

# Tensione Ingegneristica e Deformazione Ingegneristica

Tensione Ingegneristica

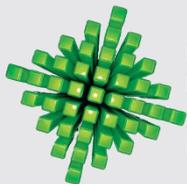
$$\sigma_{ing} = \frac{P}{A_0}$$

Deformazione Ingegneristica

$$de = \frac{dl}{l_0}$$



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



# Tensione Vera e Deformazione Vera

Tensione Vera

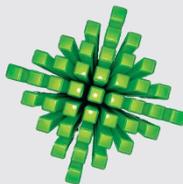
$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Deformazione Vera

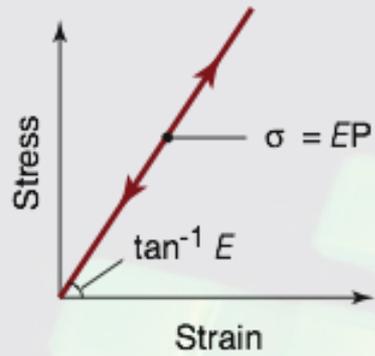
$$\epsilon = \ln\left(\frac{l}{l_o}\right) = \ln\left(\frac{A_o}{A}\right) = \ln\left(\frac{D_o}{D}\right)^2 = 2\ln\left(\frac{D_o}{D}\right)$$

Confronto tra deformazione ingegneristica ( $e$ ) e deformazione vera ( $\epsilon$ ) a trazione

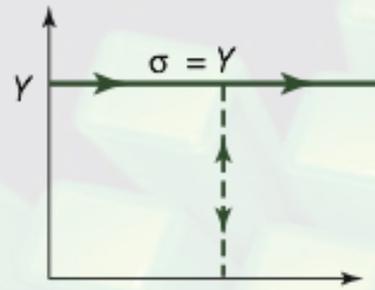
$e$	0.01	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10
$\epsilon$	0.01	0.049	0.095	0.18	0.4	0.69	1.1	1.8	2.4



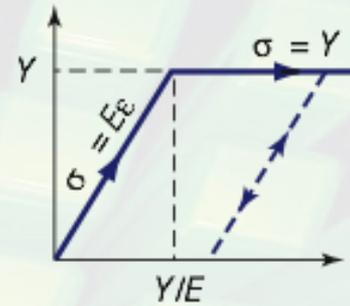
# Schemi Ideali delle Curve Tensione-Deformazione



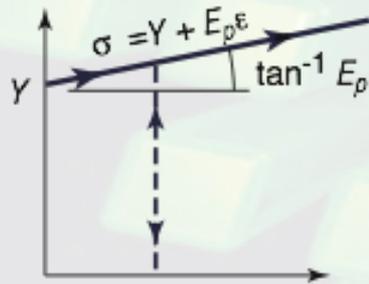
(a)



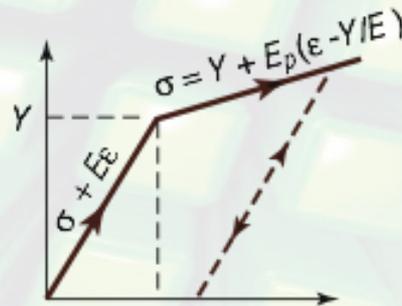
(b)



(c)



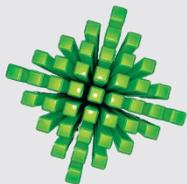
(d)



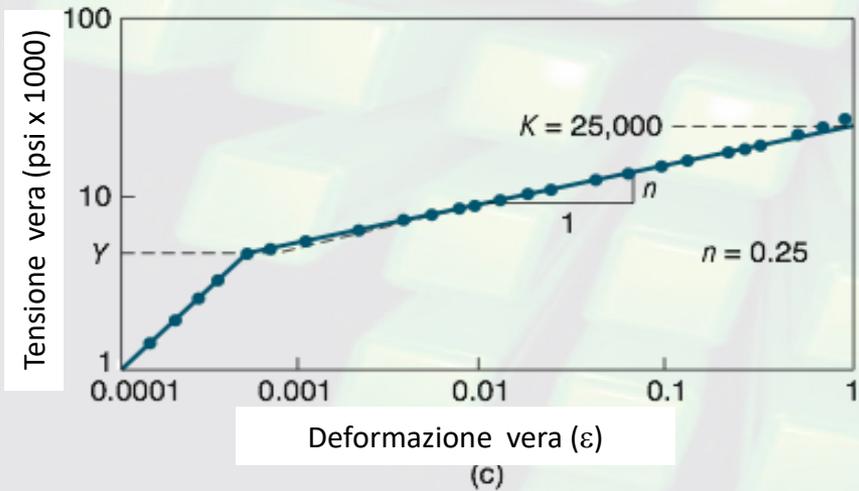
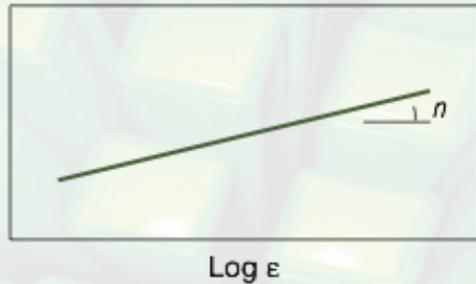
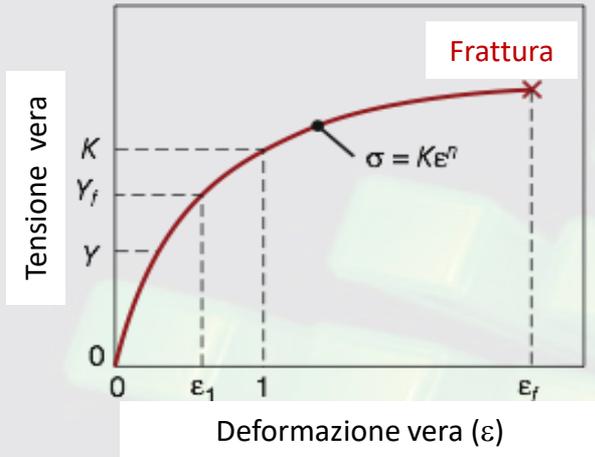
(e)

- (a) Perfettamente elastico.
- (b) Rigido, perfettamente plastico.
- (c) Elastico, perfettamente plastico.
- (d) Rigido, con incrudimento lineare.
- (e) Elastico, con incrudimento lineare.

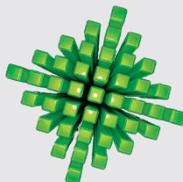
Le linee tratteggiate indicano lo scarico e successivo ricarico durante il test.



