

COMPORTAMENTO PLASTICO DEI MATERIALI METALLICI

PROGETTAZIONE DEI PROCESSI DI FORMATURA PLASTICA

- Uno dei compiti fondamentali cui è chiamato il tecnologo riguarda la progettazione dei processi produttivi allo scopo di ottenere prodotti esenti da difetti nella maniera più economicamente vantaggiosa
- Nel caso di processi di formatura plastica la progettazione consiste nella scelta di una serie di parametri operativi riassumibili in:
 - parametri relativi alla geometria degli stampi e del semilavorato (dimensioni e forma del pezzo di partenza, raggi di raccordo, dimensioni della luce di bava, ecc.)
 - parametri relativi al processo (T iniziale del pezzo, T degli stampi, velocità degli stampi, condizioni di lubrificazione, pressione del premilamiera, ecc.)

PROGETTAZIONE DEI PROCESSI DI FORMATURA PLASTICA

- Per poter operare tali scelte sono necessarie informazioni su:
 - comportamento al flusso plastico del materiale da sottoporre a deformazione
 - comportamento delle interfacce materiale in deformazione – utensili deformanti in termini di:
 - resistenza all'attrito
 - trasmissione del calore
 - caratteristiche del materiale degli utensili (tensione di snervamento, modulo di elasticità, resistenza all'usura, ecc.)
 - costi del processo (costo delle attrezzature e dei macchinari, costo orario della manodopera, ecc.)

COMPORAMENTO PLASTICO DEI METALLI

I materiali metallici sono caratterizzati dalle loro proprietà fisico-chimiche, proprietà meccaniche e proprietà tecnologiche

Proprietà fisico-chimiche:

peso specifico, temperatura di fusione, proprietà strutturate in generale, ecc.

... Sono indipendenti dalle azioni meccaniche esterne

COMPORTAMENTO PLASTICO DEI METALLI

Proprietà meccaniche:

Resistenza a trazione, compressione, flessione, torsione, taglio, urto, durezza, resistenza allo scorrimento, resistenza a fatica.

... Sono relative alla risposta del materiale a sollecitazioni meccaniche statiche o dinamiche.

Proprietà tecnologiche:

Fusibilità, malleabilità, lavorabilità alle macchine utensili, ecc.

... sono relative all'attitudine che i vari materiali presentano ad essere lavorati con i vari procedimenti tecnologici

COMPORTAMENTO PLASTICO DEI METALLI

Nelle operazioni per deformazione plastica dei metalli riveste notevole utilità la conoscenza

- dell'inizio dello scorrimento plastico del materiale
- delle forze necessarie per produrre le grandi deformazioni a cui è sottoposto il materiale
- del comportamento del materiale durante la deformazione plastica

COMPORTAMENTO PLASTICO DEI METALLI

- Legge reologica $(\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T))$
- Caratteristiche di anisotropia
- Limiti di formabilità Formabilità



- Ricorso a prove effettuate con stati tensionali semplici e ben definiti
- Risultati estesi ai sistemi reali più complessi

COMPORTAMENTO PLASTICO DEI METALLI

- Configurazione tensionale più semplice fornita da una sollecitazione monoassiale (prove di trazione e di compressione)
- Limitazioni maggiori rispetto a quanto accade nella pratica delle lavorazioni (soprattutto a caldo):
 - piccole deformazioni ottenibili nel campione
 - piccole variazioni di forma



- Necessità di ricorrere ad altri tipi di prove (prova di compressione o di torsione) che forniscono informazioni più idonee per lo studio delle lavorazioni plastiche dei metalli

PROVA DI TRAZIONE

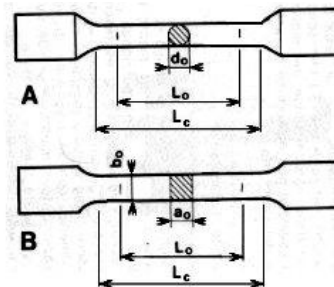
- È la più importante e usata fra le prove meccaniche distruttive
- Fornisce, oltre alle proprietà meccaniche, una descrizione quantitativa del comportamento plastico dei metalli
- Informazione basilare ricavata:
 - forza per ottenere un determinato allungamento del provino



- Valutazione delle tensioni e delle deformazioni in quanto sono le caratteristiche più generalizzabili

PROVA DI TRAZIONE: LE PROVETTE

- Lunghezza e sezione stabilite in modo che fra di esse vi sia un determinato rapporto allo scopo di ottenere risultati confrontabili
- Realizzate evitando operazioni che possano provocare riscaldamenti o fenomeni di incrudimento
- Devono essere lucidate e non presentare traccia di utensile
- Si distinguono:
 - le teste
 - i raccordi
 - il tratto a sezione costante L_c
 - il tratto utile di lunghezza iniziale L_0



PROVA DI TRAZIONE

Provette proporzionali

$$L_0 = 5d$$

$$L_0 = 5.65\sqrt{S_0}$$

Provette cilindriche

Provette rettangolari

Provette non proporzionali – L_c deve essere compresa fra

$$L_0 + d/2 \text{ e } L_0 + 2d$$

Provette cilindriche

$$L_0 + 1.5\sqrt{S_0} \text{ e } L_0 + 2.5\sqrt{S_0}$$

Provette rettangolari

La velocità di incremento del carico deve essere compresa fra:

2 – 10 N/(mm²s) per materiali con $E < 150000$ N/mm²

6 – 30 N/(mm²s) per materiali con $E > 150000$ N/mm²

Norma UNI EN 10002-1

PROVA DI TRAZIONE: LA MACCHINA

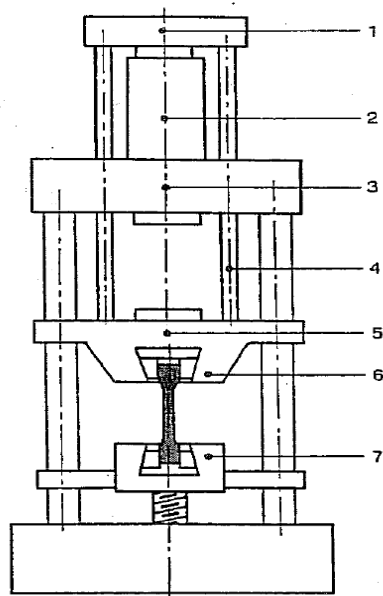


Fig. 1.3

Macchina universale di prova.

