

Capitolo II

PROVE MECCANICHE

Le prove meccaniche servono a monitorare il comportamento dei materiali sottoposti ad una sollecitazione esterna in diverse condizioni ambientali. Diverse sono le prove standardizzate funzione della modalità di applicazione del carico (trazione, compressione, flessione, torsione etc.). Generalmente si applica un carico registrando le conseguenti deformazioni indotte nel materiale, più raramente si monitora la variazione di carico per livelli di deformazione prefissati.

La prova di trazione

La prova di trazione viene ampiamente usata nella caratterizzazione dei materiali per ottenere le informazioni di progetto sulla resistenza di un materiale e le specifiche dello stesso. Durante tale prova si sottopone un provino ad un carico monoassiale di trazione crescente con continuità e contemporaneamente se ne registra l'allungamento. Dalle misure di carico-allungamento si costruisce la curva sforzo-deformazione ingegneristica (figura 2.1). Lo sforzo in tale curva rappresenta lo sforzo medio longitudinale nel provino di trazione. Il suo valore s si ottiene dividendo il carico P per l'area A della sezione trasversale del provino indeformato.

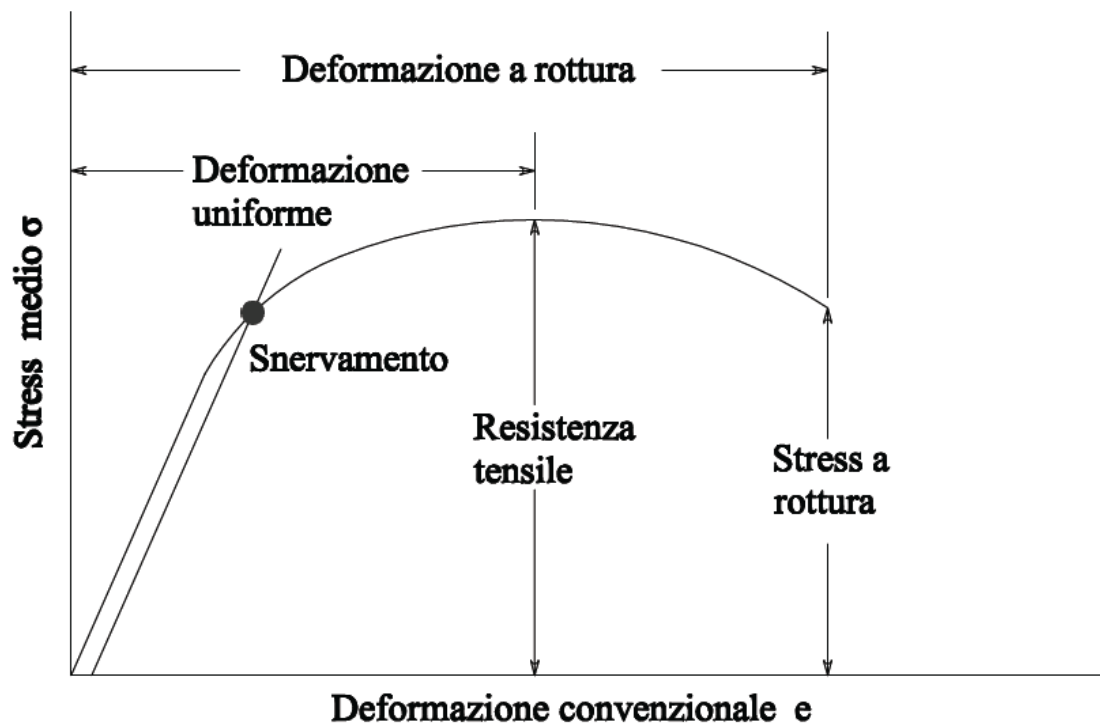


Figura 2.1: generico legame tra tensione e deformazione durante una prova di trazione.

$$s = \frac{P}{A_0} \quad (2.1)$$

La deformazione nella curva tensione-deformazione ingegneristica è la deformazione lineare media, ottenuta dividendo l'allungamento δ del tratto utile del provino per la sua lunghezza iniziale L_0 .

$$e = \frac{\delta}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2.2)$$

Dal momento che sia lo sforzo che la deformazione sono ottenuti dividendo il carico e l'allungamento per un fattore costante, la curva carico-allungamento avrà la stessa forma di quella sforzo-deformazione ingegneristica.

La forma e l'ampiezza della curva tensione-deformazione di un metallo dipenderà dalla sua composizione, dai trattamenti termici, dalla storia di deformazione plastica precedente, dalla velocità di deformazione, dalla temperatura e dallo stato di sollecitazione imposto durante la prova.

I parametri utilizzati per descrivere la curva tensione-deformazione di un metallo sono: la resistenza a trazione; lo snervamento; l'allungamento percentuale a rottura; la riduzione di sezione.

I primi due sono parametri di resistenza, gli ultimi due sono indicativi della duttilità. La forma generale della curva tensione-deformazione ingegneristica necessita di ulteriori spiegazioni.

Nella regione elastica tensione e deformazione sono linearmente proporzionali. Quando il carico supera il valore corrispondente allo snervamento, il provino subisce una consistente deformazione plastica. Quindi, se si riduce il carico a zero, risulta deformato in maniera permanente. Lo sforzo necessario per produrre una deformazione plastica continua aumenta all'aumentare della stessa, ciò è indicativo del fatto che il metallo si incrudisce.

Il volume del provino rimane costante durante la deformazione plastica, $AL=A_0L_0$, quindi man mano che il provino si allunga decresce uniformemente la sezione trasversale del tratto utile.

Inizialmente l'incrudimento compensa abbondantemente la diminuzione della sezione ed il valore della tensione ingegneristica (proporzionale al carico P) continua a crescere con l'aumentare della deformazione. Quindi si raggiunge un punto in cui il peso della diminuzione di sezione è maggiore dell'effetto incrudimento. Questa condizione sarà raggiunta in alcuni punti del provino che sono più deboli degli altri. Tutta la ulteriore deformazione plastica sarà concentrata in questa regione ed il provino comincerà a mostrare una diminuzione di sezione localizzata detta strizione. Poiché a questo punto la sezione trasversale decresce più rapidamente di quanto il carico di deformazione aumenta per effetto dell'incrudimento, il carico richiesto per deformare il provino diminuisce drasticamente e la tensione ingegneristica espressa dall'equazione (2.1) analogamente continua a diminuire fino alla rottura.

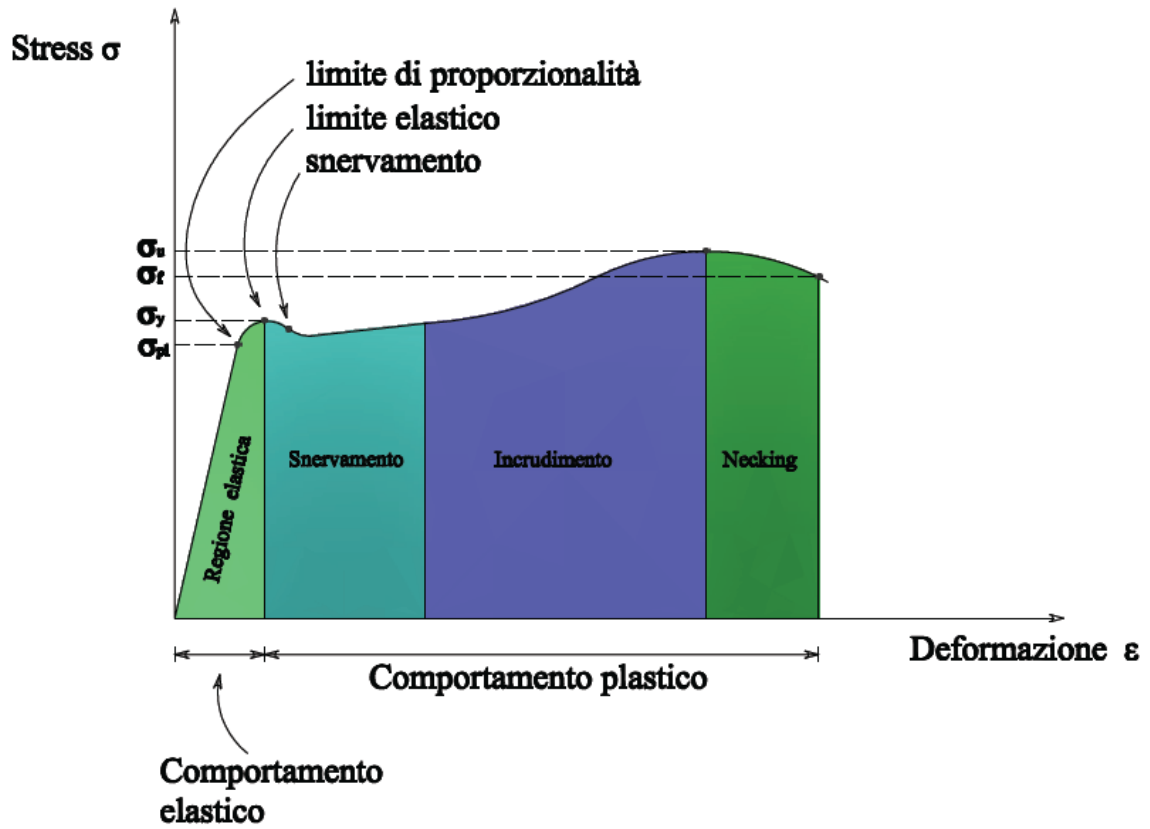


Figura 2.2: differenti fasi elasto-plastiche esibite in trazione.

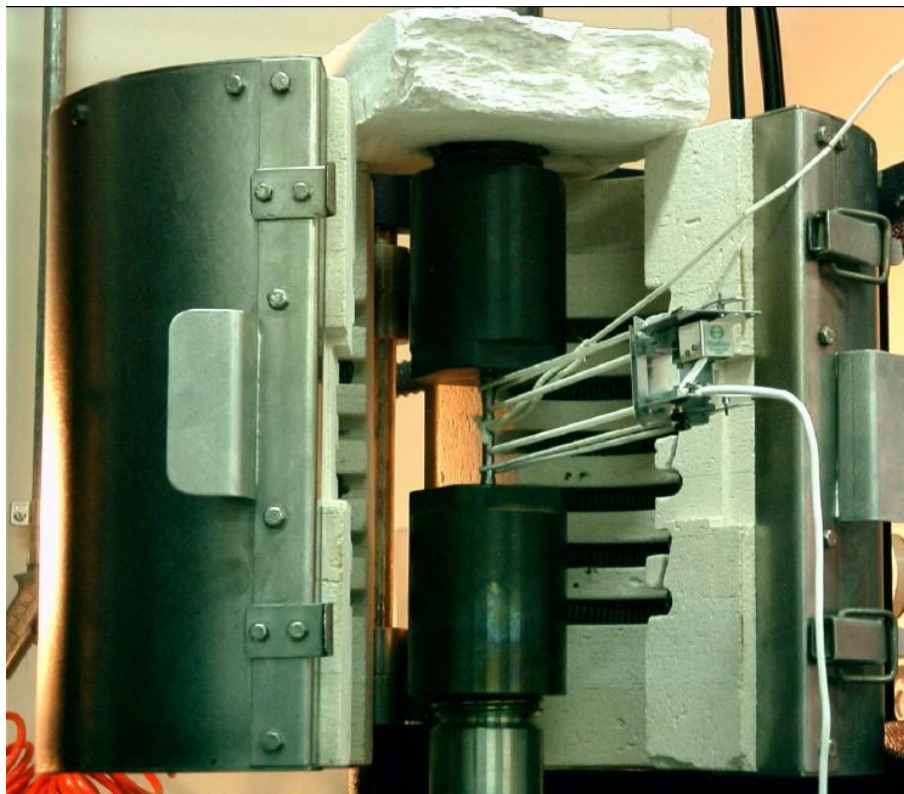


Figura 2.3: set-up sperimentale di una prova di trazione.



Figura 2.4: tipica geometria di provini di trazione.

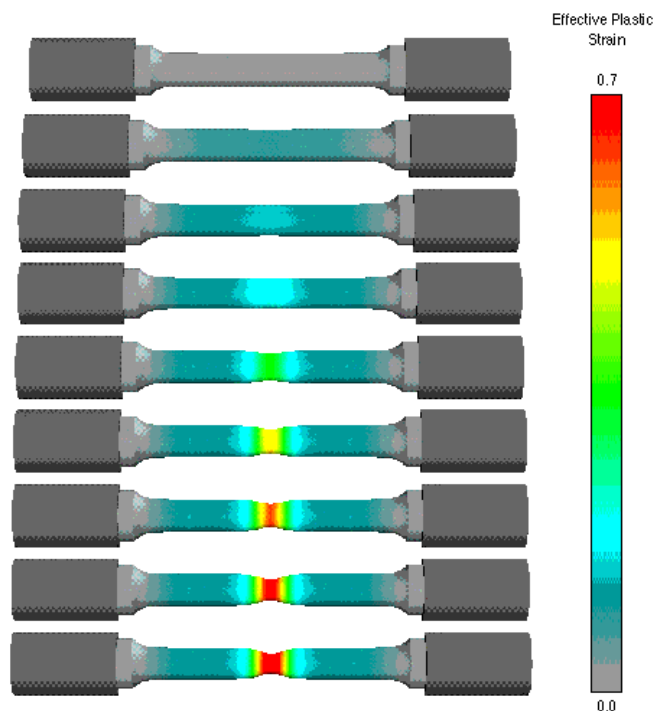


Figura 2.5: tipico andamento delle tensioni di VonMises lungo il tratto utile di un provino di trazione.

Da una curva di trazione ingegneristica si ricavano diverse informazioni.

Resistenza a trazione: La resistenza a trazione, o resistenza ultima (UTS), è pari al massimo valore del carico diviso la sezione iniziale del provino.

$$s_u = \frac{P_{\max}}{A_0} \quad (2.3)$$

Sebbene sia un parametro notevole della curva di trazione, la resistenza a trazione ha poco significato ingegneristico circa la resistenza del materiale. Per i metalli duttili potrebbe rappresentare una misura del massimo carico che il metallo può sopportare sotto le condizioni molto restrittive di carico uniassiale. Tale parametro è di scarsa utilità nel caso vi siano condizioni di carico più complesse. Oggi si preferisce un approccio più razionale basando la progettazione statica, nel caso di metalli duttili, sulla tensione di snervamento. Al contrario per i materiali fragili la

resistenza a trazione rappresenta un criterio valido di progettazione. Inoltre essendo facilmente riproducibile e determinabile è un parametro utile nella caratterizzazione e nella elaborazione delle specifiche di un metallo nonché nei controlli di qualità. Vi sono diverse correlazioni empiriche tra tale proprietà, la durezza e la resistenza a fatica, che spesso si rivelano molto utili.

Modulo elastico: La pendenza della porzione lineare iniziale della curva tensione-deformazione è il modulo elastico o modulo di Young. Tale modulo è la misura della rigidità del materiale. Maggiore è il modulo elastico minore è la deformazione elastica risultante dall'applicazione di un dato carico. Poiché il modulo elastico è necessario per il calcolo delle inflessioni di una trave ed altri parametri, esso è un importante parametro ingegneristico e di progetto.

Il modulo elastico è determinato dalle forze atomiche di legame. Poiché tali forze non possono essere cambiate senza cambiare la natura del materiale, segue che il modulo elastico è una caratteristica meccanica intrinseca del materiale. Esso può essere leggermente alterato da alligazione, trattamenti a caldo o lavorazioni a freddo. Un aumento di temperatura fa diminuire il modulo elastico.

Misura dello snervamento: Il valore della tensione a cui si osserva l'inizio della deformazione plastica o dello snervamento dipende dalla sensibilità della misura della deformazione. Con la maggior parte dei materiali si ha una transizione graduale tra comportamento elastico e plastico ed il punto in cui comincia la deformazione plastica è difficile da definire con precisione. Vi sono diversi criteri per definire l'inizio dello snervamento in relazione alla sensibilità degli strumenti di misura e agli scopi di utilizzo dei dati.

1. Limite elastico vero, basato sulla misura delle microdeformazioni a deformazioni dell'ordine di 2×10^{-6} . Questo limite elastico ha un valore molto basso ed è relativo al moto di poche centinaia di dislocazioni.
2. Limite di proporzionalità, è il valore più alto di tensione in cui sussiste proporzionalità diretta con la deformazione. Si ricava dalla curva tensione-deformazione non appena essa si discosta dall'andamento lineare.
3. Limite elastico, è il più alto valore della tensione che il materiale può sopportare senza che vi sia deformazione permanente alla rimozione del carico. All'aumentare della sensibilità dello strumento di misura il valore del limite elastico diminuisce sino a coincidere con il limite elastico vero, determinato dalla misura delle microdeformazioni. Con i valori di sensibilità di misura delle deformazioni di uso ingegneristico (10^{-4}), il limite elastico è maggiore del limite di proporzionalità. La determinazione del limite elastico richiede una tediosa procedura di carico e scarico incrementale durante la prova.
4. Snervamento, è la tensione necessaria a produrre una piccola quota specifica di deformazione plastica. La definizione usuale di questa proprietà è *offset yield strength* ed è determinata dal valore della tensione in corrispondenza del punto di intersezione della curva tensione deformazione con una retta parallela al tratto elastico della curva e traslata di un fattore di offset di deformazione specificato. Negli USA il fattore di offset è pari ad un valore di deformazione dello 0.2% o dello 0.1 % ($e = 0.002$ o 0.001).

$$s_0 = \frac{P_{(strain_offset=0.002)}}{A_0} \quad (2.4)$$

Misura della duttilità: La duttilità è una proprietà qualitativa e soggettiva di un materiale. In genere le misure di duttilità sono interessanti per tre aspetti:

1. Per indicare la misura in cui un metallo può essere deformato, senza che intervenga la frattura, nelle operazioni di lavorazione quali la laminazione e l'estrusione.
2. Per indicare al progettista, in via generale, il modo in cui il metallo fluisce plasticamente prima della frattura.
3. Fornire un'indicazione del cambiamento nel livello di impurità o nelle condizioni di processo. La misura di duttilità può rappresentare una misura della qualità del materiale, persino ove non vi sia una relazione diretta tra il valore della duttilità e le performance in servizio.

Le misure convenzionali della duttilità ottenute dalla prova di trazione sono la deformazione ingegneristica a rottura e_f (nota come allungamento) e la riduzione della sezione a rottura q . Entrambe queste proprietà sono ottenute dopo la rottura, ricomponendo il provino e misurando L_f ed A_f .

$$e_f = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (2.5)$$

$$q = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \quad (2.6)$$

I valori di e_f e di q sono di solito espressi in termini percentuali.

Poiché vi è una apprezzabile frazione di deformazione plastica concentrata nella regione del provino che subisce la strizione, il valore di e_f dipenderà dalla lunghezza del tratto utile L_0 su cui si prendono le misure. Più piccolo è il valore di L_0 maggiore sarà il peso sul valore dell'allungamento della regione che ha subito strizione è più alto sarà il valore di e_f . Perciò quando si riporta il valore dell'allungamento percentuale dovrebbe essere indicato anche il valore di L_0 .

Resilienza: E' la capacità di un materiale di assorbire energia quando deformato elasticamente e restituirla una volta tolto il carico prende il nome di resilienza. Di solito si misura il *modulo di resilienza* ovvero l'energia di deformazione per unità di volume richiesta per stressare il materiale da 0 sino al valore di snervamento σ_0 . Nel caso di tensione monoassiale l'energia di deformazione vale:

$$U_0 = \frac{1}{2} \sigma_x e_x = \frac{1}{2} \frac{\sigma_x^2}{E} = \frac{1}{2} e_x^2 E \quad (2.7)$$

Quindi il modulo di resilienza è (l'equazione del tratto elastico della curva di trazione è $\sigma = eE$):

$$U_R = \frac{1}{2} s_0 e_0 = \frac{1}{2} s_0 \frac{s_0}{E} = \frac{s_0^2}{2E} \quad (2.8)$$

Questo indica che il materiale ideale che non deve presentare deformazione plastica permanente quando è sottoposto a carico, nelle condizioni di utilizzo, (ad esempio le molle meccaniche) deve avere un elevato modulo di resilienza. Per cui per l'equazione 2.8 deve avere un elevato valore della tensione di snervamento ed un basso modulo elastico.

La tabella riporta i valori del modulo di resilienza per materiali comuni.

materiale	E [GPa]	S ₀ [MPa]	U _R [kJ/m ³]
Acciaio medio C	207	310	232
Acciaio alto C	207	965	2250
AA2024	72	124	107
Rame	110	28	3.5
Gomma	0.0010	2.1	2140

Tenacità: la tenacità è indicativa della capacità di un materiale di assorbire energia in campo plastico. In molti componenti meccanici (ganci gru, ruote dentate, catene, ecc.) è particolarmente desiderabile sopportare carichi occasionali superiori al valore della tensione di snervamento senza che avvenga la rottura. Un modo di definire la tenacità è considerarla come l'area totale sottesa dalla curva tensione-deformazione. Tale area è indicativa del lavoro per unità di volume che può essere fatto sul materiale senza causarne la rottura. La figura 2.6 mostra la curva tensione-deformazione per materiali ad alta e bassa tenacità. L'area totale sottesa dalla curva è maggiore per l'acciaio strutturale che è dunque un materiale più tenace. Le regioni tratteggiate in figura rappresentano il modulo di resilienza per ciascun acciaio.