# Curva Tensione Vera – Deformazione Vera

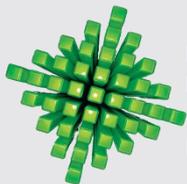


- (a) Curva tensione vera – deformazione vera nel caso di trazione. Da notare che a differenza della curva ingegneristica, la pendenza è sempre positive e che diminuisce al crescere della deformazione. Sebbene nel tratto elastico tensione e deformazione siano proporzionali, la curva complessiva può essere approssimata dalla legge di Potenza. In questa curva la tensione di snervamento è  $Y$  mentre la tensione di flusso è  $Y_f$ .
- (b) Curva tensione vera – deformazione vera tracciata in scala logaritmica.
- (c) Curva tensione vera – deformazione vera dell'alluminio 1100 ricotto tracciata in scala logaritmica. Notare l'ampia differenza delle pendenze nel tratto elastico e in quello plastico.



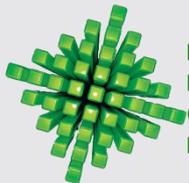
# Proprietà Meccaniche

Metallo	E (GPa)	Y (MPa)	UTS (MPa)	Allungamento su 50 mm (%)	Rapporto di Poisson
Alluminio e sue leghe	69-79	35-550	90-600	45-5	0.31-0.34
Rame e sue leghe	105-150	76-1100	140-1310	65-3	0.33-0.35
Piombo e sue leghe	14	14	20-55	50-9	0.43
Magnesio e sue leghe	41-45	130-305	240-380	21-5	0.29-0.35
Molibdeno e sue leghe	330-360	80-2070	90-2430	40-30	0.32
Nickel e sue leghe	180-214	105-1200	345-1450	60-5	0.31
Acciai	190-200	205-1725	415-1750	65-2	0.28-0.33
Acciai inox	190-200	240-480	480-760	60-20	0.28-0.30
Titanio e sue leghe	80-130	344-1380	415-1450	25-7	0.31-0.34
Titanio e tungsteno e loro leghe	350-400	550-690	620-760	0	0.27



# Proprietà Meccaniche

Non Metallo	E (GPa)	Y (MPa)	UTS (MPa)	Allungamento su 50 mm (%)	Rapporto di Poisson
Ceramici	70-1000	-	140-2600	0	0.2
Diamante	820-105	-	-	-	-
Vetro e porcellana	70-80	-	140	0	0.24
Gomme	0.01-0.1	-	-	-	0.5
Termoplastici	1.4-3.4	-	7-80	1000-5	0.32-0.40
Termoplastici rinforzati	2-50	-	20-120	10-1	-
Termoindurenti	3.5-17	-	35-170	0	0.34
Fibre di boro	380	-	3500	0	-
Fibre di carbonio	275-415	-	2000-5300	1-2	-
Fibre di vetro (S,E)	73-85	-	3500-4600	5	-
Fibre di Kevlar (29, 49,129)	70-113	-	3000-3400	3-4	-
Fibre di Spectra (900, 1000)	73-100	-	2400-2800	3	-



# Legge di Potenza che approssima la tensione di flusso del materiale

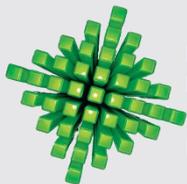
Curva tensione vera –  
deformazione vera:

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

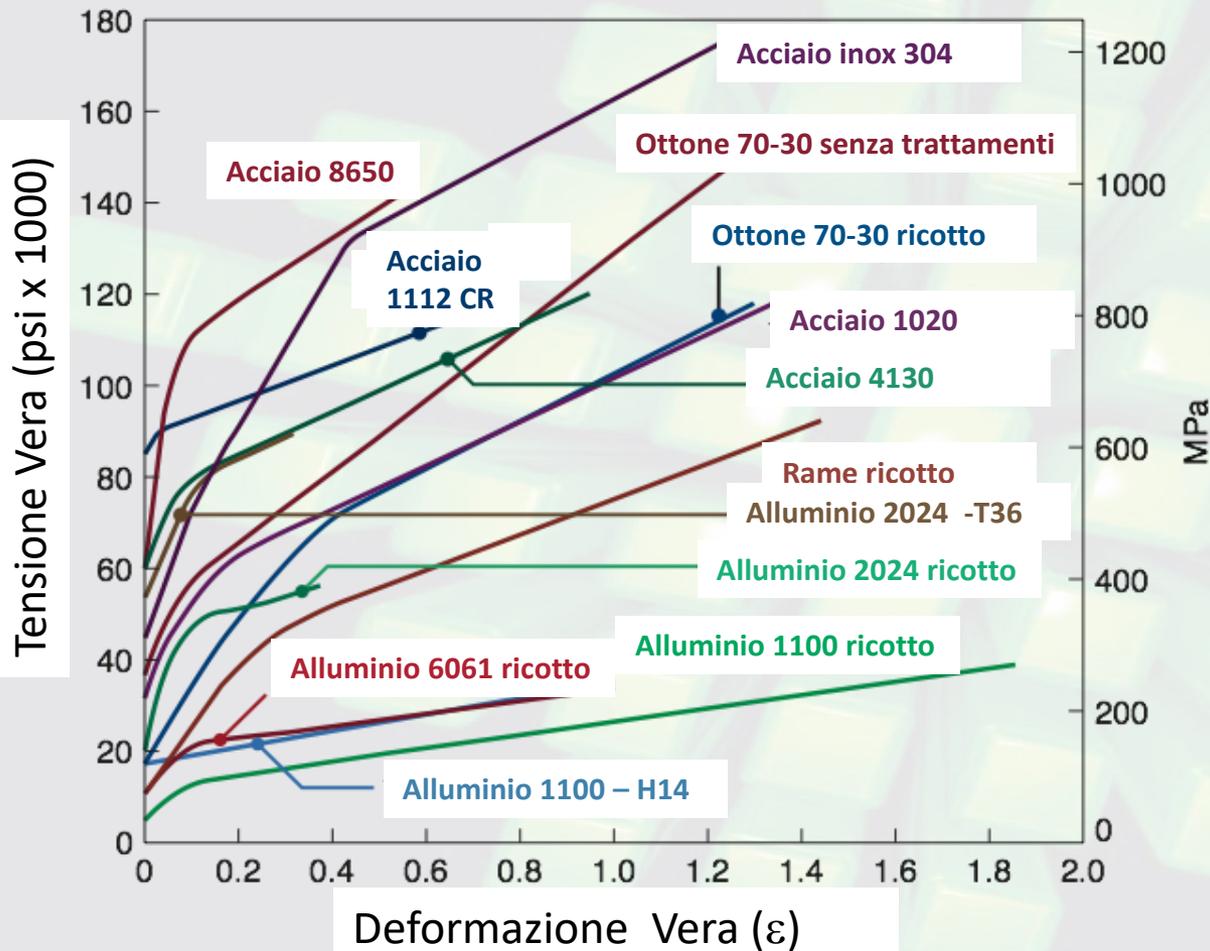
- K = fattore di resistenza
- n = coefficiente di incrudimento

Tipici valori di K ed n a temperature ambiente.

