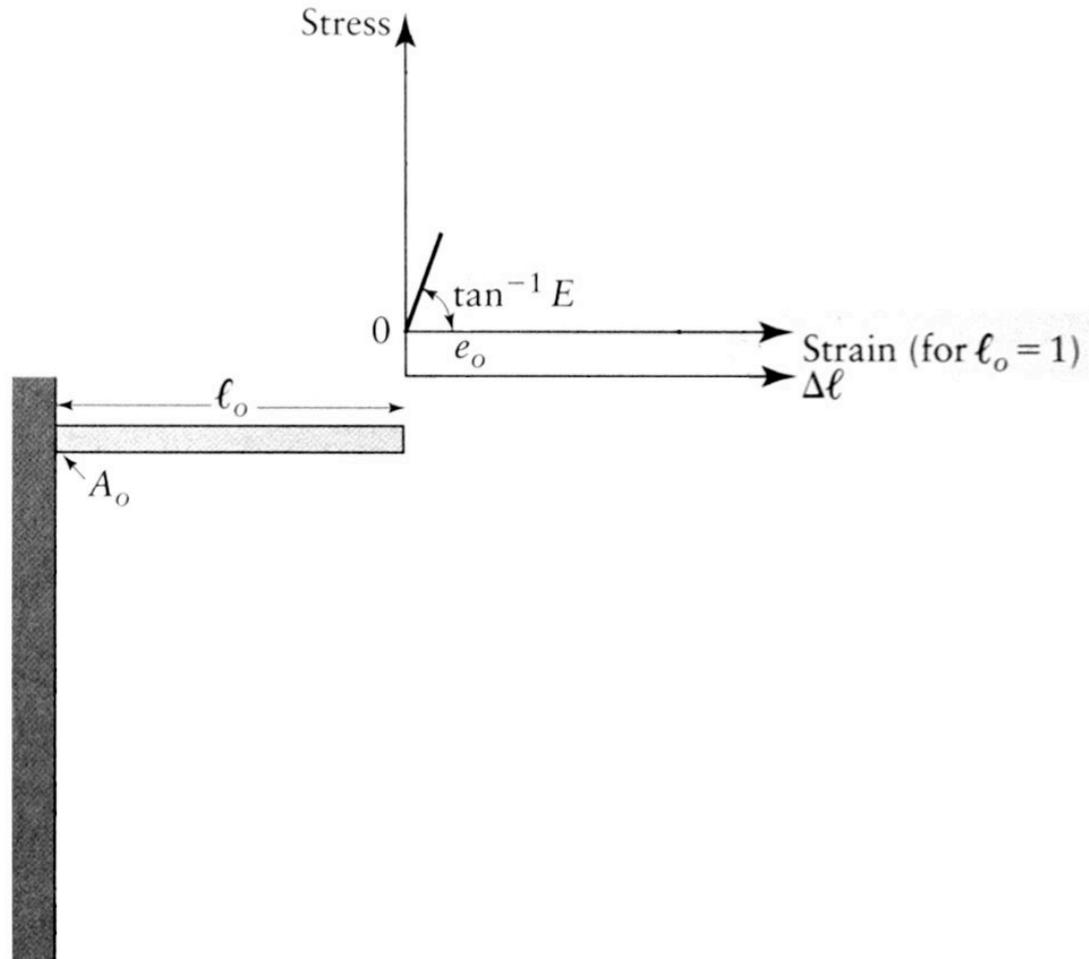
- È il test più comune per determinare le caratteristiche di resistenza e deformazione di un materiale