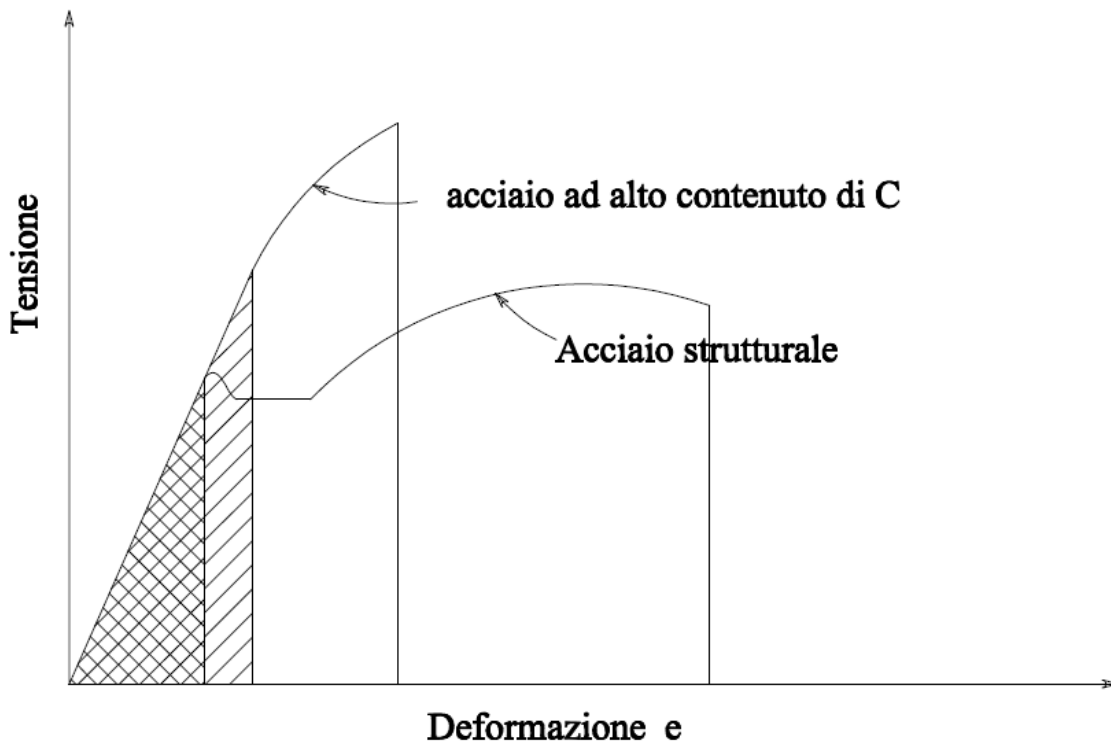


Figura 2.6: curve di trazione differenti per due distinti tipi di acciai.

Vi sono diverse relazioni matematiche per il calcolo dell'area sottesa dalla curva tensione-deformazione. In particolare per materiali duttili:

$$U_T \approx s_u e_f \quad (2.9)$$

oppure:

$$U_T \approx \frac{s_0 + s_u}{2} e_f \quad (2.10)$$

per materiali fragili, si assume talvolta che la curva di trazione sia una parabola, quindi l'area sottesa vale:

$$U_T \approx \frac{2}{3} s_u e_f \quad (2.11)$$

La curva tensione-deformazione ingegneristica non fornisce indicazioni vere sulle caratteristiche della deformazione di un metallo poiché si basa interamente sulle dimensioni originali del provino. In realtà tali dimensioni variano continuamente durante la prova. Inoltre i materiali duttili trazionati diventano instabili e subiscono strizione nel corso della prova. Se si fa riferimento alla sezione istantanea del provino durante la prova, la curva *tensione vera-deformazione vera* risultante presenta un andamento crescente continuo sino a frattura. Tale curva è nota anche come curva di flusso poiché rappresenta le caratteristiche di flusso plastico del materiale.

La tensione vera σ è espressa in termini della tensione ingegneristica s da:

$$\sigma = \frac{P}{A_0}(e+1) = s(e+1) \quad (2.12)$$

Per ricavare l'equazione 2.12 si assume che il volume sia costante e la distribuzione delle deformazioni lungo il tratto utile del provino sia omogenea. Perciò tale equazione dovrebbe essere riferita solo al tratto della curva fino all'inizio della strizione. Oltre il valore massimo del carico lo stress vero dovrebbe determinarsi dalle misure attuali di carico ed area di sezione trasversale A .

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.13)$$

La deformazione vera ε può essere determinata dalla deformazione ingegneristica e :

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} = \ln(e+1) \quad (2.14)$$

Anche l'equazione 2.14 dovrebbe essere valida prima dell'inizio della strizione, quindi oltre il valore massimo del carico la deformazione vera dovrebbe basarsi sul valore della sezione attuale A o equivalentemente sul valore attuale del diametro D (per provini cilindrici).

$$\varepsilon = \ln \frac{A_0}{A} = \ln \frac{(\pi/4)D_0^2}{(\pi/4)D^2} = 2 \ln \frac{D_0}{D} \quad (2.15)$$

Le figure 2.7 e 2.8 confrontano la curve sforzo-deformazione vera con la corrispondente curva ingegneristica. Si osserva che a causa della notevole estensione del tratto plastico, nella prima figura, il tratto elastico lineare è stato fatto coincidere con l'asse y . In accordo con le equazioni 2.12 e 2.14, la curva sforzo-deformazione vera è sempre alla sinistra della curva ingegneristica fino al raggiungimento del massimo carico. Oltre il valore di massimo carico le elevate deformazioni localizzate nella zona di strizione, calcolate secondo l'equazione 2.15, superano largamente quelle calcolate con l'equazione 2.2. Di frequente la curva di flusso è lineare dal massimo carico fino a rottura, mentre in altri casi la sua pendenza decresce con continuità sino a rottura. La formazione della regione di strizione introduce uno stato di tensione triassiale che rende difficile da determinare lo sforzo di trazione longitudinale sino a rottura.

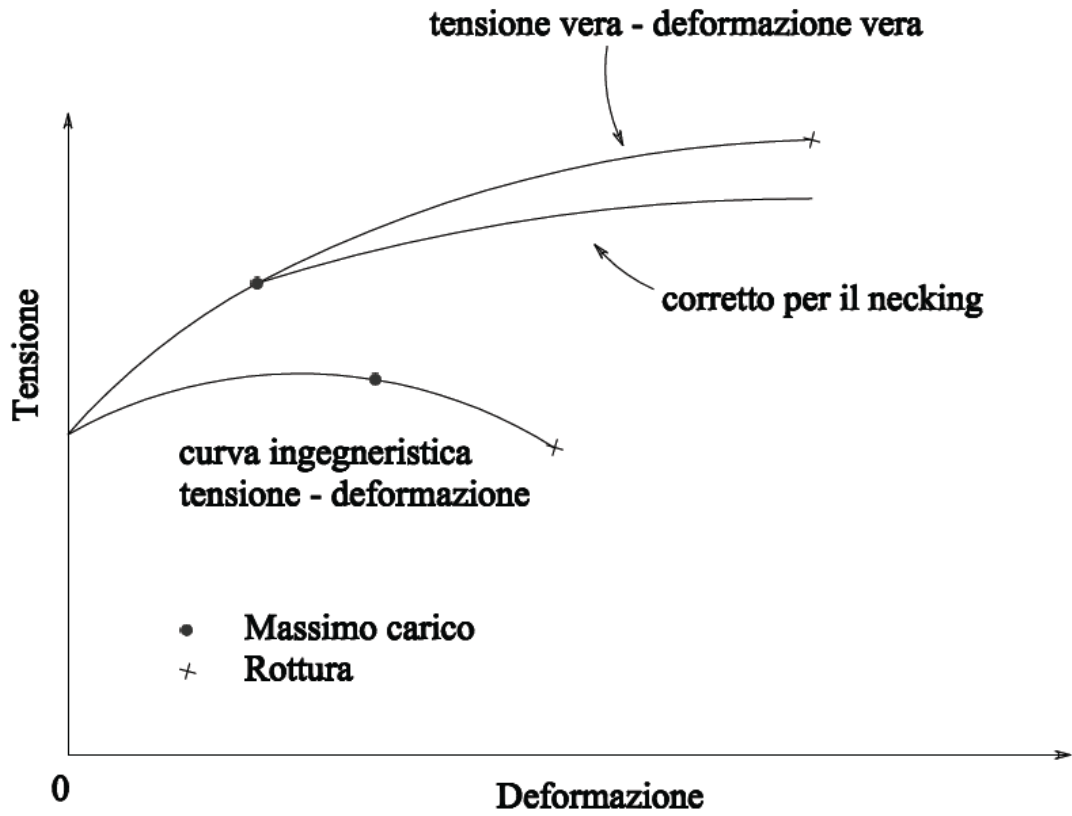


Figura 2.7: curva tensione deformazione nel caso di grandezze ingegneristiche e vere.

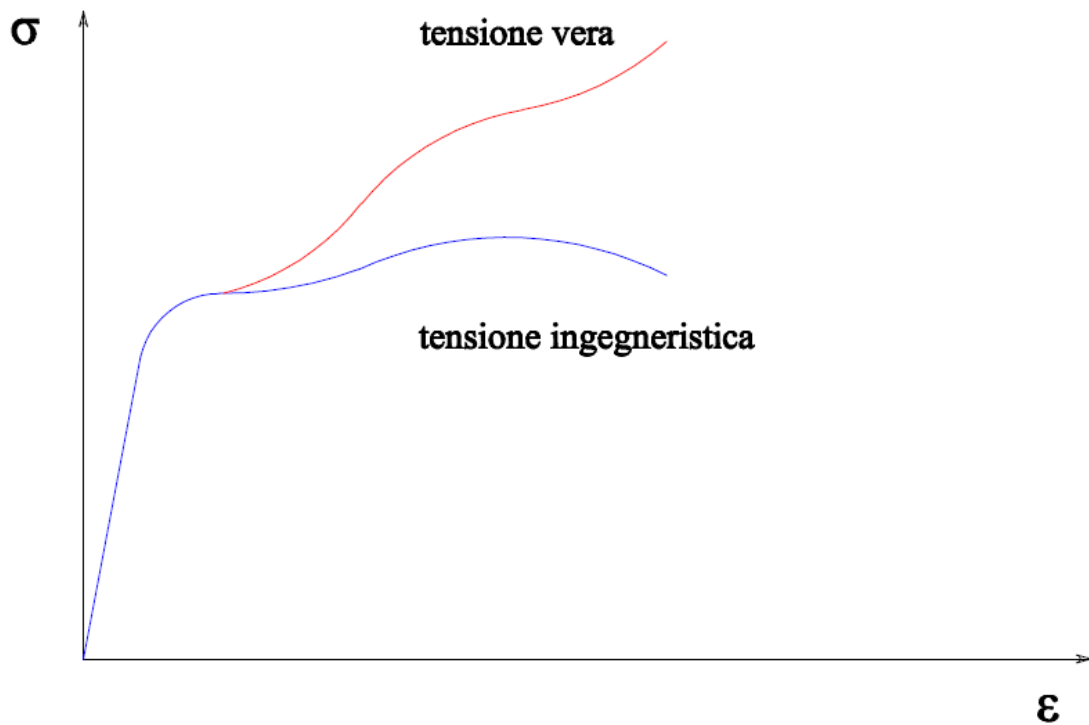


Figura 2.8: variazione tra la forma tensione ingegneristica- deformazione ingegneristica e tensione vera- deformazione vera.

Sforzo vero al Massimo Carico: Tale parametro corrisponde alla resistenza vera a trazione. Per la maggior parte dei materiali la strizione comincia al massimo carico ed ad un valore di deformazione in cui lo sforzo vero eguaglia la pendenza della curva di flusso. Siano σ_u ed ε_u rispettivamente la tensione vera e la deformazione vera al massimo carico per un valore A_u dell'area della sezione trasversale del provino. La resistenza a trazione sarà data da:

$$s_u = \frac{P_{\max}}{A_0}$$

quindi:

$$\sigma_u = \frac{P_{\max}}{A_u} \quad \text{e} \quad \varepsilon_u = \ln \frac{A_0}{A_u}$$

eliminando P_{\max} si ottiene:

$$\sigma_u = s_u \frac{A_0}{A_u}$$

ottenendo infine:

$$\sigma_u = s_u e^{\varepsilon_u} \quad (2.16)$$

Tensione vera a rottura: la tensione vera a rottura è il carico a rottura diviso l'area della sezione trasversale a rottura. Tale sforzo dovrebbe essere corretto a causa dello stato di tensione triassiale esistente nel provino al momento della rottura. Poiché i dati necessari per tale correzione sono spesso non disponibili, il valore dello sforzo vero a rottura reca con se un errore.

Deformazione vera a rottura: il valore di tale parametro è dato da:

$$\varepsilon_f = \ln \frac{A_0}{A_f} \quad (2.17)$$

con A_f valore dell'area della sezione trasversale dopo la rottura.

Questo parametro rappresenta la massima deformazione vera che il materiale può subire prima della rottura ed è analogo alla deformazione totale a rottura della curva di trazione ingegneristica. Poiché l'equazione 2.14 non è valida dopo la comparsa della strizione non è possibile calcolare ε_f dal valore misurato di e_f . Comunque per provini cilindrici il valore del fattore di riduzione di sezione q è legato alla deformazione vera a rottura dalla relazione:

$$\varepsilon_f = \ln \frac{1}{1-q} \quad (2.18)$$

Deformazione vera uniforme: La deformazione vera uniforme ε_u è la deformazione fino al valore massimo del carico. Può essere calcolata sia riferendosi alla sezione trasversale del provino A_u sia

$$\varepsilon_u = \ln \frac{A_0}{A_u}$$

alla lunghezza del tratto utile L_u in corrispondenza del massimo carico. Si può usare l'equazione 2.14 per convertire il valore convenzionale di tale parametro in quello vero. La deformazione vera uniforme si rivela spesso utile per una stima della formabilità di un metallo dalle prove di trazione.

$$(2.19)$$

Deformazione vera di strizione locale: la deformazione di strizione locale ε_n è la deformazione necessaria per deformare un provino dal massimo carico fino a frattura.

$$\varepsilon_n = \ln \frac{A_u}{A_f} \quad (2.20)$$

La curva di flusso di molti metalli nella regione di deformazione plastica uniforme può essere espressa dalla semplice relazione esponenziale:

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (2.21)$$

dove n è l'esponente di incrudimento e K è il coefficiente di resistenza. Se l'equazione 2.21 è soddisfatta dai dati della curva di trazione il diagramma logaritmico della curva sforzo-deformazione vera fino al valore di massimo carico risulta una linea retta. La pendenza di tale linea è n e K rappresenta il valore della tensione vera per $\varepsilon = 1$. L'esponente di incrudimento può assumere valori compresi tra $n=0$ (solido perfettamente plastico) ed $n=1$ (solido elastico). Per la maggior parte dei metalli n assume valori compresi tra 0.10 e 0.50.

E' importante notare che la velocità di incrudimento $d\sigma/d\varepsilon$ non deve essere confusa con il coefficiente di incrudimento. Infatti dalla definizione di n :

$$n = \frac{d(\ln \sigma)}{d(\ln \varepsilon)} = \frac{\varepsilon}{\sigma} \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \Rightarrow \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = n \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.22)$$

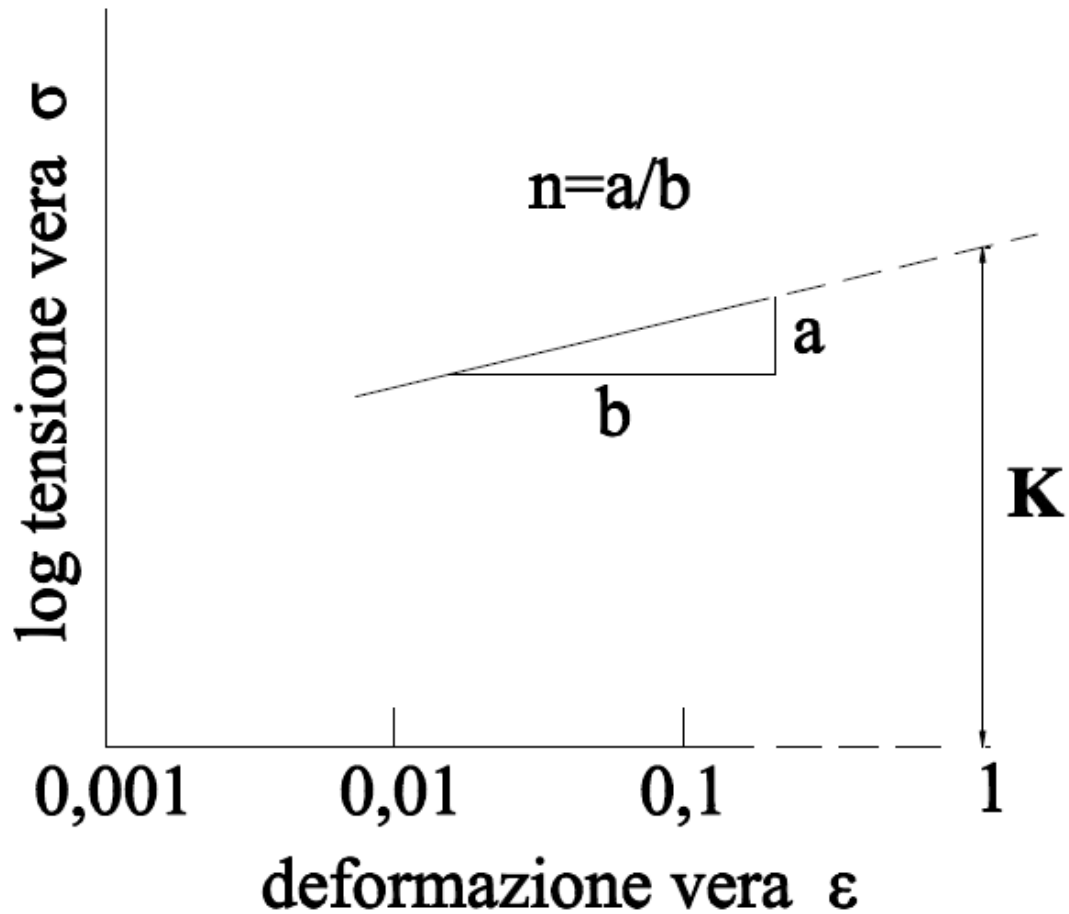


Figura 2.9: relazione logaritmica tra tensione vera e deformazione vera.

Spesso si osservano delle deviazioni di comportamento delle curve di trazione rispetto a quanto previsto dall'equazione 2.21. In genere ciò accade alle basse deformazioni (10^{-3}) o alle alte ($\varepsilon \approx 1$).

Instabilità: Consideriamo un metallo sollecitato in trazione

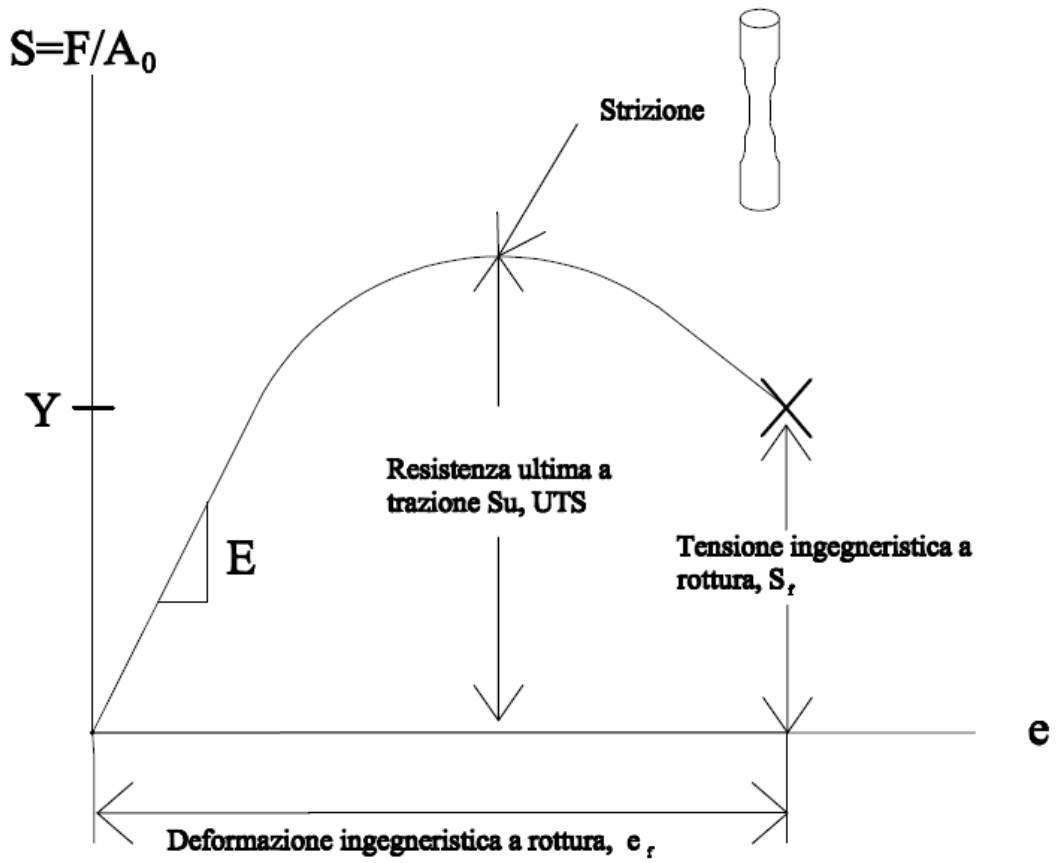


Figura 2.10: tensione-deformazione ingegneristiche, si mette in evidenza il carico ultimo in trazione e la deformazione a rottura.

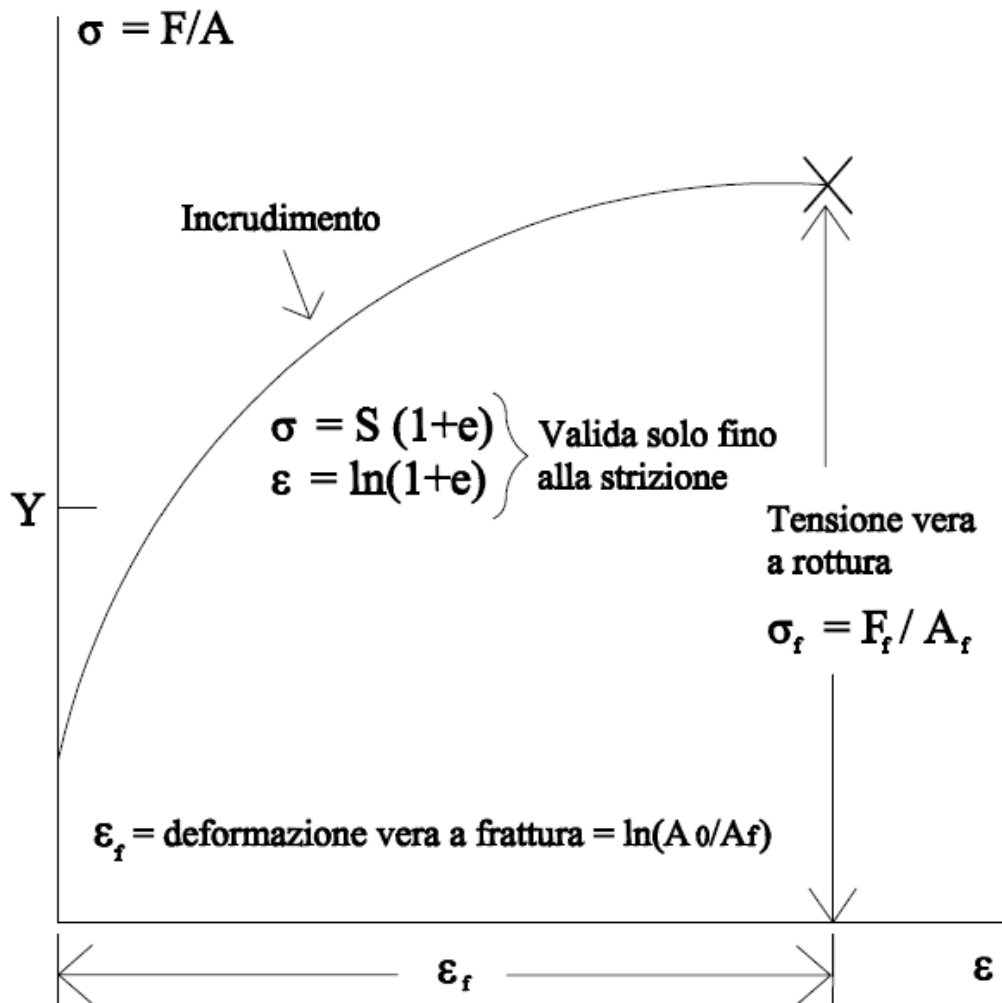


Figura 2.11: curva tensione-deformazione vere, non si distingue il carico ultimo e l'instabilità plastica.