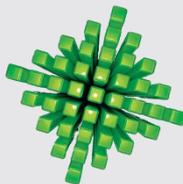
Materiale	K (MPa)	n
Alluminio 1100 ricotto	180	0.20
Alluminio 2024 – T4	690	0.16
Alluminio 5052 ricotto	210	0.13
Alluminio 6061 ricotto	205	0.20
Alluminio 6061 – T6	410	0.05
Alluminio 7075 ricotto	400	0.17
Ottone 7030 ricotto	895	0.49
Ottone 85-15 laminato a freddo	580	0.34
Bronzo (fosforo) ricotto	720	0.46
Leghe Co trattate termicamente	2070	0.50
Rame ricotto	315	0.54
Molibdeno ricotto	725	0.13
Acciaio a basso tenore di C ricotto	530	0.26
Acciaio 1045 laminato a caldo	965	0.14
Acciaio 1112 ricotto	760	0.19
Acciaio 1112 laminato a freddo	760	0.08
Acciaio 4135 ricotto	1015	0.17
Acciaio 4135 laminato a freddo	1100	0.14
Acciaio 4340 ricotto	640	0.15
Acciaio 17-4 P-H ricotto	1200	0.05
Acciaio 52100 ricotto	1450	0.07
Acciaio 304 INOX ricotto	1275	0.45
Acciaio 410 INOX ricotto	960	0.10



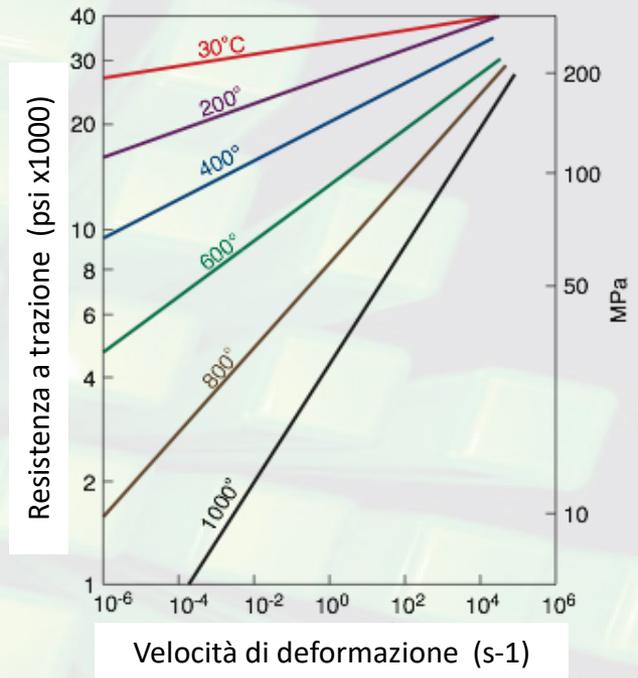
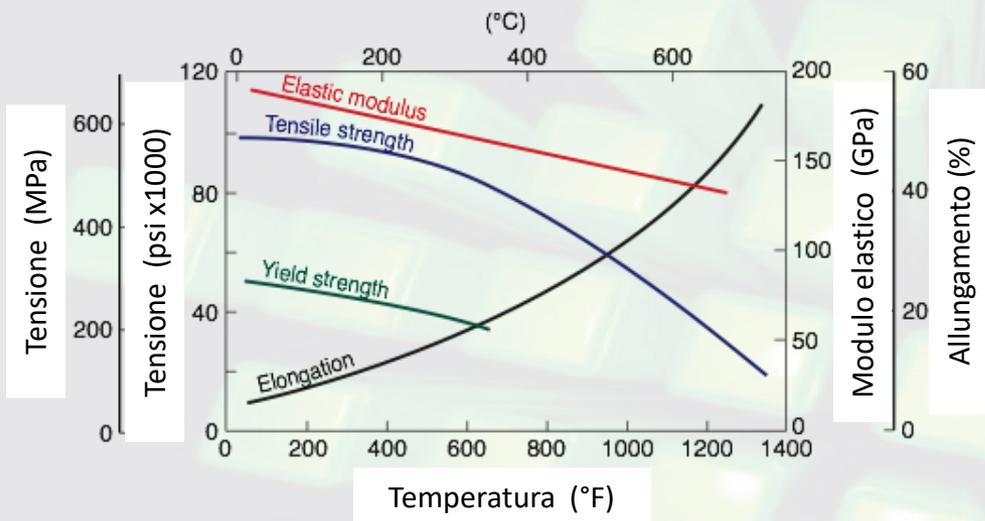
# Curve Tensione Vera – Deformazione Vera di vari materiali



Curve tensione vera – deformazione vera di vari metalli a temperatura ambiente in prove di trazione. Il punto di intersezione di ogni curva con l'asse y indica la tensione di snervamento (Y); perciò il **tratto elastico non è rappresentato**.

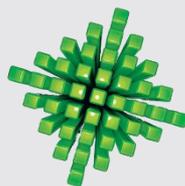


# Effetti della Temperatura e della Velocità di Deformazione



Effetti della temperature sulle proprietà meccaniche di un acciaio al carbonio. Gran parte dei materiali presentano una sensibilità del modulo elastico, della tensione di snervamento, del carico di rottura e della duttilità alla temperatura.

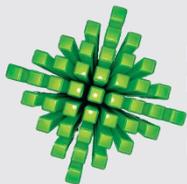
Effetto della velocità di deformazione sul carico di rottura dell'alluminio. Al crescere della temperature cresce la pendenza.