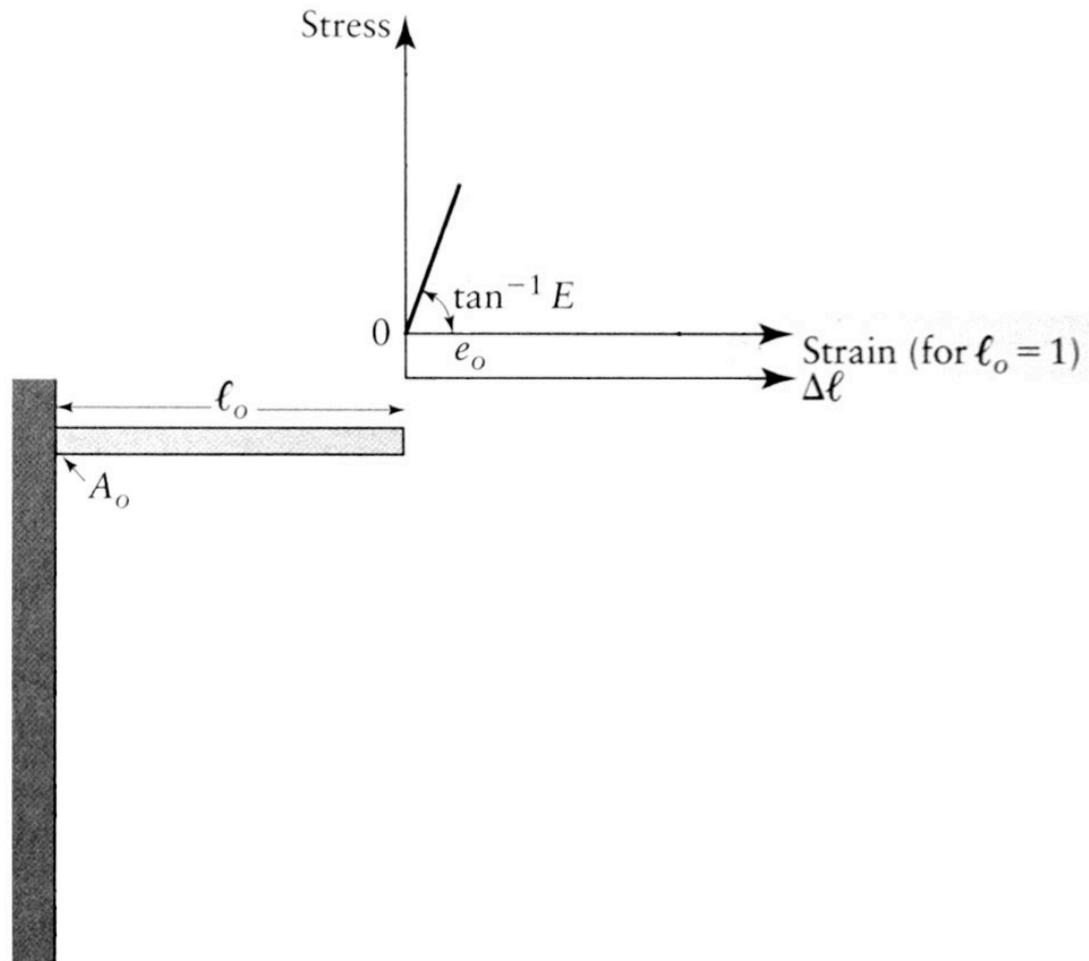
Test di tensione



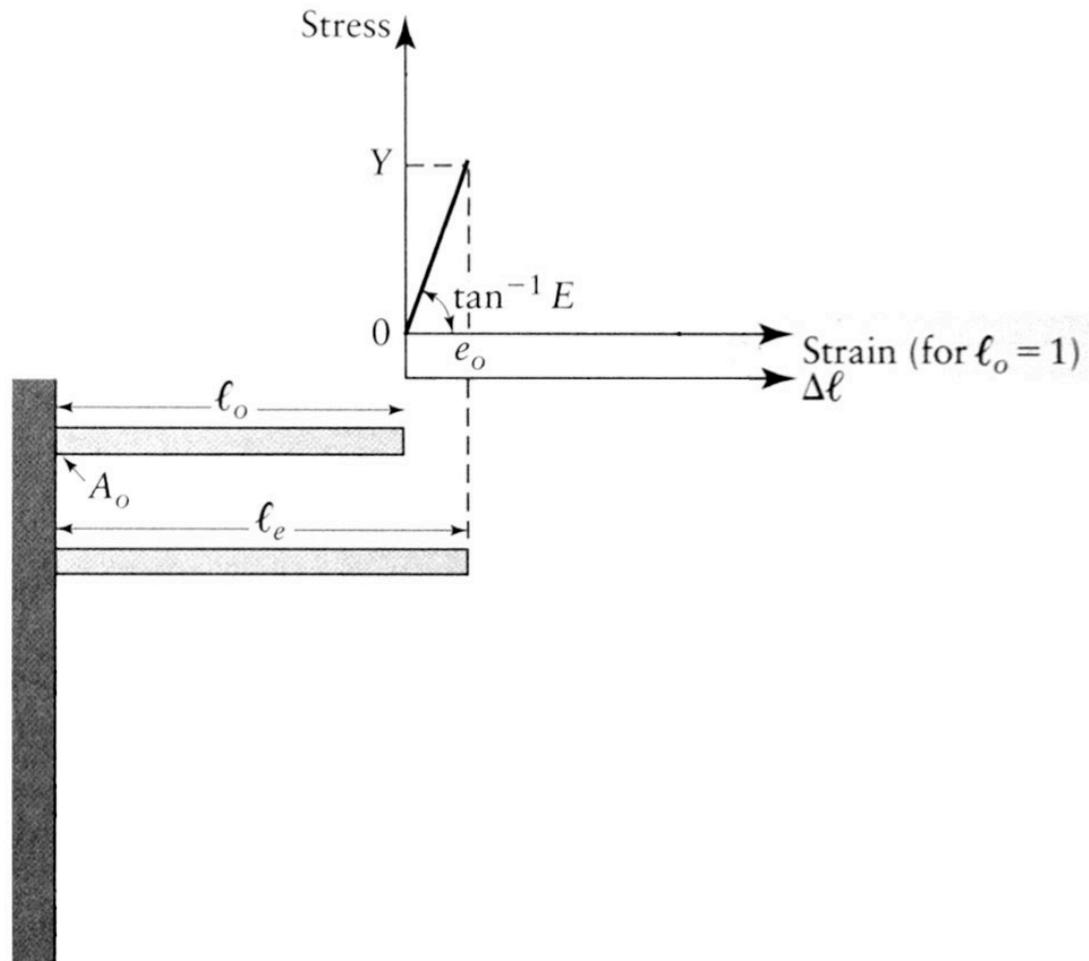
Tensione: tratto elastico lineare



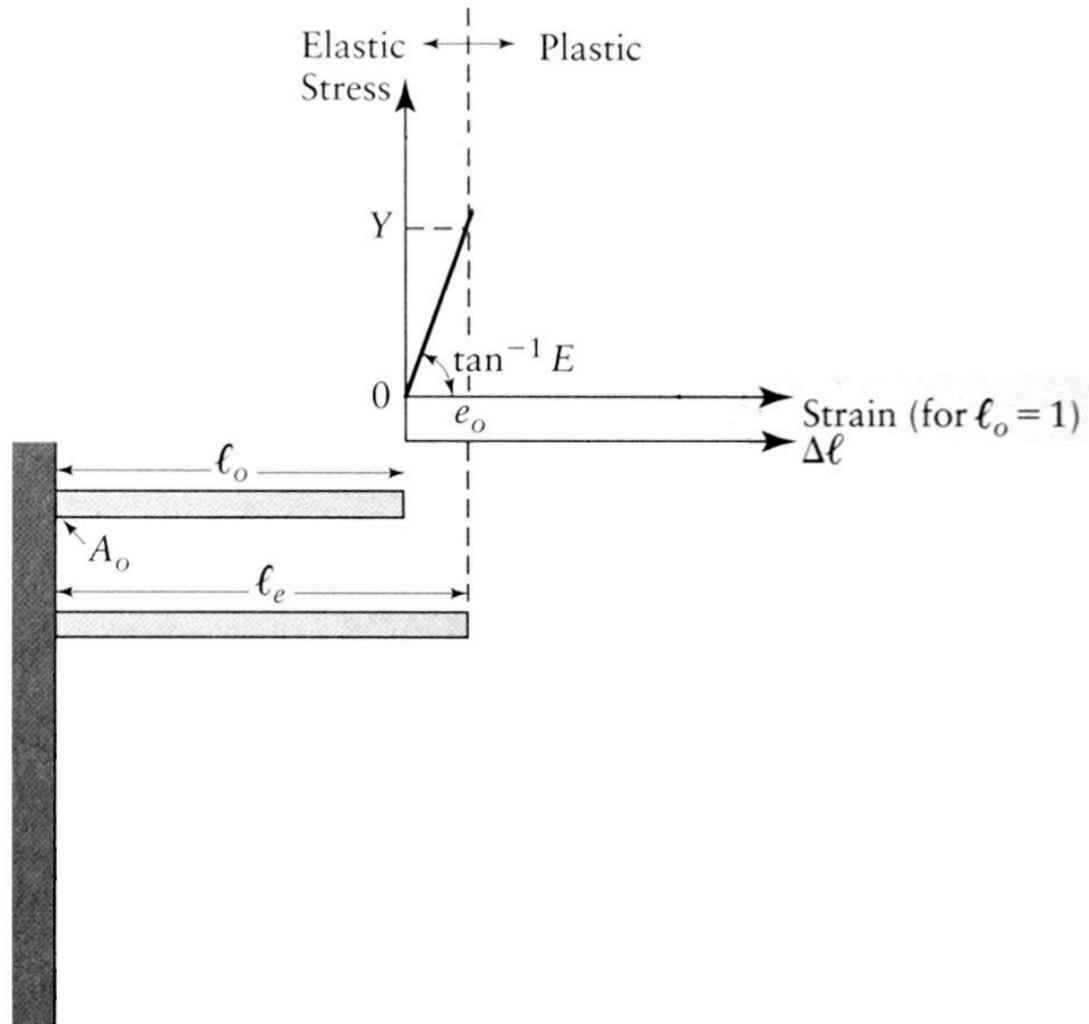
Tensione: tratto elastico lineare continua