La deformazione plastica è uniforme tra lo snervamento e l'UTS. Questa diviene non uniforme dopo l'UTS, tale non uniformità si manifesta tramite la strizione.

La strizione di un metallo duttile durante la prova di trazione generalmente comincia al valore del massimo carico. Un materiale plastico ideale, che non presenta dunque incrudimento, comincia a diventare instabile nella tensione e comincia a mostrare strizione appena si snerva. Un metallo reale è soggetto ad incrudimento, questo aumenta le possibilità di carico del provino all'aumentare della deformazione. Questo effetto è contrastato dalla diminuzione graduale della sezione del provino in fase di allungamento. La strizione o la deformazione localizzata comincia al massimo carico, dove l'aumento della tensione dovuto alla diminuzione della sezione trasversale del provino diventa preponderante rispetto all'effetto dell'incrudimento. Tale condizione di instabilità che porta alla deformazione localizzata è espressa dalla condizione $dF = 0$.

Sopraggiungere della instabilità plastica: la tensione aumenta localmente a causa dell'incrudimento e della concomitante riduzione della sezione resistente per effetto Poisson. Durante la deformazione, la capacità di carico del materiale aumenta a causa dell'incrudimento. All'incrudimento si oppone la graduale diminuzione della sezione resistente. In corrispondenza

dell'UTS l'aumento tensionale richiesto per deformare il materiale supera la sua capacita' di resistenza al carico applicato e cio' causa delle deformazioni plastiche localizzate.

Utilizzando la relazione semplificata:

$$F = \sigma A$$

si puo' scrivere che nel punto di strizione:

$$d(\sigma A) = 0, \quad \frac{d\sigma}{d} = -\frac{dA}{A}, \quad \sigma dA + d\sigma A = 0$$

che si puo' scrivere come:

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = d\varepsilon, \quad \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sigma$$

Quindi il punto di strizione al valore di massimo carico puo' essere ottenuto dalla curva sforzo-deformazione vera cercando il punto sulla curva che ha una sottotangente unitaria (figura 2.12) o il punto in cui la velocita' d'incrudimento eguaglia la tensione (figura 2.13).

Meccanicamente, quando σ supera $d\sigma/d\varepsilon$ la deformazione diviene instabile. In tale punto il materiale non puo' incrudirsi piu' con velocita' tale da resistere al carico applicato e quindi al sopraggiungere della strizione.

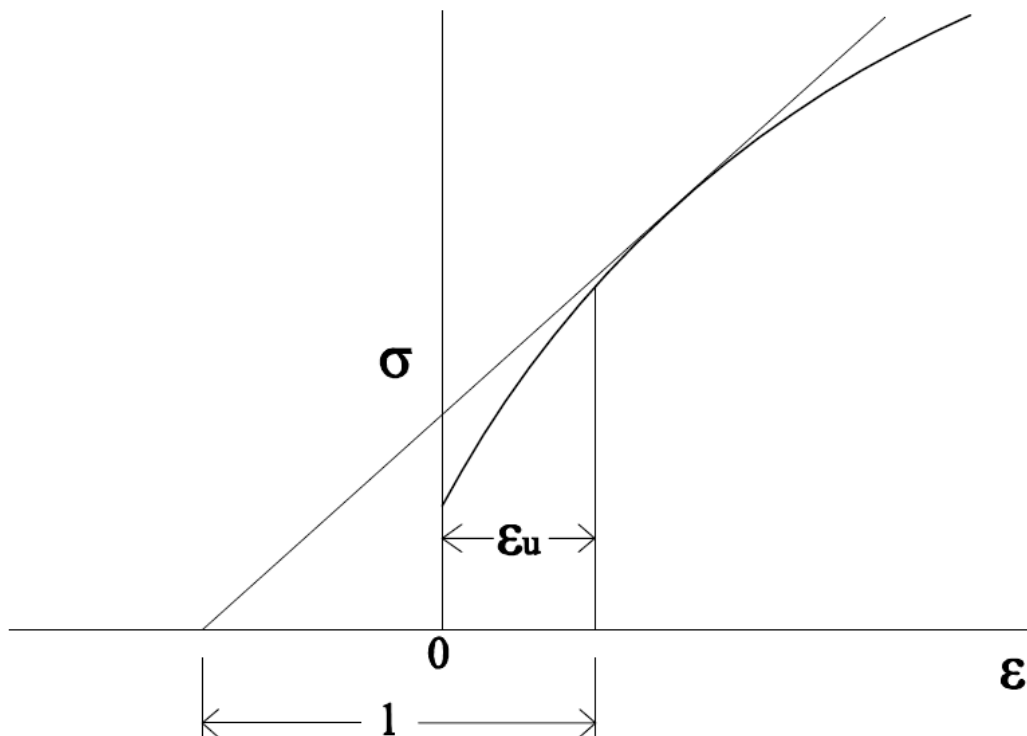


Figura 2.12: determinazione della sottotangente unitaria per il calcolo del punto di strizione.

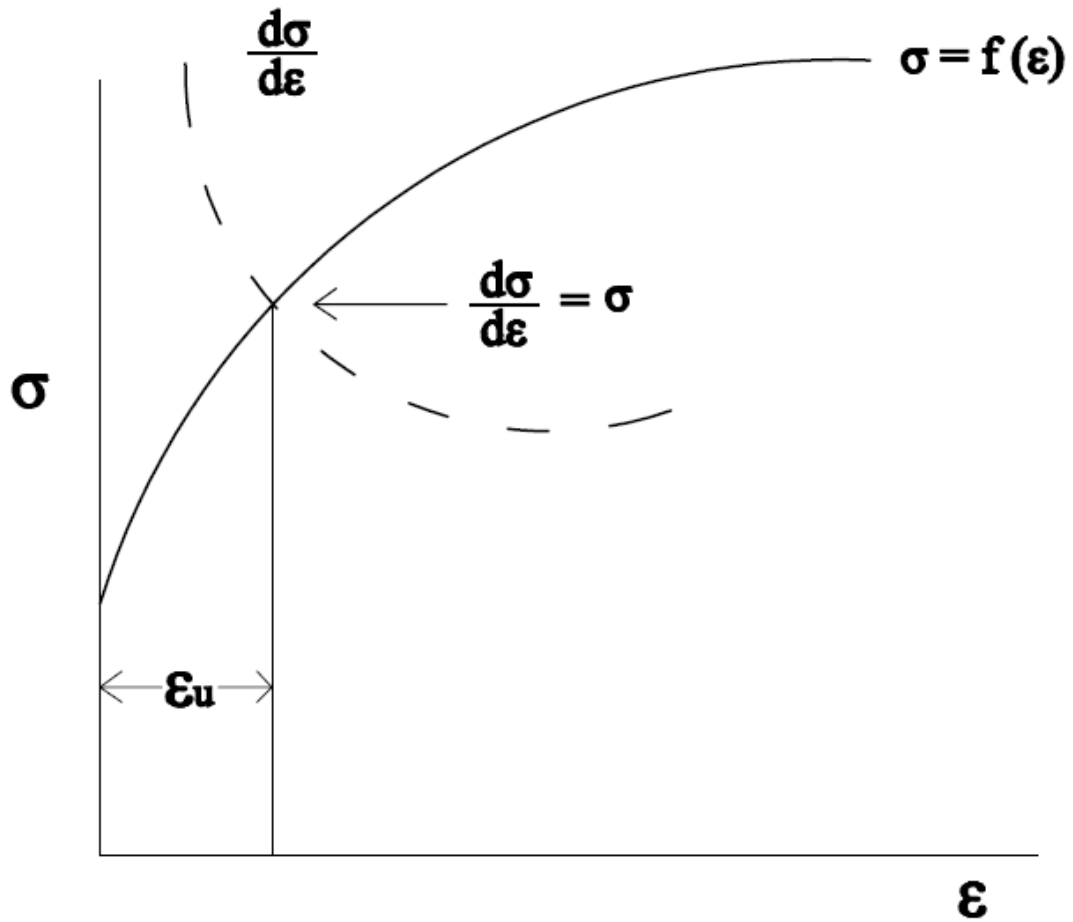


Figura 2.13: determinazione del punto di strizione.

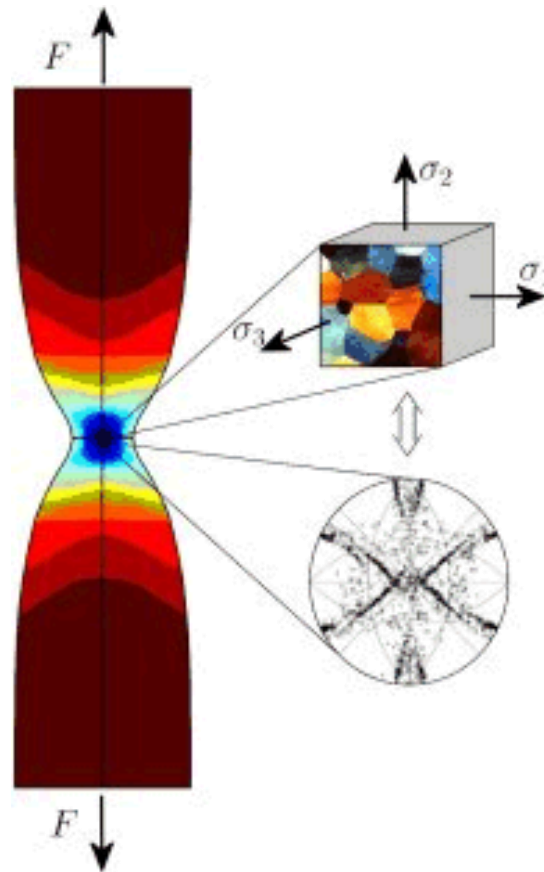


Figura 2.14: distribuzione tensionale nella zona di strizione.

Trovandoci in regime di deformazione plastica, la relazione che lega tensione e deformazione e' la 2.21, che derivata:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = Kn\varepsilon^{n-1}$$

eguagliando i due termini:

$$Kn\varepsilon_u^{n-1} = Kn\varepsilon_u^n$$

Nel punto di deformazione corrispondente alla strizione:

$$\varepsilon_u = n$$

se vogliamo aumentare la capacita' di deformazione uniforme dobbiamo selezionare un materiale con un esponente di incrudimento piu' elevato.

La strizione in un provino di trazione a sezione cilindrica, di materiale isotropo, è simmetrico rispetto all'asse di trazione. Per provini di trazione a sezione rettangolare, ricavati da fogli di metallo, quindi di ampiezza molto maggiore dello spessore, si osservano due tipi di instabilità di flusso tensile. Il primo è la strizione diffusa, così detto perché la sua estensione è molto maggiore dello spessore del provino Tale forma di strizione è analoga a quella che si ha in provini cilindrici, e comincia in accordo con la teoria espressa precedentemente. La strizione diffusa può terminare con la frattura, ma spesso è seguito da un secondo processo di instabilità chiamata strizione localizzata.

Tale strizione è rappresentata da una banda stretta lungo l'ampiezza del provino, di larghezza quasi pari allo spessore ed inclinato rispetto all'asse di trazione. La strizione localizzata non presenta variazioni di ampiezza della banda lungo il percorso di azione, così che può essere assimilato ad uno stato di deformazione piana. Inoltre la diminuzione della sezione del provino con l'aumentare della deformazione avviene solo nella direzione dello spessore.

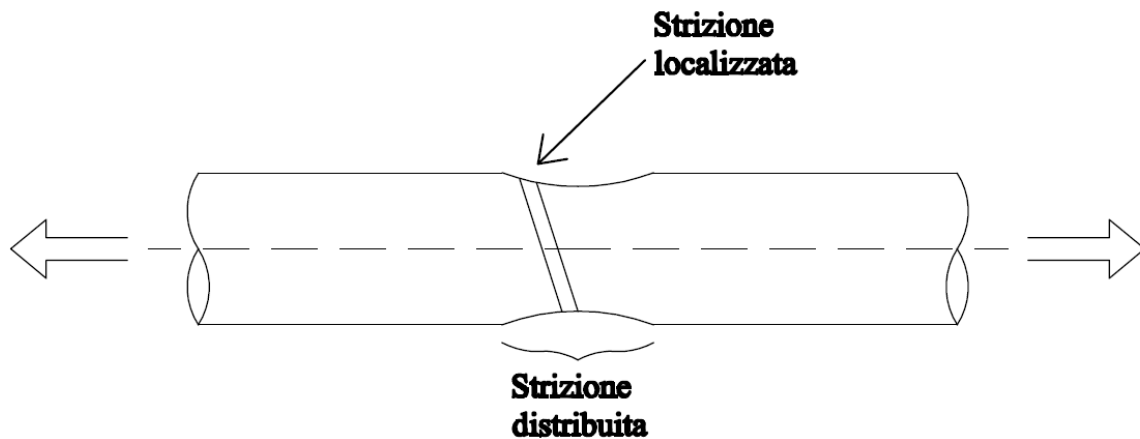


Figura 2.15: strizione localizzata e strizione distribuita.

Quindi l'UTS è dato da:

$$S_u = K \left(\frac{n}{e} \right)^n$$

Dato che F_u è la forza nel punto di strizione:

$$S_u = \frac{F_u}{A_0}$$

Ricordando che l'UTS è una tensione ingegneristica perché sempre riferita al valore iniziale della sezione deformata.

Considerando la tensione vera nel punto di strizione:

$$\sigma_u = K \varepsilon_u^n = K n^n$$

che può essere riscritta come:

$$F_u = \sigma_u A_u = K n^n A_u$$

e dalla definizione di deformazione vera:

$$\varepsilon = \ln \frac{A_0}{A}$$

si conclude che:

$$A_u = A_0 e^{-\varepsilon_u} = A_0 e^{-n}$$

combinando le equazioni precedenti:

$$S_u = \frac{F_u}{A_0} = \frac{Kn^n A_0 e^{-n}}{A_0} = K \left(\frac{n}{e} \right)^n$$

Quale effetto ha un precedente incrudimento sul comportamento meccanico dei metalli? Consideriamo un metallo non incrudito, l'incrudimento e' regolato dalla relazione:

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

Sollecitiamo il materiale fino ad un valore di deformazione ε_{in} .

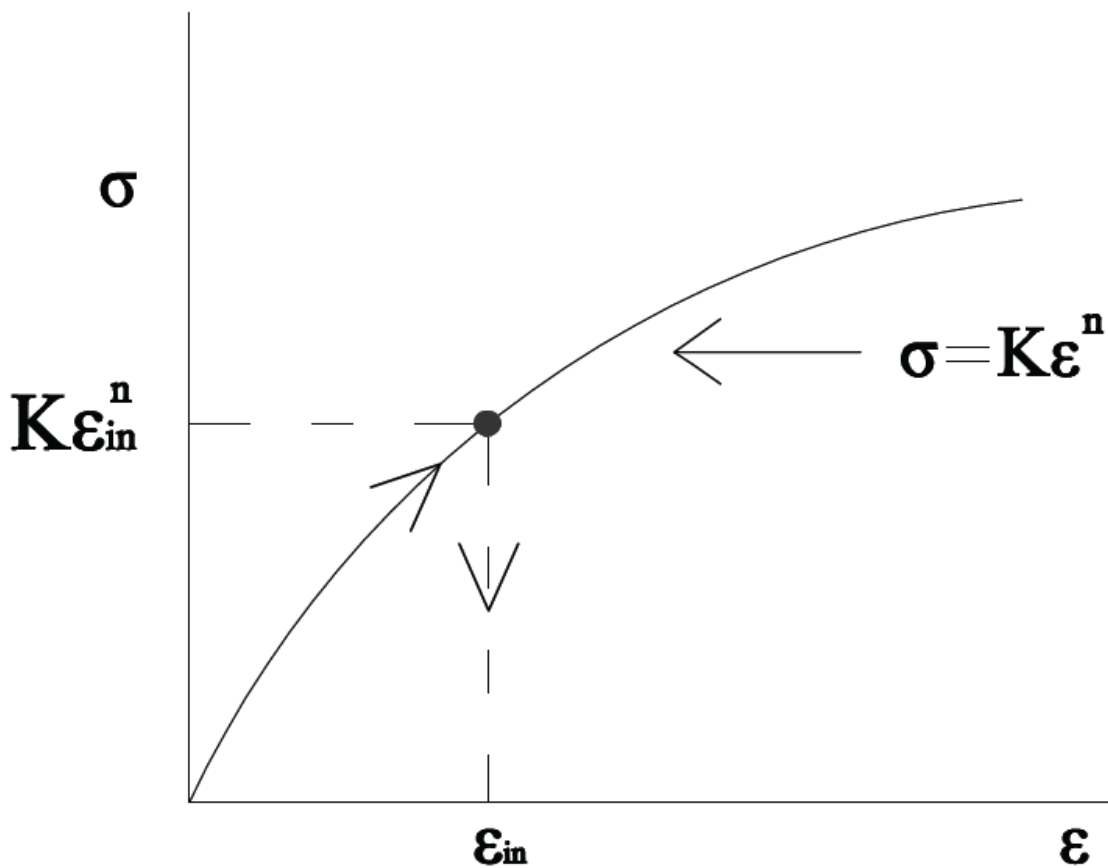


Figura 2.16: generica curva tensione deformazione.

Il materiale, dopo l'applicazione del carico avra' assunto una deformazione permanente pari a ε_{in} .

Prendiamo questo materiale e sollecitiamolo nuovamente.

La relazione che regola il comportamento del materiale sara':

$$\sigma = K(\varepsilon_{in} + \varepsilon)^n$$

Il flusso plastico in un metallo va sempre considerato valutando la deformazione totale imposta al materiale.

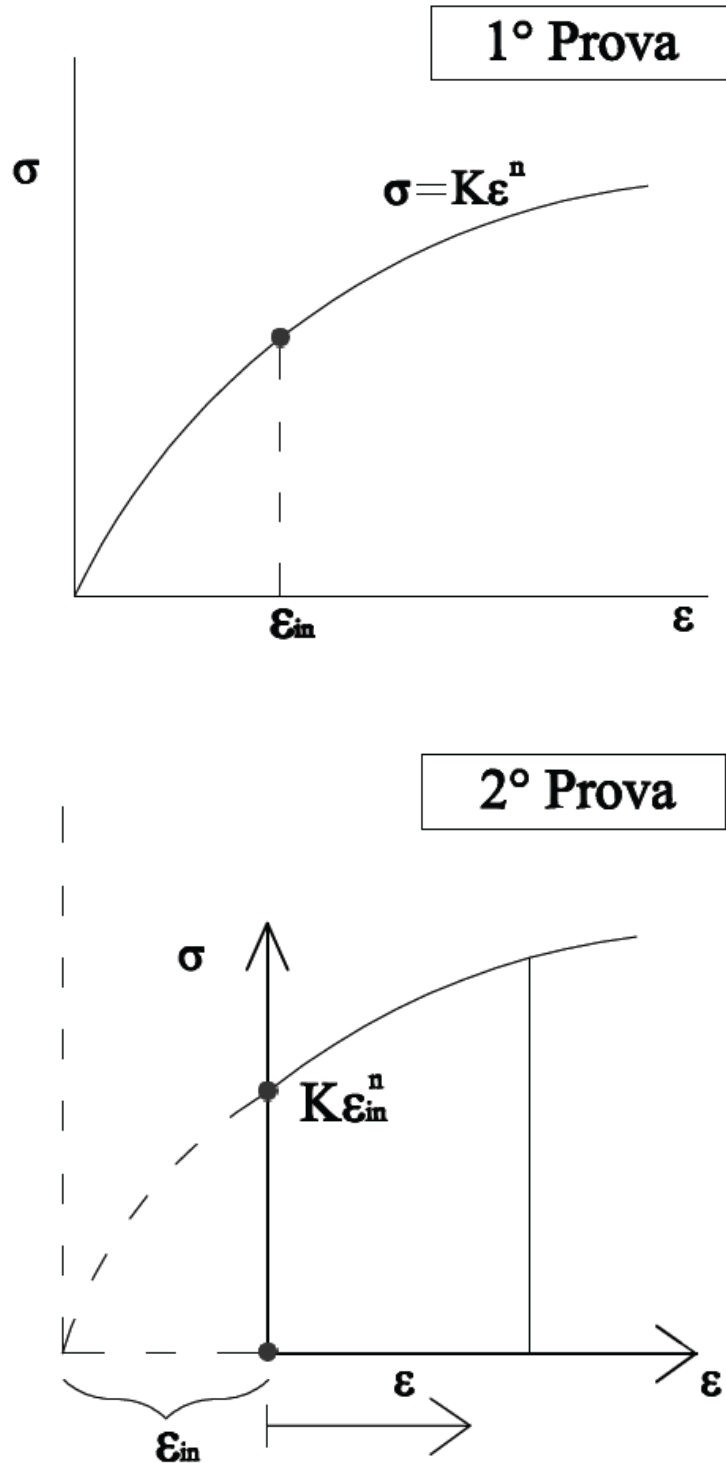


Figura 2.17: differenti prove di carico e scarico.

La formazione della strizione in un provino di trazione introduce in tale regione un complesso stato tensionale triassiale. La regione di strizione si può paragonare ad un intaglio “morbido”. Un intaglio sottoposto ad uno stato tensionale produce tensioni radiali e trasversali che accrescono il valore della tensione longitudinale richiesto per causare flusso plastico. Perciò, la tensione vera media nella zona strizionata, determinata dividendo il carico assiale di trazione per la sezione trasversale minima del provino nella zona strizionata, è maggiore di quella richiesta per avere flusso plastico

nel caso di trazione semplice. La figura 2.18 illustra la geometria della zona di strizione e lo stato tensionale che si instaura in essa. R è il raggio di curvatura della strizione.