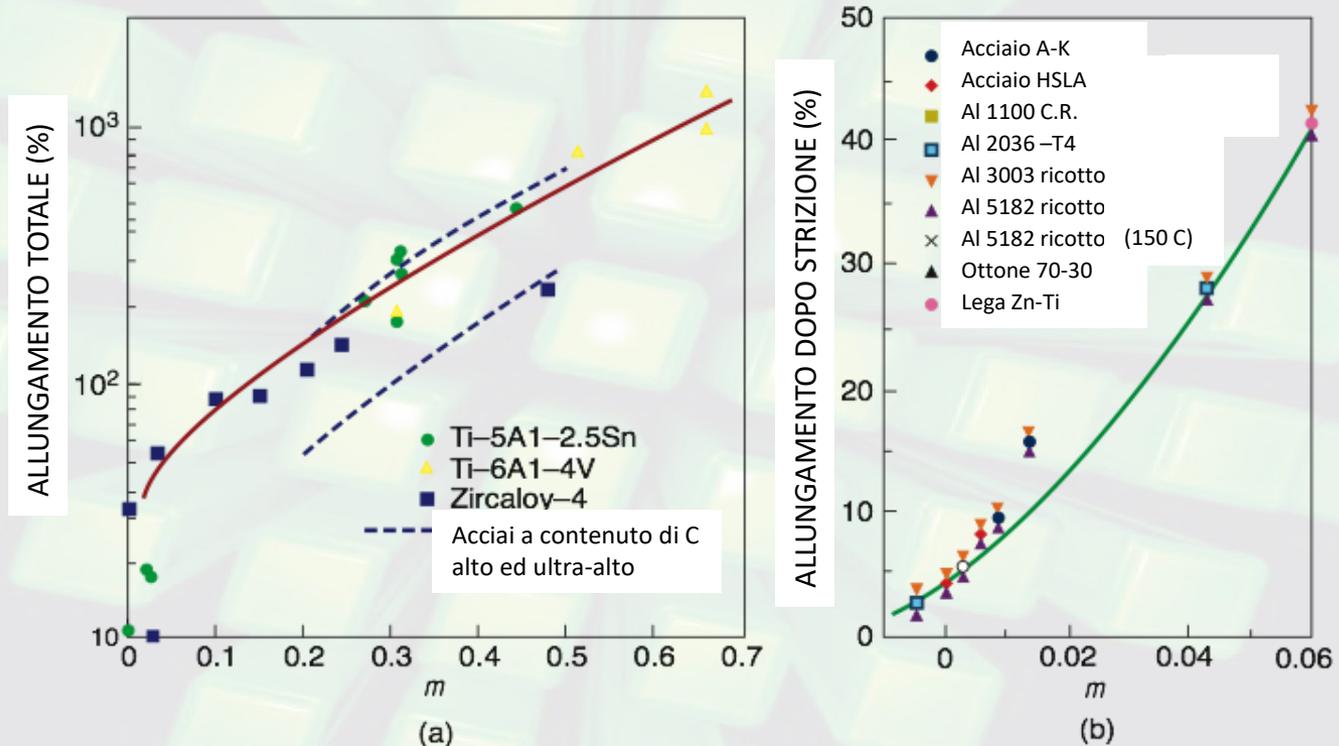
# Tipiche Velocità di Deformazione nei Processi di Lavorazione dei Metalli

Tipici campi di deformazione, velocità di processo e velocità di deformazione nei processi di lavorazione dei metalli.

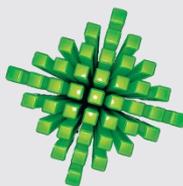
Processo	Deformazione vera	Velocità processo (m/s)	Velocità deformazione (s <sup>-1</sup> )
<b>Lavorazioni a freddo</b>			
• Formatura, laminazione	0.1-0.5	0.1-100	1-1000
• Trafilatura fili e tubi	0.05-0.5	0.1-100	1-10000
• Formatura esplosiva	0.05-0.2	10-100	10-100000
<b>Lavorazioni a caldo e a tiepido</b>			
• Forgiatura, laminazione	0.1-0.5	0.1-30	1-1000
• Estrusione	2-5	0.1-1	0.1-100
<b>Lavorazioni per asportazione di truciolo</b>	1-10	0.1-100	1000-1000000
<b>Lavorazioni lamiera</b>	0.1-0.5	0.05-2	1-100
<b>Lavorazioni in campo superplastico</b>	0.2-3	0.0001-0.01	0.0001-0.01



# Effetto del Coefficiente di Sensibilità alla Velocità di Deformazione sull'Allungamento



- (a) Effetto del coefficiente di sensibilità  $m$  alla velocità di deformazione sull'allungamento totale di diversi metalli.
- (b) Effetto del coefficiente di sensibilità  $m$  alla velocità di deformazione sull'allungamento successivo a quello uniforme (dopo la strizione localizzata) di diversi metalli.

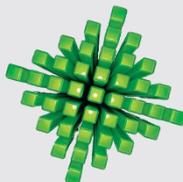


# Effetto della Velocità di Deformazione

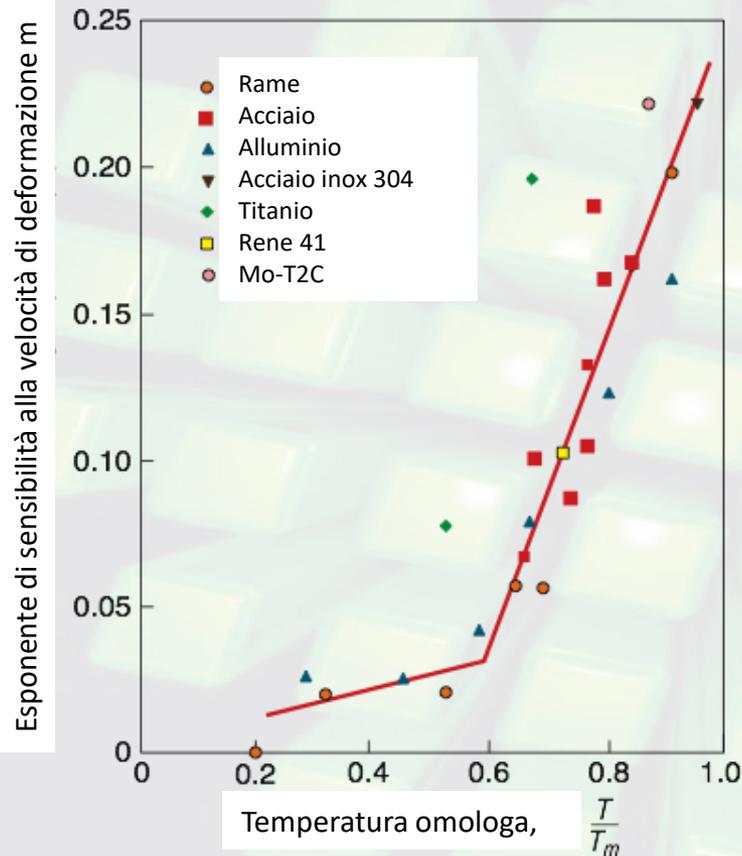
$$\sigma = C \dot{\epsilon}^m$$

- C = fattore di resistenza
- m = coefficiente di sensibilità alla velocità di deformazione

Materiale	Temperatura (°C)	C (MPa)	m
Alluminio	200-500	82-14	0.07-0.23
Leghe alluminio	200-500	310-35	0.00-0.20
Rame	300-900	240-20	0.06-0.17
Leghe rame (bronzi)	200-800	415-14	0.02-0.30
Piombo	100-300	11-2	0.10-0.20
Magnesio	200-400	140-14	0.07-0.43
Acciaio a basso contenuto C	900-1200	165-48	0.08-0.22
Acciaio a medio contenuto C	900-1200	160-48	0.07-0.24
Acciaio inox	600-1200	415-35	0.02-0.40
Titanio	200-1000	930-14	0.04-0.30
Leghe titanio	200-1000	900-35	0.02-0.30
Ti-6Al-4V (*)	815-930	65-11	0.50-0.80
Zirconio	200-1000	830-27	0.04-0.40

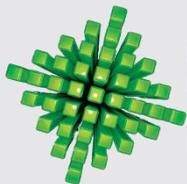


# Effetto della Temperatura Omologa



Dipendenza dell'esponente di sensibilità alla velocità di deformazione  $m$  dalla **temperatura omologa**  $T/T_m$  di diversi materiali.