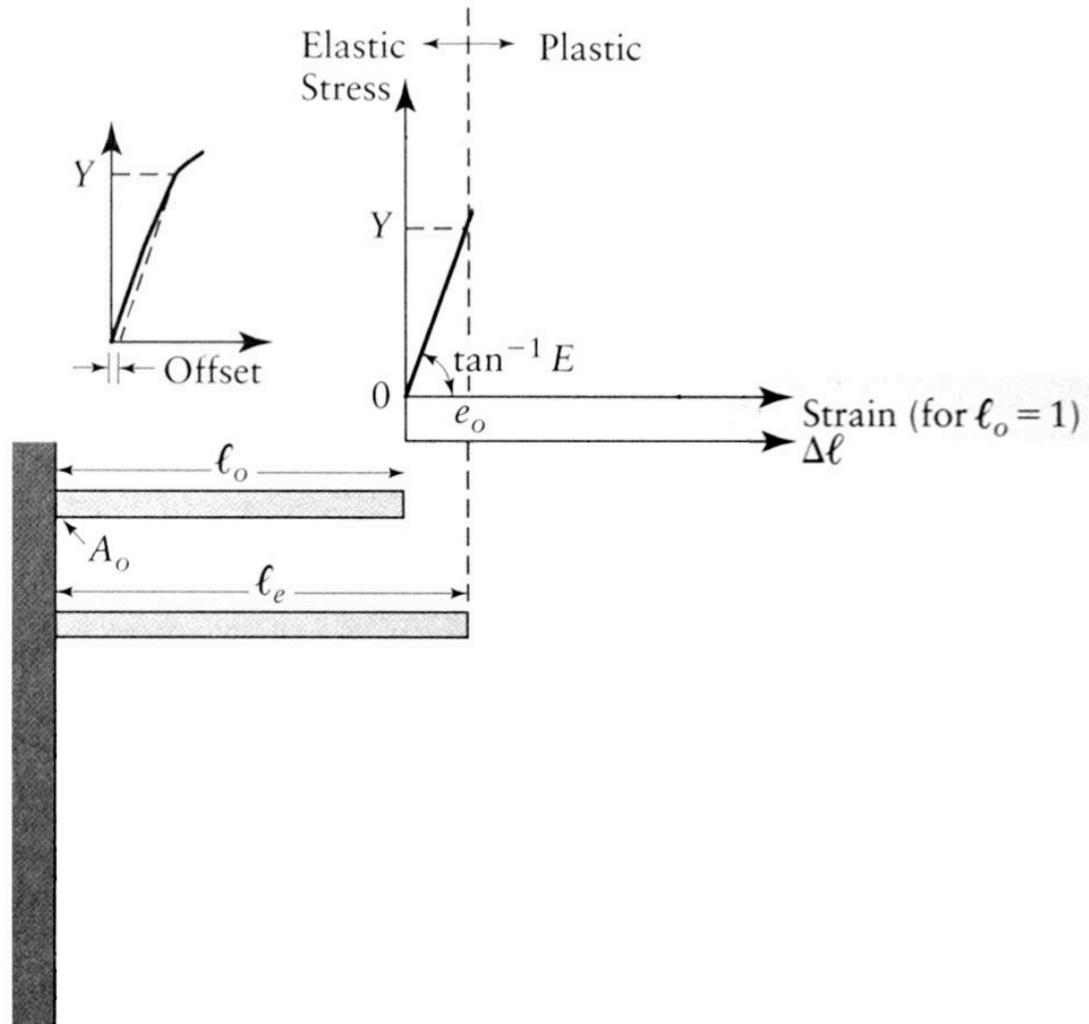
Tensione: limite elastico



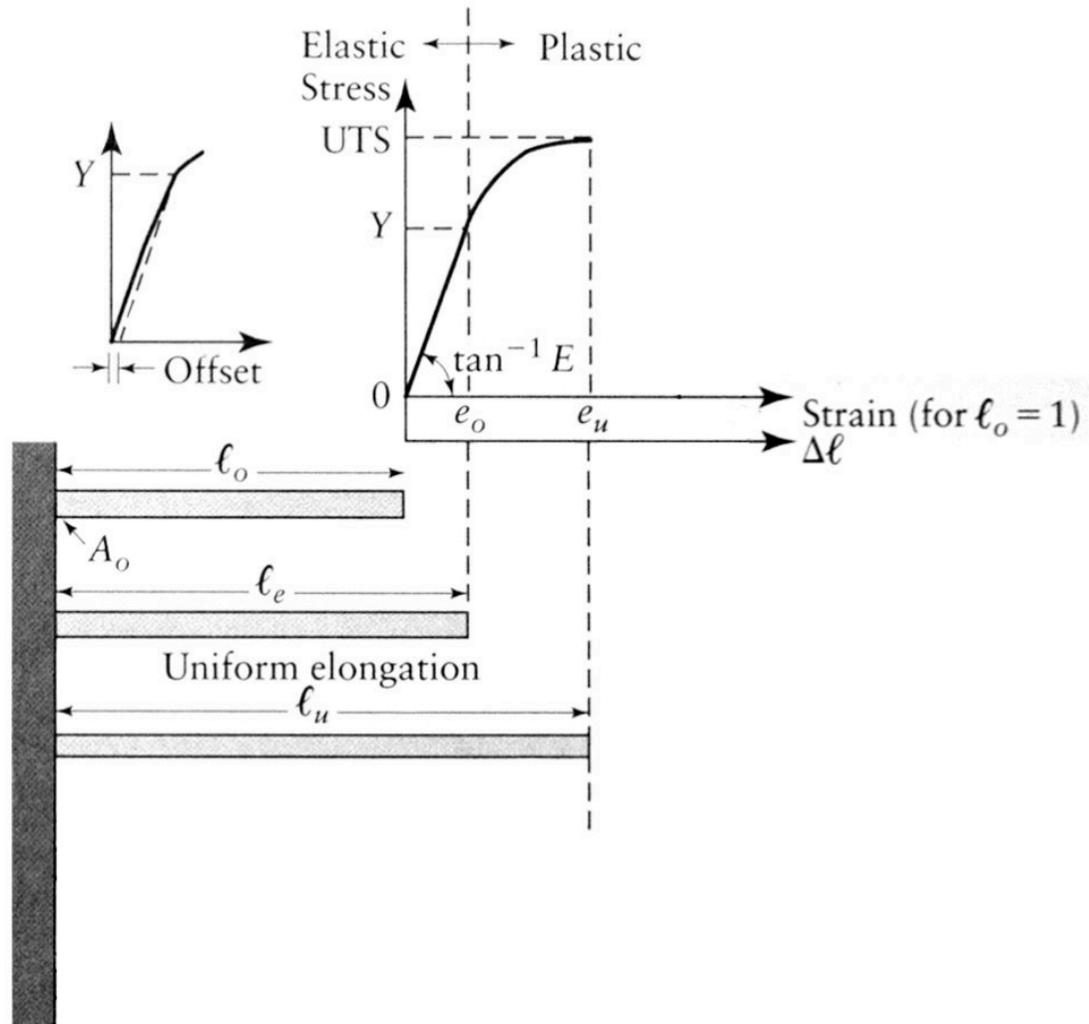
Tensione: deformazione plastica



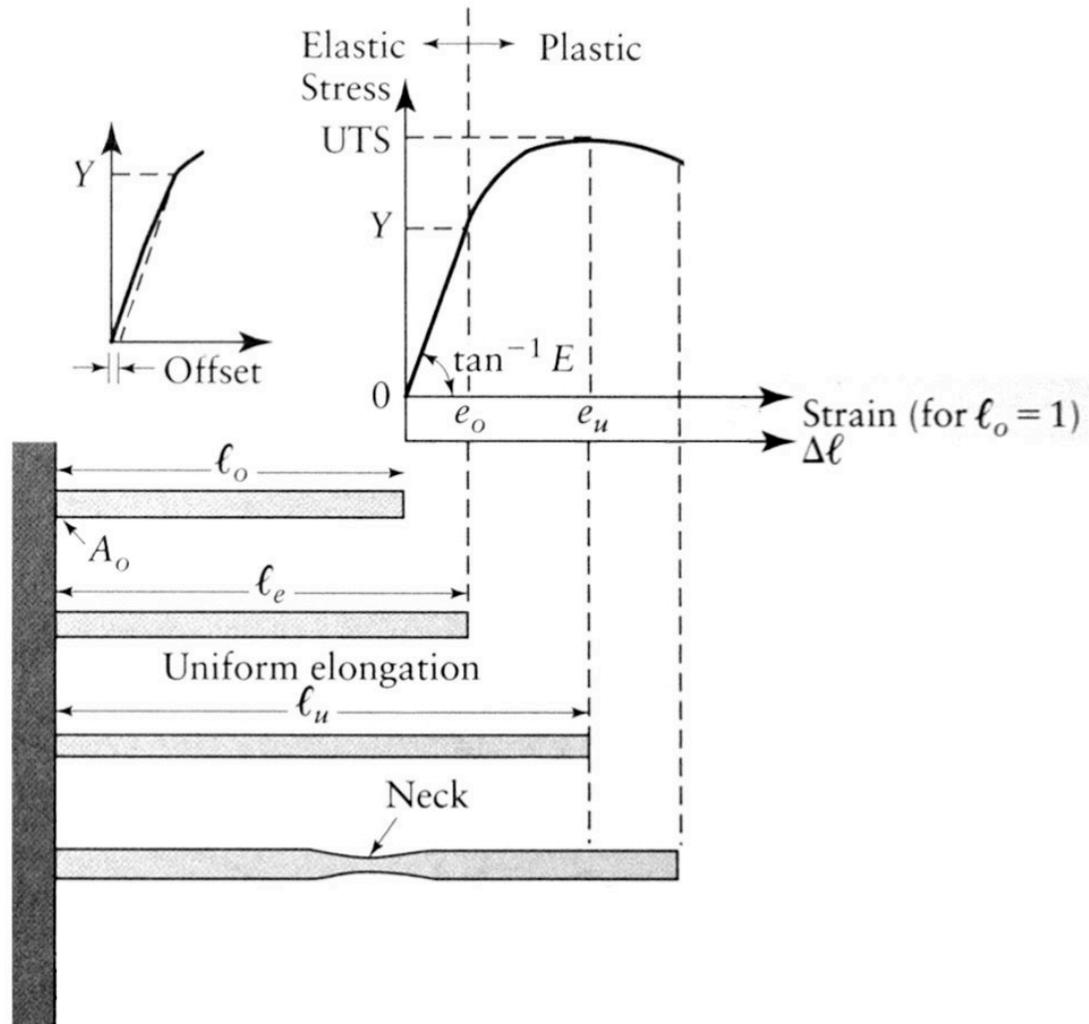
Tensione: limite di snervamento (def. 0.2%)



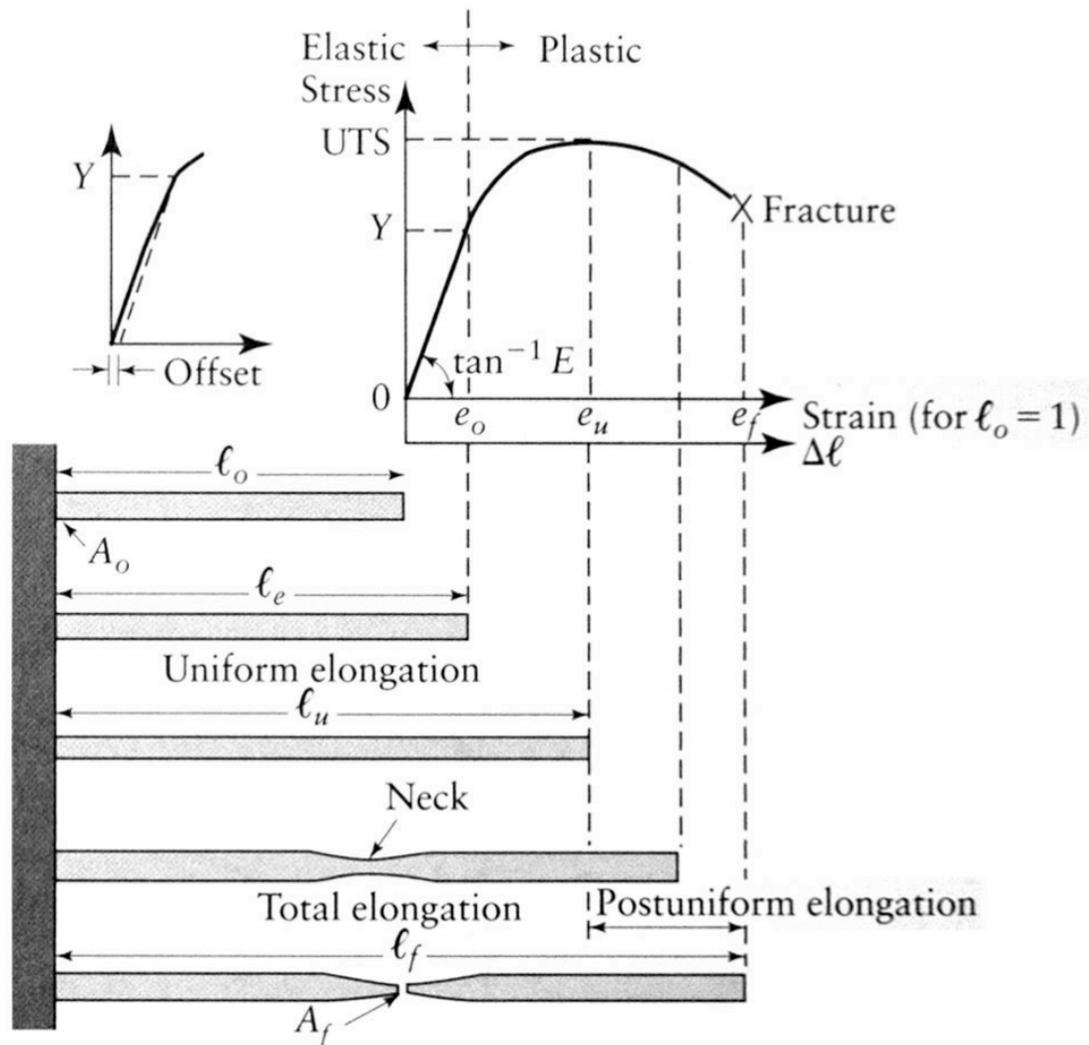
Tensione: limite ultimo



Tensione: strizione



Tensione: frattura



Deformazione elastica lineare: legge di Hooke

- Caso uniassiale: modulo di elasticità o di Young:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (\text{MPa;GPa,MPa;-})$$

- Nel caso del taglio:

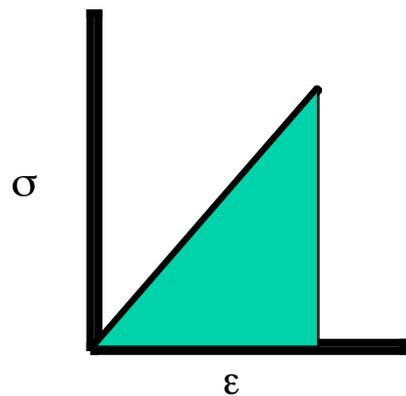
$$\tau = G\gamma \quad (\text{MPa;GPa,MPa;-})$$

- Resilienza (lavoro per portare il materiale a snervamento = energia per portare a rottura il materiale in campo elastico):

$$\text{Resilienza} = \frac{Y\varepsilon_o}{2} = \frac{Y^2}{2E} \quad (\text{J/m}^3)$$

Resilienza

- Capacità del materiale di assorbire energia mentre viene deformato elasticamente



$$U_r = \int_0^{\epsilon_y} \sigma d\epsilon$$

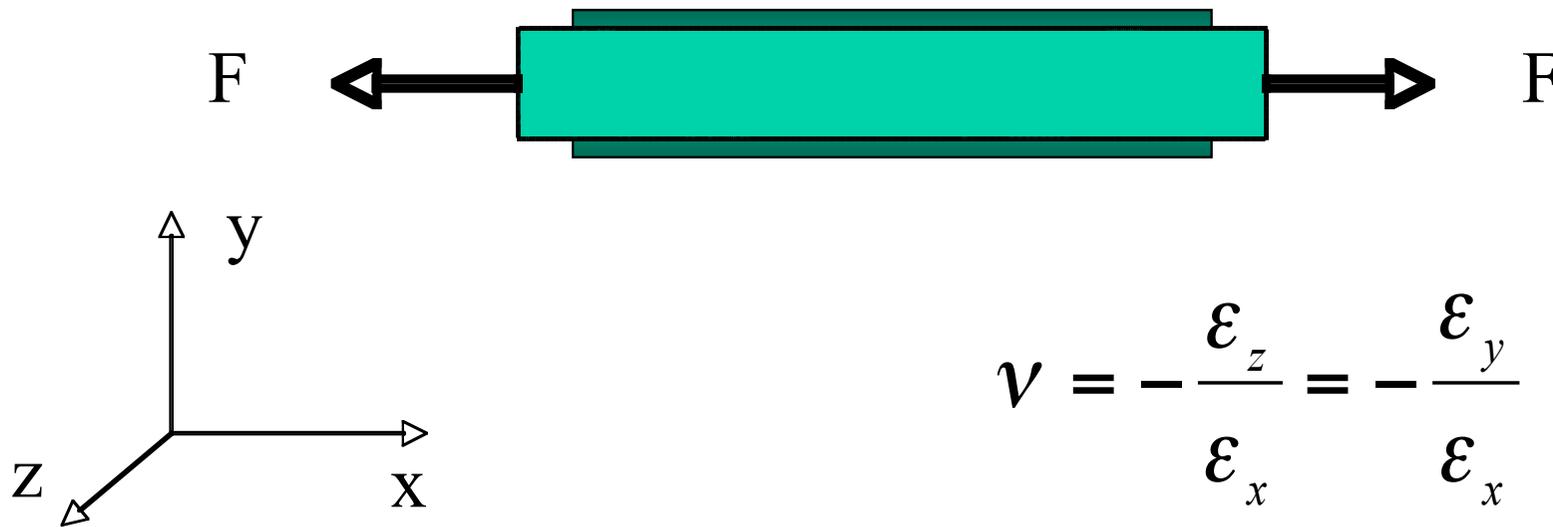
Caso elastico-lineare

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_y \epsilon_y \quad U_r = \frac{Y^2}{2E}$$

