

SFORZI E DEFORMAZIONI

CLASSIFICAZIONE DELLE LAVORAZIONI



Le lavorazioni per deformazione plastica possono essere classificate in:

Lavorazioni a freddo: quelle in cui la temperatura è al di sotto della temperatura di ricristallizzazione. Spesso sono usate nelle fasi finali di produzione perché permettono di ottenere ottime finiture superficiali e precisione dimensionale. Esse comportano la necessità di utilizzare forze maggiori per la deformazione del materiale, ma anche la possibilità di lubrificare agevolmente la zona di contatto pezzo-utensile. La massima deformazione ottenibile senza l'uso di trattamenti termici intermedi è limitata dalle caratteristiche del materiale.

Lavorazioni a caldo: quelle in cui la temperatura è maggiore di quella di ricristallizzazione. E' possibile ottenere grandi valori della deformazione complessiva utilizzando forze minori. Il materiale ha però la tendenza ad ossidarsi e ciò provoca un decadimento delle caratteristiche di finitura superficiale. Le tolleranze dimensionali sono più ampie rispetto al caso precedente a causa della difficile prevedibilità degli effetti legati alle dilatazioni termiche.

EFFETTO DI ALCUNE GRANDEZZE SULLA TENSIONE DI FLUSSO PLASTICO

$$\sigma_f = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, d, T)$$



In generale la dimensione della grana cristallina d influenza poco la tensione di flusso

Nei processi di formatura *a freddo* è trascurabile l'influenza della velocità di deformazione ed è possibile scrivere:

$$\sigma_f = K \cdot \varepsilon^n$$

Nei processi di formatura *a caldo* la tensione di flusso è influenzata pochissimo dal grado di deformazione ε , mentre hanno grande importanza la temperatura e la velocità di deformazione:

$$\sigma_f = C \cdot \dot{\varepsilon}^m$$

SFORZI E DEFORMAZIONI

MODELLO PER LA DEFORMAZIONE A FREDDO



Una relazione molto utilizzata, a livello tecnologico, per la valutazione e la modellazione degli effetti della deformazione plastica a freddo è la seguente:

$$\sigma_f = K \cdot \varepsilon^n$$

K (coefficiente di resistenza) ed **n** (indice di incrudimento) sono tabellati per diversi materiali e temperature

Note:

- ▶ Si trascura la presenza della zona elastica lineare, in quanto siamo interessati, a livello tecnologico, a ragionare in regime di grandi deformazioni
- ▶ Si trascura l'effetto - piccolo alle basse temperature - della velocità di deformazione

SFORZI E DEFORMAZIONI

MODELLO PER LA DEFORMAZIONE A CALDO



Una relazione molto utilizzata, a livello tecnologico, per la valutazione e la modellazione degli effetti della deformazione plastica a caldo è la seguente:

$$\sigma_f = C \cdot \dot{\varepsilon}^m$$

C (coefficiente di resistenza) ed **m** (indice di sensibilità alla velocità di deformazione) dipendono da materiale e temperatura e sono tabellati

Si noti che, in una prova di trazione si avrebbe:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{dl}{l} \cdot \frac{1}{dt} = \frac{v}{l}$$

Con **v** si intende la velocità di traslazione della traversa mobile della macchina