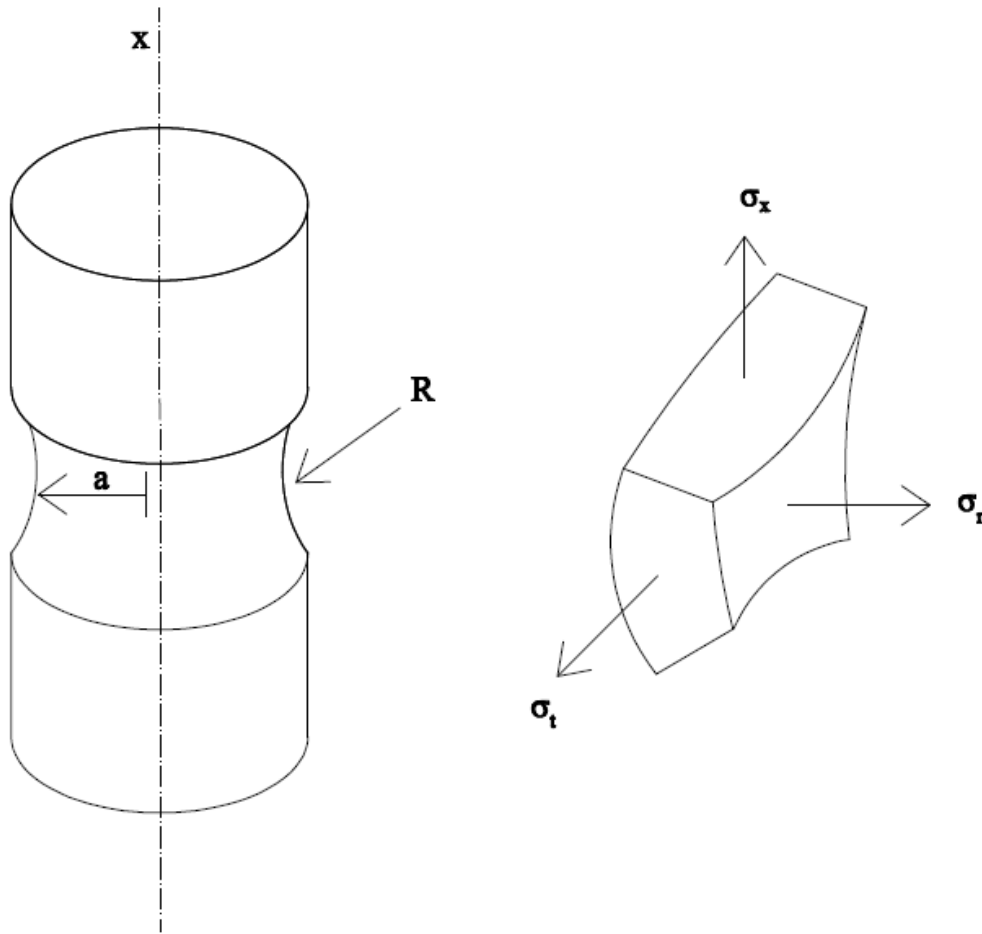


Figura 2.18: distribuzione tensionale nella zona di strizione.

Bridgman introdusse una correzione analitica del valore medio della tensione assiale in relazione alla introduzione dello sforzo trasversale dovuto alla strizione. Le ipotesi su cui si basa tale analisi sono:

1. Il contorno della strizione è approssimato da un arco di circonferenza.
2. La sezione trasversale della regione di strizione rimane circolare per tutta la durata del test.
3. Si applica il criterio di von Mises per lo snervamento.

Le deformazioni sono costanti nella sezione trasversale della strizione.

Quindi, secondo Bridgman, la tensione di flusso uniassiale corrispondente a quella che esisterebbe in una prova di trazione in cui la strizione non abbia introdotto tensioni triassiale è:

$$\sigma = \frac{(\sigma_x)_{media}}{(1 + 2R/a)[\ln(1 + a/2R)]}$$

dove $(\sigma_x)_{media}$ è la tensione misurata nella direzione assiale (carico/sezione minima). La figura 2.19 mostra come cambia la curva tensione-deformazione vera con la correzione di Bridgman (curva tratteggiata).

I valori a/R necessari per l'analisi possono essere ricavati o deformando un provino un po' più del valore di strizione e misurando a ed R allo scarico, oppure misurandoli con continuità dopo la strizione usando tecniche fotografiche o estensimetriche.

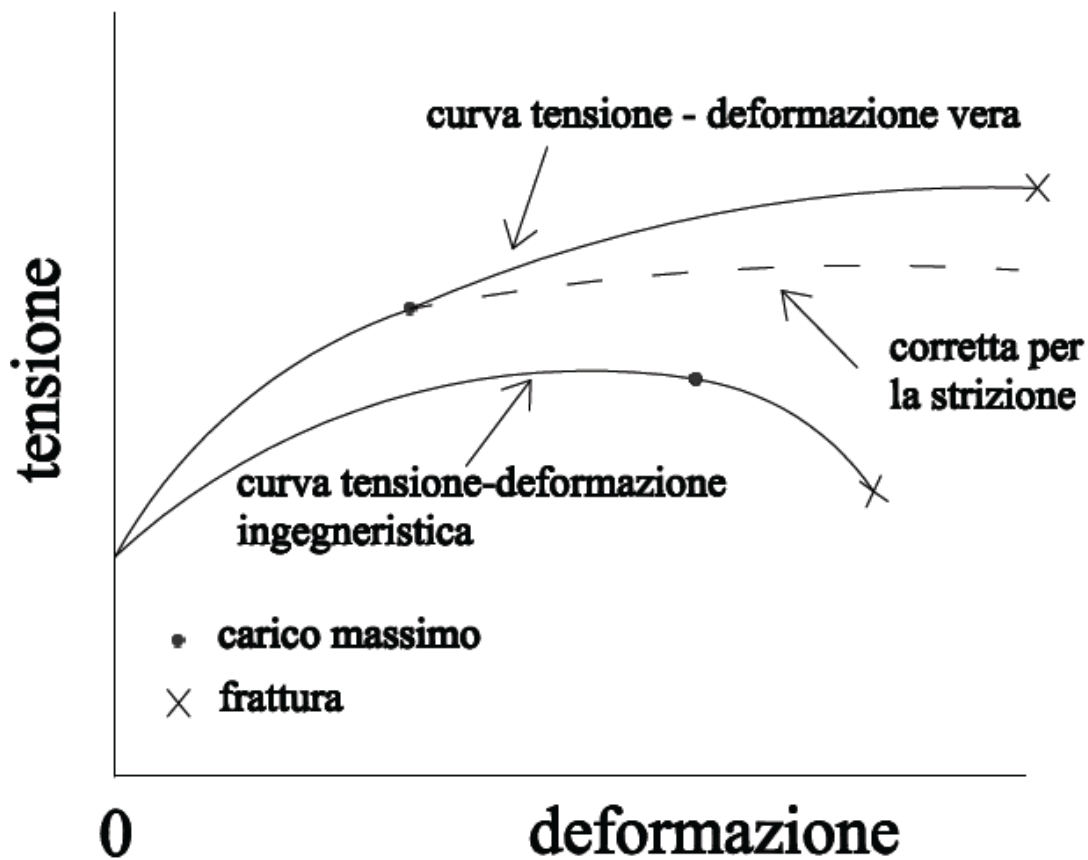


Figura 2.19: correzione della curva tensione vera-deformazione vera a seguito del fenomeno di instabilità plastica.

La misura dell'allungamento di un provino di trazione dipende dalla lunghezza del tratto utile o dalle dimensioni della sezione trasversale. Questo perché l'estensione totale consiste di due componenti, l'estensione uniforme fino alla comparsa della strizione e l'estensione localizzata a strizione iniziata. Il valore dell'estensione uniforme dipende dalle condizioni metallurgiche del materiale (attraverso n) e dall'effetto della dimensione e della forma del provino sullo sviluppo della strizione. La figura 2.20 illustra la variazione dell'allungamento locale, espresso dall'equazione 2.7, lungo il tratto utile di un provino caratterizzato dalla presenza di strizione. Si può prontamente osservare che più corto è il tratto utile maggiore è l'influenza della deformazione localizzata alla strizione sull'allungamento totale di tale tratto.

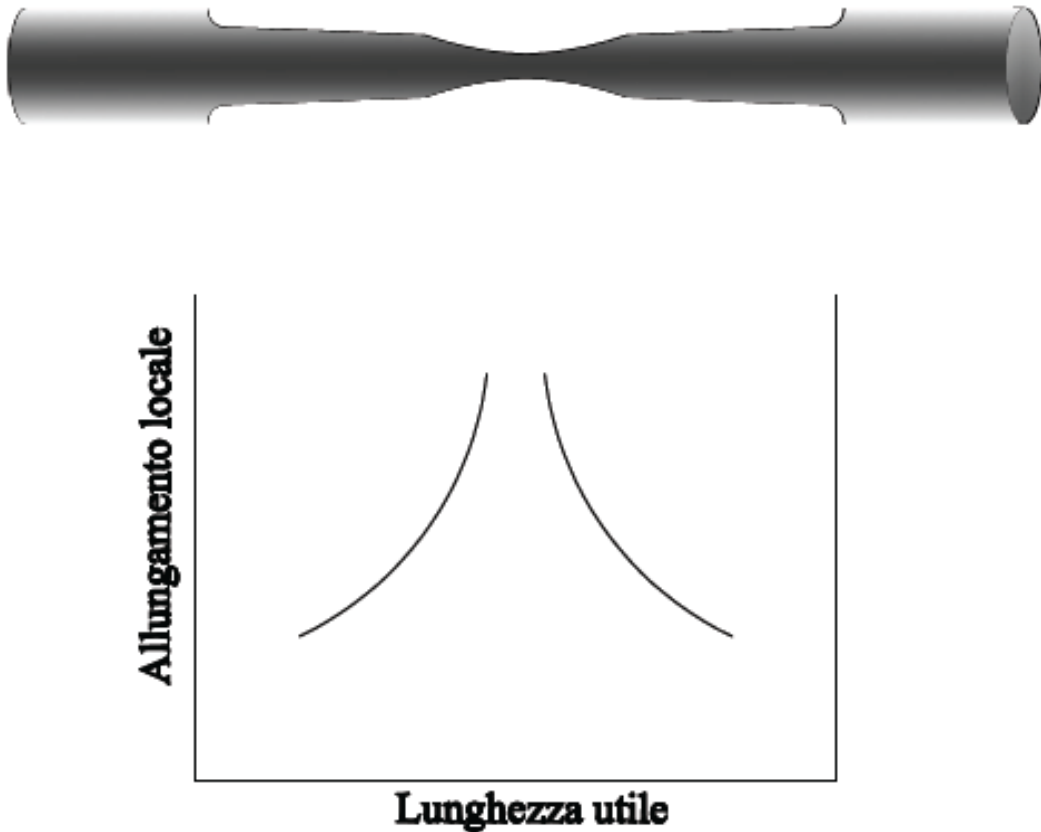


Figura 2.20: allungamento locale-lunghezza del tratto utile.

La lunghezza del provino a rottura può essere espressa come:

$$L_f - L_0 = \alpha + e_u L_0 \quad (2.33)$$

dove α è l'estensione locale della strizione ed $e_u L_0$ è l'estensione uniforme. L'allungamento di trazione quindi è dato da:

$$e_f = \frac{L_f - L_0}{L_0} = \frac{\alpha}{L_0} + e_u \quad (2.34)$$

che indica chiaramente che l'allungamento totale è funzione della lunghezza del tratto utile. Secondo la legge di Barba $\alpha = \beta \sqrt{A_0}$ l'equazione dell'allungamento diventa:

$$e_f = \beta \frac{\sqrt{A_0}}{L_0} + e_u \quad (2.35)$$

Si osserva che provini geometricamente simili, danno luogo a regioni di strizione simili. Inoltre per poter comparare gli allungamenti di provini di dimensioni differenti è necessario che siano geometricamente simili.

L'equazione 2.35 mostra che il fattore geometrico critico perché venga mantenuta la similitudine è $L_0/\sqrt{A_0}$ per provini a sezione rettangolare oppure L_0/D_0 per provini cilindrici.

Le norme ASTM prevedono che le dimensioni del provino standard di trazione siano 12.8 mm di diametro e 50.8 mm di lunghezza del tratto utile. I provini sottodimensionati hanno lo stesso rapporto *lunghezza del tratto utile / diametro* (L_0/D_0). Valori diversi di $L_0/\sqrt{A_0}$ sono specificati enti di unificazione di ciascun paese, nel caso dell'ASTM tale rapporto vale 4.5.

Si può affermare con buona approssimazione, che un dato allungamento si produce in un materiale se $\sqrt{A_0}/L_0$ si mantiene costante come predetto dall'equazione 2.35. Quindi ad un valore costante di allungamento $\sqrt{A_1}/L_1 = \sqrt{A_2}/L_2$, dove A ed L sono le aree e le lunghezze di tratto utile di provini diversi, 1 e 2 dello stesso metallo. Per prevedere l'allungamento di un provino di lunghezza L_2 ed area A_2 per mezzo delle misurazioni effettuate su un provino di area A_1 , è solo necessario calcolare il tratto utile del provino 1 come $L_1 = L_2 \sqrt{A_1/A_2}$.

Ovviamente il verificarsi della strizione fa sì che ogni conversione quantitativa tra allungamento e riduzione di sezione sia impossibile. Mentre l'allungamento e la riduzione di sezione di solito variano nello stesso modo, per esempio in funzione della temperatura, del contenuto di alliganti, ecc., vi sono dei casi in cui ciò non avviene. Nell'accezione generale, l'allungamento e la strizione misurano caratteristiche diverse del comportamento del materiale.

Supposto che la lunghezza del tratto utile non sia troppo corta, l'allungamento percentuale è principalmente influenzato dall'allungamento uniforme, è perciò dipendente dalle caratteristiche di incrudimento del materiale.

La riduzione dell'area è più una misura della deformazione richiesta per produrre la frattura ed il suo principale contributo risulta dal processo di strizione. A causa del complesso stato tensionale che si instaura con il processo di strizione, il valore della riduzione dell'area è legato alla geometria del provino ed al comportamento a deformazione, quindi non dovrebbe essere considerato come una reale proprietà del materiale. La riduzione di area però è il parametro di duttilità che più risente della struttura, per cui è utile per rivelare cambiamenti di qualità di un materiale.

La velocità a cui viene indotta una deformazione su un provino può avere un'importante influenza sulla tensione di flusso. La velocità di deformazione è definita come:

$$\dot{\epsilon} = d\epsilon / dt$$

ed è espresso convenzionalmente in s^{-1} ovvero "per secondo". Lo spettro delle velocità di deformazione caratteristiche è riportato in tabella.

Velocità di deformazione	Regime deformativo
$10^{-8} \div 10^{-5} s^{-1}$	creep a carico costante
$10^{-5} \div 10^{-1} s^{-1}$	trazione statica con macchina idraulica o a attuatore a vite

$10^{-1} \div 10^2 \text{ s}^{-1}$	trazione o compressione dinamici
$10^2 \div 10^4 \text{ s}^{-1}$	impatto ad alta velocità, (si considerano gli effetti di propagazione dell'onda)
$10^4 \div 10^8 \text{ s}^{-1}$	impatti iper-veloci con uso di proiettili spinti da gas o da esplosioni (propagazione dell'onda d'urto)

La figura 2.21 mostra che l'aumento della velocità di deformazione fa aumentare la tensione di flusso. Inoltre la dipendenza della resistenza dalla velocità di deformazione aumenta con l'aumentare della temperatura. Lo snervamento ed la tensione di flusso a basse deformazioni plastiche sono più dipendenti dalla velocità di deformazione rispetto alla resistenza a trazione. Elevate velocità di deformazione, ad esempio, causano la comparsa di un punto di snervamento nelle prove con acciaio a basso contenuto di carbonio che non mostra tale punto a velocità di prova ordinarie.

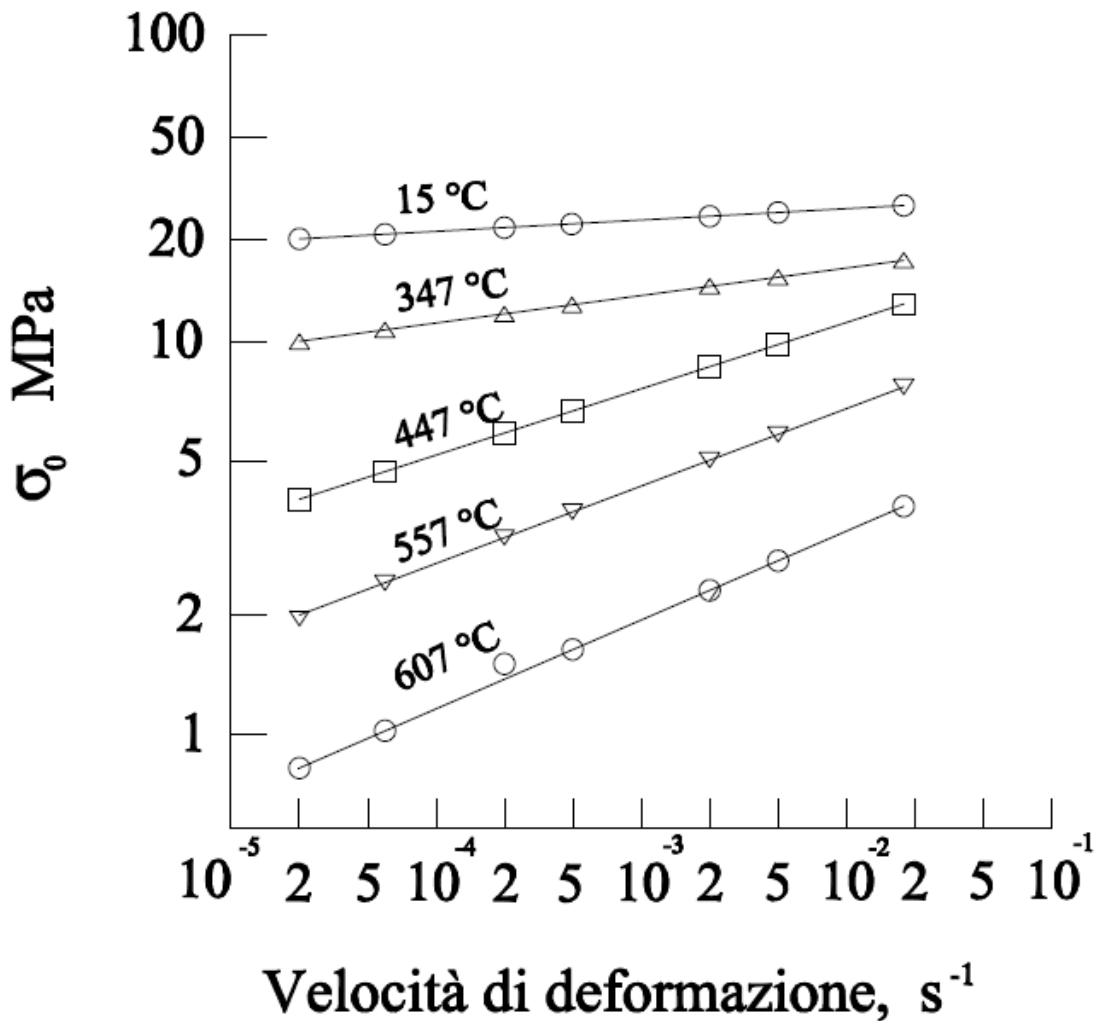


Figura 2.21: legame tensione velocità di deformazione per prove condotte a differenti temperature.

Nadai ha presentato una trattazione analitica delle condizioni esistenti durante l'allungamento di un provino cilindrico con una estremità fissata e l'altra collegata ad una traversa mobile della macchina di prova. La velocità della traversa è $v = dL / dt$. La velocità di deformazione è espressa in termini di deformazione lineare ingegneristica.

$$\dot{\epsilon} = \frac{de}{dt} = \frac{d(L-L_0)/L_0}{dt} = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dt} = \frac{v}{L_0} \quad (2.36)$$

Quindi la velocità di deformazione ingegneristica o convenzionale è proporzionale alla velocità della traversa. Nelle macchine di trazione moderne in cui la velocità della traversa può essere settata accuratamente e controllata, è molto semplice condurre un test di trazione alle velocità di deformazione convenzionali.

La velocità di deformazione vera è data da:

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d[\ln(L/L_0)]}{dt} = \frac{1}{L} \frac{dL}{dt} = \frac{v}{L} \quad (2.37)$$

ed è correlato alla velocità di deformazione ingegneristica dall'equazione:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{L} = \frac{L_0}{L} \frac{de}{dt} = \frac{1}{1+e} \frac{de}{dt} = \frac{\dot{\epsilon}}{1+e} \quad (2.38)$$

L'equazione 2.37 indica che per una velocità della traversa costante la velocità di deformazione vera diminuisce man mano che il provino si allunga. Per mantenere una velocità di deformazione vera costante usando un controllo *open-loop* la velocità di deformazione deve aumentare proporzionalmente all'allungamento del provino.