I materiali resilienti hanno alto snervamento e basso modulo elastico

Rapporto di Poisson

- Rapporto tra la deformazione trasversale e longitudinale
- E' controllato dalla tendenza del materiale ha mantenere lo stesso volume
- E' in genere positivo, esiste qualche polimero con modulo di Poisson < 0



Relazione tra le costanti

- Vale per materiali isotropi (solamente)
- Lega modulo di Young, modulo di taglio e rapporto di Poisson

$$E = 2G(1 + \nu)$$

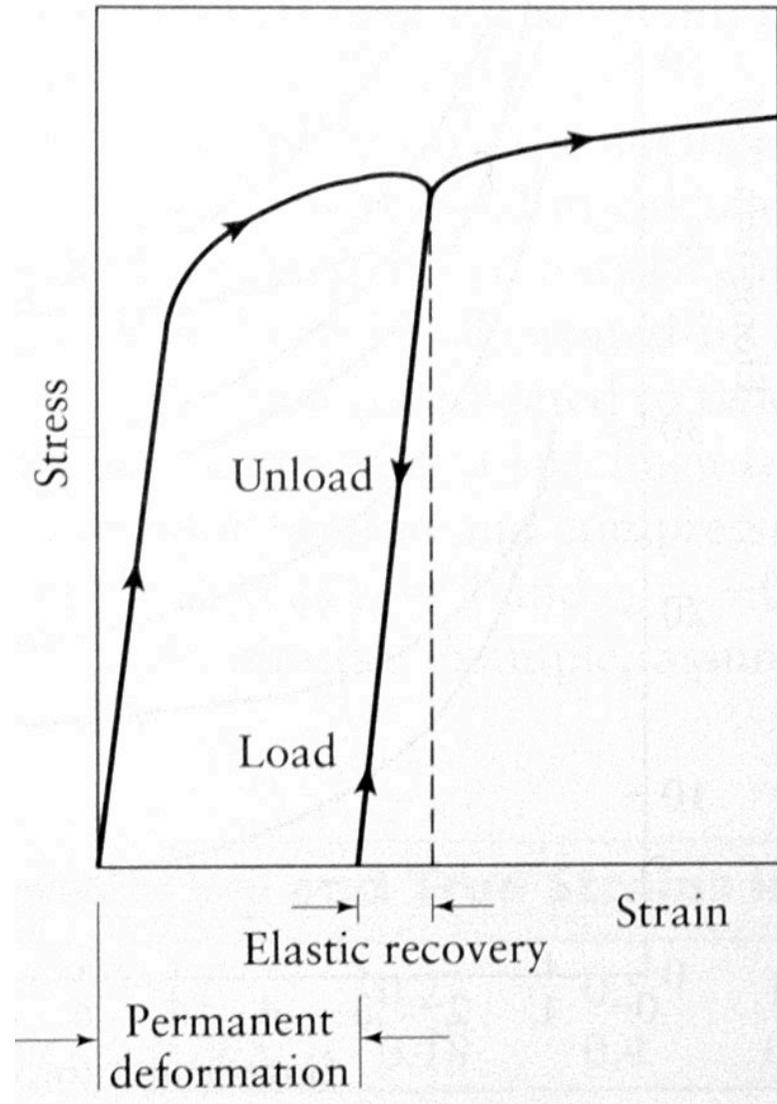
- Per materiali anisotropi occorrono le relazioni tridimensionali complete (in seguito)

Proprietà meccaniche tipiche per alcuni materiali

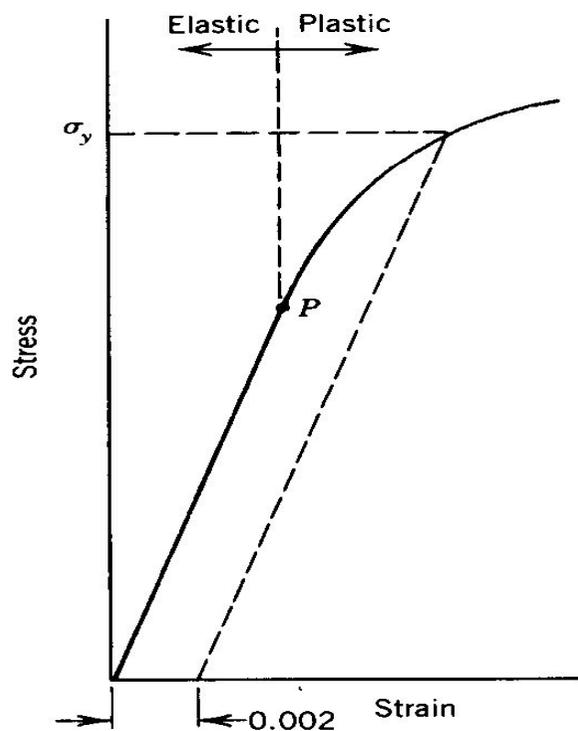
	E (GPa)	Y (MPa)	UTS (MPa)	Elongation in 50 mm (%)	Poisson's Ratio (ν)
METALS (WROUGHT)					
Aluminum and its alloys	69-79	35-550	90-600	45-5	0.31-0.34
Copper and its alloys	105-150	76-1100	140-1310	65-3	0.33-0.35
Lead and its alloys	14	14	20-55	50-9	0.43
Magnesium and its alloys	41-45	130-305	240-380	21-5	0.29-0.35
Molybdenum and its alloys	330-360	80-2070	90-2340	40-30	0.32
Nickel and its alloys	180-214	105-1200	345-1450	60-5	0.31
Steels	190-200	205-1725	415-1750	65-2	0.28-0.33
Stainless steels	190-200	240-480	480-760	60-20	0.28-0.30
Titanium and its alloys	80-130	344-1380	415-1450	25-7	0.31-0.34
Tungsten and its alloys	350-400	550-690	620-760	0	0.27
NONMETALLIC MATERIALS					
Ceramics	70-1000	-	140-2600	0	0.2
Diamond	820-1050	-	-	-	-
Glass and porcelain	70-80	-	140	0	0.24
Rubbers	0.01-0.1	-	-	-	0.5
Thermoplastics	1.4-3.4	-	7-80	1000-5	0.32-0.40
Thermoplastics, reinforced	2-50	-	20-120	10-1	-
Thermosets	3.5-17	-	35-170	0	0.34
Boron fibers	380	-	3500	0	-
Carbon fibers	275-415	-	2000-5300	1-2	-
Glass fibers (S, E)	73-85	-	3500-4600	5	-
Kevlar fibers (29, 49, 129)	70-113	-	3000-3400	3-4	-
Spectra fibers (900, 1000)	73-100	-	2400-2800	3	-

Note: In the upper table, the lowest values for E , Y , and UTS and the highest values for elongation are for the pure metals.

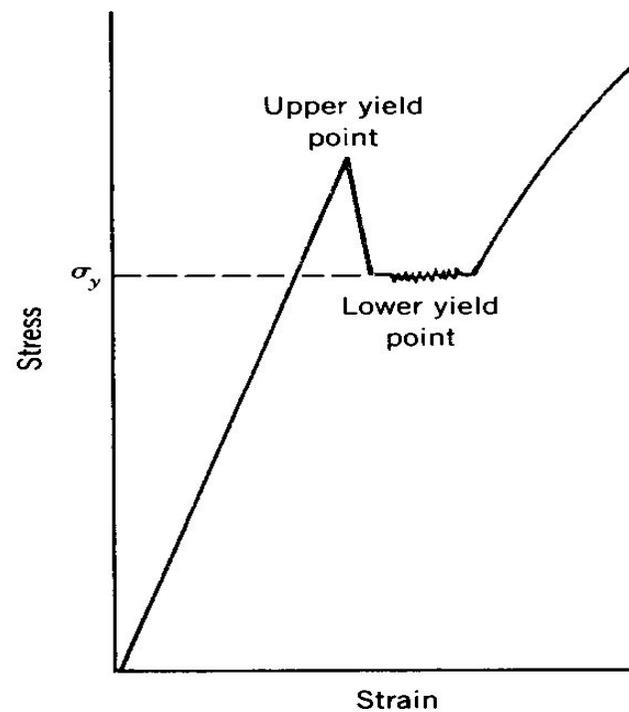
Deformazione plastica



Punto di snervamento



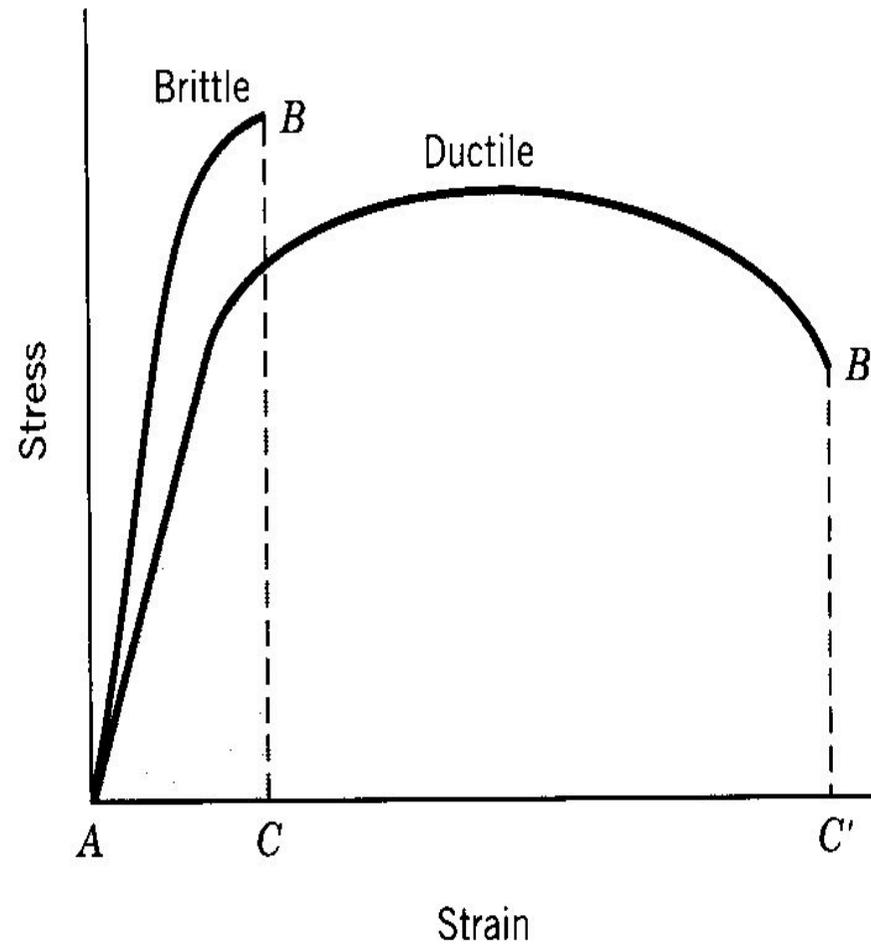
(a)