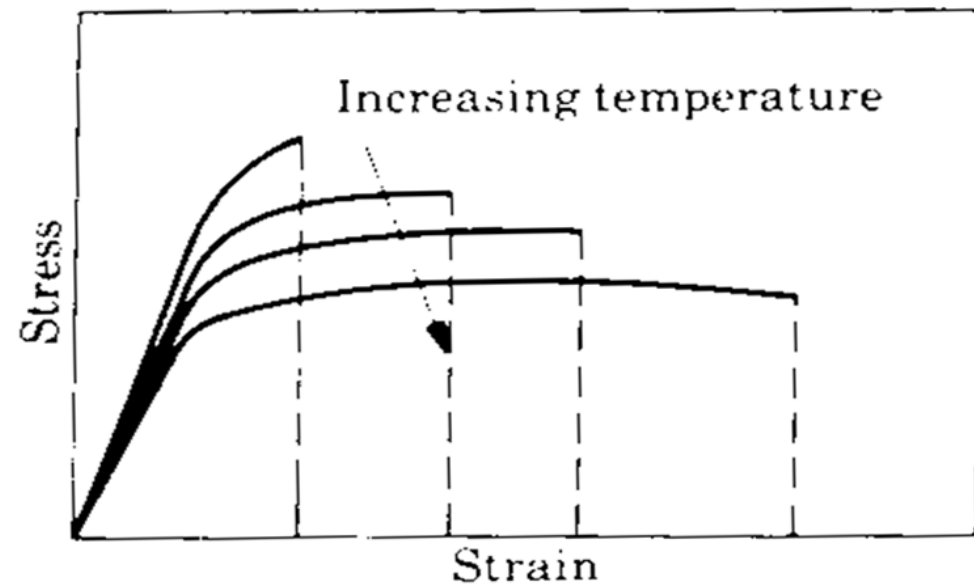
EFFETTI DELLA TEMPERATURA



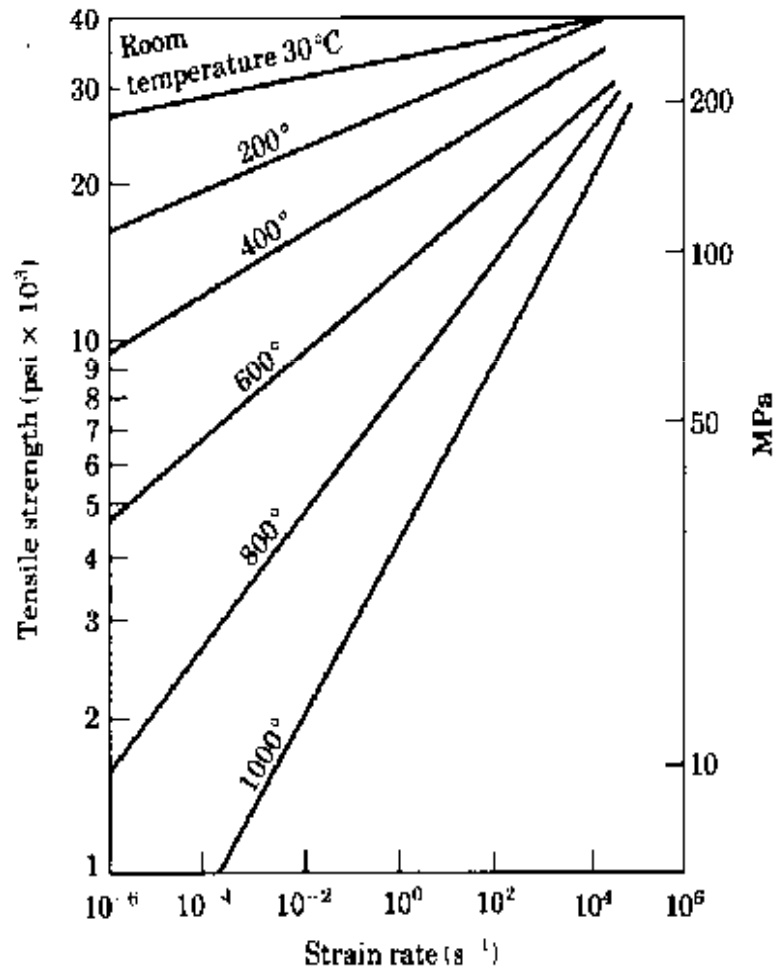
L'aumento della temperatura generalmente produce un incremento di duttilità e tenacità ed una diminuzione dei moduli elastici, del carico di snervamento e del carico di rottura

A temperature molto basse si verifica un'elevata fragilità anche in materiali che a temperatura ambiente risultano essere molto duttili

All'aumentare della temperatura aumenta il valore dell'esponente m che ha un effetto significativo sul prodursi della strizione in una prova di trazione: materiali con m più elevati presentano allungamenti percentuali più alti



EFFETTI DELLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE



La resistenza alla deformazione di un materiale diminuisce al diminuire della velocità di deformazione.

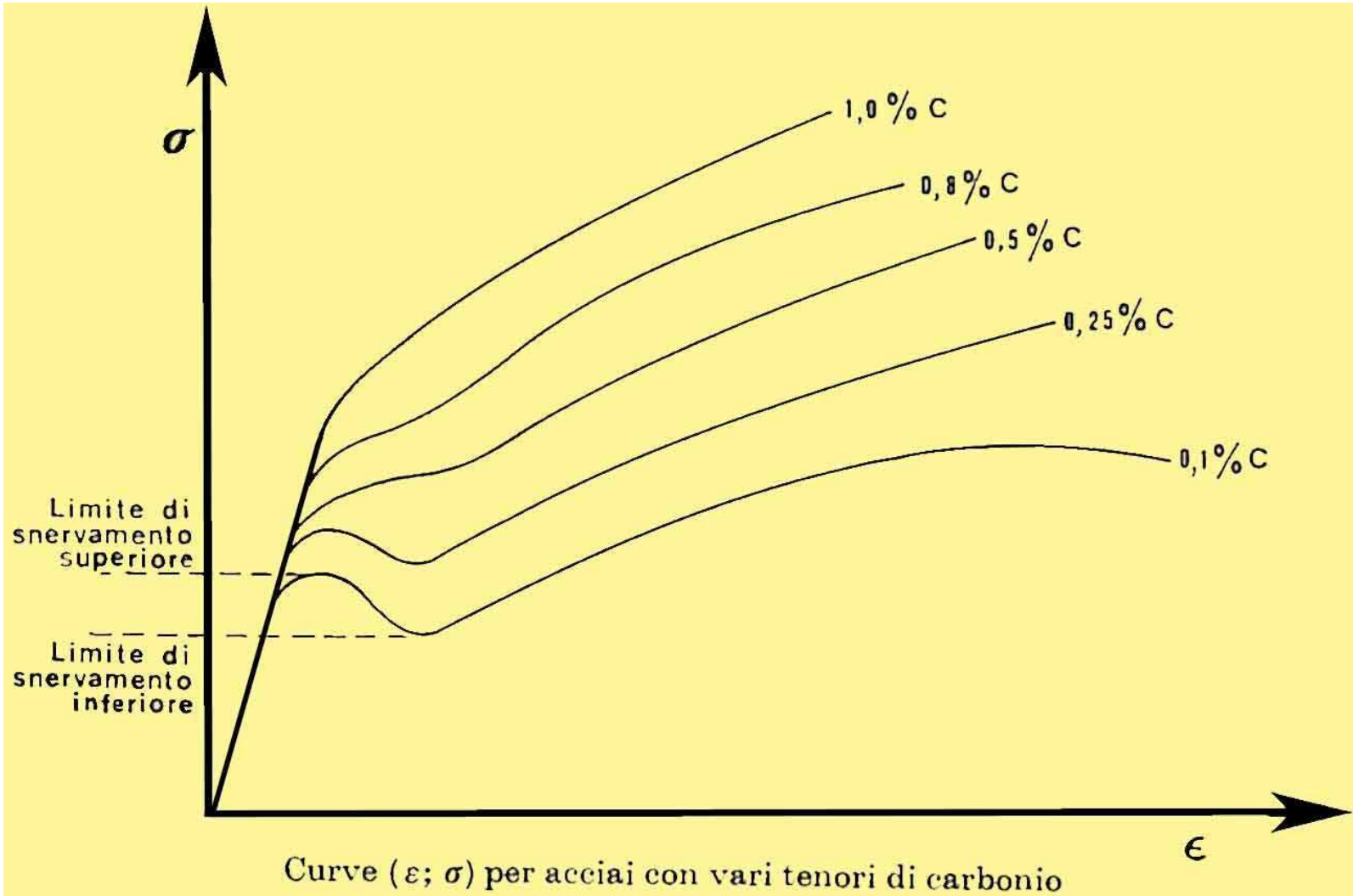
Range di Strain rate	Condizioni di prova
Da 10^{-8} a $10^{-5} s^{-1}$	Test di creep
Da 10^{-5} a $10^{-1} s^{-1}$	Test di trazione statici (quasi-statici)
Da 10^{-1} a $10^2 s^{-1}$	Test di trazione dinamici
Da 10^2 a $10^4 s^{-1}$	Test ad alta velocità
Da 10^4 a $10^8 s^{-1}$	Test esplosivi

VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI ALCUNI PROCESSI

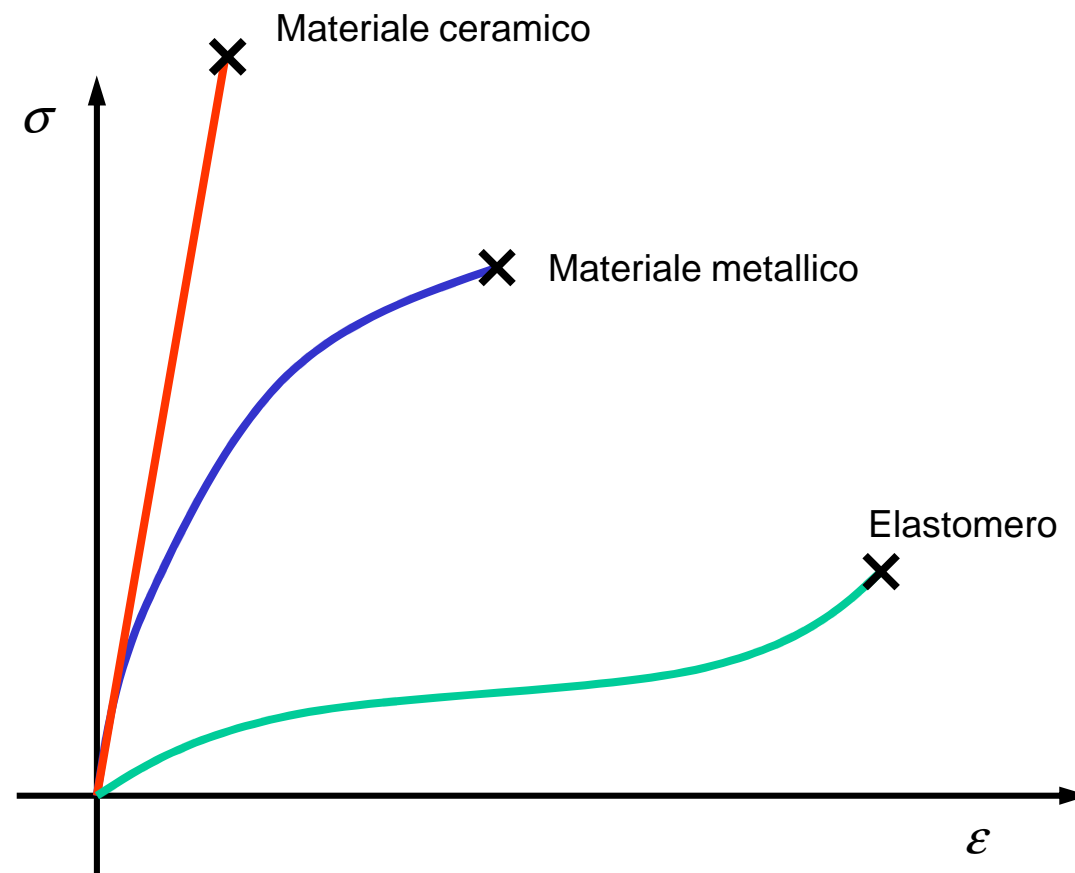
Processo	Deformazione	vel. lav. (m/s)	vel. def. (s^{-1})
Lav. a freddo			
forgiatura/ laminazione	0.1-0.5	0.1-100	$1-10^3$
Stiro e filatura	0.05-0.5	0.1-100	$1-10^4$
deformazione per esplosione	0.05-0.2	10-100	$10-10^5$
Lav. a caldo			
forgiatura/ laminazione	0.1-0.5	0.1-30	$1-10^3$
estrusione	2-5	0.1-1	$10^{-1}-10^2$
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	$10^{-4}-10^{-2}$	$10^{-4}-10^{-2}$