- 1 - traversa di sollevamento
- 2 - cilindro di comando
- 3 - traversa fissa
- 4 - tiranti di sollevamento
- 5 - traversa mobile
- 6 - afferraggio superiore
- 7 - afferraggio inferiore

PROVA DI TRAZIONE: CURVA DEI VALORI NOMINALI

- Mette in relazione:

- tensione nominale o ingegneristica:

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

F e A_0 : forza applicata e area iniziale del provino

- deformazione nominale o ingegneristica:

$$e = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{L}{L_0} - 1$$

L_0 e L : lunghezza iniziale e istantanea del provino

PROVA DI TRAZIONE: CURVA DEI VALORI NOMINALI

- Curva s - e dipendente da:
 - composizione chimica del materiale
 - trattamento termico preliminare
 - deformazione plastica precedente
 - velocità di deformazione
 - temperatura



PROVA DI TRAZIONE: CURVA DEI VALORI NOMINALI

- Al di sotto di una certa tensione (resistenza allo snervamento)
 - ▣ andamento grafico $s - e$ lineare (**regione elastica**)
- Al di sopra della resistenza allo snervamento
 - ▣ andamento grafico $s - e$ non lineare e il campione subisce deformazioni permanenti (**regione plastica**)
- Volume del provino costante durante la deformazione plastica
 - ▣ $A_0 \cdot L_0 = A \cdot L$
 - ▣ allungamento accompagnato da una diminuzione di area della superficie trasversale del provino

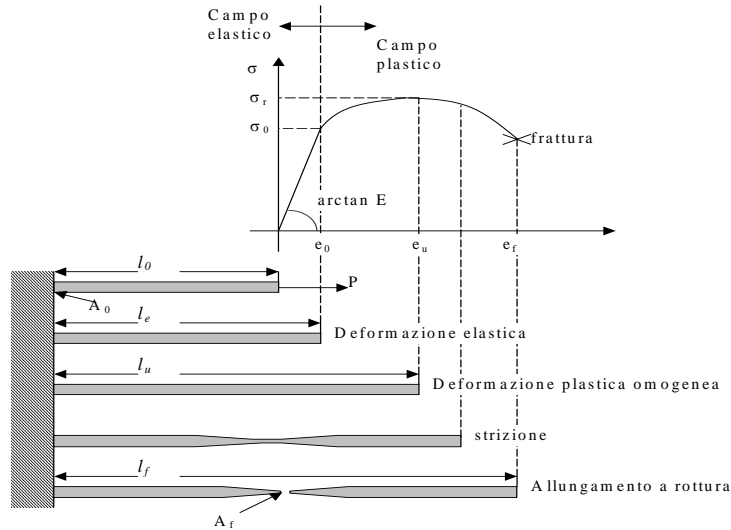


PROVA DI TRAZIONE: CURVA DEI VALORI NOMINALI

- Diminuzione di sezione compensata inizialmente dall'incrudimento
 - ▣ aumento di s con e
- Ad un certo punto la sezione diventa estremamente ridotta
 - ▣ incrudimento non più compensativo
 - ▣ diminuzione di s al crescere di e fino a rottura
- Riduzione di sezione nel punto più debole del provino ove si concentra tutta l'ulteriore deformazione plastica
 - ▣ strizione localizzata



PROVA DI TRAZIONE: CURVA DEI VALORI NOMINALI



PROVA DI TRAZIONE: CURVA DEI VALORI NOMINALI

Modulo di elasticità (E):

- pendenza della curva σ - e nel tratto lineare
- misura della rigidità del materiale
- determinato dalle forze di legame tra gli atomi \Rightarrow poco influenzato da elementi di lega, trattamenti termici o incrudimenti
- diminuisce all'aumentare di T
- molto importante da un punto di vista progettuale



PROVA DI TRAZIONE: CURVA DEI VALORI NOMINALI

Resistenza allo snervamento (R_{p}):

- tensione a cui ha inizio la deformazione plastica
- per molti materiali esiste uno snervamento ben definito
- per altri transizione graduale tra comportamento elastico e plastico \Rightarrow inizio di plasticizzazione non definibile con precisione \Rightarrow ricorso ai concetti di:
 - limite elastico vero basato su misure di microdeformazione
 - limite di proporzionalità tra s ed e
 - limite elastico inteso come valore di s che non produce deformazioni permanenti misurabili
 - tensioni che producono deformazioni prefissate (0.1 e 0.2%)



PROVA DI TRAZIONE

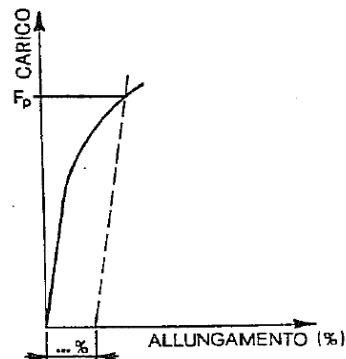
Carico unitario di scostamento dalla proporzionalità:

E' il rapporto fra il carico di scostamento dalla proporzionalità F_p e la sezione iniziale S_0

$$R_p = \frac{F_p}{S_0} \quad (\text{N/mm}^2)$$

$R_{p 0,2}$

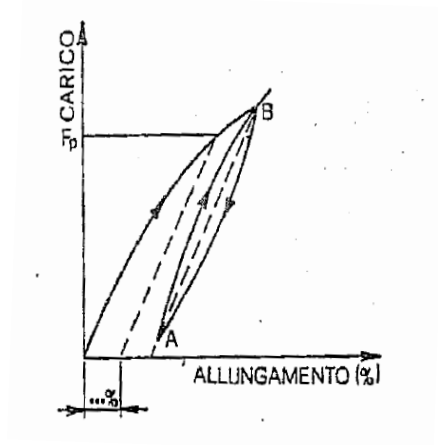
E' il carico unitario che determina uno scostamento pari allo 0.2% della lunghezza L_0



PROVA DI TRAZIONE

Carico unitario di scostamento dalla proporzionalità:

Se il tratto iniziale della curva non fosse rettilineo ...