Una relazione generale tra la tensione di flusso e la velocità di deformazione, a deformazione e temperatura costante è:

$$\sigma = C(\dot{\epsilon})^m \Big|_{\epsilon, T} \quad (2.39)$$

dove m è nota come sensibilità alla velocità di deformazione. L'esponente m può essere ottenuto dalla pendenza del diagramma $\log \sigma$ vs $\log \dot{\epsilon}$. Comunque un metodo più accurato per ricavare m è effettuare un test a velocità variabile in cui m è determinato misurando le variazioni di tensione di flusso indotte dal cambiamento della velocità di deformazione a deformazione e temperatura costanti (figura 2.22),

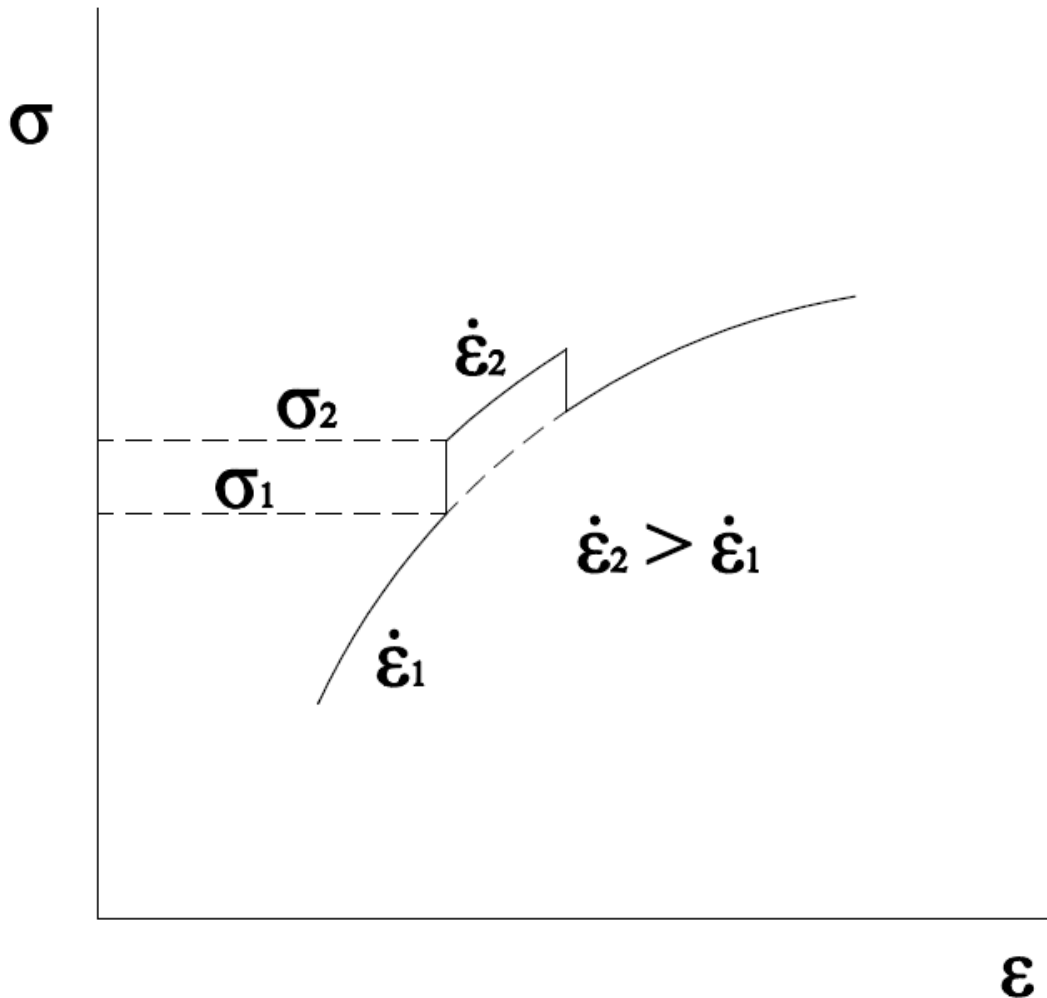


Figura 2.22: prova condotta variando la velocità di deformazione.

e descrivibile con l'equazione:

$$m = \left(\frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right)_{\epsilon, T} = \frac{\dot{\epsilon}}{\sigma} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\epsilon}} \right)_{\epsilon, T} = \frac{\Delta \log \sigma}{\Delta \log \dot{\epsilon}} = \frac{\log \sigma_2 - \log \sigma_1}{\log \dot{\epsilon}_2 \cdot \log \dot{\epsilon}_1} = \frac{\log(\sigma_2 / \sigma_1)}{\log(\dot{\epsilon}_2 / \dot{\epsilon}_1)} \quad (2.40)$$

La sensibilità alla velocità di deformazione dei metalli è molto basso (<0.1) a temperatura ambiente ma m aumenta con la temperatura, specialmente al di sopra della metà della temperatura assoluta di fusione. Nelle lavorazioni a caldo m di solito varia da 0.1 a 0.2.

L'equazione 2.39 non è la migliore possibile nel caso degli acciai. Per questi materiali sembra valere una relazione semilogaritmica tra tensione di flusso e velocità di deformazione:

$$\sigma = k_1 + k_2 \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0} \quad (2.41)$$

dove k_1 , k_2 ed ϵ_0 sono delle costanti.

La sensibilità alla velocità di deformazione è un buon indicatore delle variazioni di comportamento durante la deformazione e la sua misura fornisce un legame chiave tra le misure di deformazione effettuate in fase di prova e il comportamento delle dislocazioni durante la deformazione plastica.

La velocità del moto delle dislocazioni dipende fortemente dalla tensione secondo la relazione:

$$v = A\sigma^{m'} \quad (2.42)$$

dove m' è una costante che varia da 1.5 a 40 in funzione del materiale.

Inoltre, la velocità di deformazione è correlata alla velocità delle dislocazioni mobili secondo la relazione:

$$\dot{\epsilon} = \rho b v \quad (2.43)$$

dove ρ è la densità delle dislocazioni e b l'interdistanza durante lo scorrimento delle dislocazioni. Dalle equazioni 2.40, 2.42, 2.43 calcolando segue:

$$m' = \frac{1}{m} - \frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln \sigma} \quad (2.44)$$

Perciò se non ci sono cambiamenti nella densità delle dislocazioni mobili all'aumentare della tensione, $m' = 1/m$.

Mentre la sensibilità alla velocità di deformazione può essere molto basso nei metalli a temperatura ambiente, negli altri materiali può al contrario essere apprezzabile. Il caso estremo è un solido viscoso newtoniano, in cui la tensione di flusso è descritta dalla:

$$\sigma = \eta \dot{\epsilon} \quad (2.45)$$

Elevati valori della sensibilità alla velocità di deformazione sono caratteristici dei metalli e delle leghe superplastiche.

La superplasticità induce allungamenti notevoli di solito compresi tra il 100 ed il 1000 per cento. I metalli superplastici hanno dimensioni di grano o spaziature interfasiche dell'ordine di 1 μm . Le prove condotte ad alta temperatura ed a basse velocità di deformazione, accentuano il comportamento superplastico.

Risulta chiaro che gli elevati allungamenti tipici della superplasticità, in questi materiali con elevati valori di m , sono il risultato della soppressione della strizione. Un caso estremo è il vetro caldo ($m=1$) che può essere formato dallo stato fuso in fibre senza che le fibre presentino strizione.

Nei metalli normali l'addolcimento geometrico che favorisce il processo di strizione è impedito dall'incrudimento, e finché $d\sigma/d\epsilon > \sigma$, il provino di trazione non presenterà strizione. Con i materiali superplastici la velocità di incrudimento è bassa (a causa della elevata temperatura e delle condizioni strutturali) ma la strizione è impedita dalla presenza dell'incrudimento e $d\sigma/d\epsilon > \sigma$.

Se si considera una barretta di materiale superplastico di sezione A caricata assialmente con una forza P si ricava:

$$-\frac{dA}{dt} = \left(\frac{P}{C}\right)^{1/m} \left(\frac{1}{A^{(1-m)/m}}\right) \quad (2.46)$$

L'equazione 2.46 stabilisce che tanto più $m < 1$ e l'area della sezione trasversale è piccola, tanto più rapidamente l'area si riduce.

La figura 2.23 mostra come l'area diminuisce al variare di m . Quando $m=1$ la deformazione è viscosa newtoniana e dA/dt è indipendente da A ed ogni fenomeno di strizione incipiente è impedito durante l'allungamento. Dunque quando m si approssima ad 1 la velocità di crescita della strizione incipiente si riduce drasticamente.

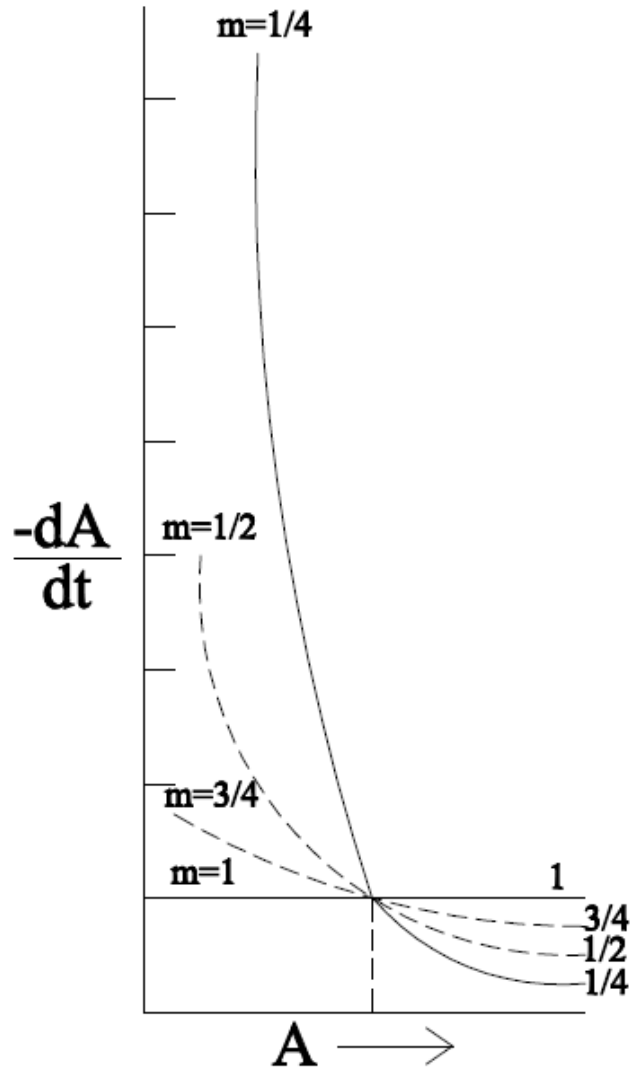


Figura 2.23: variazione della sezione in funzione di diversi valori della sensibilità alla velocità di deformazione.

La figura 2.24 mostra come un allungamento a trazione di una lega superplastica aumenti con la sensibilità alla velocità di deformazione in accordo con l'analisi precedentemente esposta.

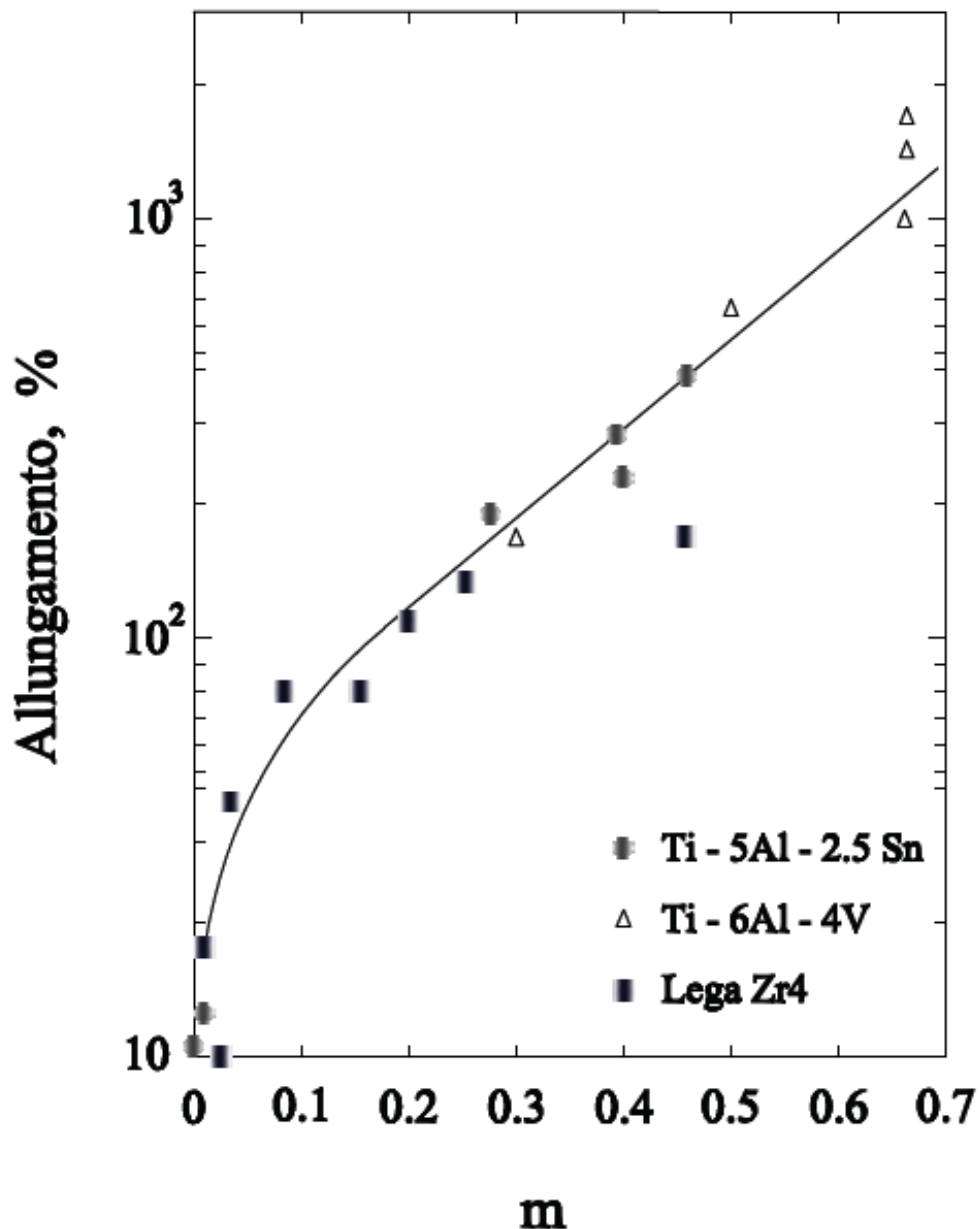


Figura 2.24: deformazione a rottura in funzione di m per diversi materiali.

Effetto della temperatura sulle proprietà di flusso: La curva tensione-deformazione, le caratteristiche di flusso e frattura derivate dalla prova di trazione sono fortemente dipendenti dalla temperatura a cui si conduce il test. In generale la resistenza diminuisce e la duttilità aumenta all'aumentare della temperatura di test. Comunque, in certi intervalli di temperatura possono intervenire cambiamenti strutturali come la precipitazione, l'invecchiamento o la ricristallizzazione che possono alterare tale comportamento generale. I processi attivati termicamente in genere favoriscono la deformazione e riducono la resistenza a temperature elevate, inoltre a tali temperature per lunghe esposizioni si possono avere cambiamenti strutturali che portano al creep (scorrimento viscoso, deformazione in funzione del tempo). In figura 2.25 sono riportati gli andamenti delle curve stress-strain ingegneristiche per un acciaio duttile.

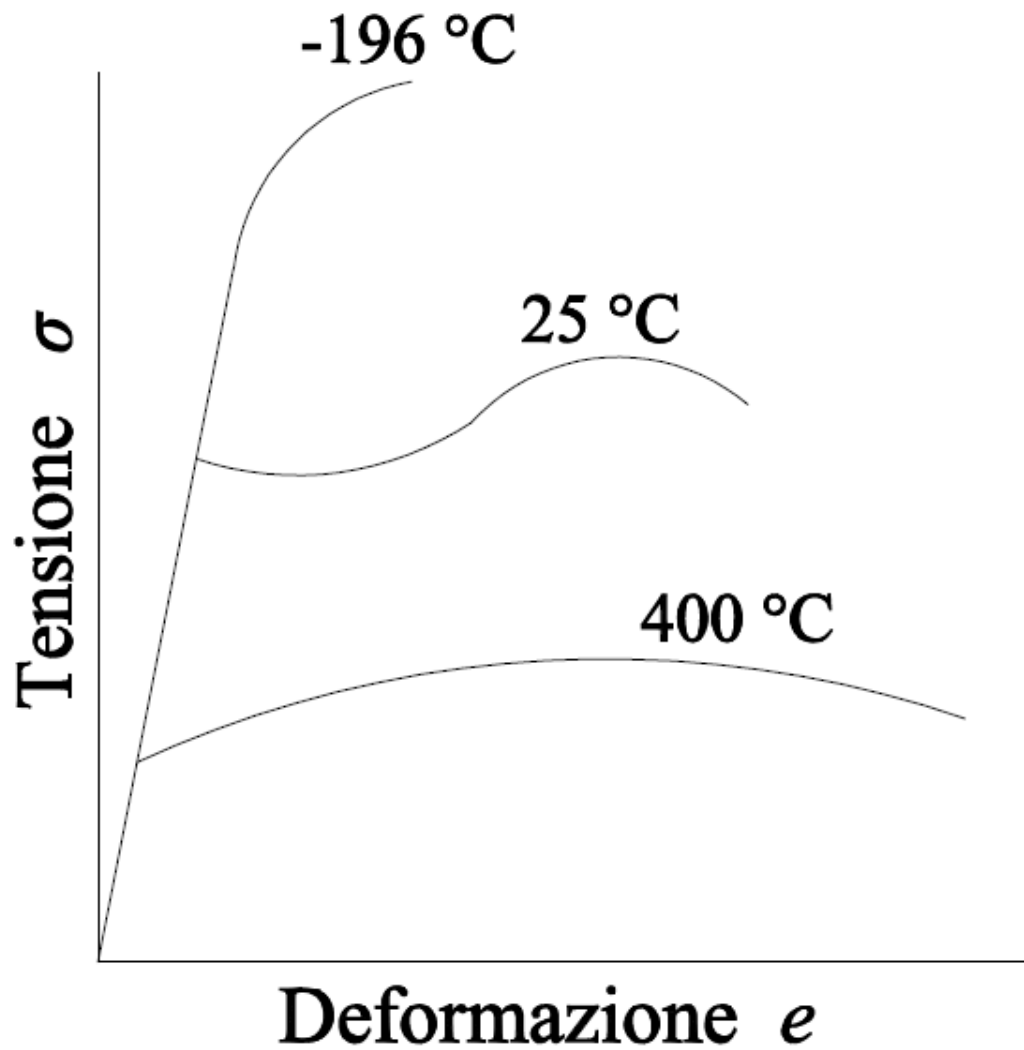


Figura 2.25: legame tensione-deformazione al variare della temperatura.

La figura 2.26 mostra la variazione dello snervamento con la temperatura per i metalli con struttura cubica a corpo centrato (bcc) Ta, W, Mo, Fe e per il Ni invece con struttura cubica a facce centrate (fcc)

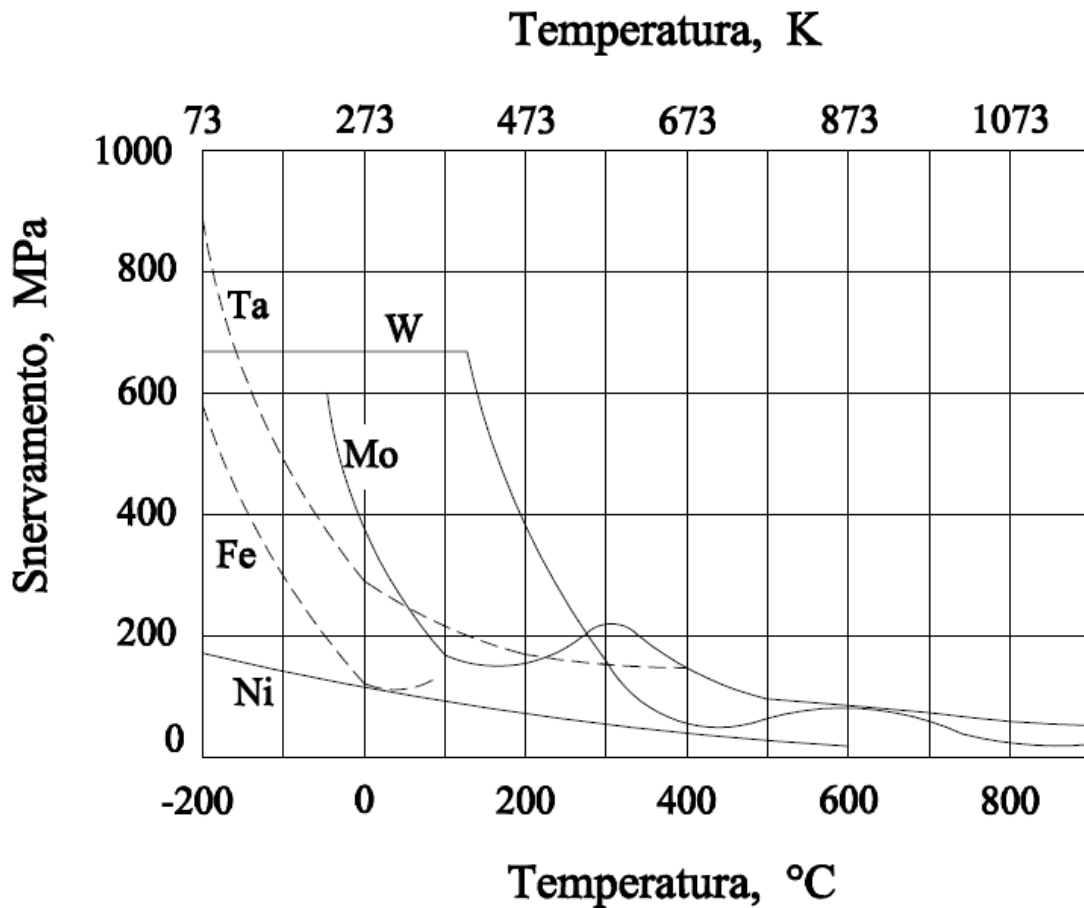


Figura 2.26: snervamento al variare della temperatura.

Si osserva che per i metalli bcc la tensione di snervamento aumenta rapidamente al diminuire della temperatura, è facile dunque spiegarsi perché tali metalli esibiscono frattura fragile alle basse temperature. Per i metalli fcc, invece, lo snervamento dipende poco dalla temperatura.

La figura 2.27 mostra la variazione della riduzione di area con la temperatura per gli stessi metalli. Si noti che il tungsteno (W) è fragile a 100 °C, il ferro a -225 °C, mentre il nickel diminuisce di poco in duttilità sull'intero intervallo di temperatura.