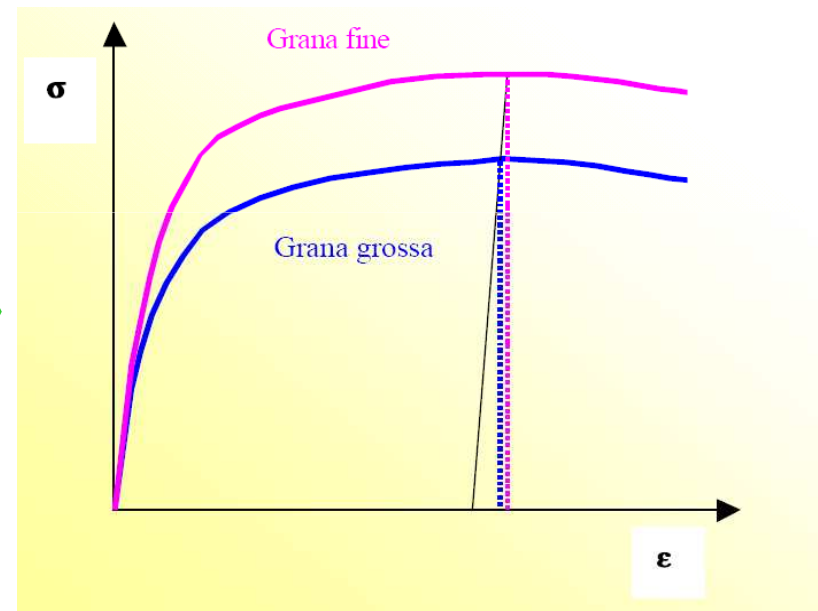
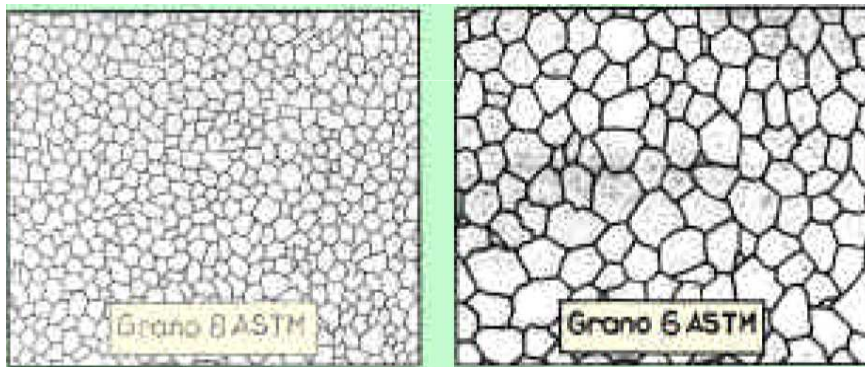
EFFETTI DEL TENORE DI CARBONIO



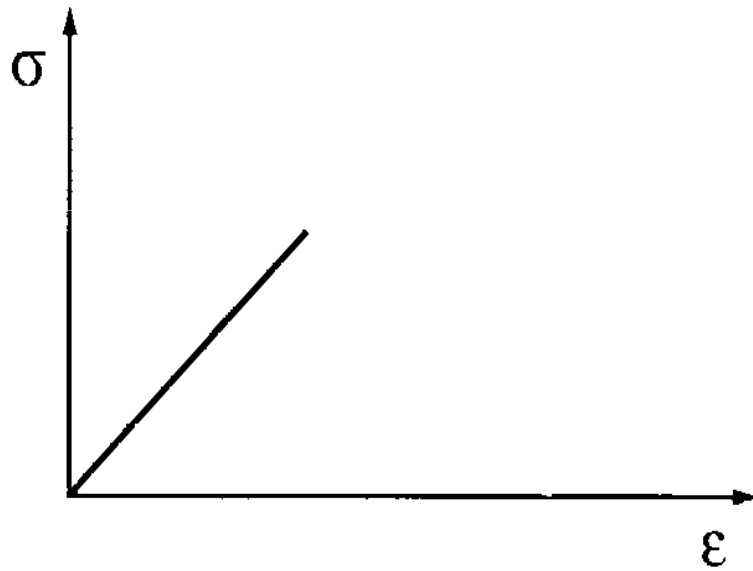
EFFETTI DELLA TIPOLOGIA DI MATERIALI



EFFETTI DELLA DIMENSIONE DELLA GRANA

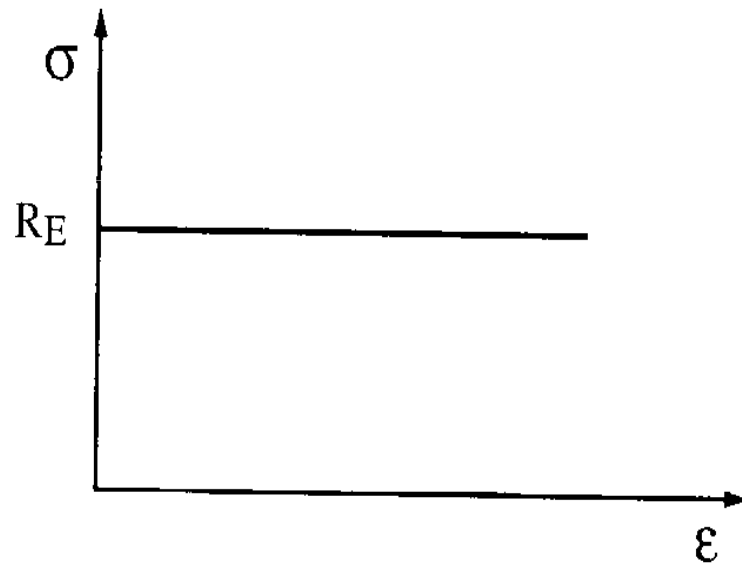


FORME SEMPLIFICATE CURVA TENSIONI NOMINALI – DEFORMAZIONI NOMINALI ELASTICO PERFETTO



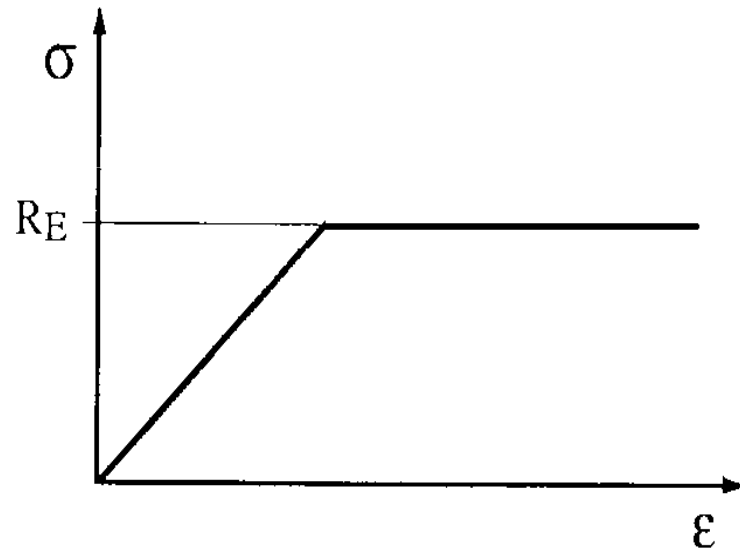
Tale curva approssima bene il comportamento dei materiali fragili quali, ad esempio, il vetro, la ceramica e alcune ghise. La tensione massima che il materiale può sopportare ha un limite; superandolo, si verifica la rottura senza apprezzabile deformazione plastica.