$T$  è la temperatura di prova e  $T_m$  è la temperatura di fusione del materiale, entrambe misurate in °K.



# Velocità di deformazione

- **Ingegneristica**  $\dot{\epsilon} = \frac{d\left(\frac{l-l_0}{l_0}\right)}{dt} = \frac{1}{l_0} \frac{dl}{dt} = \frac{v}{l_0}$   
dove  $v$  = velocità della macchina di prova  
è **proporzionale** a  $v$

- **Vera**  $\dot{\epsilon} = \frac{d\left(\ln\left(\frac{l}{l_0}\right)\right)}{dt} = \frac{1}{l} \frac{dl}{dt} = \frac{v}{l}$   
 $\dot{\epsilon}$  **non proporzionale** a  $v$  perché  $l$  varia istantaneamente  
se  $v$  è costante  $\rightarrow \dot{\epsilon}$  decresce al crescere di  $l$   
per mantenere  $\dot{\epsilon} = \text{costante} \rightarrow v$  deve crescere  
man mano che aumenta  $l$

Dipendenza della tensione dalla deformazione

$$\frac{T}{T_m} < 0.3$$

A freddo  $\sigma = C\varepsilon^n$

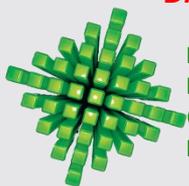
$$0.5 > \frac{T}{T_m} > 0.3$$

A tiepido

Dipendenza della tensione dalla velocità di deformazione

$$\frac{T}{T_m} > 0.6$$

A caldo  $\sigma = C\dot{\epsilon}^m$



Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.

Kalpakjian • Schmid

© 2008, Pearson Education

ISBN No. 0-13-227271-7

# Criteri di Snervamento

## A. Massima tensione tangenziale (Tresca)

$$\tau_{max} = k = \frac{Y}{2}$$
$$\sigma_{max} - \sigma_{min} = Y$$

## B. Energetico (von Mises)

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

### Tensione effettiva o equivalente

A.  $\bar{\sigma} = \sigma_{eq} = \sigma_1 - \sigma_3$

B.  $\bar{\sigma} = \sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right)^{1/2}$

### Deformazione effettiva o equivalente insensibilità alla velocità di deformazione

A.  $\bar{\varepsilon} = \varepsilon_{eq} = \frac{2}{3} (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)$

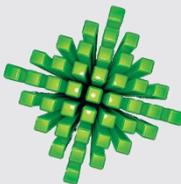
B.  $\bar{\varepsilon} = \varepsilon_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left( (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 \right)^{1/2}$

Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.