(b)

- a. Definizione punto di snervamento ingegneristico (0.2% di deformazione plastica residua)
- b. Punto di snervamento e bande di scorrimento nei metalli duttili

Duttile-Fragile



Duttilità

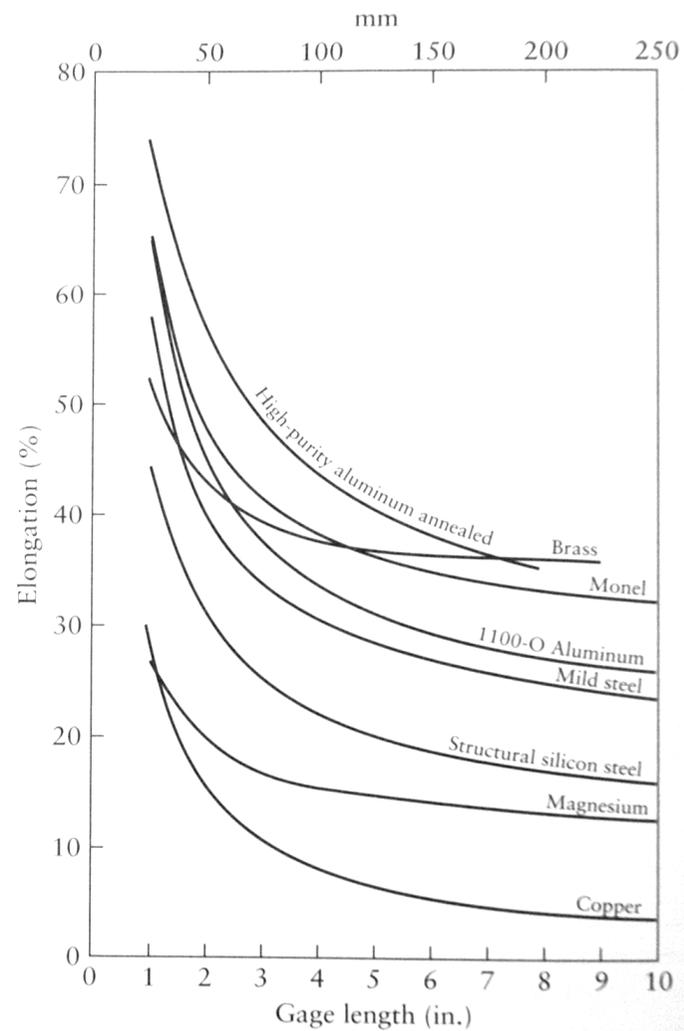
- E' pari all'ammontare di deformazione plastica del materiale prima di arrivare a rottura. Si misura dai due segni dell'estensimetro sui pezzi rotti ricombaciandoli:

$$\%EL = \left(\frac{l_f - l_o}{l_o} \right) \times 100$$

- In termini di sezione; si misura l'area della strizione:

$$\%AR = \left(\frac{A_o - A_f}{A_o} \right) \times 100$$

La duttilità misurata dipende dalla lunghezza utilizzata per l'estensimetro



Deformazione vera e strizione

- Nel caso di deformazione plastica vale la legge di conservazione del volume (D è il diametro di un provino cilindrico):

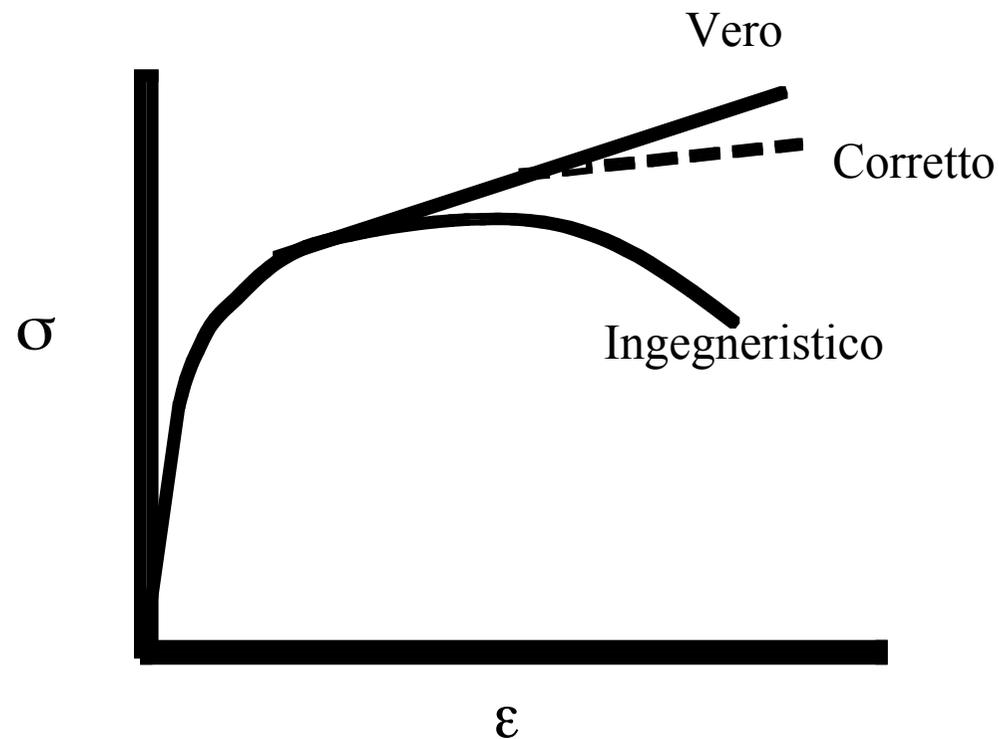
$$\varepsilon = \ln\left(\frac{l}{l_o}\right) = \ln\left(\frac{A_o}{A}\right) = \ln\left(\frac{D_o}{D}\right)^2 = 2\ln\left(\frac{D_o}{D}\right)$$

- Per cui possiamo utilizzare l'area della strizione nel punto di rottura per il calcolo dell'allungamento a rottura:

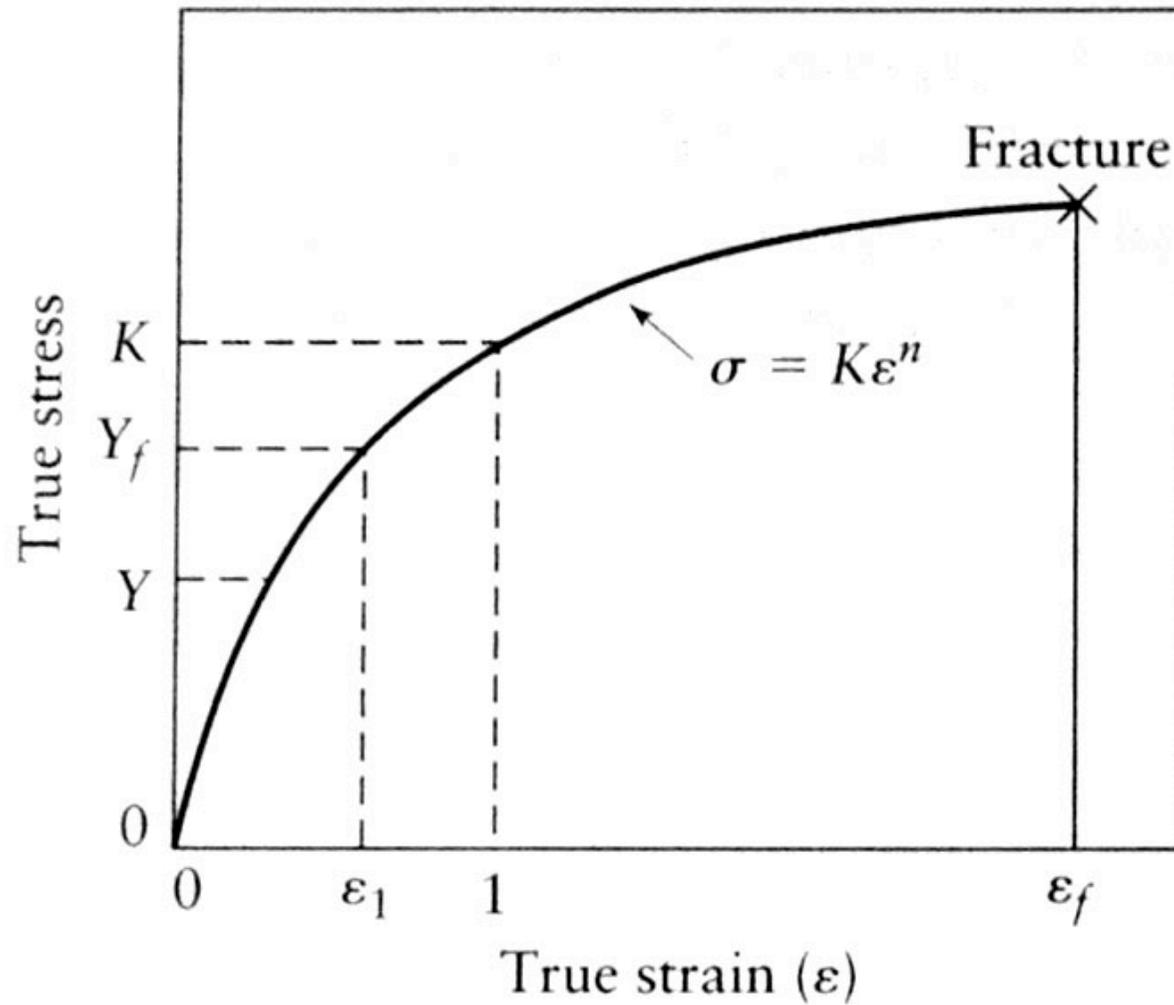
$$\varepsilon_f = \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right)$$