FORME SEMPLIFICATE CURVA TENSIONI NOMINALI – DEFORMAZIONI NOMINALI PLASTICO PERFETTO



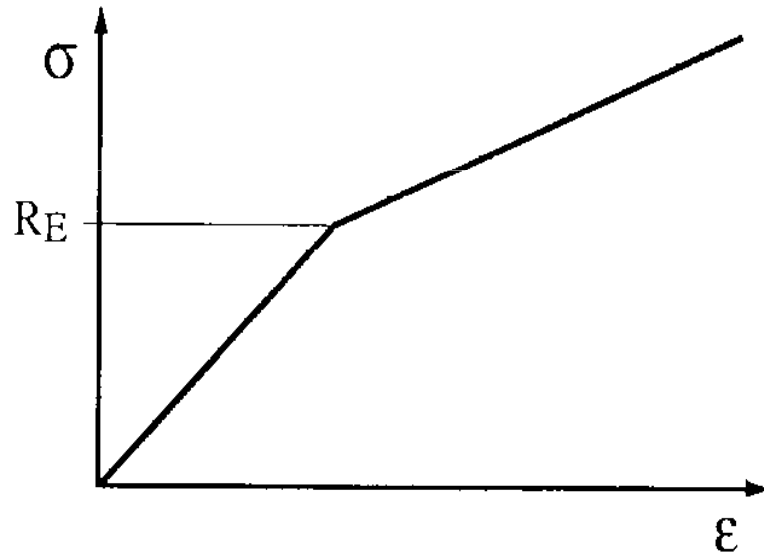
Ha per definizione un valore di E tendente ad infinito. Non appena la sollecitazione raggiunge il valore dello snervamento, la deformazione ha inizio e poi procede indefinitamente allo stesso livello di tensione; rimuovendo il carico, il materiale mantiene tutta la deformazione plastica raggiunta senza alcun recupero elastico.

FORME SEMPLIFICATE CURVA TENSIONI NOMINALI – DEFORMAZIONI NOMINALI ELASTO-PLASTICO PERFETTO



Tale modello può considerarsi come la combinazione dei due precedenti; esso consente un recupero elastico dopo la rimozione del carico.

FORME SEMPLIFICATE CURVA TENSIONI NOMINALI – DEFORMAZIONI NOMINALI ELASTO-PLASTICO CON INCRUDIMENTO

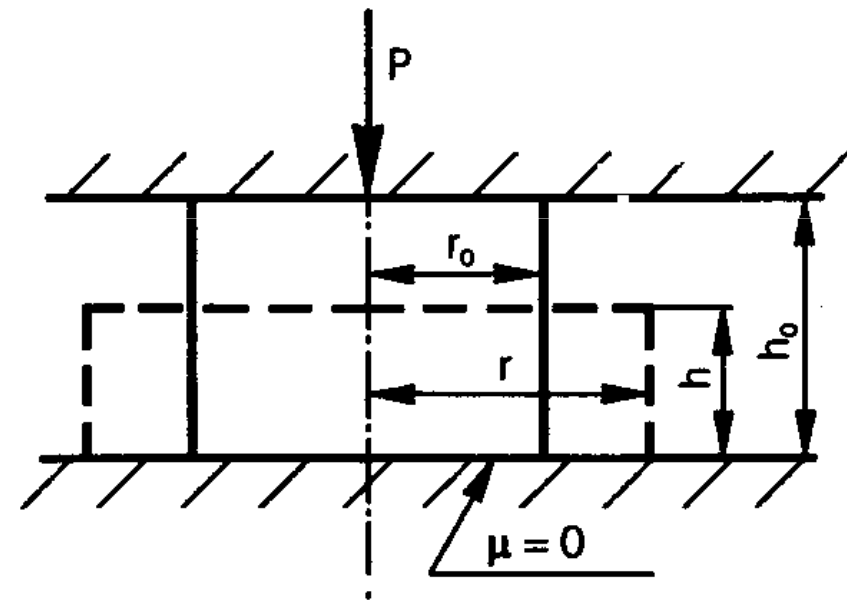


In questo caso il legame funzionale tra tensione e deformazione può pensarsi ottenuto approssimando la curva σ - ϵ con 2 segmenti aventi pendenze diverse. Questo modello approssima il comportamento di molti materiali ingegneristici.

PROVA DI COMPRESSIONE

La prova di compressione viene eseguita comprimendo un provino di forma cilindrica fra due superfici piane e parallele

In molte lavorazioni per deformazione plastica (stampaggio, laminazione, estrusione), la deformazione si ottiene principalmente tramite un'azione di compressione esercitata sul pezzo da deformare. La prova di compressione riproduce uno stato di tensione paragonabile a quello impresso al pezzo durante le lavorazioni predette ed è perciò indicativa ai fini del comportamento del materiale.