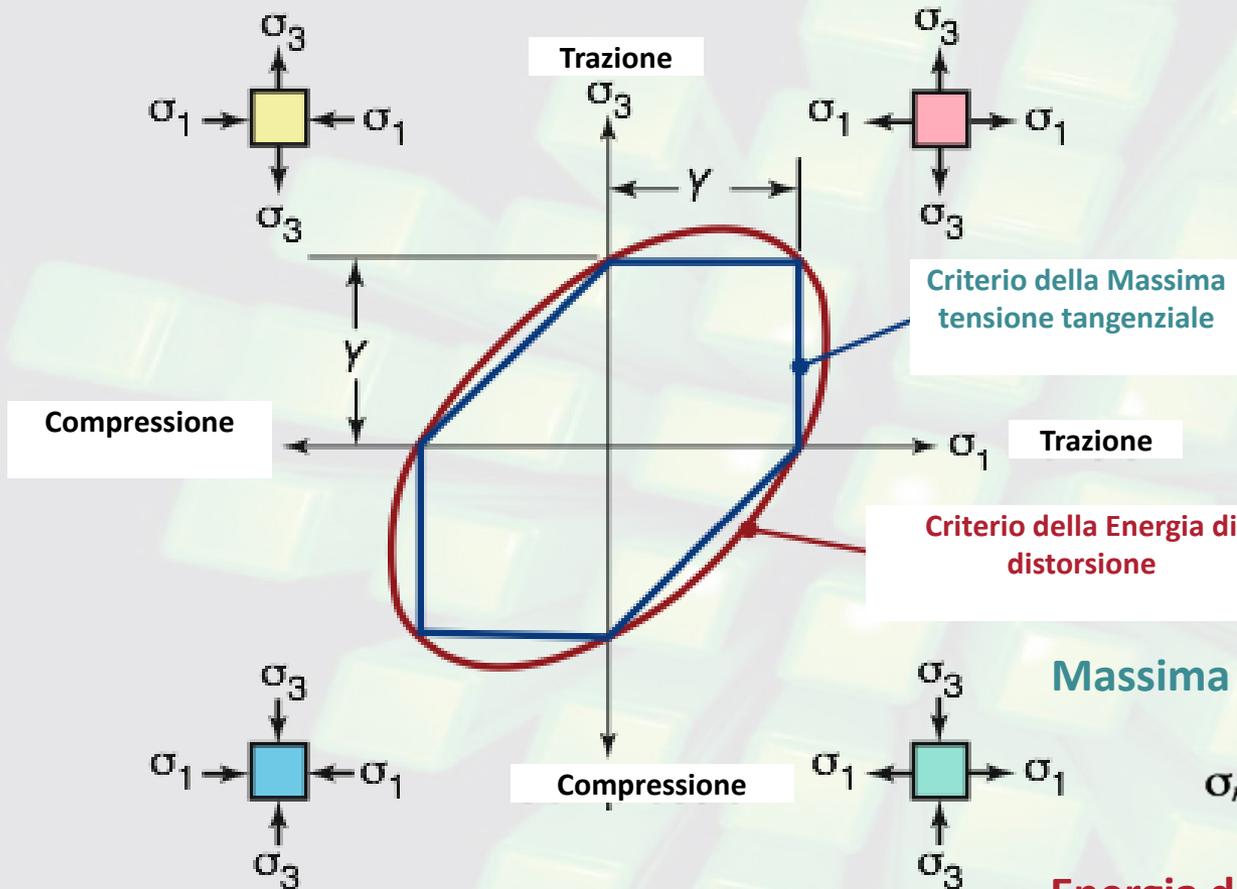
Kalpakjian • Schmid

© 2008, Pearson Education

ISBN No. 0-13-227271-7



# Criteri di Snervamento nel Piano

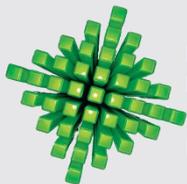


**Massima tensione tangenziale :**

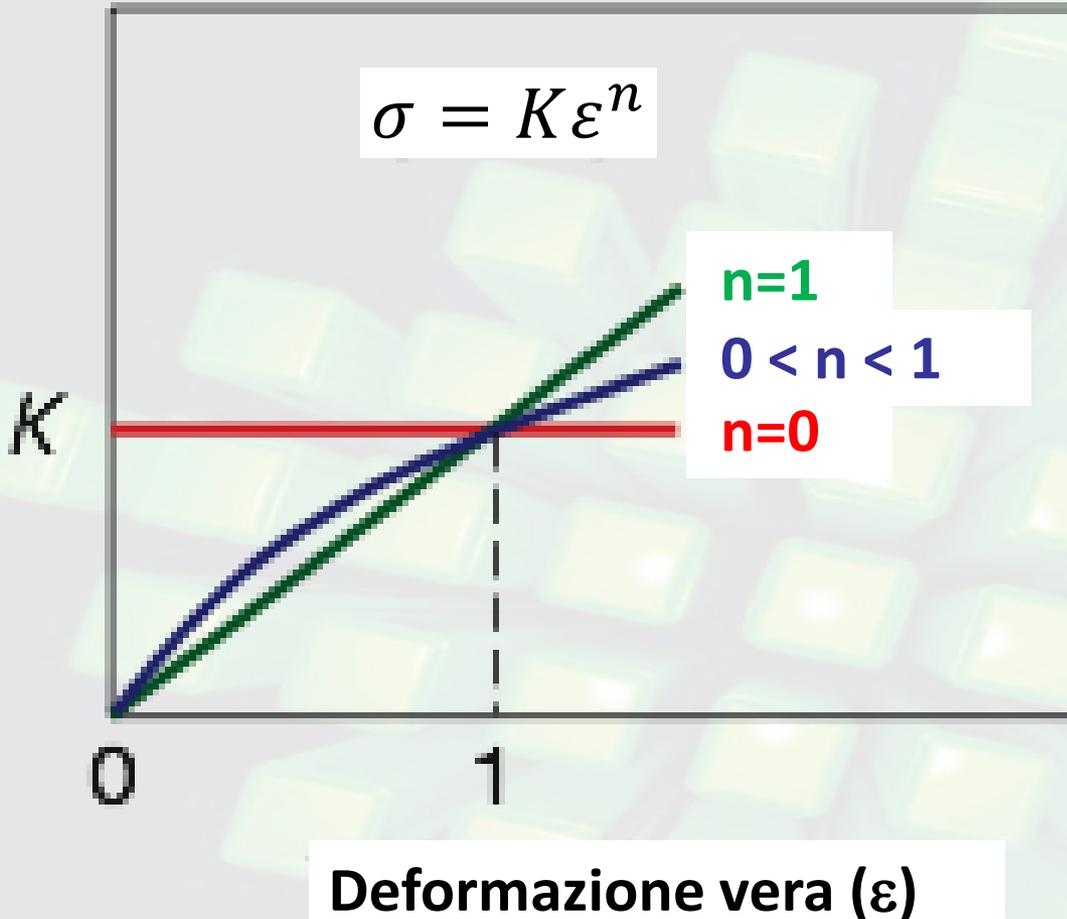
$$\sigma_{max} - \sigma_{min} = Y$$

**Energia di distorsione:**

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



Tensione vera ( $\sigma$ )

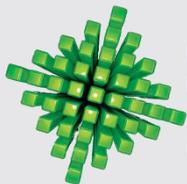


Effetto dell'esponente di incrudimento,  $n$ , sulla forma della curva tensione vera – deformazione vera.

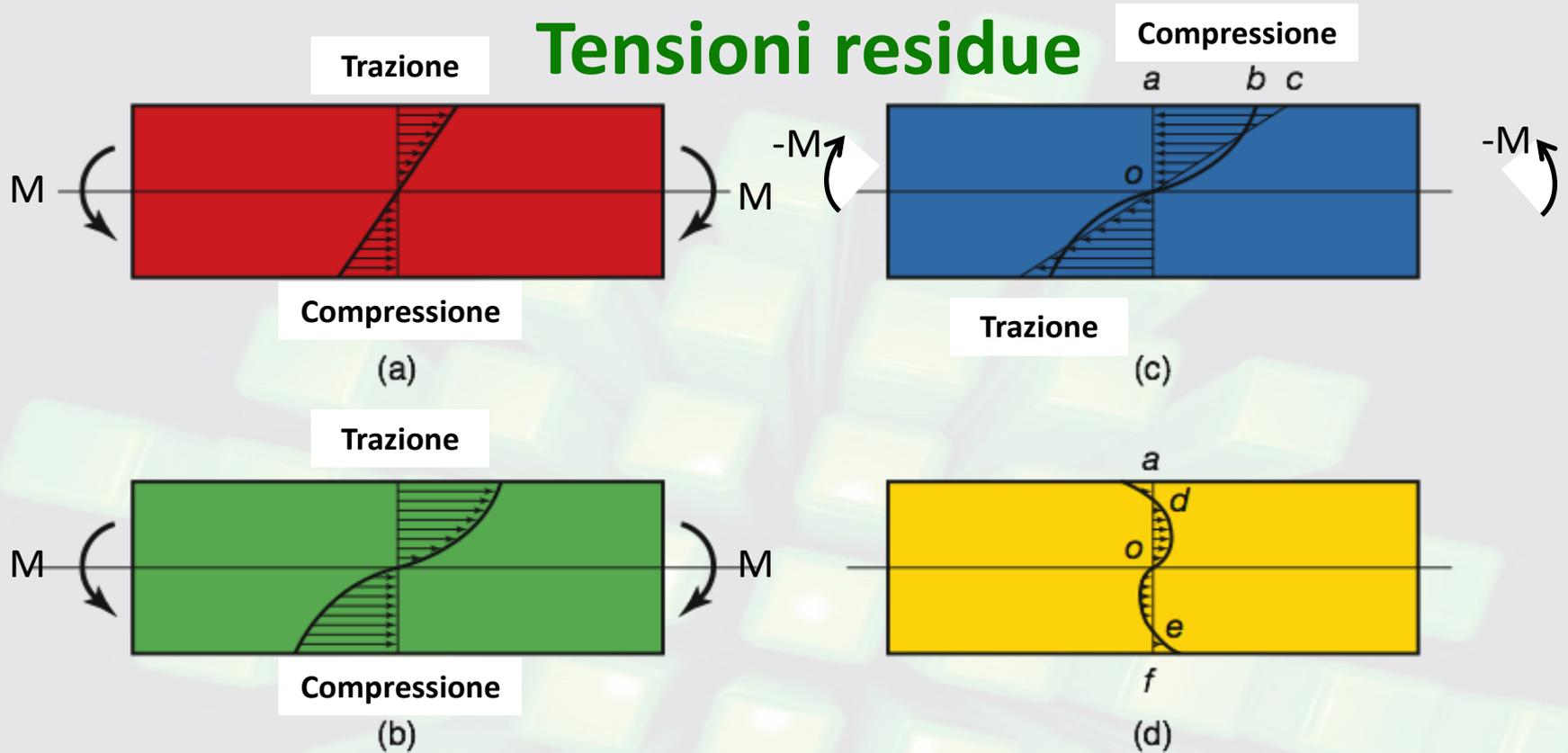
Per  $n = 1$ , il materiale è elastico,

Mentre per  $n = 0$ , il materiale è rigido e perfettamente plastico.