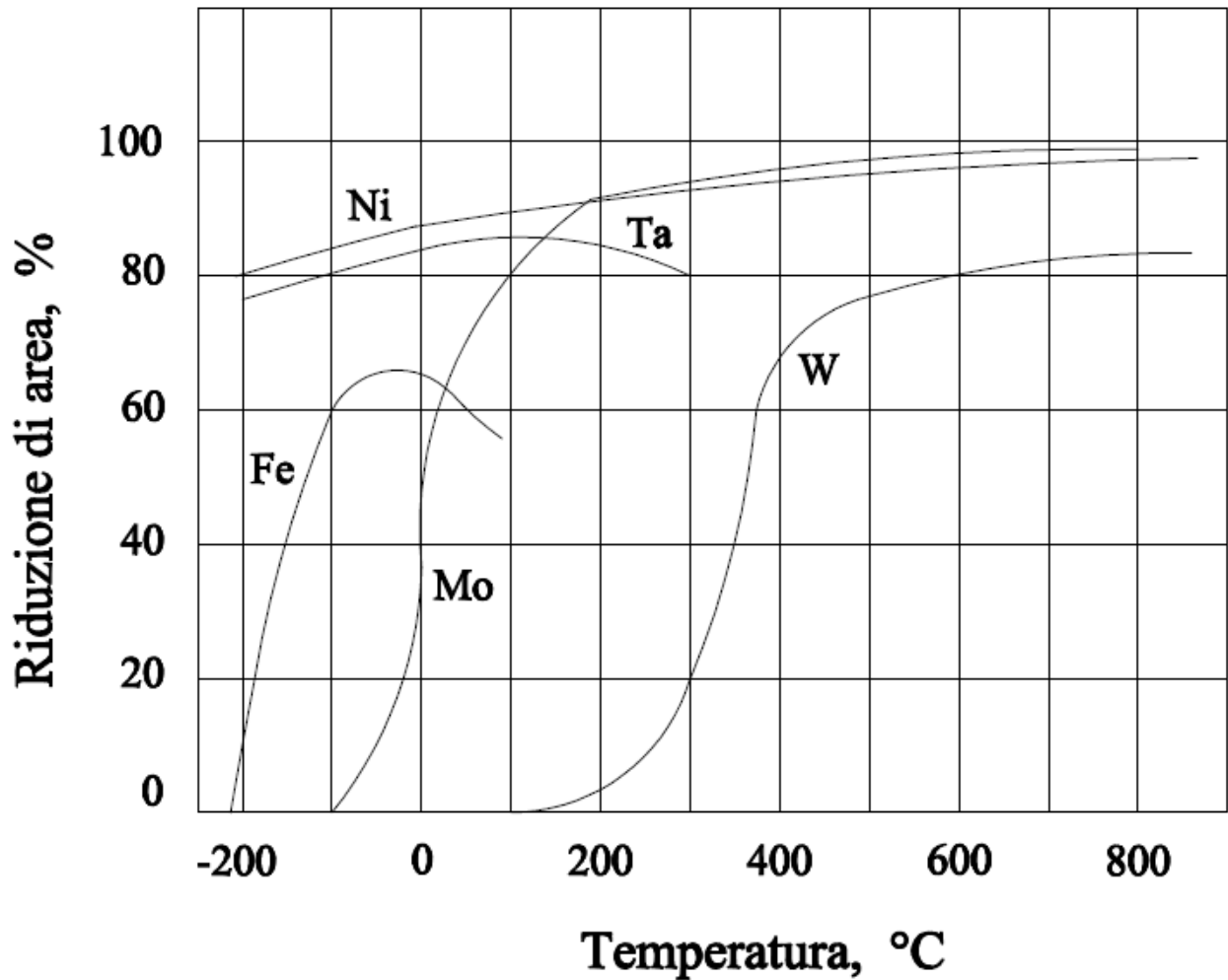


Figura 2.27: variazione della duttilità in funzione della temperatura di prova per diversi metalli puri.

Nei metalli fcc la tensione di flusso non è fortemente dipendente dalla temperatura, ma l'esponente di incrudimento diminuisce con l'aumentare di essa.

Il modo migliore per comparare le proprietà meccaniche di materiali differenti alle varie temperature è in termini di rapporto fra la temperatura di prova e quella di fusione, espresso in kelvin. Questo rapporto è spesso riportato in letteratura come *temperatura omologa*.

La dipendenza della tensione di flusso dalla temperatura a deformazione e velocità di deformazione costanti può essere rappresentata da:

$$\sigma = C_2 e^{Q/RT} \Big|_{\epsilon, \dot{\epsilon}} \quad (2.47)$$

dove Q = energia di attivazione del flusso plastico, J mol^{-1}

R = costante universale dei gas, $8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

T = temperatura di test, K

Se questa espressione è soddisfatta, un diagramma di $\ln \sigma$ vs $1/T$ sarà una linea retta di pendenza Q/R .

Il valore della tensione di flusso dipende dalla struttura delle dislocazioni esistente al tempo in cui la tensione di flusso è misurata. la struttura delle dislocazioni cambia con la temperatura, la velocità di deformazione e la deformazione. Una maniera di separare questi effetti è di valutare Q per mezzo di una prova a variazione di temperatura. La curva tensione-deformazione è ottenuta tenendo costante la velocità di deformazione e cambiando la temperatura, ad esempio da T_2 a T_1 , ad un desiderato valore di deformazione plastica. All'equilibrio di temperatura, l'energia di attivazione è data da:

$$Q = R \ln \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right) \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \quad (2.48)$$

Più del 90% dell'energia spesa nella deformazione plastica viene convertita in calore. In molte operazioni di lavorazione dei metalli, a causa del flusso non omogeneo, la deformazione è localizzata e la temperatura cresce in questa regione locale. Poiché la tensione di flusso decresce con la temperatura, ulteriori deformazioni si concentreranno preferibilmente in questa zona ed il processo continuerà fino alla frattura. Ad alte velocità di deformazione non vi è tempo a sufficienza per un flusso di calore apprezzabile per cui ne risulta una condizione quasi adiabatica. Questo tipo di frattura localizzata è chiamata frattura a taglio adiabatica e si osserva qualche volta negli ultimi stadi del test di trazione, in particolare nelle prove condotte a bassa temperatura.

Un'analisi delle condizioni che producono instabilità nella curva di flusso per taglio adiabatico è stata fatta da Backofen.

Proprietà tensili dell'acciaio: A causa della importanza commerciale dei materiali ferrosi è stata fatta una grossa mole di lavoro per correlarne le proprietà tensili con la composizione chimica e la microstruttura. Da un punto di vista scientifico il sistema Fe-C esibisce una grande versatilità nella struttura e nelle proprietà. E' stato chiaramente dimostrato che la struttura piuttosto che la composizione è la principale variabile che controlla le proprietà dell'acciaio.

Le proprietà tensili dell'acciaio ricotto e normalizzato sono controllate dalle caratteristiche di flusso e di frattura della ferrite e dalla quantità, forma e distribuzione della cementite.

La resistenza della ferrite dipende dalla quantità di elementi di lega in soluzione solida e dalla dimensione dei suoi grani. Il contenuto di carbonio ha un effetto molto forte in quanto controlla la quantità di cementite presente sia come perlite sia come sferoidite. Con l'aumentare del contenuto di carbonio aumenta la resistenza e diminuisce la duttilità a causa dell'aumento della cementite nella microstruttura.

Un acciaio normalizzato avrà una resistenza più elevata rispetto ad uno ricotto a causa del raffreddamento molto più rapido tipico del trattamento di normalizzazione. Tale raffreddamento fa sì che la trasformazione a perlite avvenga a temperature più basse e con spaziature ridotte. In figura 2.28 sono riportate le differenze delle proprietà tensili dovute alla forma delle particelle di cementite. In tale figura sono comparate le strutture sferoidiche e perlitiche di un acciaio con lo stesso contenuto di carbonio.

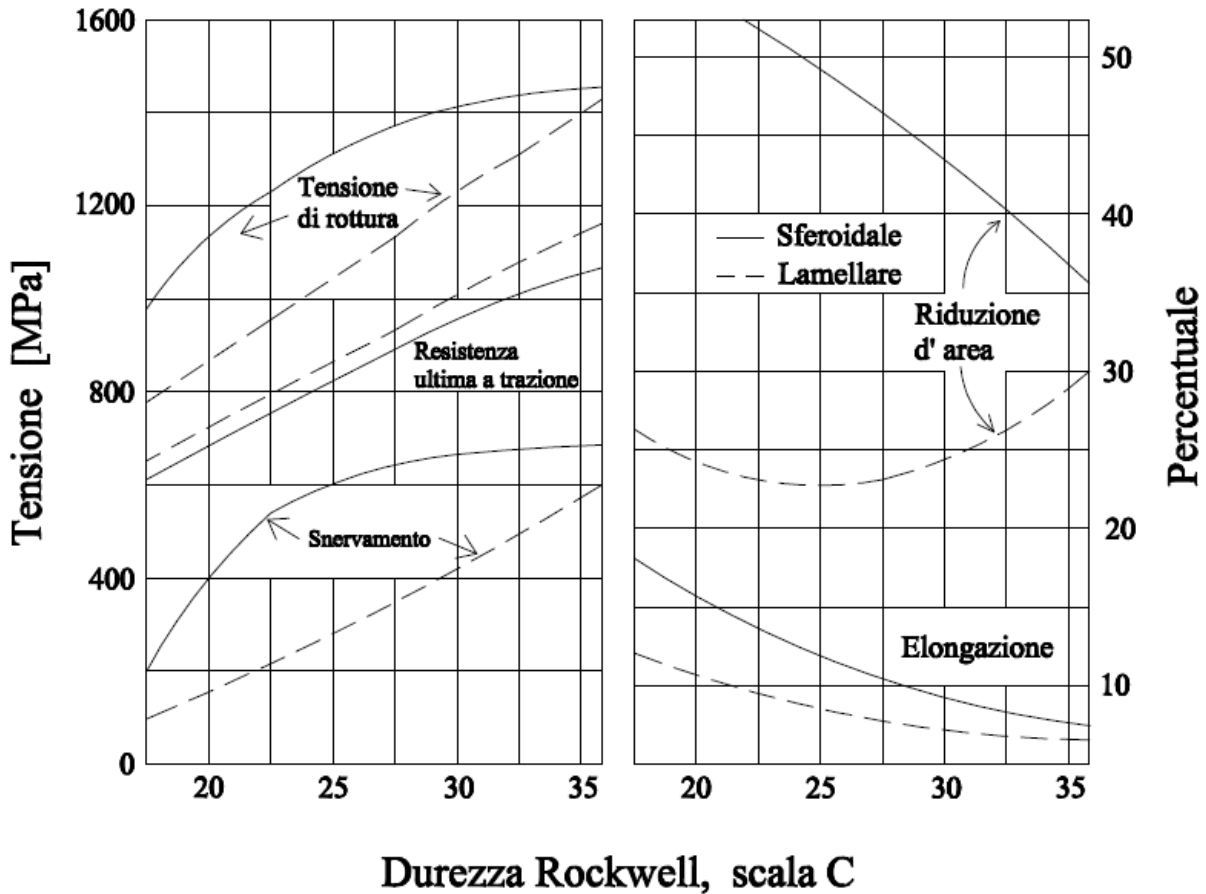


Figura 2.28: variazione delle proprietà meccaniche in funzione della struttura.

Uno dei metodi migliori per aumentare la resistenza di un acciaio ricotto è la lavorazione a freddo. La tabella mostra la variazione delle proprietà tensili di un acciaio SAE 1016 ridotto in barre attraverso uno stampo.

Reduction of area by drawing, %	Yield strength, MPa	Tensile strength, MPa	Elongation, in 50 mm, %	Reduction of area, %
0	276	455	34	70
10	496	517	20	65
20	565	579	17	63
40	593	655	16	60
60	607	703	14	54
80	662	793	7	26

La struttura perlitica nell'acciaio può essere meglio controllata trasformando l'austenite in perlite a temperatura costante, invece di permetterne la formazione in un intervallo di temperatura da un raffreddamento continuo al di sopra della temperatura critica. Sebbene la trasformazione isoterma non sia ideale per gli usi commerciali, essa permette di isolare gli effetti di alcune microstrutture sulle proprietà dell'acciaio.

La figura 2.29 mostra le variazioni delle proprietà tensili di un acciaio eutettoide Ni-Cr-Mo a temperatura di trasformazione isoterma.

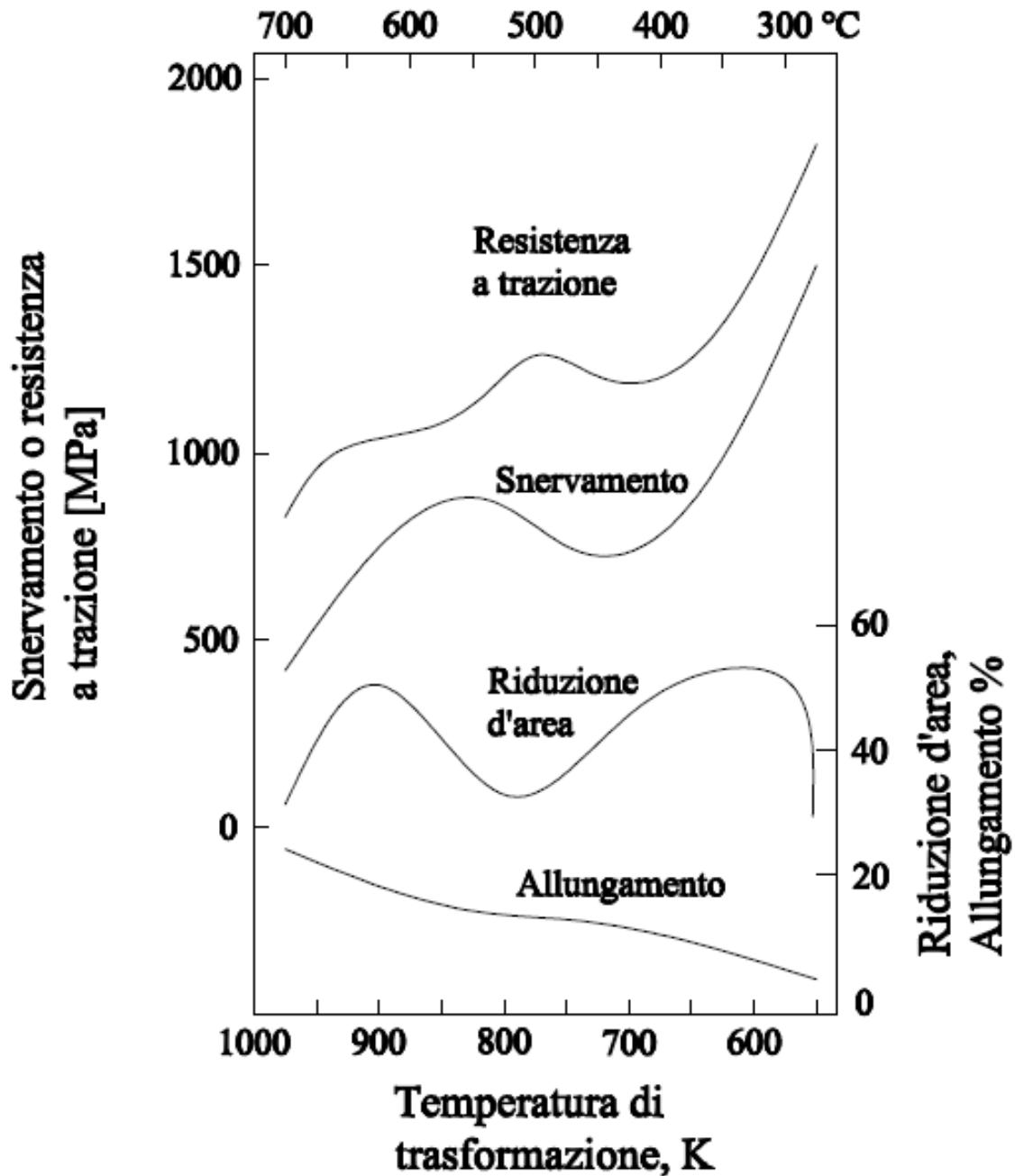


Figura 2.29: variazione delle proprietà meccaniche in funzione della temperatura.

Se si considera una trasformazione isoterma nel range compreso tra 1000 ed 800 K il prodotto di tale trasformazione è perlite lamellare. La spaziatura tra le particelle di cementite diminuisce con la temperatura di trasformazione e corrispondentemente aumenta la resistenza.

Nella regione da 700 a 550 K la struttura ottenuta dalla trasformazione è bainite aciculare. La struttura bainitica diventa sempre più fine con il diminuire della temperatura e la resistenza aumenta quasi linearmente sino a valori elevati, inoltre la struttura risultante ha una buona duttilità. Questo è il range di temperatura utilizzato nel trattamento termico commercialmente noto come austempering.

Nel range di temperatura compreso tra 800 e 700 K vi è la coesistenza di strutture lamellari ed aciculari.

La migliore combinazione di duttilità e resistenza si ottiene in acciai *quenched* (tempra con raffreddamento veloce) per ottenere una struttura completamente martensitica e successivamente temperati (*tempered*). A causa dell'importanza di ottenere una struttura completamente martensitica, è desiderabile che l'acciaio abbia un'adeguata induribilità (*hardenability*).

L'induribilità è una proprietà dell'acciaio che caratterizza la profondità e la distribuzione della durezza indotta dal brusco raffreddamento. L'induribilità non deve essere confusa con la durezza, poiché la durezza è una proprietà del materiale che rappresenta la sua resistenza all'indentazione o alla deformazione.

La durezza è associata con la resistenza mentre l'induribilità è connessa alle trasformazioni caratteristiche dell'acciaio. L'induribilità può essere aumentata alterando le cinetiche di trasformazione con l'aggiunta di elementi di lega, mentre la durezza dell'acciaio ad una data cinetica di trasformazione è controllata principalmente dal contenuto di carbonio.

La figura 2.30 mostra la durezza della martensite in funzione del contenuto di carbonio per quantitativi differenti di martensite nella microstruttura. Le curve in figura possono essere utilizzate per stabilire se si è ottenuto o meno un hardening completo dopo il brusco raffreddamento.

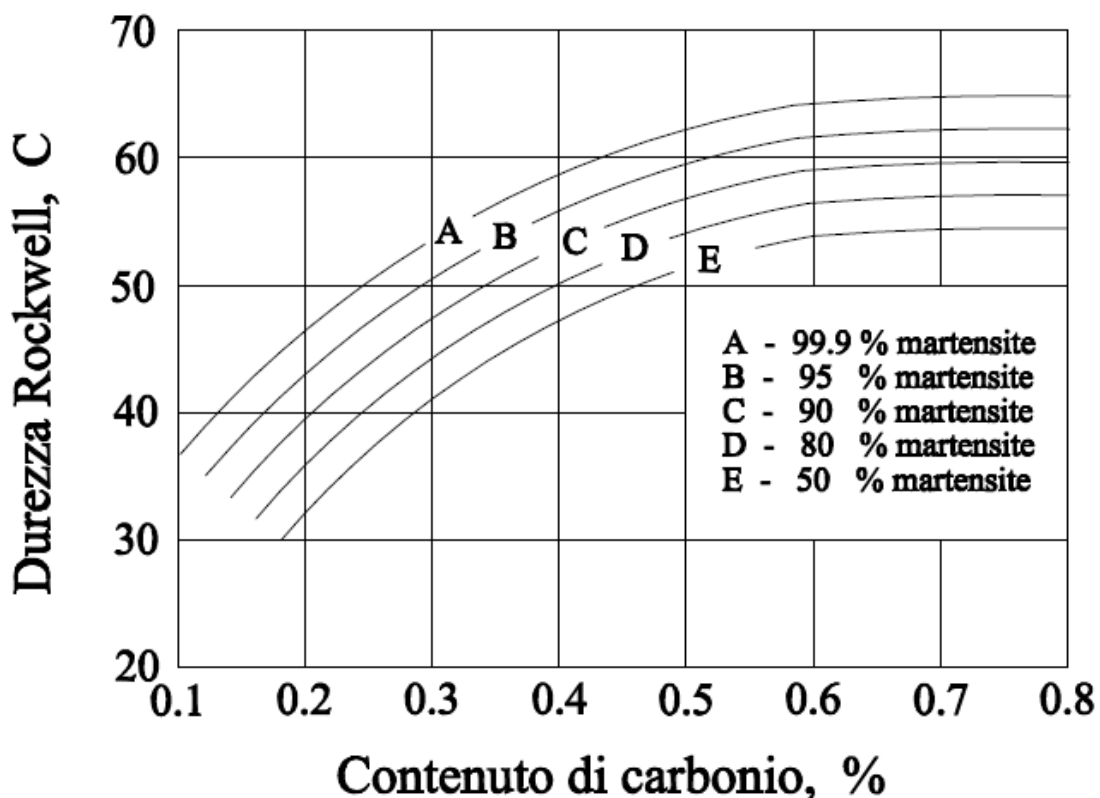


Figura 2.30: variazione delle proprietà meccaniche al variare del tenore di carbonio e della percentuale di martensite.

La durezza può rappresentare una misura conveniente della resistenza di un acciaio sottoposto a trattamento termico, poiché vi sono delle correlazioni sperimentali tra durezza e resistenza (figura 2.31).

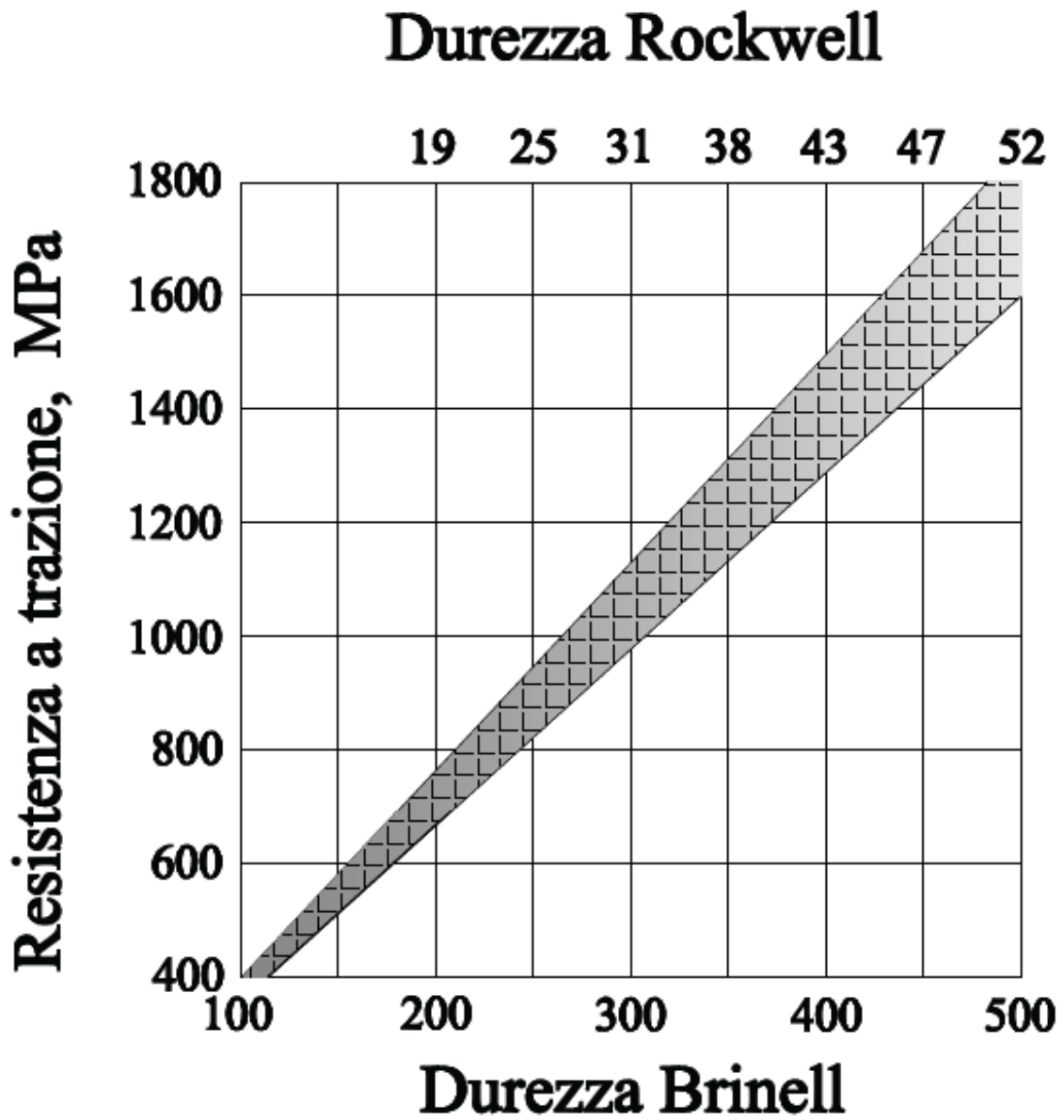


Figura 2.31: relazione tra durezza e resistenza a trazione.