PROVA DI TRAZIONE

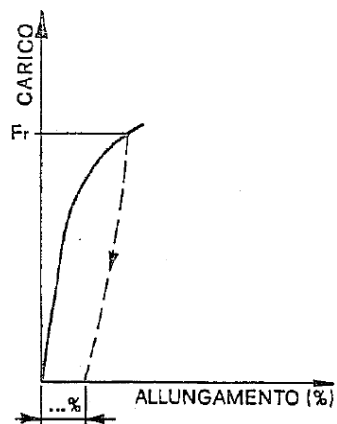
Carico unitario limite di allungamento permanente:

E' il rapporto fra il carico limite di allungamento permanente F_r e la sezione iniziale S_0

$$R_r = \frac{F_r}{S_0} \quad (\text{N/mm}^2)$$

$R_{r 0,2}$

E' il carico unitario che determina un allungamento pari allo 0.2% della lunghezza L_0



PROVA DI TRAZIONE

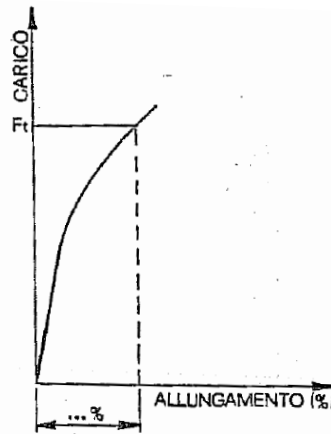
Carico unitario limite di allungamento totale:

E' il rapporto fra il carico limite di allungamento totale (plastico + elastico) F_t e la sezione iniziale S_0

$$R_t = \frac{F_t}{S_0} \quad (\text{N/mm}^2)$$

$R_{t\ 0,5}$

E' il carico unitario che determina un allungamento totale pari allo 0.5% della lunghezza L_0



PROVA DI TRAZIONE: CURVA DEI VALORI NOMINALI

Resistenza a trazione (R_u):

$$R_u = \frac{F_{\max}}{S_0}$$

- Metalli duttili:
 - misura del carico massimo sopportabile
 - usata in progettazione anche se si preferisce R_0
 - parametro facilmente determinabile e riproducibile \Rightarrow usato come specifica nel controllo di qualità
 - spesso correlato empiricamente alla durezza ed alla resistenza a fatica
- Metalli fragili:
 - parametro valido per la progettazione



PROVA DI TRAZIONE: CURVA DEI VALORI NOMINALI

Duttilità:

- Quantificabile mediante misure di:

- allungamento a rottura:

$$e_f = \frac{L_f - L_0}{L_0}$$

- riduzione di area a rottura:

$$r_f = \frac{A_0 - A_f}{A_0}$$

L_f e A_f : lunghezza e area del provino alla rottura

- Utile per:

- indicare il grado di deformabilità nelle lavorazioni plastiche senza che si verifichino rotture nel materiale
- indicare al progettista la deformazione prima della rottura



PROVA DI TRAZIONE: CURVA DEI VALORI NOMINALI

Duttilità:

- frazione apprezzabile della plasticità nella zona di strizione \Rightarrow e_f funzione di L_0 \Rightarrow nell'indicare il valore e_f è opportuno fornire anche la lunghezza L_0
- utilizzando r_f si evita tale limitazione
- relazione tra e_f e r_f riferita ad una lunghezza del tratto utile molto corta:

$$e_f = \frac{L_f}{L_0} - 1 = \frac{A_0}{A_f} - 1 = \frac{r_f}{1 - r_f}$$

PROVA DI TRAZIONE: CURVA DEI VALORI NOMINALI

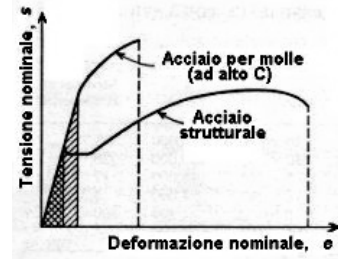
Resilienza:

- capacità del materiale di assorbire energia in campo elastico e di restituirla allo scarico
- valutata con il modulo di resilienza U_R definito come l'energia di deformazione per unità di volume per portare il materiale allo snervamento:

$$U_R = \frac{1}{2} R_0 \cdot e_0 = \frac{R_0^2}{2E}$$



- materiali ad alta resilienza (ad es. acciai per molle)



PROVA DI TRAZIONE: CURVA DEI VALORI NOMINALI

Tenacità:

- capacità del materiale di assorbire energia in campo plastico senza che avvengano rotture
- desiderabile in componenti meccanici quali ruote dentate, catene, ganci
- definita attraverso l'area sottesa dalla curva s-e, cioè come lavoro specifico di deformazione

- materiali duttili:

$$U_T = R_u \cdot e_f \quad \text{o} \quad U_T = \frac{1}{2} (R_0 + R_u) \cdot e_f$$

- materiali fragili:

$$U_T = \frac{2}{3} R_u \cdot e_f$$

si assume che la curva s-e in campo plastico sia una parabola



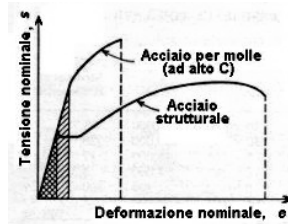
PROVA DI TRAZIONE: CURVA DEI VALORI NOMINALI

Tenacità:

- area sottesa negli acciai strutturali > di quella negli acciai al C per molle anche se in quest'ultimo caso i carichi di snervamento e a rottura sono maggiori
- gli acciai strutturali presentano però maggiore duttilità



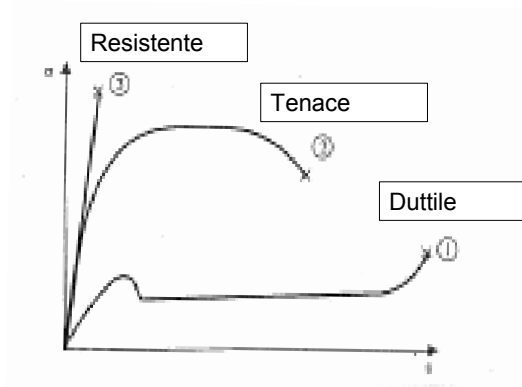
- **La tenacità è la proprietà del materiale che combina resistenza e duttilità**