Curva sforzo vero - deformazione vera

- Si ottiene correggendo la curva sforzo-deformazione misurata con la deformazione vera (\ln) e lo sforzo vero (considerando la strizione):



Curva sforzo-deformazione veri



Curva sforzo-deformazione veri

- La curva può essere approssimata dalla seguente equazione:

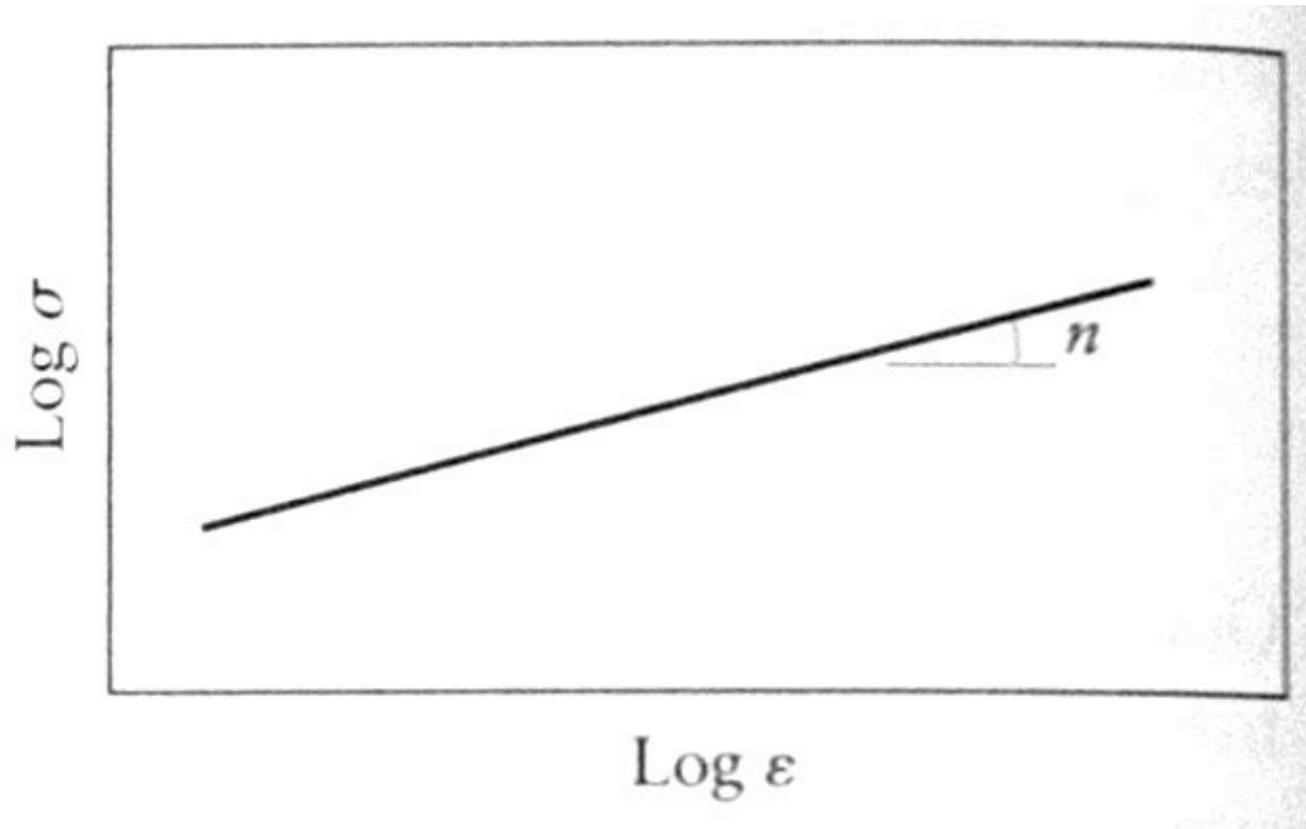
$$\sigma_T = K \varepsilon_T^n$$

- K è il coefficiente di sforzo
- n l'esponente di incrudimento
- L'equazione può essere riscritta come:

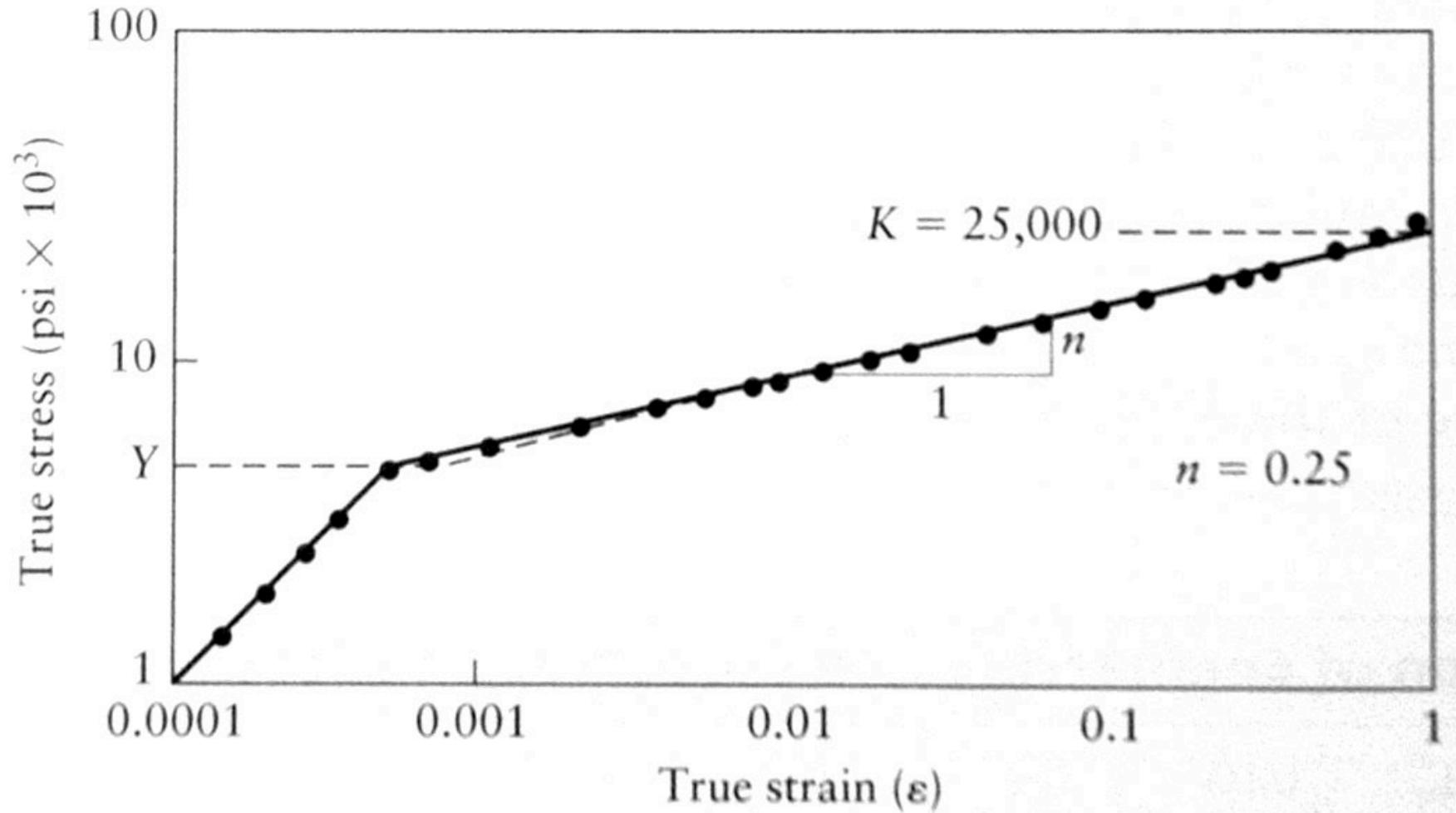
$$\log \sigma_T = \log K + n \log \varepsilon_T$$

Curva logaritmica, parte plastica

$$\log \sigma_T = \log K + n \log \varepsilon_T$$



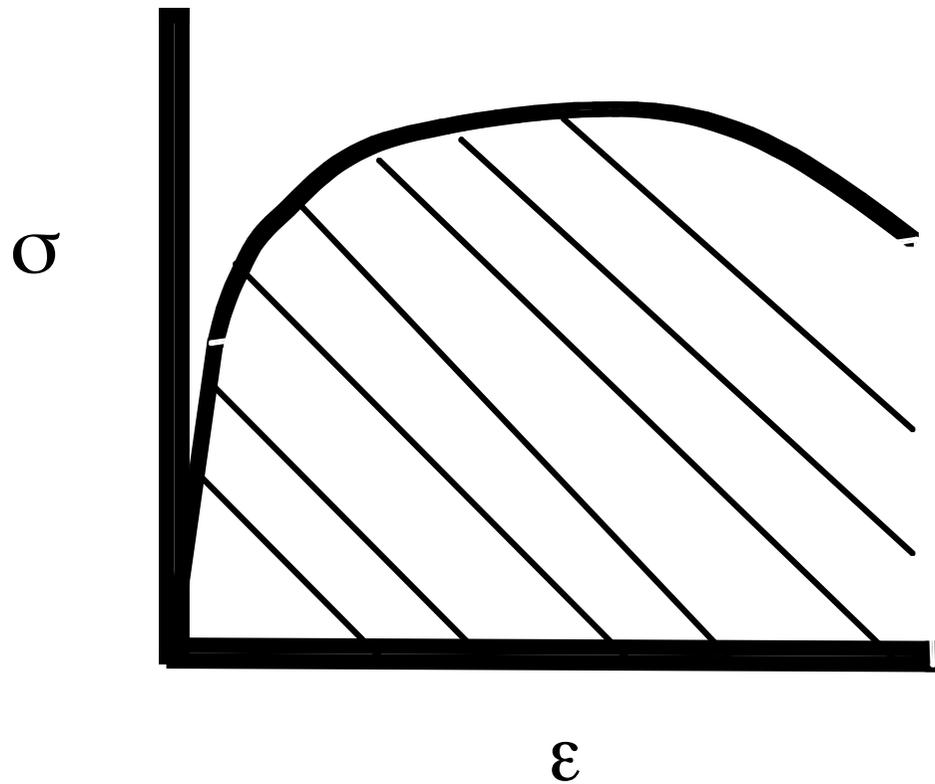
Curva logaritmica, parte elastica+plastica