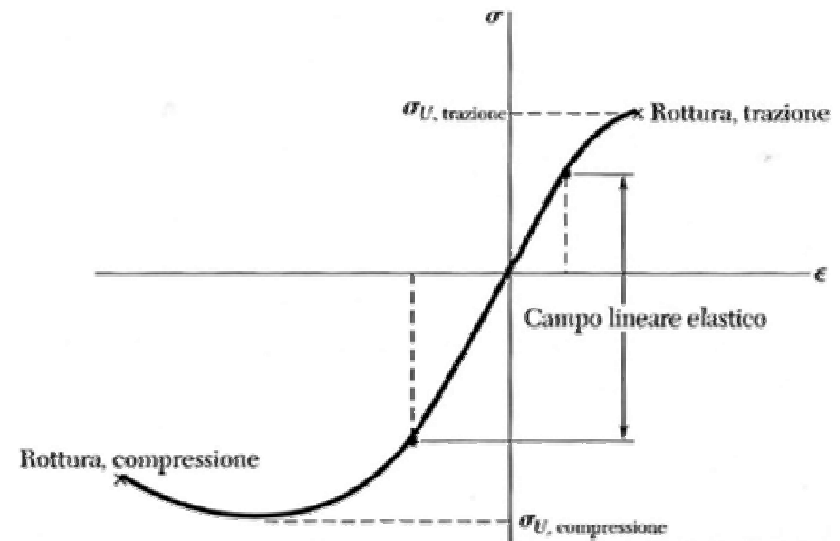
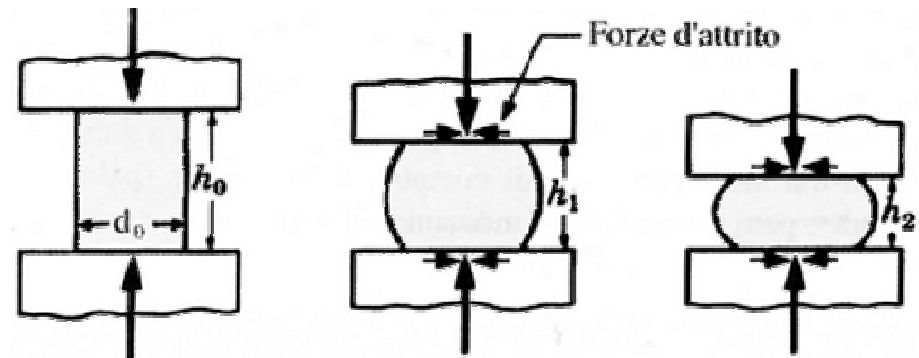


$$\varepsilon = \ln (h_0/h) = \ln (A/A_0)$$

PROVA DI COMPRESSIONE

Sono in genere prove molto complicate dal fatto che tra provino e i piatti della macchina l'attrito crea tensioni tangenziali che introducono uno stato di tensione tridimensionale (creando anche il fenomeno di imbarilimento o barreling)

Il valore in modulo della tensione di snervamento a trazione ed a compressione per i metalli è simile (simmetria rispetto allo snervamento)

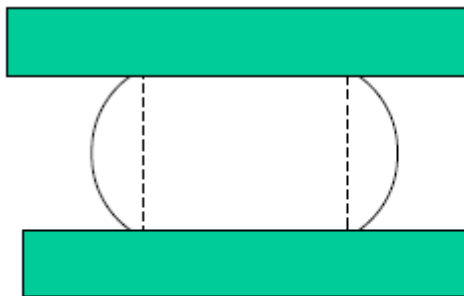


PROVA DI COMPRESSIONE

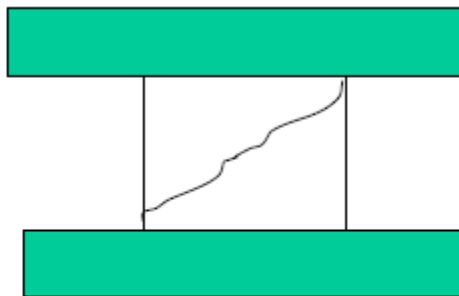


Solo i materiali fragili e quelli poco duttili si rompono a compressione.

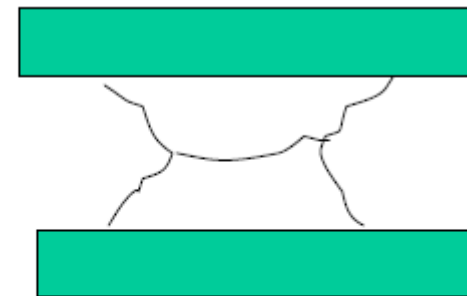
I materiali duttili si deformano vistosamente ma non si rompono.



Materiale duttile



Materiale a frattura fragile (ghisa)



Materiale a frattura fragile (calcestruzzo)

ESERCIZIO N°1



Una barra cilindrica di rame è caricata con una forza assiale di 6.6 kN. Se la lunghezza della barra è di 380 mm, quale deve essere il diametro della sezione che permette un allungamento elastico di 0.5 mm?

Lega	E (GPa)
Al	69
Cu	110
Ottone	97
Acciaio 1025	207
W	407

ESERCIZIO N°1

$$E_{\text{cu}} = 110 \text{ GPa}$$

$$P = 6.6 \text{ kN}$$

$$L_0 = 380 \text{ mm}$$

$$\Delta L = 0.5 \text{ mm}$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{P}{A_0} \cdot \frac{L_0}{\Delta L} \Rightarrow A_0 = \frac{P}{E} \cdot \frac{L_0}{\Delta L} = \frac{6.6}{110} \cdot \frac{380}{0.5} = 45.6 \text{ mm}^2$$

$$A_0 = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \Rightarrow d = \sqrt{\frac{4A_0}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 45.6}{\pi}} = 7.62 \text{ mm}$$



ESERCIZIO N°2

Un carico di trazione viene applicato lungo l'asse di una barra cilindrica di ottone avente un diametro di 10 mm. Determinare lo sforzo necessario a produrre una variazione del diametro di 2.5×10^{-3} mm, ipotizzando che avvenga una deformazione puramente elastica. Il rapporto di Poisson della barra è $\nu=0.34$.

Lega	E (GPa)
Al	69
Cu	110
Ottone	97
Acciaio 1025	207
W	407



ESERCIZIO N°2

Il disegno riporta la deformazione che avviene nella barra di ottone in seguito all'applicazione del carico di trazione F .