Tanacità, duttilità, resistenza

- L'attitudine di un materiale ad essere deformato plasticamente viene detta **duttilità**
- La capacità del materiale di assorbire energia prima di giungere a rottura viene detta **tenacità**

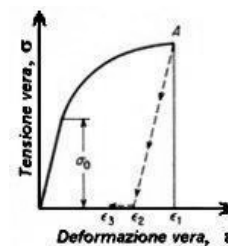
Tanacità, duttilità, resistenza



PROVA DI TRAZIONE: CURVA DEI VALORI REALI

- Correla i valori della tensione reale (σ) con quelli della deformazione reale (ε), ottenuti riferendosi alle dimensioni istantanee del provino

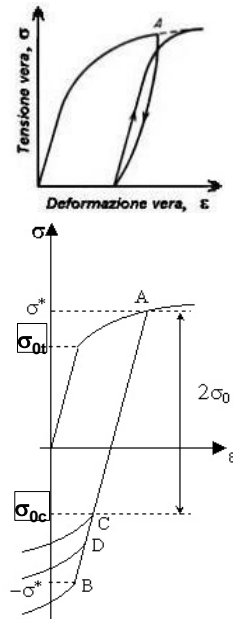
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \varepsilon = \ln \frac{L}{L_0}$$



- Permette una migliore descrizione dei dati sperimentali
- σ sempre crescente con ε fino a rottura contrariamente a quanto accade nella curva $s - e$
- $\sigma < \sigma_0 \Rightarrow$ zona elastica
- $\sigma > \sigma_0 \Rightarrow$ zona di deformazione plastica

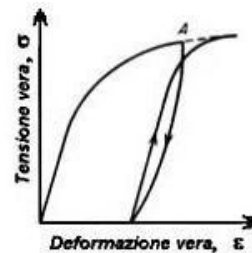
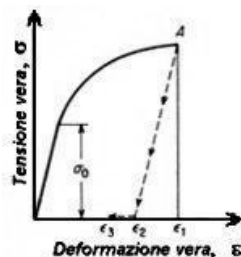
PROVA DI TRAZIONE: CURVA DEI VALORI REALI

- Riapplicazione del carico \Rightarrow curva σ - ε , con deformazione plastica addizionale, tende a riassumere i valori che aveva prima dello scarico
- Effetto Bauschinger: dipendenza dello snervamento dalla traiettoria di carico \Rightarrow in un materiale traziionato in zona plastica, scaricato e poi compresso: $\sigma_{0t} > \sigma_{0c}$
- Nei problemi di plasticità si trascurano:
 - l'isteresi derivante dal caricamento e scaricamento del materiale
 - l'effetto Bauschinger ($\sigma_{0t} = \sigma_{0c}$)



PROVA DI TRAZIONE: CURVA DEI VALORI REALI

- Caricamento del provino fino al punto A \Rightarrow deformazione ad un valore ε_1
- Scaricamento del provino \Rightarrow passaggio da ε_1 a ε_2 seguendo la linea tratteggiata $\Rightarrow \varepsilon_1$ - ε_2 : **deformazione elastica**
- Passaggio nel tempo della deformazione da ε_2 ad ε_3 $\Rightarrow \varepsilon_2$ - ε_3 : **deformazione anelastica**
- In realtà, il materiale scaricato dal punto A non segue una traiettoria perfettamente lineare e // a quella elastica

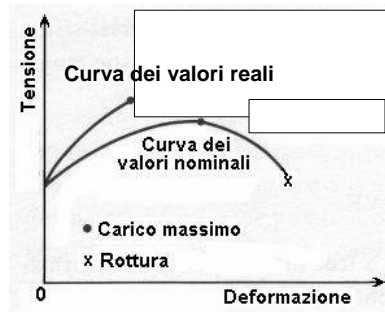


PROVA DI TRAZIONE: CURVA DEI VALORI REALI

- Correlazione tra valori reali e nominali:

$$\sigma = s \cdot (1 + e) \quad \varepsilon = \ln(1 + e)$$

- Deformazione elastica trascurabile (materiali duttili)
- Curva σ - ε più in alto e a sinistra rispetto a quella s - e fino al raggiungimento del picco della curva nominale



PROVA DI TRAZIONE: CURVA DEI VALORI REALI

- Relazione:

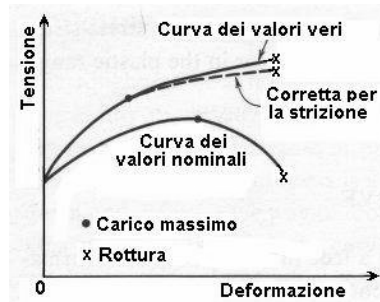
$$\varepsilon = \ln(1 + e)$$

valida fino alla forza massima in quanto, essendo la deformazione uniforme, si ha una misura significativa di e

- Oltre tale punto le deformazioni altamente localizzate nella zona di strizione >> deformazioni nominali \Rightarrow ricorso ad espressioni della ε in funzione della variazione di area

$$d\varepsilon = \frac{dL}{L} = -\frac{dA}{A} \Rightarrow \varepsilon = \ln \frac{A_0}{A}$$

- Triassialità dello stato tensionale conseguente alla formazione della strizione \Rightarrow necessità di correggere la curva σ - ε



PROVA DI TRAZIONE: CURVA DEI VALORI REALI

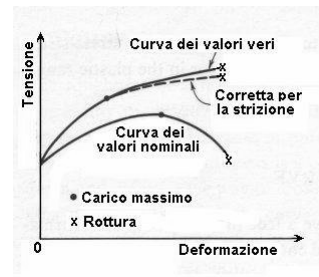
- σ_u ed ε_u : valori reali al massimo della curva dei valori nominali in corrispondenza di R_u ed e_u :

$$\sigma_u = \frac{F_{\max}}{A_u} \quad \varepsilon_u = \ln \frac{L_u}{L_0} = \ln \frac{A_0}{A_u}$$

- Correlazione tra σ_u e R_u e tra ε_u ed e_u :

$$\sigma_u = R_u \frac{A_0}{A_u} = R_u \cdot \exp(\varepsilon_u) \quad \varepsilon_u = \ln(1 + e_u)$$

- ε_u (deformazione reale uniforme) molto utile per stimare la lavorabilità plastica con i dati forniti dalla prova di trazione