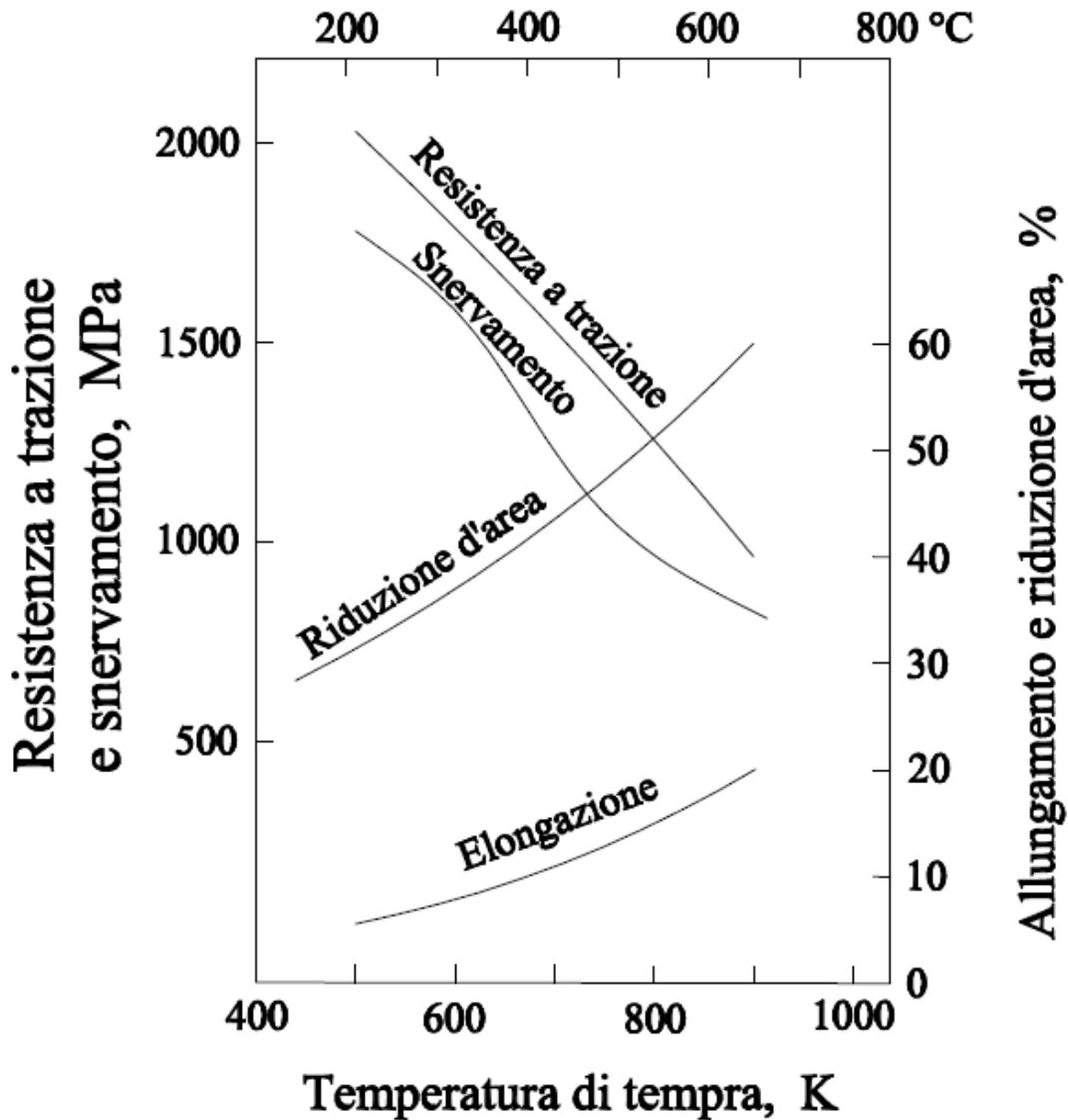


Figura 2.32: variazione delle proprietà meccaniche con la temperatura di tempra.

Le proprietà meccaniche di un acciaio temprato possono essere alterate cambiando la temperatura di raffreddamento.

Anisotropia delle proprietà tensili: Di solito si osserva che le proprietà tensili dei metalli lavorati per deformazione plastica non sono le stesse in tutte le direzioni. La dipendenza delle proprietà dall'orientazione è detta anisotropia. Nei metalli in genere si osservano due tipi di anisotropia.

L'*anisotropia cristallografica* è prodotta dalla orientazione preferenziale dei grani causata da processi di deformazione plastica severa. Poiché la resistenza di un monocristallo è altamente anisotropica, una deformazione plastica severa che produce una forte orientazione preferenziale, rende un materiale policristallino simile per anisotropia ad un monocristallo. Lo snervamento e in minor misura la resistenza a trazione sono le proprietà maggiormente affette. Questo tipo di anisotropia è più frequente nei metalli non ferrosi, specialmente se sono stati ridotti in fogli o lamiere. L'anisotropia cristallografica può essere eliminata con la ricristallizzazione, sebbene la formazione di texture di ricristallizzazione possa portare ad un'anisotropia differente.

Il *fibering meccanico* è la seconda forma di anisotropia, ed è dovuto all'allineamento preferenziale di discontinuità strutturali come inclusioni, vuoti, segregazione e seconde fasi nella direzione di lavorazione. Tale tipo di anisotropia è importante nella forgiatura e nella laminazione. La direzione principale di lavorazione è definita *direzione longitudinale*. Essa può essere ad esempio l'asse maggiore di una barra o la direzione di laminazione nei fogli e lamiere. Si devono considerare inoltre due direzioni trasversali. La *direzione trasversale corta* è la dimensione più piccola del prodotto, per esempio lo spessore di una lamiera. La *direzione trasversale lunga* è perpendicolare ad entrambe le direzioni precedentemente esposte. Nelle sezioni circolari e quadrate, entrambe le direzioni trasversali sono equivalenti. Negli acciai lavorati per deformazione plastica il fibering meccanico è la prima causa di proprietà direzionali. Le misure di duttilità come la riduzione di area ne sono quelle più affette. In generale, la riduzione di area è minore nella direzione trasversale corta, intermedia nella direzione trasversale lunga e maggiore nella direzione longitudinale.

Le proprietà trasversali sono particolarmente importanti nello spessore di parete di tubi, come canne da fuoco e serbatoi in pressione, che sono sottoposti a pressioni interne elevate. In queste applicazioni la tensione principale maggiore agisce in direzione circonferenziale, che corrisponde alla direzione trasversale in un forging cilindrico. La riduzione trasversale di area (RAT) è un buon indice di qualità per l'acciaio in questo tipo di applicazioni.

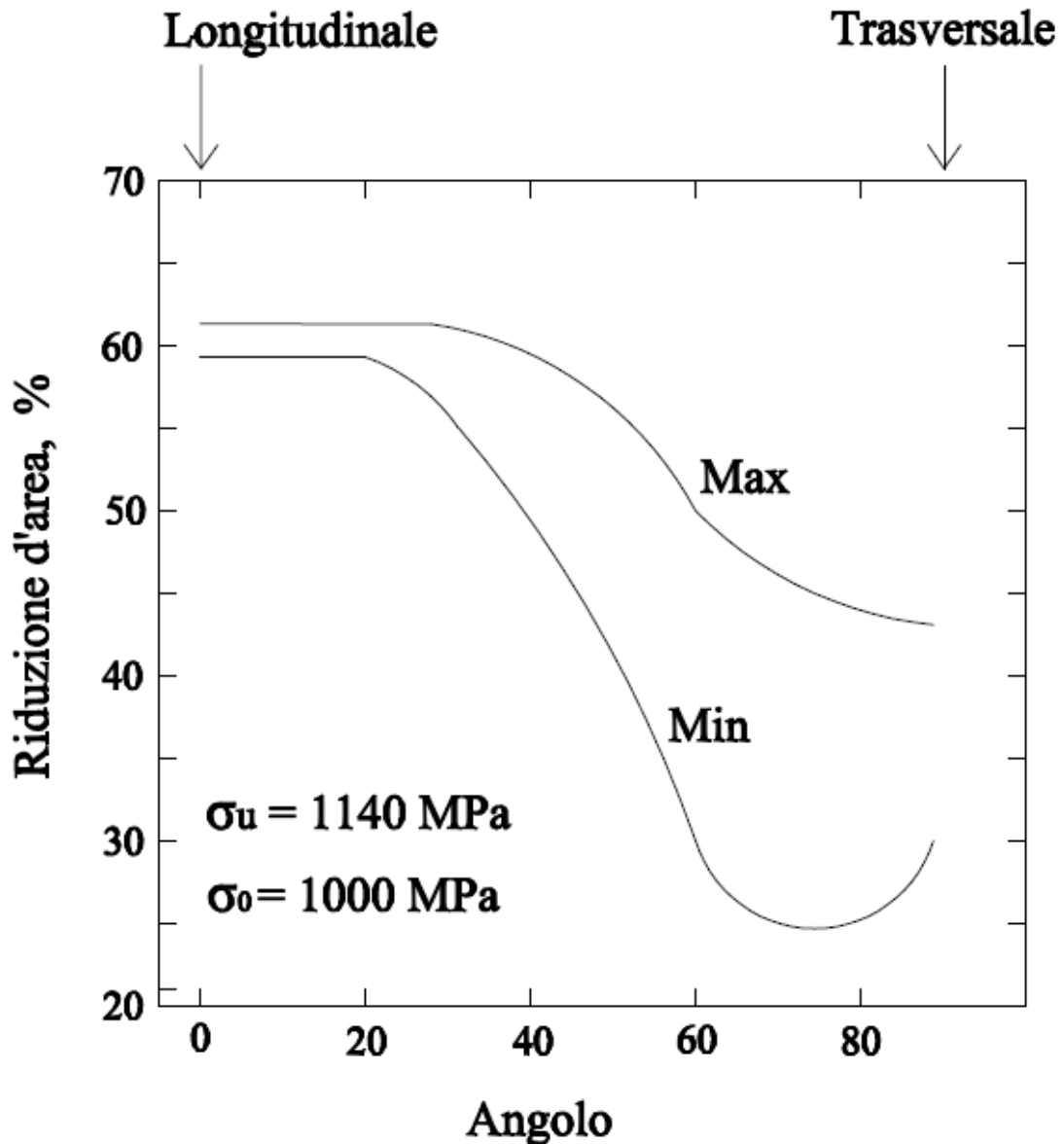


Figura 2.33: variazione di area longitudinale e trasversale con l'angolo fra gli assi di un provino di trazione e la direzione longitudinale nella forgiatura.

La figura 2.34 mostra come variano la riduzione di area longitudinale e trasversale in funzione del rapporto di forging. Tale rapporto è il rapporto della sezione originale e della finale dopo forgiatura. Di solito le proprietà ottime si ottengono per rapporti di 2:1 3:1. Le inclusioni non metalliche sono considerate le principali responsabili della bassa duttilità trasversale. Questa assunzione si basa sul fatto che gli acciai fusi sottovuoto danno dei valori di RAT più elevati rispetto a quelli fusi in aria, oltre che su diverse correlazioni esistenti tra il RAT ed il contenuto di inclusioni. Anche fattori come la microsegregazione e la struttura dendritica possono essere responsabili di una scarsa duttilità trasversale.

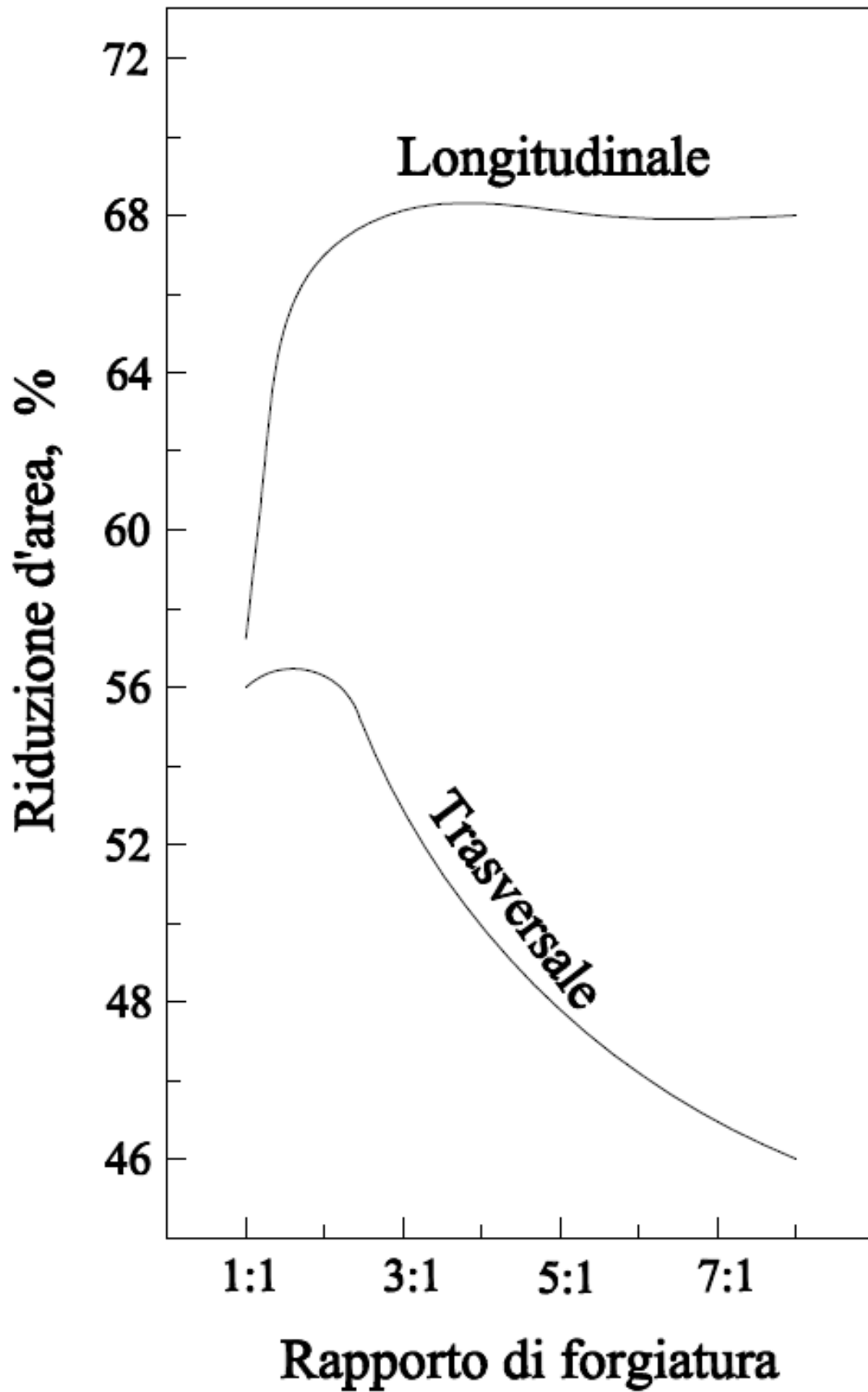


Figura 2.34: variazione di area longitudinale e trasversale in funzione del rapporto di forgiatura.

La prova di compressione

Il concetto di carico uniassiale a trazione o a compressione è simile.

In entrambi i casi viene prodotta una deformazione parallela al carico applicato e con lo stesso segno, e due deformazioni trasversali di segno opposto a quello del carico applicato.

Al di sotto del limite di proporzionalità, la deformazione nella direzione del carico, in entrambi i casi, può essere calcolata usando un solo valore del modulo elastico.

Similmente, la deformazione trasversale, può essere calcolata usando il modulo di Poisson (ν):

$$\varepsilon_{trasversale} = \nu \varepsilon_{assiale}$$

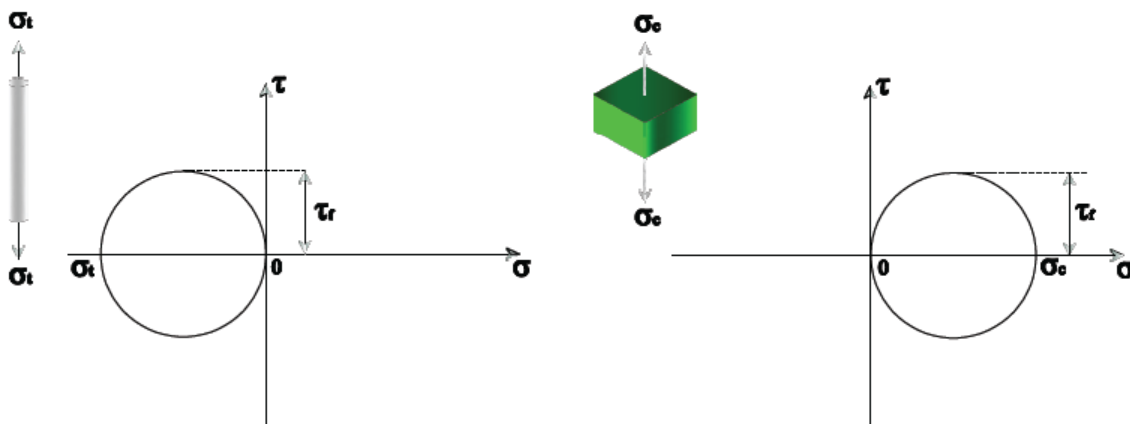


Figura 2.35: stato tenso-deformativo nella sezione trasversale in trazione e compressione.

È una prova meccanica molto utile per capire la formabilità del materiale nelle lavorazioni di forgiatura, estrusione, laminazione ecc, perché lo stato di sollecitazione medio durante il test è simile a quello della maggior parte delle lavorazioni per deformazione plastica. Il materiale sottoposto a compressione non subisce necking come nella trazione, ma è soggetto ad barilottatura. La rottura avviene con meccanismi differenti e perciò non vi è un parametro di resistenza a rottura (UTS). In generale, un materiale duttile non si rompe a compressione, ma tende a fluire in risposta al carico imposto. Provini cilindrici di materiale fragile sottoposti a compressione, si rompono a taglio su un piano inclinato rispetto alla direzione del carico, in due o più pezzi. In questo caso si può definire una tensione di compressione ultima.

Rispetto alla prova di trazione, si incontrano parecchie difficoltà nell'effettuare un test di compressione e nell'interpretarne i dati. Per esempio, è molto importante mantenere la perfetta assialità del carico applicato. Nel test di trazione ciò può essere facilmente ottenuto nel sistema di ammorsamento del provino, nel test di compressione, se il provino è alto rispetto al diametro, si possono avere delle difficoltà. La non assialità del carico induce delle componenti flessionali sul provino che unite alle componenti di sforzo assiale, tipiche della prova, ne causano l'ingobbamento. Il centraggio delle piastre di carico e di appoggio per la perfetta assialità dello stesso è più semplice se il provino ha una grande area di contatto, però ciò dà luogo ad altri problemi. Le forze d'attrito esistenti all'interfaccia piastre-provino tendono ad opporsi all'aumento del diametro dello stesso

man mano che per effetto della compressione se ne riduce l'altezza. Queste forze sono direttamente correlate al coefficiente d'attrito μ , perciò bisogna minimizzarlo.

A causa dell'attrito, il carico sul provino non è uniassiale, l'effetto dell'attrito impedisce l'aumento di diametro delle superfici a contatto con le piastre, ma non sul resto del provino, che tende dunque ad imbarellarsi.

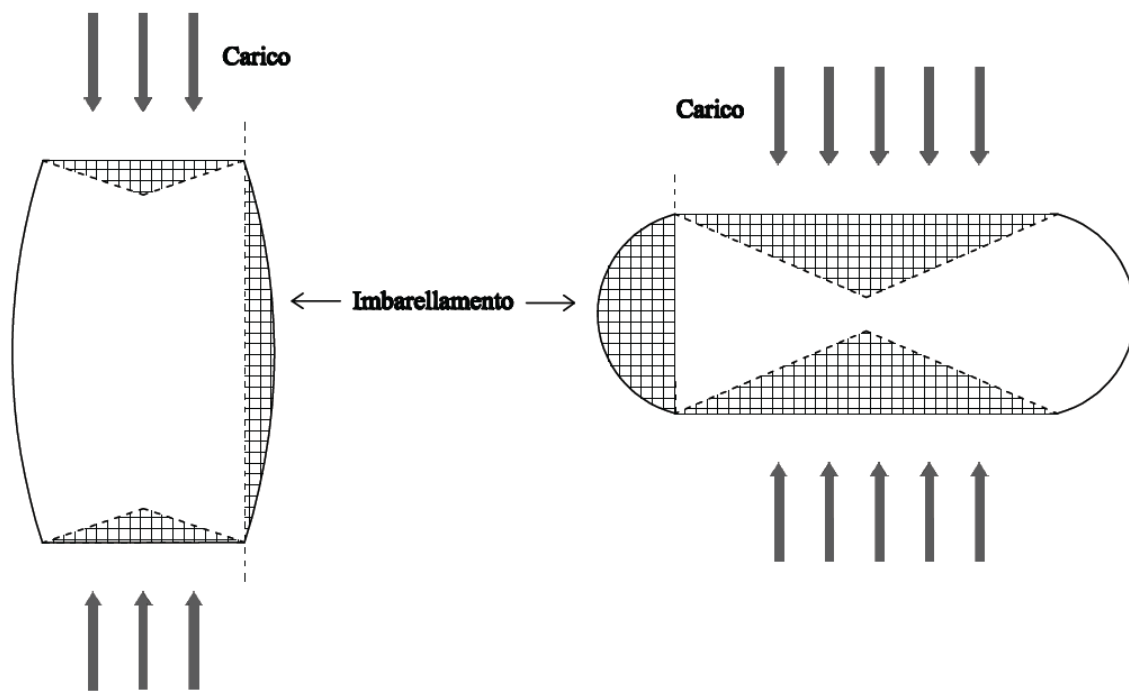


Figura 2.36: barilottatura tipica della prova di compressione.