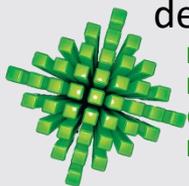
Deformazione vera ( $\epsilon$ )



# Tensioni residue



Tensioni residue che si sviluppano nella flessione di una trave fatta di materiale elastico-incrudente. Inizialmente la trave è **in campo elastico** (a) e l'andamento delle tensioni è lineare con trazione nella parte superiore della trave e con compressione nella parte inferiore. Aumentando il momento flettente  $M$  si **entra in campo plastico** (oltre il valore della tensione di snervamento =  $Y$ ) e l'andamento non è più lineare (b). Ora se si scarica il momento flettente come applicare un momento pari a  $-M$  però **l'andamento delle tensioni è lineare**, come rappresentato in (c). Rimane quindi la distribuzione di tensioni visualizzata in (d) come effetto della somma di (b) e (c).



# Tensioni residue

1. Sollecitazione trave a flessione in campo elastico. Aumentando il momento flettente  $M=M1$  crescono le tensioni fino al raggiungimento della tensione di snervamento  $Y$ . La distribuzione delle tensioni è lineare



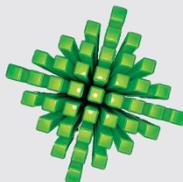
2. Aumentando ancora il momento flettente si entra nel campo plastico e la distribuzione delle tensioni non è più lineare, cioè viene applicato un momento flettente  $M=M2$



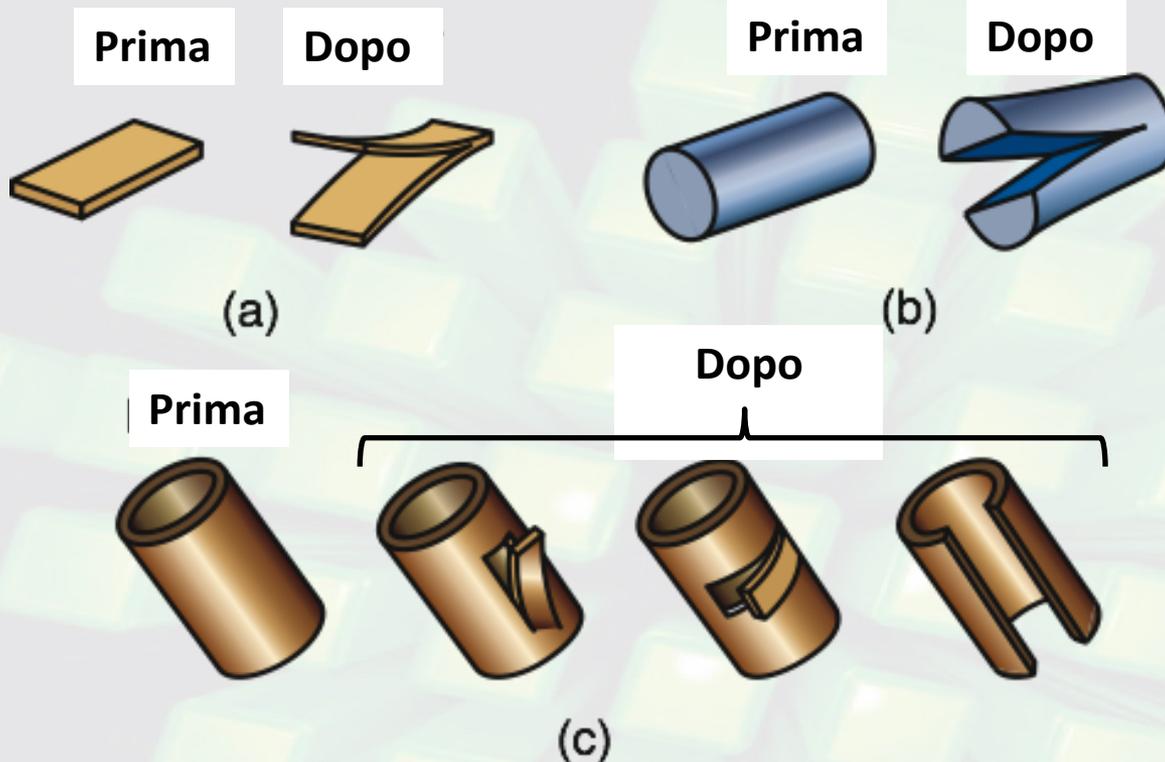
3. Scarico : viene tolto il momento flettente  $M$ , ovvero viene applicato un momento  $M=M3=-M2$ , la distribuzione delle tensioni è lineare con area equivalente al caso 2



4. La distribuzione finale delle tensioni è la sovrapposizione di quelle ottenute nel caso 2 con quelle ottenute nel caso 3



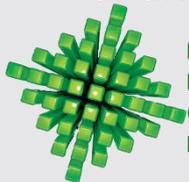
# Distorsione derivante da Tensioni Residue



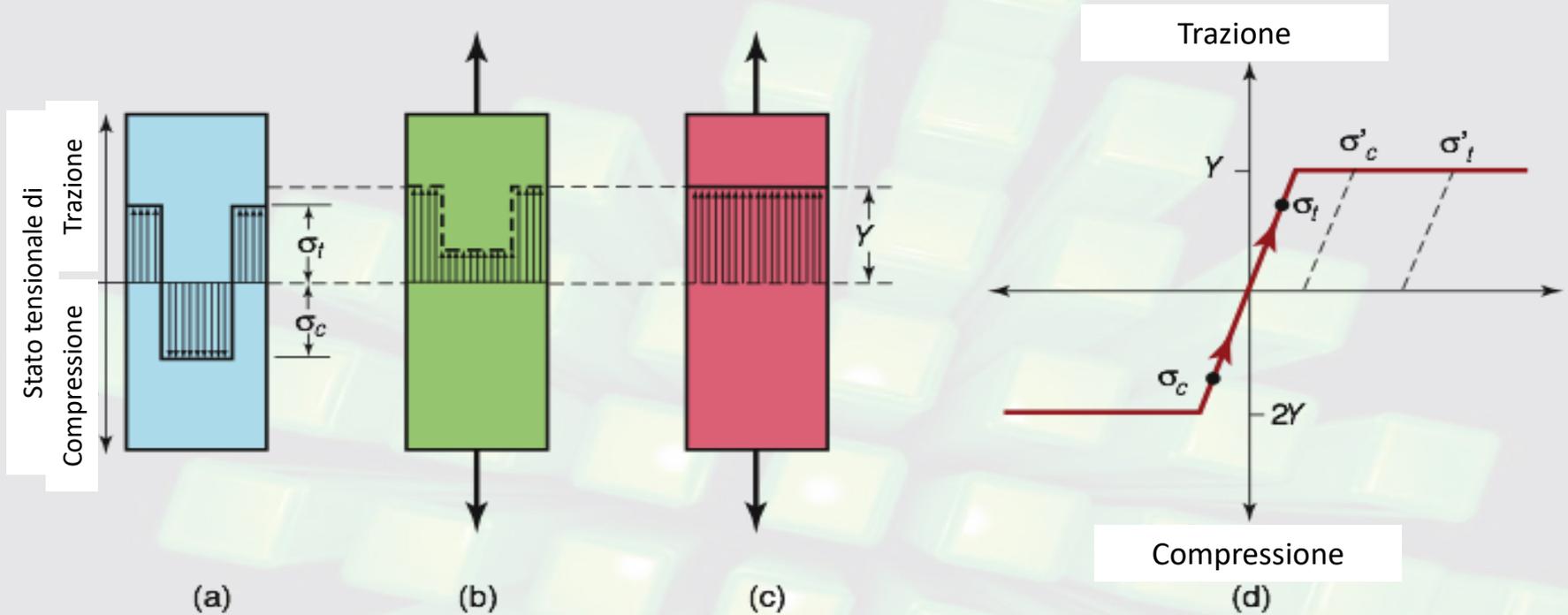
Distorsione di pezzi che presentano tensioni residue successive al taglio o alla incisione:

- (a) Lamiera o lastra laminate;
- (b) Barra trafilata;
- (c) Tubo in parete sottile.

Inoltre a causa della presenza di tensioni residue sulle superfici dei pezzi, la realizzazione di un piccolo foro può trasformarsi in un foro di forma ovale.



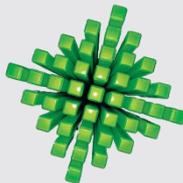
# Eliminazione delle Tensioni Residue



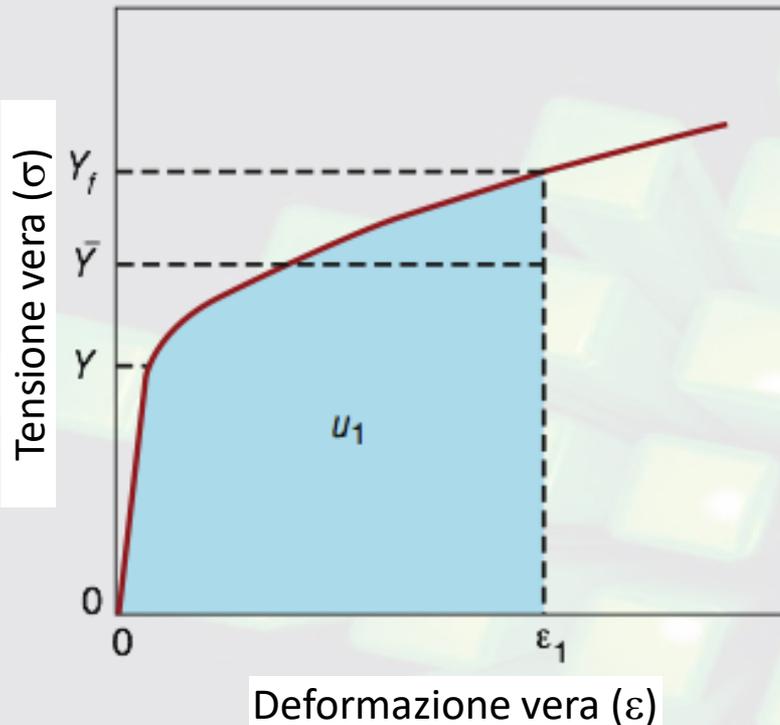
Eliminazione delle tensioni residue mediante *stiratura* in un materiale elastico-perfettamente plastico (d).

- Stato tensionale residuo in equilibrio.
- Applicazione della stiratura in campo perfettamente plastico, dove la tensione a trazione può raggiungere al massimo  $Y$ .
- Raggiungimento della completa plasticizzazione della sezione a trazione, cioè tutti i punti della sezione raggiungono  $Y$ .

Le tensioni residue possono essere **ridotte o eliminate** mediante **trattamenti termici**, come *il trattamento di rilascio delle tensioni o la ricottura*.



# Tensione di Flusso e Lavoro di Deformazione



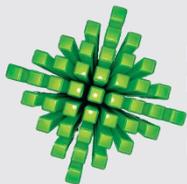
Energia specifica  $u = \int_0^{\varepsilon} \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon}$

Nel caso di stato mono-assiale posso sostituire i valori effettivi  $\bar{\sigma}$  e  $\bar{\varepsilon}$  con  $\sigma$  ed  $\varepsilon$ , legati da  $\sigma = K\varepsilon^n$  ottenendo

$$u = \int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon = \int_0^{\varepsilon} K\varepsilon^n d\varepsilon = \frac{K\varepsilon^{n+1}}{n+1}$$

Tensione di Flusso media  $\bar{Y} = \frac{u}{\varepsilon_1} = \frac{K\varepsilon_1^n}{n+1}$

Schema della curva tensione vera – deformazione vera nella quale sono visibili la tensione di snervamento,  $Y$ , la tensione di flusso,  $Y_f$ , la tensione di flusso media,  $\bar{Y}$  e l'energia specifica  $u_1$ .



# Lavoro di deformazione

- Energia specifica di deformazione (per unità di volume)

- Monoassiale

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

- Pluriassiale

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

$$u = \int_0^{\varepsilon_{eq}} \sigma_{eq} d\varepsilon_{eq}$$

- Lavoro ideale =  $u$  \* Volume

- Lavoro richiesto =  $L$  ideale +  $L$  attrito interfaccia +  $L$  distorsione

Parte del lavoro è convertita in calore  $\rightarrow \Delta T = \frac{u}{\rho c}$

Deformazione a taglio

Dove  $\rho$  = densità del materiale

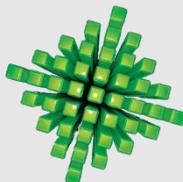
$c$  = calore specifico

Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.

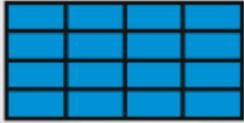
Kalpakjian • Schmid

© 2008, Pearson Education

ISBN No. 0-13-227271-7



# Lavoro Ideale e Lavoro Ridondante



(a)



(b)



(c)

**Energia specifica totale:**  $u_{totale} = u_{ideale} + u_{attrito} + u_{ridondante}$

**Efficienza:**  $\eta = \frac{u_{ideale}}{u_{totale}}$

- (a) Situazione iniziale con griglia uniforme indeformata.
- (b) Dopo una deformazione ideale, cioè con deformazioni omogenee e in assenza di attrito.
- (c) Dopo una deformazione non omogenea che richiede dell'ulteriore lavoro legato all'attrito all'interfaccia (lavoro attrito) e del lavoro legato di deformazione a taglio (lavoro ridondante).