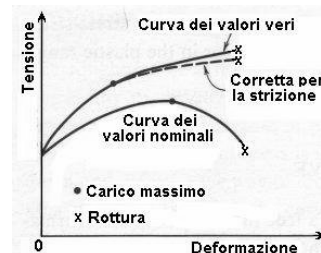
PROVA DI TRAZIONE: CURVA DEI VALORI REALI

- Tensione reale a rottura: rapporto tra forza e sezione a rottura
- Deve essere corretta per la triassialità
- Non essendo sempre disponibili dati per la correzione ➡ spesso imprecisa
- Deformazione reale a rottura:

$$\varepsilon_f = \ln \frac{A_0}{A_f}$$

- ε_f non correlabile con il valore nominale della deformazione... può essere messa in relazione con r_f :

$$\varepsilon_f = \ln \frac{1}{1 - r_f}$$



MODELLI EMPIRICI ANALITICI

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

- Effetto di ε

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

- Effetto di $\dot{\varepsilon}$

$$\sigma = A \cdot \varepsilon^n \cdot \dot{\varepsilon}^m$$

- Effetto simultaneo di ε e $\dot{\varepsilon}$

$$\sigma = A \cdot \varepsilon^n \cdot \dot{\varepsilon}^m \cdot \exp\left(\frac{\beta}{T}\right)$$

- Effetto simultaneo di ε , T e $\dot{\varepsilon}$

$$\dot{\varepsilon} \cdot \exp\left(\frac{Q}{R \cdot T}\right) = A \cdot [\sinh(\alpha \cdot \sigma)]^{n'}$$

- Effetto simultaneo di T e $\dot{\varepsilon}$

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \cdot \sinh^{-1} \left[\frac{\dot{\varepsilon} \cdot \exp\left(\frac{Q(\varepsilon)}{R \cdot T}\right)}{A(\varepsilon)} \right]^{1/n'(\varepsilon)}$$

- Effetto simultaneo di ε , T e $\dot{\varepsilon}$

$$\sigma = \left[\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{st}} \right)^m \sigma_{st} + B \right] \cdot \exp \left[-p \cdot \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{st}} \right)^q (T - T_{st}) \right]$$

- Tiene conto della storia di deformazione

MODELLI REOLOGICI: EFFETTO DELLA DEFORMAZIONE

- Legge σ - ε in campo plastico (dallo snervamento a tutta la zona di deformazione uniforme):

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

- K : coefficiente di resistenza (valore della tensione per $\varepsilon = 1$)
- n : coefficiente di incrudimento (pendenza della retta interpolante i dati su un grafico $\log \sigma - \log \varepsilon$)
- Esprimendo la deformazione in termini di riduzione di area r :

$$\sigma = K \cdot \left(\ln \frac{1}{1-r} \right)^n$$

MODELLI REOLOGICI: EFFETTO DELLA DEFORMAZIONE

- Stati tensionali e deformativi agenti su provini cilindrici:

$$\sigma_1 \neq 0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad d\varepsilon_1 = -2d\varepsilon_2 = -2d\varepsilon_3$$

- 1 è la direzione di carico ed il materiale si suppone isotropo
- Valori reali delle tensioni e delle deformazioni coincidenti con quelli nella direzione di applicazione del carico \Rightarrow l'equazione rappresenta la curva dei valori equivalenti del materiale

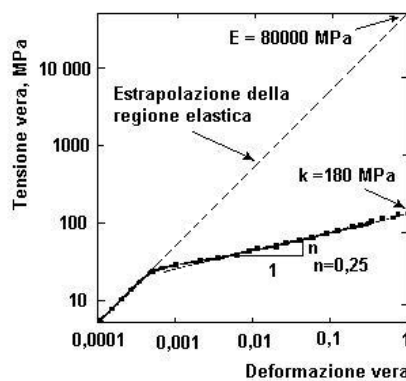


- Relazione tra tensione e deformazione in campo plastico scritta in termini di valori equivalenti:

$$\bar{\sigma} = K \cdot \bar{\varepsilon}^n$$

MODELLI REOLOGICI: EFFETTO DELLA DEFORMAZIONE

- Determinazione dei valori numerici delle costanti K ed n :
 - dati $\sigma - \varepsilon$ in un grafico logaritmico
 - interpolazione lineare dei dati relativi al campo plastico
- Determinazione dei valori di:
 - K come ordinata per $\varepsilon = 1$
 - n come pendenza della retta



MODELLI REOLOGICI: EFFETTO DELLA DEFORMAZIONE

$$\bar{\sigma} = K \cdot \bar{\varepsilon}^n$$

- Equazione affidabile quando: $0.04 < \varepsilon < \varepsilon_U$
- Uso per la previsione della tensione di snervamento da evitare

MODELLI REOLOGICI: EFFETTO DELLA DEFORMAZIONE

- Per uno stesso materiale si possono avere diversi valori di K ed n a seconda:
 - del trattamento termico subito
 - della composizione
 - della storia di caricamento precedente



- Valori di K ed n di un materiale riferiti ad una condizione ben precisa

MODELLI REOLOGICI: EFFETTO DELLA DEFORMAZIONE

- Relazioni σ - ε , quando utilizzate nei calcoli, possono comportare notevoli difficoltà nonostante la loro semplicità
- Semplificazioni considerando il materiale:
 - rigido-plastico ideale: approssima il comportamento dei metalli duttili fortemente incruditi
 - elastico-idealmente plastico: approssima il comportamento dei materiali con snervamento pronunciato (acciai al C)
 - elastico-plastico lineare: per tutti gli altri materiali



PROVA DI COMPRESSIONE

- Permette di ovviare ad alcuni inconvenienti tipici della prova di trazione:
 - assenza della zona di strizione \Rightarrow incremento della massima deformazione raggiungibile ($\varepsilon_T = 0.1 \div 0.5$; $\varepsilon_C \cong 2$ per materiali duttili) prossima a quella delle lavorazioni plastiche ($\varepsilon = 2 \div 4$)
 - stato tensionale che approssima meglio quello della maggior parte delle lavorazioni plastiche massive (fucinatura, laminazione, ecc.)
- Tipi di prove:
 - compressione assialsimmetrica
 - compressione in stato piano di deformazione (prova di Ford)

I MODELLI DI ATTRITO

In generale il problema consiste nella stima della sollecitazione tangenziale τ al contatto tra due corpi.