K e n per diversi metalli e leghe

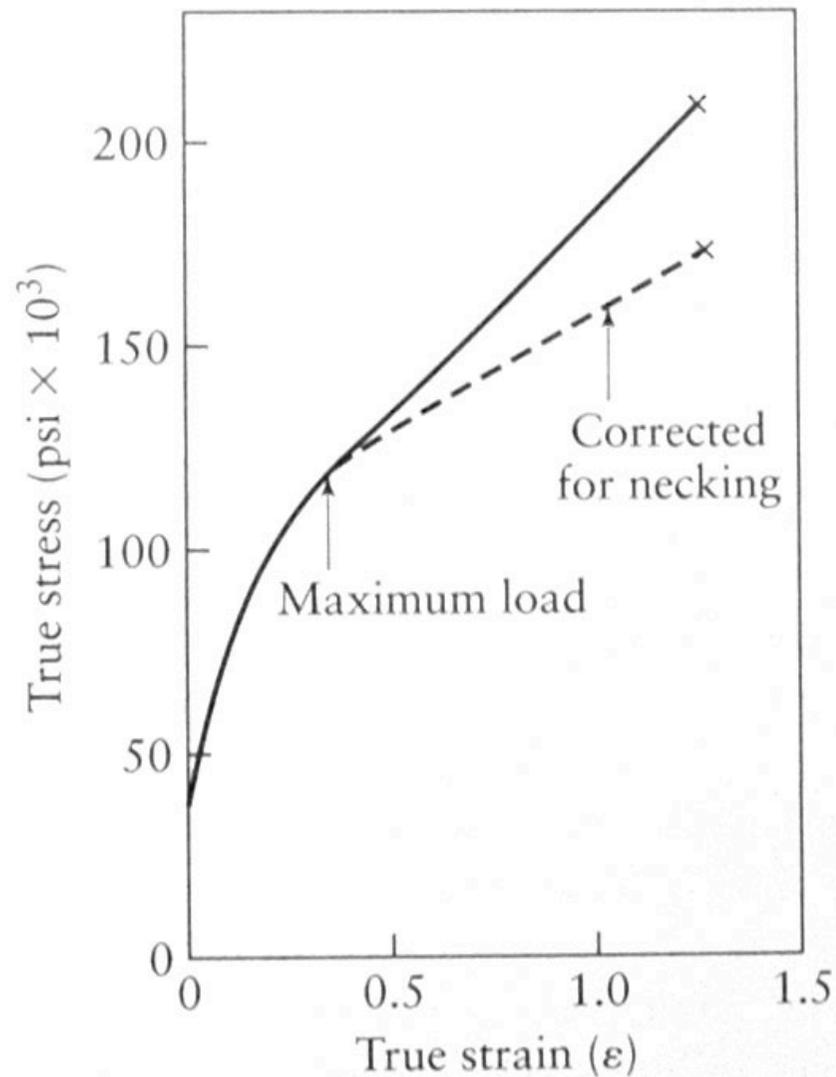
Material	K (MPa)	n
Aluminum, 1100-O	180	0.20
2024-T4	690	0.16
5052-O	210	0.13
6061-O	205	0.20
6061-T6	410	0.05
7075-O	400	0.17
Brass, 70-30, annealed	895	0.49
85-15, cold rolled	580	0.34
Bronze (phosphor), annealed	720	0.46
Cobalt-base alloy, heat treated	2070	0.50
Copper, annealed	315	0.54
Molybdenum, annealed	725	0.13
Steel, low carbon, annealed	530	0.26
1045 hot rolled	965	0.14
1112 annealed	760	0.19
1112 cold rolled	760	0.08
4135 annealed	1015	0.17
4135 cold rolled	1100	0.14
4340 annealed	640	0.15
17-4 P-H, annealed	1200	0.05
52100 annealed	1450	0.07
304 stainless, annealed	1275	0.45
410 stainless, annealed	960	0.10

Tenacità



$$\textit{Tenacità} = \int_0^{\epsilon_f} \sigma d\epsilon$$

Correzione sulla strizione



- Alla strizione il carico non e' più perfettamente uniassiale
- Si applicano le equazioni tridimensionali

La resistenza ultima

- La resistenza ultima è il punto in cui inizia la strizione.
- In tale punto la curva del carico raggiunge il massimo (la derivata diventa zero).

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{A_o}{A}\right), \quad A = A_o e^{-\varepsilon}$$

$$P = \sigma A = \sigma A_o e^{-\varepsilon}$$

- Con le opportune sostituzioni risulta:

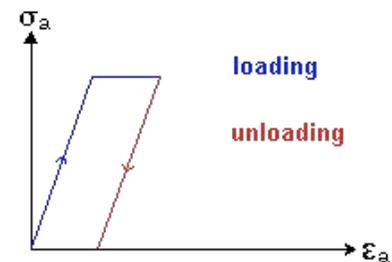
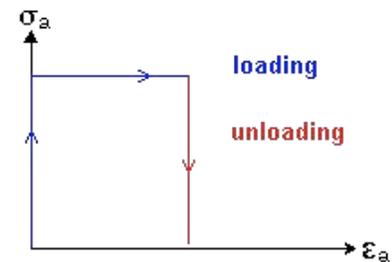
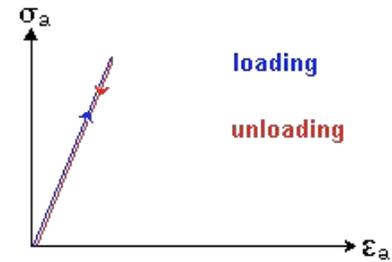
$$\varepsilon = n$$

Instabilità nella curva in tensione

- L'instabilità all'inizio della strizione è dovuta ai due processi contemporanei:
 - Sforzo che aumenta
 - Sezione che diminuisce
- Quando si superano determinati valori l'incremento dello sforzo necessario a continuare la deformazione plastica è inferiore a quello dato dalla diminuzione di sezione (considerando un carico costante)
- In tal punto si ha instabilità e a carico costante il pezzo continua a deformarsi fino a rottura.

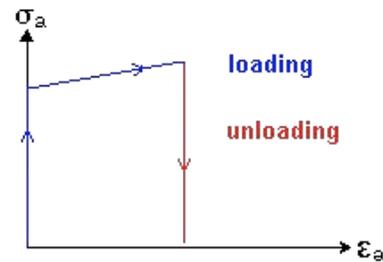
Tipi di curve differenti

- Perfettamente elastica
- Rigida, perfettamente plastica
- Elastica, perfettamente plastica

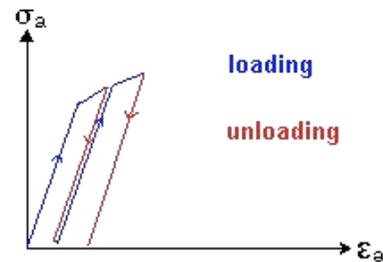


Tipi di curve differenti

- Perfettamente rigida, ad incrudimento lineare



- Elastica, ad incrudimento lineare



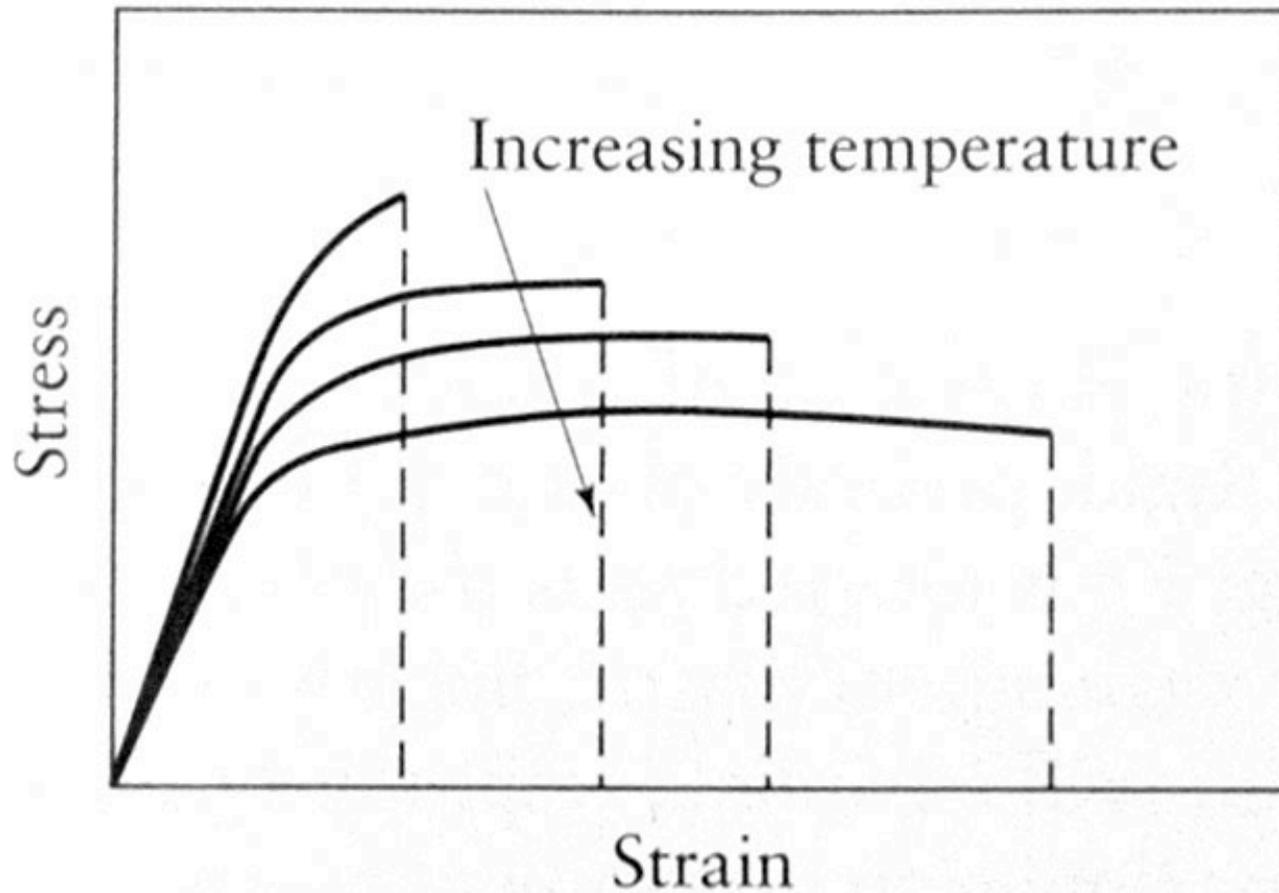
Differenti tipi di curve ed n

- Per valori differenti di n, l'esponente di incrudimento, si ottengono alcuni tipi delle curve ideali descritte.
- Per $n=0$ si ha un comportamento rigido perfettamente plastico
- Per $0 < n < 1$ comportamento intermedio
- Per $n=1$ comportamento perfettamente elastico