Quando viene applicata la forza F , la barra si allunga nella direzione z e il diametro si riduce di $\Delta d = 2.5 \times 10^{-3}$ mm lungo la direzione x .

Quindi la deformazione nella direzione x è data da:

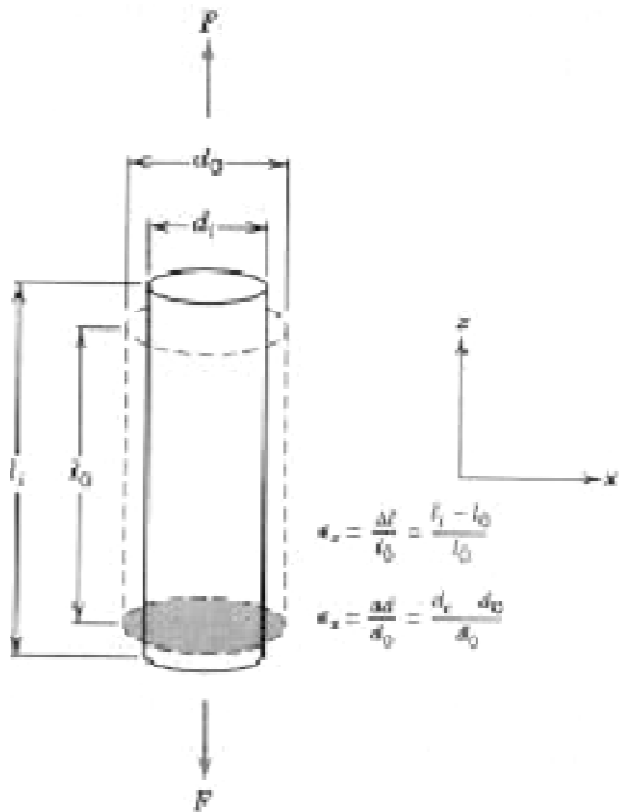
$$\varepsilon_x = \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{-2.5 \cdot 10^{-3}}{10} = -2.5 \cdot 10^{-4}$$

che è negativa poiché si ha una riduzione di diametro. Per valutare la deformazione lungo l'asse z si utilizza la $\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z}$ da cui:

$$\varepsilon_z = -\frac{\varepsilon_x}{\nu} = -\frac{2.5 \cdot 10^{-4}}{0.34} = 7.35 \cdot 10^{-4}$$

Lo sforzo applicato è quindi dato dalla legge di Hooke poiché la deformazione è puramente elastica ed è quindi dato da:

$$\sigma = \varepsilon_z \cdot E = (7.35 \cdot 10^{-4} \cdot 97 \cdot 10^3) = 71.3 \text{ MPa}$$



ESERCIZIO N°3

Una prova di trazione, eseguita su un campione di titanio, ha fornito i risultati riportati in tabella.

Il diametro iniziale è di 18 mm ed il tratto utile di 90 mm.

Tracciare il diagramma sigma-epsilon (sia ingegneristico che reale) e determinare:

- il modulo di elasticità di Young;
- il valore del carico unitario di scostamento dalla proporzionalità allo 0.2%;
- il valore dello sforzo a rottura;
- l'allungamento percentuale dopo la rottura.

Carico (kN)	ΔL (mm)
0	0
12	0,04
24	0,08
36	0,12
44	0,2
51,2	0,28
56	0,4
60	0,57
62	0,77
64	1,1
65,6	1,63
66,8	3,67
67,2	16,3
62,4	38,7
52,8	61



ESERCIZIO N°3



Carico (kN)	ΔL (mm)	ϵ	σ (Mpa)	ϵ_t	σ_t (Mpa)
0	0	0	0	0	0
12	0,04	0,000444	47,15702	0,000444	47,17798
24	0,08	0,000889	94,31404	0,000888	94,39788
36	0,12	0,001333	141,4711	0,001332	141,6597
44	0,2	0,002222	172,9091	0,00222	173,2933
51,2	0,28	0,003111	201,2033	0,003106	201,8293
56	0,4	0,004444	220,0661	0,004435	221,0442
60	0,57	0,006333	235,7851	0,006313	237,2784
62	0,77	0,008556	243,6446	0,008519	245,7291
64	1,1	0,012222	251,5041	0,012148	254,578
65,6	1,63	0,018111	257,7917	0,017949	262,4606
66,8	3,67	0,040778	262,5074	0,039968	273,2119
67,2	16,3	0,181111	264,0793	0,166456	311,907
62,4	38,7	0,43	245,2165	0,357674	350,6596
52,8	61	0,677778	207,4909	0,51747	348,1236

NB:

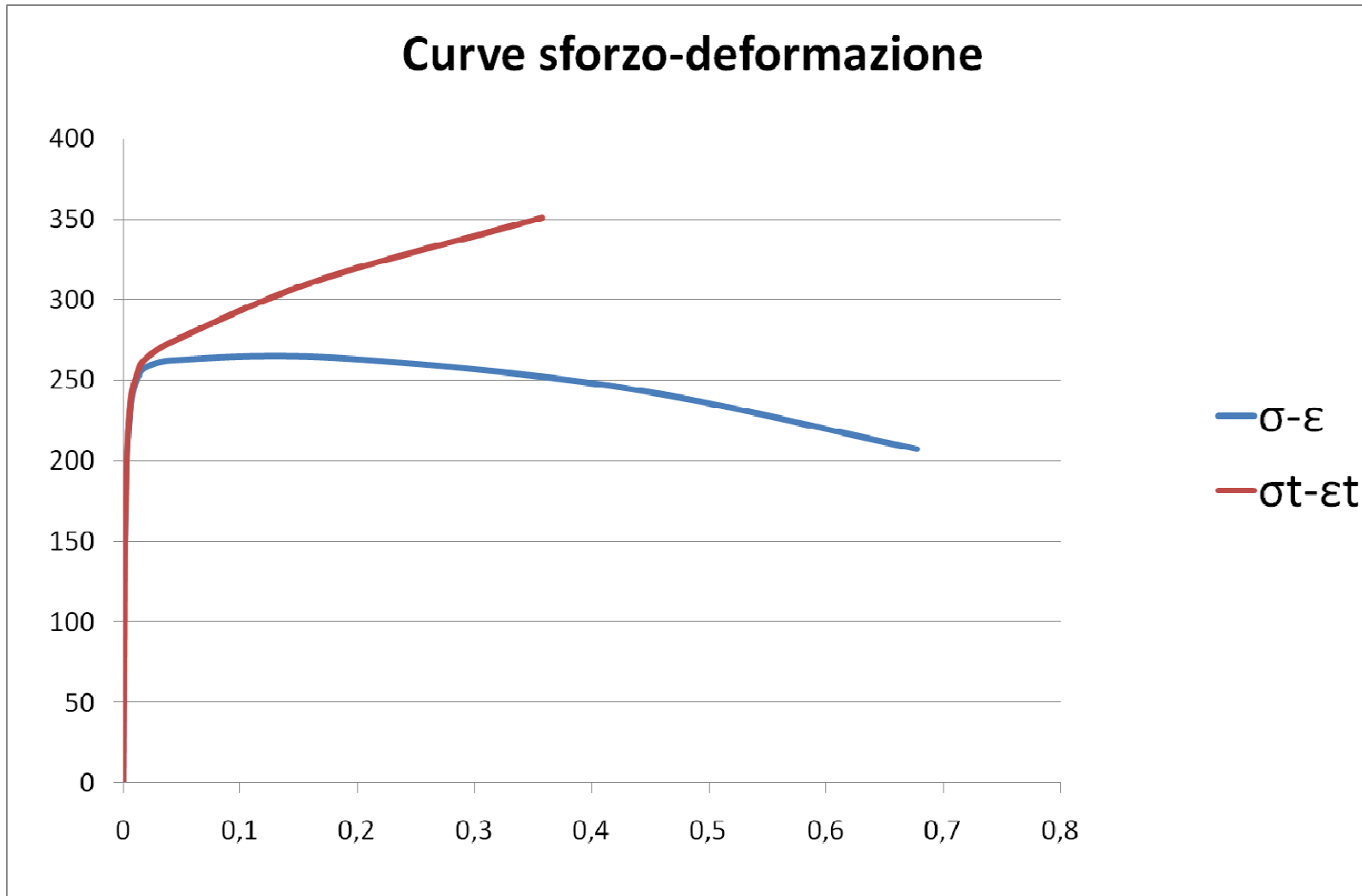
$$\epsilon_t = \ln(L/L_0) = \ln(1 + \epsilon)$$

$$\sigma_t = \sigma \cdot (1 + \epsilon)$$

ESERCIZIO N°3



Curve sforzo-deformazione



ESERCIZIO N°3



a) Modulo di elasticità di Young

Scelgo due punti nel tratto elastico:

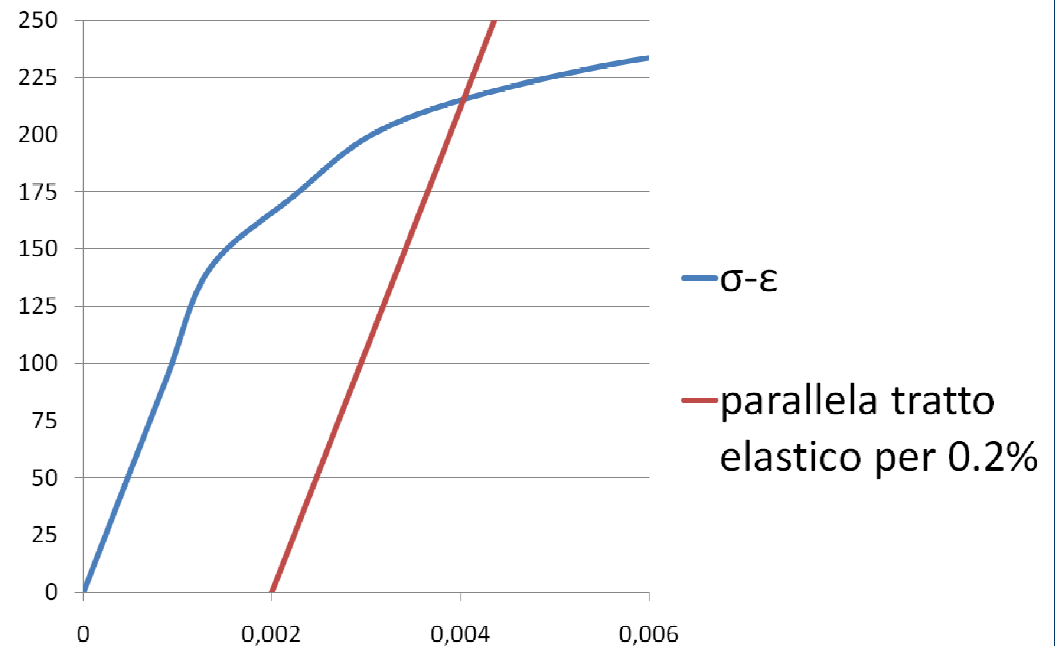
$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \cong 106100 \text{ MPa}$$

b) Valore del carico unitario di scostamento dalla proporzionalità allo 0.2%

Metodo grafico con retta parallela al tratto elastico e passante per deformazione dello 0.2%

$$Y_{0.2} \cong 215 \text{ MPa}$$

Curve sforzo-deformazione



ESERCIZIO N°3



c) Valore dello sforzo a rottura

Valore massimo della tensione ingegneristica:

$$\sigma_R \cong 264\text{MPa}$$

d) Allungamento percentuale dopo la rottura

$$A\% = \frac{L_f - L_0}{L_0} \cdot 100 = 67.8\%$$