- Modello a sollecitazione costante:

$$\tau = m \cdot \tau_{\text{lim}} = m \cdot \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}$$

L'attrito dipende dalla massima sollecitazione tangenziale sopportabile dal corpo e, in ultima analisi, dal suo limite plastico.

I MODELLI DI ATTRITO

- Modello Coulombiano:

$$\tau = f \cdot \sigma_n$$

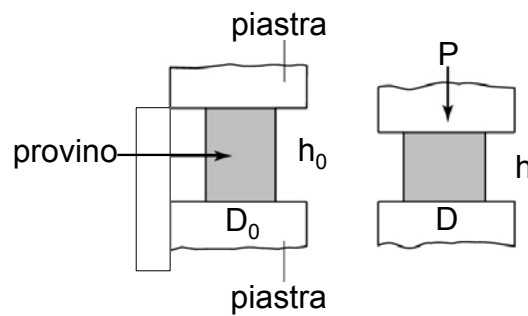
σ_n è la componente dello sforzo normale alla superficie di contatto.

Il calcolo di τ richiede la preventiva conoscenza degli sforzi.

PROVA DI COMPRESSIONE ASSIALSIMMETRICA

- Compressione con una pressa, tra piastre lisce, piane e parallele, di un provino di forma cilindrica
- Compressione omogenea: cilindro di diametro e altezza iniziali pari a D_0 e h_0 trasformato in un cilindro di diametro e altezza finali pari a D e h ➡ per la legge sulla costanza del volume:

$$D_0^2 \cdot h_0 = D^2 \cdot h$$



PROVA DI COMPRESSIONE ASSIALSIMMETRICA

- Prova condotta misurando in ogni istante forza applicata (P) e la corsa della piastra mobile (Δh)
- Tensione (pressione) reale sul provino (compressione omogenea):

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{4P}{\pi D^2} = \frac{4P}{\pi D_0^2} \frac{h}{h_0} = \frac{4P}{\pi D_0^2} \frac{h_0 - \Delta h}{h_0}$$

- Deformazione assiale reale:

$$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h} = \ln \frac{h_0}{h_0 - \Delta h} = \ln \frac{A}{A_0}$$

- Velocità di deformazione:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{dh}{h \cdot dt} = \frac{v}{h} = \frac{v}{h_0 - \Delta h}$$

v : velocità della piastra mobile

PROVA DI COMPRESSIONE ASSIALSIMMETRICA

- Azione delle forze di attrito che si oppone al flusso del materiale, a contatto le piastre, in direzione \perp alla forza P
- Flusso indisturbato del materiale a metà altezza



- Profilo del campione a botte con disuniformità della deformazione
 - Zone di metallo indeformato (a forma di cono) in corrispondenza delle regioni in cui opera l'attrito
 - Aumento della forza richiesta per produrre una data deformazione alla sovrapposizione di tali zone

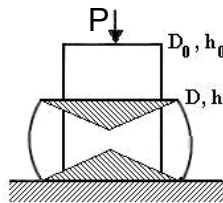
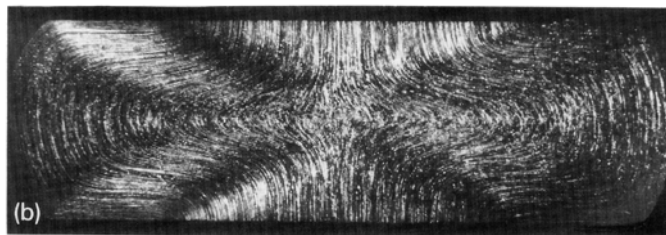
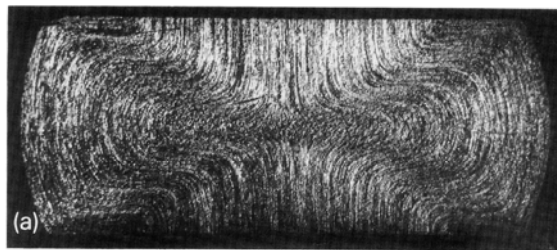


Figura forza - spostamento

PROVA DI COMPRESSIONE ASSIALSIMMETRICA

Zone di metallo indeformato



PROVA DI COMPRESSIONE ASSIALSIMMETRICA

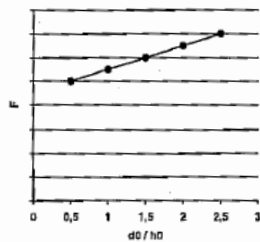
- Forze di attrito minimizzate:
 - utilizzando piastre lisce e dure
 - realizzando sulle superfici di base del campione delle scanalature elicoidali che trattengono il lubrificante
 - facendo la prova ad incrementi così che il lubrificante possa essere sostituito ad intervalli prefissati
- Lubrificanti per prove a freddo:
 - fogli di teflon
 - bisolfuro di molibdeno
 - olio ad alta viscosità
- Lubrificanti per prove a caldo:
 - grafite in olio per leghe di alluminio
 - vetro per acciaio, titanio e leghe resistenti ad alta T

PROVA DI COMPRESSIONE ASSIALSIMMETRICA

Metodo di Sachs

La prova si basa sull'impiego di cilindri aventi il rapporto d_0/h_0 diverso e minore di uno

Comprimendo a secco tali provini e riportando in funzione di d_0/h_0 i valori della pressione ottenuti, è possibile constatare che la retta che si ottiene cala al calare di d_0/h_0 fino al valore per $d_0/h_0=0$ ove l'attrito deve essere ininfluenza

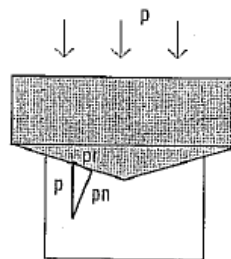


PROVA DI COMPRESSIONE ASSIALSIMMETRICA

- Soluzione per minimizzare la disuniformità della compressione (Siebel):
 - compressione del campione tra piastre coniche le cui generatrici formino con il piano di compressione \perp alla direzione di applicazione del carico un angolo pari a quello di attrito
- ↓
- provino sottoposto all'azione di forze // al suo asse \Rightarrow stato di tensione monoassiale \Rightarrow tensione di compressione distribuita uniformemente su qualsiasi sezione trasversale della provetta e pari alla tensione equivalente
 - inconveniente: può essere adottato solo se è noto il valore del coefficiente di attrito