Effetto della temperatura

- La temperatura ha diversi effetti sulle proprietà meccaniche:
 - incrementa:
 - duttilità
 - tenacità
 - decrementa:
 - modulo di elasticità
 - limite di snervamento
 - resistenza ultima
 - l'esponente di incrudimento n

Effetto della temperatura sui diagrammi



Velocità di deformazione

- Nelle lavorazioni è importante la velocità di deformazione
- La velocità di deformazione ingegneristica:

$$\dot{\epsilon}_E = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d\left(\frac{l-l_o}{l_o}\right)}{dt} = \frac{1}{l_o} \frac{dl}{dt} = \frac{v}{l_o}$$

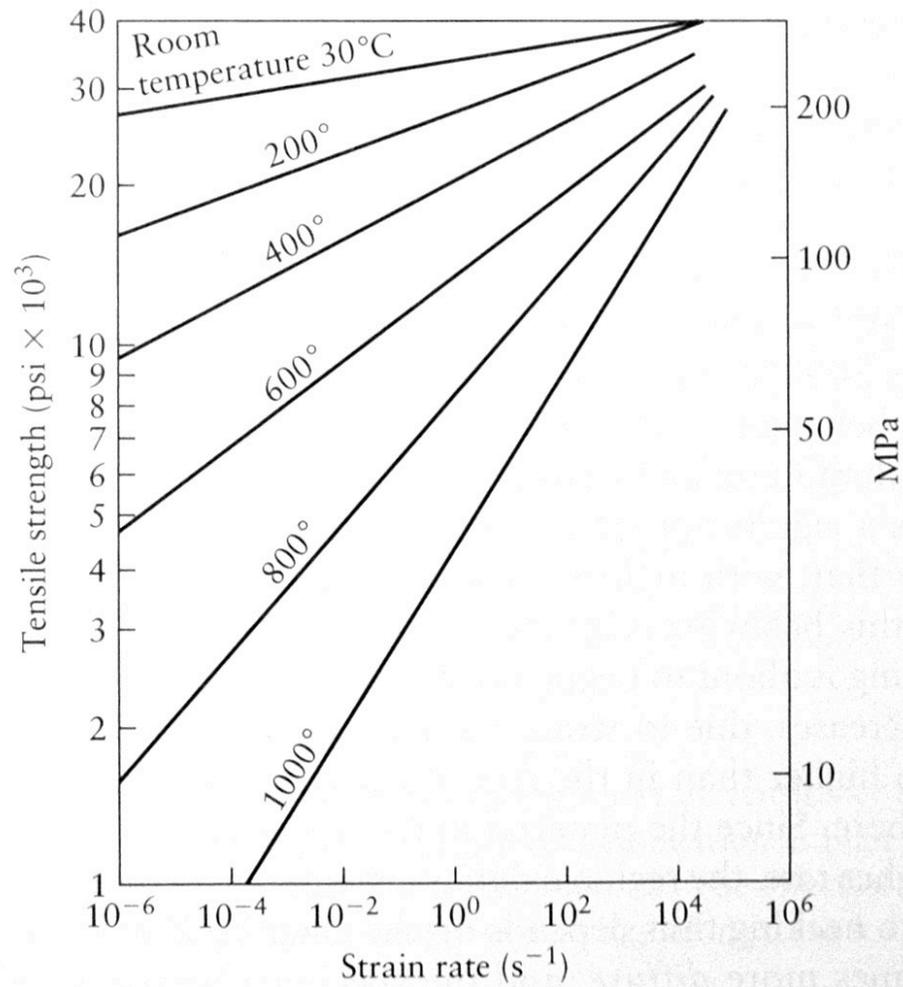
- la velocità di deformazione vera:

$$\dot{\epsilon}_T = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d\left(\ln\left(\frac{l}{l_o}\right)\right)}{dt} = \frac{1}{l} \frac{dl}{dt} = \frac{v}{l}$$

Tipiche velocità di deformazione

Processo	Deformazione	vel. lav. (m/s)	vel. def. (s ⁻¹)
Lav. a freddo			
forgiatura/ laminazione	0.1-0.5	0.1-100	1-10 ³
Stiro e filatura	0.05-0.5	0.1-100	1-10 ⁴
deformazione per esplosione	0.05-0.2	10-100	10-10 ⁵
Lav. a caldo			
forgiatura/ laminazione	0.1-0.5	0.1-30	1-10 ³
estrusione	2-5	0.1-1	10 ⁻¹ -10 ²
Lav. utensile	1-10	0.1-100	10 ³ -10 ⁶
form. lamiera	0.1-0.5	0.05-2	1-10 ²
f. superplastica	0.2-3	10 ⁻⁴ -10 ⁻²	10 ⁻⁴ -10 ⁻²

Effetto della temperatura sulla velocità di deformazione



- Effetto della temperatura per l'alluminio
- L'effetto aumenta in proporzione con l'aumentare della temperatura

Relazione resistenza-velocità di deformazione

- Viene espressa tramite la legge:

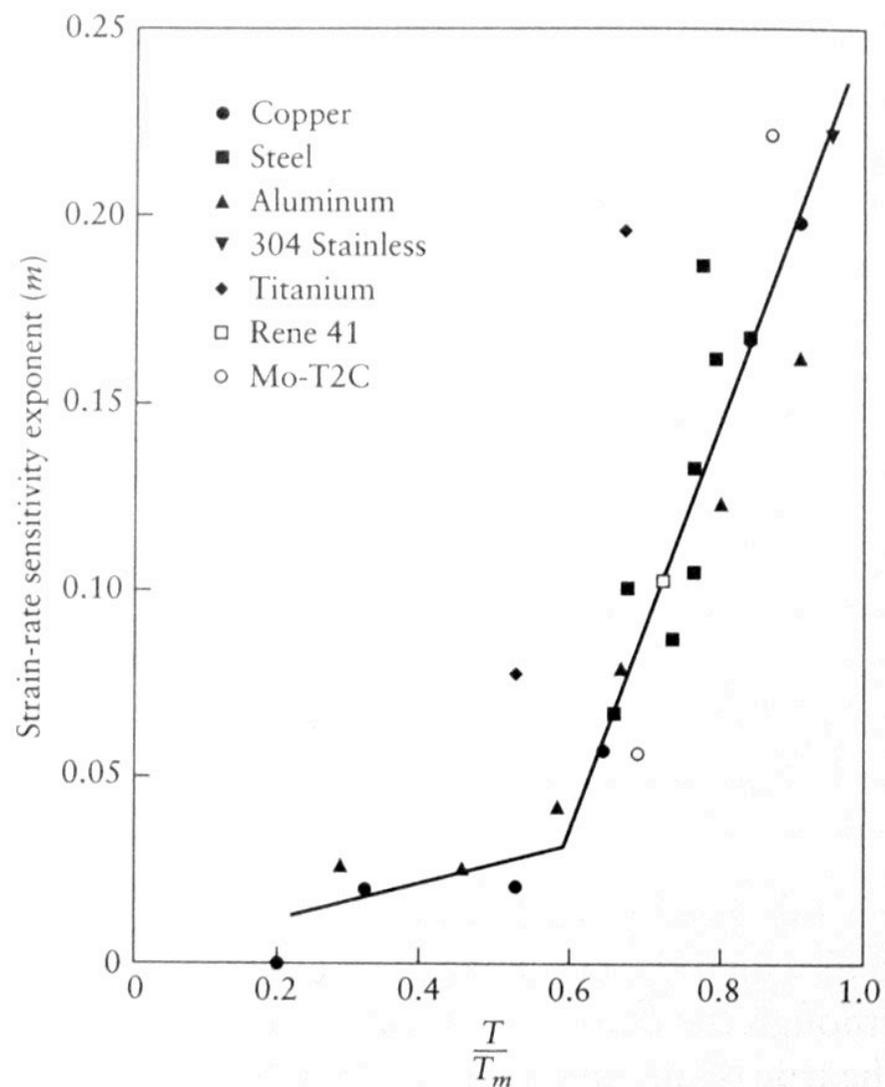
$$\sigma = C \dot{\varepsilon}^m$$

- C è il coefficiente di resistenza (simile a K)
- m è l'esponente di sensibilizzazione alla velocità di deformazione

Tipici valori per C ed m

Material	Temperature, °C	C		<i>m</i>
		psi × 10 ³	MPa	
Aluminum	200–500	12–2	82–14	0.07–0.23
Aluminum alloys	200–500	45–5	310–35	0–0.20
Copper	300–900	35–3	240–20	0.06–0.17
Copper alloys (brasses)	200–800	60–2	415–14	0.02–0.3
Lead	100–300	1.6–0.3	11–2	0.1–0.2
Magnesium	200–400	20–2	140–14	0.07–0.43
Steel				
Low carbon	900–1200	24–7	165–48	0.08–0.22
Medium carbon	900–1200	23–7	160–48	0.07–0.24
Stainless	600–1200	60–5	415–35	0.02–0.4
Titanium	200–1000	135–2	930–14	0.04–0.3
Titanium alloys	200–1000	130–5	900–35	0.02–0.3
Ti-6Al-4V*	815–930	9.5–1.6	65–11	0.50–0.80
Zirconium	200–1000	120–4	830–27	0.04–0.4

Dipendenza di m dalla temperatura



- T_m è la temperatura di fusione
- Il cambio di pendenza corrisponde alla temperatura di ricristallizzazione (0.6)