PROVA DI COMPRESSIONE ASSIALSIMMETRICA

Metodo di Siebel



Inconvenienti:

- Il metodo può essere adottato solo se è noto il valore del coefficiente di attrito
- Il metodo è valido solo per basse deformazioni perché al crescere della deformazione varia il coefficiente d'attrito ed occorrerebbe cambiare i coni di base

PROVA DI COMPRESSIONE ASSIALSIMMETRICA

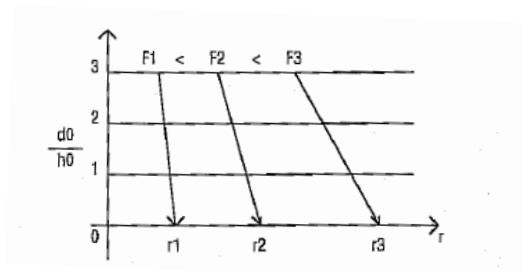
Metodo di Watts e Ford per la compressione dei cilindri

Provini con diametro costante ed altezza variabile
La prova viene effettuata nel seguente modo:

- I provini vengono lubrificati
- Si applica un carico noto e si misura la conseguente riduzione di altezza
- Si effettua una nuova lubrificazione e si sottopone il provino ad un carico crescente, andando a misurare la riduzione di altezza
- La stessa procedura viene ripetuta più volte variando il carico e la geometria del provino

PROVA DI COMPRESSIONE ASSIALSIMMETRICA

Metodo di Watts e Ford per la compressione dei cilindri



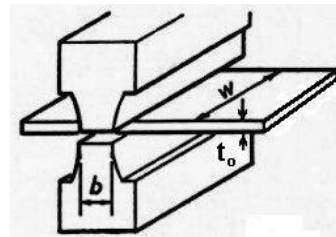
PROVA DI FORD

- Prova assialsimmetrica di difficile esecuzione su lamiere
- Stato piano di deformazione importante poiché ad esso si possono assimilare gli stati di deformazione della maggior parte dei processi di laminazione di nastri a freddo



- Prova di Ford: consiste nel comprimere una striscia di metallo tra due piastre piane e // con profondità maggiore di quella del nastro di prova

- Fenomeni di barilottatura assenti



PROVA DI FORD

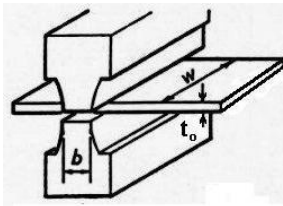
- Condizioni da rispettare:

- **$w > 5b$** affinché sia trascurabile la dilatazione nella direzione di w per effetto delle reazioni costrittive esercitate dal materiale indeformato

- **$0.25 < t_0/b < 0.5$**

- t_0/b grande \Rightarrow pressione di impronta $>$ tensione di scorrimento

- t_0/b piccolo \Rightarrow aumenti significativi degli effetti di attrito prodotti dalla notevole larghezza delle piastre



PROVA DI FORD

- Attrito presente anche con una scelta corretta del rapporto t_0/b
 ▸ necessità di lubrificazione
- Con un'opportuna scelta del rapporto t_0/b possibilità di raggiungere deformazioni fino al 90%
- Tensione di scorrimento misurata in stato di deformazione piano diversa da quella ottenuta nella prova monoassiale
- Tensioni σ_{cp} ($= \rho_{cp}$) e deformazioni ε_{cp} misurate in stato piano di deformazione:

$$\sigma_{cp} = \frac{P}{w \cdot b} \qquad \varepsilon_{cp} = \ln \frac{t_0}{t}$$

PROVA DI FORD

- Curva dei valori reali σ - ε in compressione monoassiale (corrispondente alla curva dei valori equivalenti) calcolata da quella in stato piano di deformazione (σ_{cp} - ε_{cp}) utilizzando le relazioni:

$$\sigma = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_{cp} = \frac{\sigma_{cp}}{1.155} \qquad \varepsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_{cp} = 1.155 \cdot \varepsilon_{cp}$$

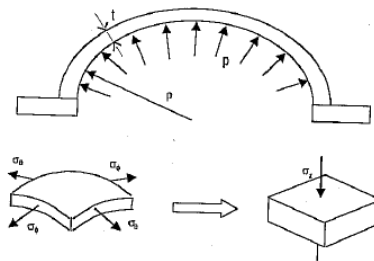
$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$\bar{\varepsilon} = \left[\frac{2}{3} (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2) \right]^{\frac{1}{2}}$$

BULGE TEST O TENSIONE BIASSIALE BILANCIATA

Nel bulge test, un disco sottile di un foglio di metallo è vincolato lungo la sua periferia e quindi sottoposto all'aumento della pressione da parte di un fluido applicato su un lato.

Mentre il foglio si rigonfia la regione in prossimità del centro diviene sferica e gli sforzi di trazione nel piano del foglio sono, per la simmetria del modello, i seguenti:



BULGE TEST O TENSIONE BIASSIALE BILANCIATA

Gli sforzi di trazione nel piano del foglio sono, per la simmetria del modello, i seguenti:

$$\sigma_g = \sigma_\varphi = \frac{p\rho}{2t}$$

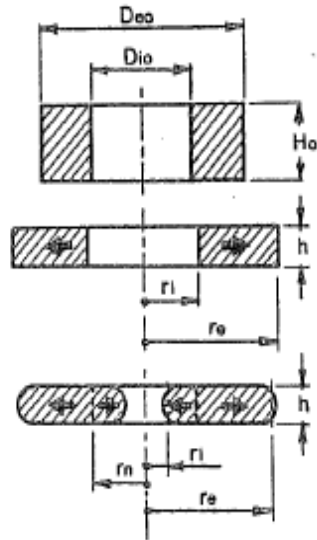
Inoltre

$$\varepsilon_\varphi = \varepsilon_g$$

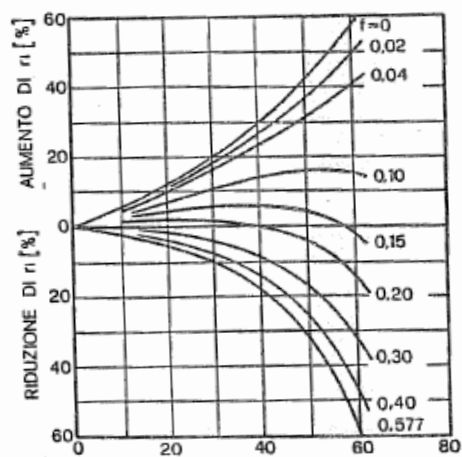
$$\varepsilon_t = -2\varepsilon_g = -2\varepsilon_\varphi = 2\ln(t/t_0)$$

$$\sigma_z = -\sigma_g$$

RING TEST



RING TEST



PROVA DI TORSIONE

- Deformazioni di notevole entità simulate più convenientemente con la prova di torsione
- A differenza delle altre prove le dimensioni del provino restano pressoché invariate
- Consente anche di determinare proprietà come modulo di elasticità tangenziale e carico di snervamento torsionale

PROVA DI TORSIONE

- Apparecchiatura di prova costituita da:
 - testa torcente su cui è posto un afferraggio che trasmette il moto al provino
 - testa fissa su cui si applica l'altro afferraggio
- Momento torcente misurato mediante dinamometro
- Angolo di torsione misurato mediante encoder
- Provini a sezione trasversale circolare
- τ varia da zero al centro del campione (asse neutro) al massimo sulla superficie \Rightarrow è desiderabile usare campioni tubolari di piccolo spessore $\Rightarrow \tau$ uniforme su tutta la sezione trasversale ma problemi di instabilità geometrica

PROPRIETÀ MECCANICHE IN TORSIONE: CAMPO ELASTICO

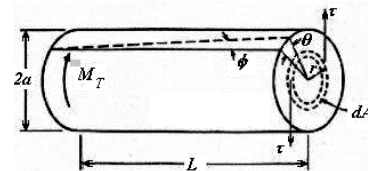
- Solido cilindrico di lunghezza L e raggio a
- Momento torcente applicato M_T opposto al momento resistente prodotto dalle tensioni τ nelle sezioni trasversali del cilindro
- $\tau=0$ per $r=0$
- τ aumenta linearmente con r ($\tau(r)=K \cdot r$)
- Equilibrio dei momenti:

$$M_T = \int_0^A \tau \cdot r \cdot dA$$



$$M_T = \int_0^A K \cdot r^2 \cdot dA = K \cdot J$$

J: momento polare d'inerzia del cilindro



PROPRIETÀ MECCANICHE IN TORSIONE: CAMPO ELASTICO

- Espressione della τ :

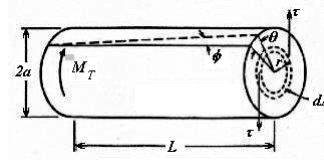
$$\tau = \frac{M_T}{J} r$$

- Momento d'inerzia polare per un cilindro di diametro $2a$:

$$J = \frac{\pi \cdot (2a)^4}{32} = \frac{\pi \cdot a^4}{2}$$

- Valore massimo della τ :

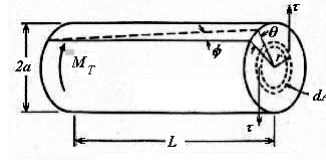
$$\tau = \frac{M_T \cdot a}{\frac{\pi(2a)^4}{32}} = \frac{2 \cdot M_T}{\pi \cdot a^3}$$



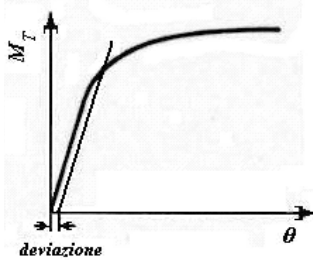
PROPRIETÀ MECCANICHE IN TORSIONE

- Deformazione di scorrimento e velocità di deformazione:

$$\gamma = \operatorname{tg}\phi = \frac{r \cdot \theta}{L} \quad \dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{r \cdot \dot{\theta}}{L}$$



- Diagramma $M_T - \theta$ fornito da una prova di torsione



PROVA DI TORSIONE A CALDO

- Si presta per ottenere i dati relativi allo scorrimento plastico ed alla rottura in metalli in condizione di lavorazione a caldo
- Facilità nel controllo della velocità di rotazione \Rightarrow prove eseguite in un ampio intervallo di velocità di deformazione
- Possibilità di impartire grandi deformazioni senza problemi di strizione o barilottatura

CORRELAZIONE TRA LE PROVE DI TORSIONE E DI TRAZIONE

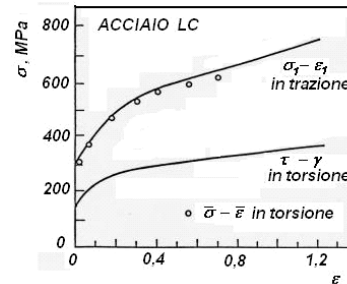
- Curva di flusso dei valori equivalenti in trazione:

$$\bar{\sigma} = \sigma_1 \quad \bar{\varepsilon} = \varepsilon_1$$

- Curva di flusso dei valori equivalenti in torsione:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{3} \sigma_1 \quad \bar{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_1 = \frac{\gamma}{\sqrt{3}}$$

i risultati in trazione, compressione e torsione sono in buon accordo

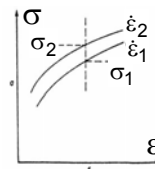


DIPENDENZA DELLA TENSIONE DI FLUSSO PLASTICO DALLA VELOCITA' DI DEFORMAZIONE

Metodi usati per valutare m :

- ottenimento di curve σ - ε a differenti velocità di deformazione (tenuta costante durante la prova)
- confronto dei livelli di tensione ad una deformazione prefissata usando l'equazione:

$$\ln\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right) = m \cdot \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_2}{\dot{\varepsilon}_1}\right)$$



DIPENDENZA DELLA TENSIONE DI FLUSSO PLASTICO DALLA VELOCITA' DI DEFORMAZIONE

Metodi usati per misurare m :

- Prove eseguite con brusche variazioni di velocità di deformazione (*jump test*)
- m ottenuto usando le corrispondenti variazioni $\Delta\sigma$ nell'equazione:

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma_1} \cong m \cdot \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1}\right)$$