Dalla figura precedente si osserva che con l'aumentare del carico si ha una deformazione plastica nel resto del provino, mentre la deformazione è elastica sulle superfici di contatto con le piastre e nelle zone vicine. Il rapporto tra il materiale deformato elasticamente e quello deformato plasticamente aumenta man mano che la compressione procede ed il provino si accorcia. In questo modo la barilottatura aumenta durante il corso della prova.

L'effetto della barilottatura è quello di indurre componenti di tensione biassiali, in un provino che dovrebbe essere testato con tensione uniassiale. Quindi un'attenta analisi deve essere fatta nello scegliere le dimensioni dei provini. Si sceglie spesso un rapporto altezza/diametro di 3 a 2 per minimizzare l'ingobbamento generato dalla non assialità del carico.

A causa dell'aumento della superficie di contatto e del materiale deformato elasticamente vicino alle piastre, la curva carico-deflessione in figura, curva verso l'alto man mano che il provino si accorcia. Si ha un notevole aumento del carico se le regioni deformate elasticamente si sovrappongono.

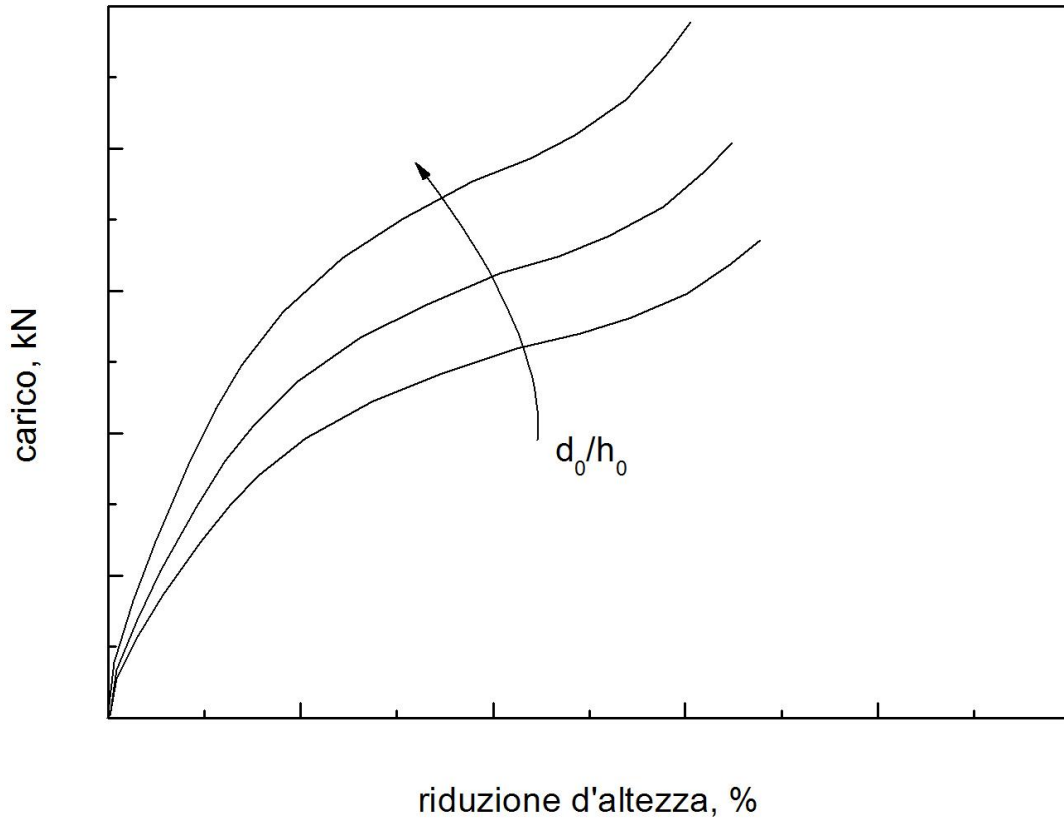


Figura 2.37: relazione carico-spostamento in funzione di diverse geometrie dei provini utilizzati.

Per la presenza delle forze d'attrito, la distribuzione delle pressioni nel provino non è uniforme, ma la sua distribuzione è data da:

$$p = \sigma_0 \exp\left[\left(\frac{2\mu}{h}\right)(r - x)\right] \quad (2.49)$$

dove p è la pressione, σ_0 è lo snervamento, μ il coefficiente d'attrito, r il raggio del cilindro, x la distanza dal centro del cilindro di un determinato punto sull'asse x ed h l'altezza del cilindro.

Il carico necessario per deformare il cilindro può essere stimato moltiplicando la pressione media sul provino per l'area della superficie di contatto. Il carico richiesto per deformare il materiale aumenta notevolmente quando il rapporto diametro/altezza diviene grande ed al crescere del coefficiente di attrito.

Il coefficiente d'attrito deve essere tenuto il più basso possibile per minimizzare il barreling e l'incremento eccessivo dei carichi, lubrificando opportunamente l'interfaccia piastra/provino. Si può usare sulle interfacce dell'olio lubrificante o un film di teflon.

Una procedura alternativa per minimizzare l'effetto dell'attrito è il carico sequenziale del provino. In pratica si applica il carico finché non comincia la deformazione plastica, quindi si toglie il carico, si determinano i cambiamenti dimensionali, si lubrifica di nuovo, si riapplica il carico finché non inizia il flusso plastico. I luoghi dei punti ottenuti si connettono per ottenere la curva tensione-deformazione in figura 2.38.

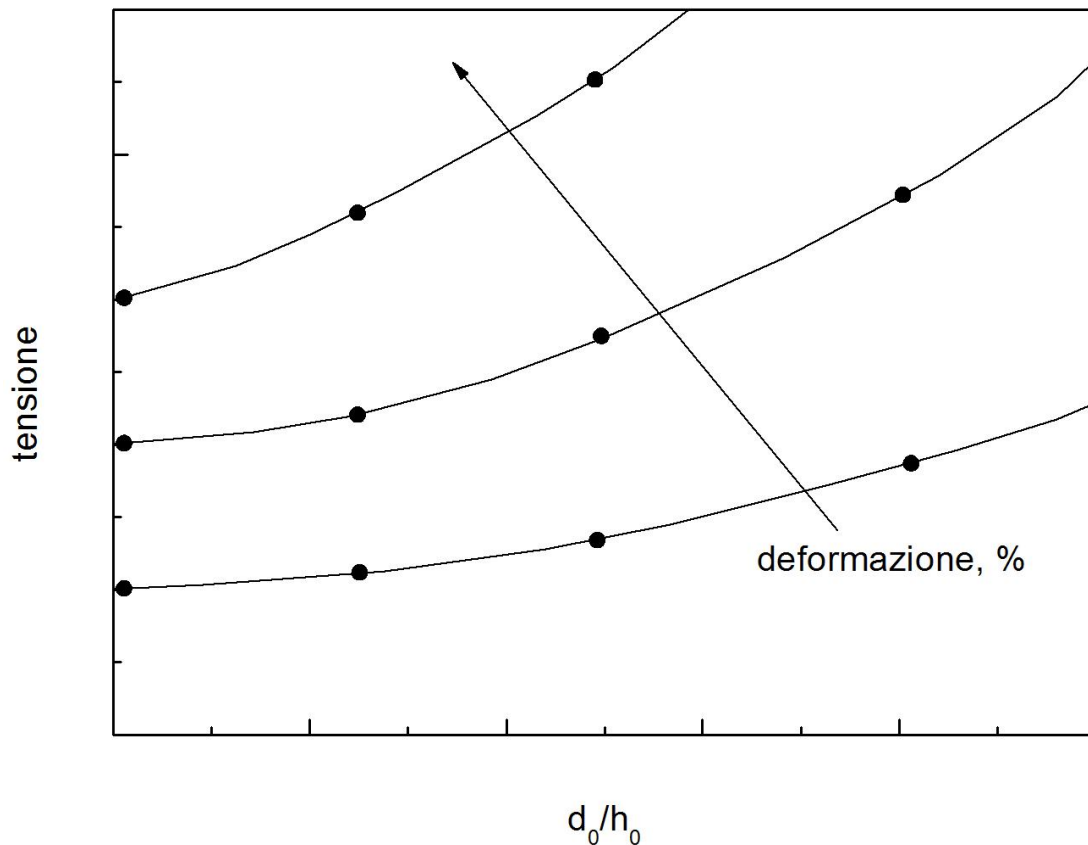


Figura 2.38: legame tensione-deformazione per prove interrotte.

Nelle comuni operazioni di formatura (laminazione, forgiatura ecc.) vi è un piccolo o nessun cambiamento di dimensione in una direzione. Per esempio nella laminazione, la diminuzione di spessore si traduce in gran parte in un aumento di lunghezza con solo un piccolo aumento della larghezza. Un tale stato di deformazione è quindi bidimensionale, ovvero uno stato di deformazione piana. Due situazioni di carico che danno luogo a deformazione piana sono descritte di seguito, una in cui tale stato è indotto da un vincolo esterno sul flusso di materiale e l'altra in cui il vincolo si sviluppa all'interno del materiale. Nella figura 2.39, il metallo può fluire nelle direzioni x ed z a causa di una tensione applicata nella direzione z . Il flusso lungo la direzione y è impedito dalle pareti dello stampo. In figura 2.40, il carico P causa il flusso nelle direzioni z ed y mentre il flusso in direzione x può avvenire se la dimensione x o il rapporto ampiezza/spessore del foglio di metallo è alto. Questo accade perché il materiale che non si trova sotto lo stampo non ha carico imposto, perciò non mostra la tendenza di fluire nelle direzioni x ed y . Quindi questo materiale non sottoposto a carico impedisce il flusso nella direzione x (ma non nella direzione y) del materiale sotto lo stampo. Vi è un flusso netto nella direzione y , perché semplicemente il materiale non caricato è spinto dal materiale che si espande a contatto con lo stampo, per effetto del carico applicato.

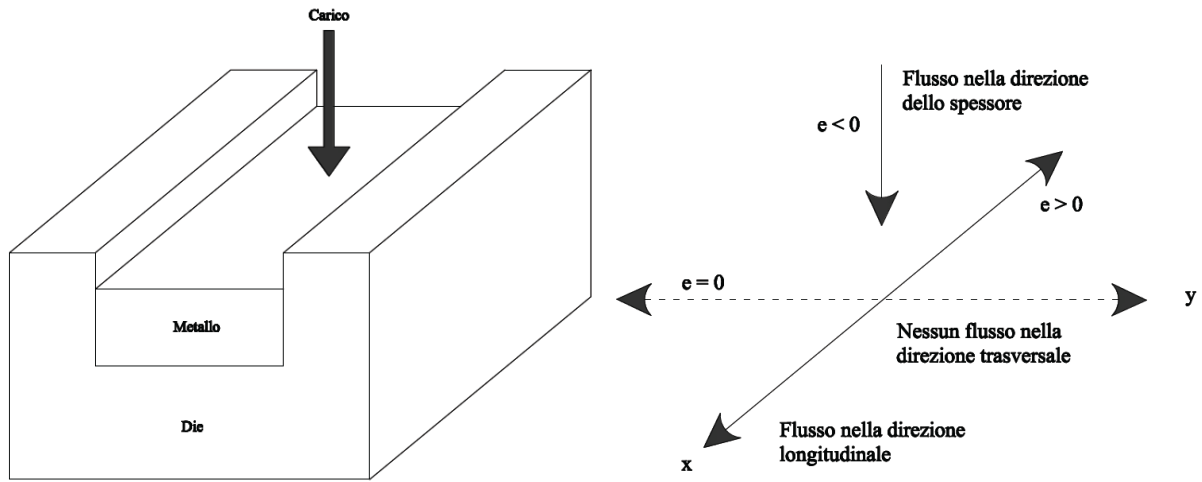


Figura 2.39: compressione in stato di deformazione piano.

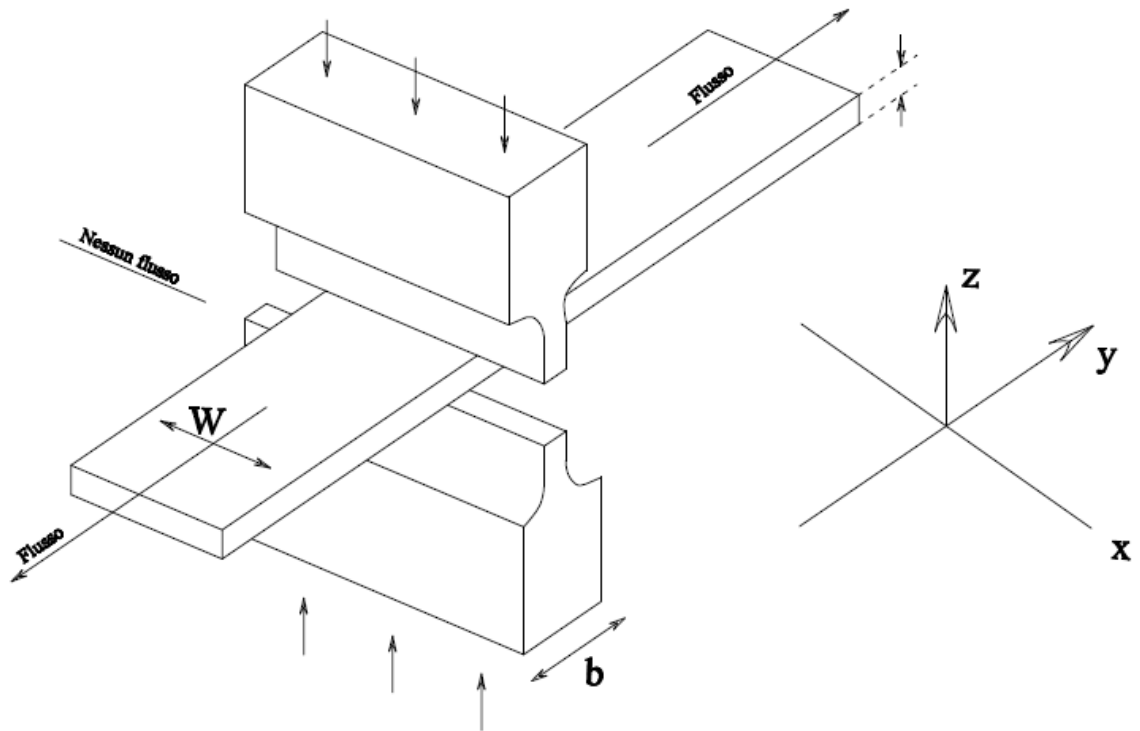


Figura 2.40: compressione in stato di deformazione piano.

La condizione di deformazione piana si realizza quando il rapporto ampiezza/spessore è circa 10 a 1. A causa delle forze d'attrito causate dall'interazione con lo stampo, il rapporto b/t dovrebbe assumere valori compresi tra 2 a 1 e 4 a 1.

Poiché le deformazioni sono elevate, si preferisce calcolare i valori veri di sforzo e deformazione piuttosto che quelli nominali.

I valori di tensione e deformazione, in uno stato di deformazione piana di un test di compressione sono dati da:

$$\sigma_T = \frac{\text{carico}}{\text{area}} = \frac{P}{wb} \quad (2.50)$$

$$\varepsilon_T = \ln(t/t_0) \quad (2.51)$$

Lo sforzo e la deformazione principale sono correlate allo sforzo ed alla deformazione di una prova di compressione uniassiale di un cilindro dalle:

$$\sigma_{\text{deformazione_piana}} = 1.15 \sigma_{\text{compressione_uniassiale}} \quad (2.52)$$

$$\varepsilon_{\text{deformazione_piana}} = 1.15 \varepsilon_{\text{compressione_uniassiale}} \quad (2.53)$$

Perciò sforzi e deformazione misurate in un test di compressione a stato di deformazione piana, devono essere divisi per 1.15 se si vuole costruire una curva equivalente ad uno stato di compressione uniassiale o se semplicemente si vogliono comparare i dati.

Le prove di compressione a caldo costituiscono un ottimo metodo di simulazione delle tensioni e delle deformazioni che si sviluppano durante lavorazioni quali: laminazione a caldo, stampaggio a caldo e stampaggio isoterma. Se il test di compressione a caldo viene utilizzato per la determinazione del “flow stress” è necessario però ridurre al minimo l’imbarellamento del provino e garantire una ottima lubrificazione delle superfici a contatto. Come precedentemente esposto, il fenomeno dell’imbarellamento risulta essere eccessivo per quei provini cilindrici in cui il rapporto tra l’altezza ed il diametro supera il valore di 2/3; in tali casi si generano all’interno del provino stati di deformazione disomogenea caratterizzati da zone debolmente deformate, adiacenti ai piatti della macchina di compressione, e zone estremamente deformate, lungo le diagonali che congiungono gli spigoli della sezione .

La velocità di deformazione reale, durante una prova di compressione a caldo viene calcolata come:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{-\frac{dh}{h}}{dt} = -\frac{1}{h} \frac{dh}{dt} = -\frac{v}{h} \quad (2.54)$$

dove v è la velocità dei piattelli , h è l’altezza del provino al tempo t . Dato che h diminuisce continuamente con il tempo, la velocità deve diminuire proporzionalmente a $(-h)$ se si vuole

ottenere una prova a velocità di deformazione costante. In un test normale, se v risulta costante la velocità di deformazione ingegneristica rimane costante:

$$\dot{\epsilon} = \frac{de}{dt} = \frac{-\frac{dh}{h_0}}{dt} = -\frac{1}{h_0} \frac{dh}{dt} = \frac{-v}{h_0} \quad (2.55)$$

dove h_0 è l'altezza iniziale.

La determinazione delle tensioni di flusso può essere effettuata mediante prove di compressione a caldo solo in condizioni di prova isoterma, con velocità di deformazione costante e con il minimo coefficiente d'attrito onde minimizzare il fenomeno dell'imbarrellamento. Durante una prova di compressione un cilindro di diametro D_0 e lunghezza iniziale h_0 può essere compresso fino ad una altezza h ed un diametro D , per la legge della conservazione del volume si ha:

$$D_0^2 h_0 = D^2 h \quad (2.56)$$

se l'effetto dell'attrito può essere trascurato, la tensione monoassiale di compressione (flow stress) corrispondente alla forza di pressione P , può essere espressa come:

$$\sigma_0 = \frac{P}{A} = \frac{4P}{\pi D^2} = \frac{4Ph}{\pi D_0^2 h_0} \quad (2.57)$$

se si tiene conto dell'attrito la tensione reale risulta:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_0}{1 + \frac{\mu D_0}{3\sqrt{3}h_0} \left(\exp \bar{\epsilon} \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (2.58)$$

dove il valore della deformazione reale viene valutato come:

$$\bar{\epsilon} = \ln \frac{h_0}{h} \quad (2.59)$$

La prova di torsione

La prova di torsione non ha la stessa risonanza ed utilizzo del test di trazione. Risulta comunque utile in molte applicazioni ingegneristiche e negli studi teorici sul flusso plastico. La prova di torsione viene effettuato sui materiali per determinare proprietà come il modulo elastico a taglio, lo snervamento torsionale, il modulo di rottura. Le prove di torsione possono essere condotti direttamente su componenti meccanici come alberi, assi, trivelle ed in generale parti di macchina che sono soggette a carichi torsionali in servizio. Tale prova è spesso condotta per testare i materiali fragili e se condotto ad elevate temperatura permette di valutare la forgiabilità dei materiali. La prova di torsione non è stato standardizzato nella stessa misura del test di trazione ed è raramente richiesto nelle specifiche del materiale.

Si consideri una barra cilindrica soggetta a momento torcente ad una estremità (figura 2.41).

Il momento è bilanciato dallo sforzo di taglio indotto nella sezione trasversale della barra. Lo sforzo di taglio vale zero al centro della barra, ed aumenta linearmente con il raggio.

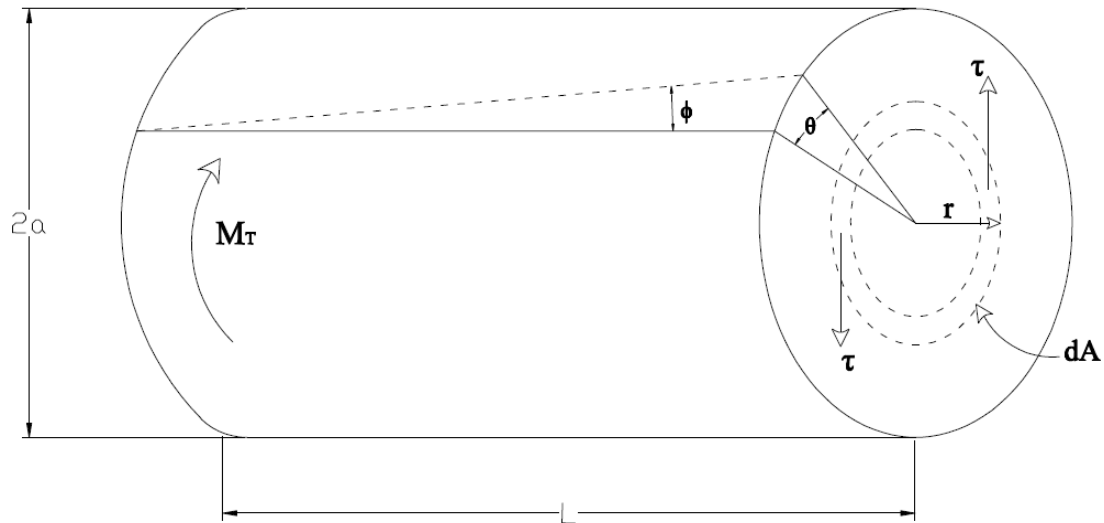


Figura 2.41: barra sottoposta a torsione.

Uguagliando il momento torcente al momento resistente interno:

$$M_T = \int_{r=0}^{r=a} \tau r dA = \frac{\tau}{r} \int_0^a r^2 dA = \frac{\tau}{r} J \quad (2.60)$$

con J momento polare di inerzia dell'area rispetto all'asse della barra. Quindi segue che:

$$\tau = \frac{M_T r}{J} \quad (2.61)$$

dove τ = sforzo di taglio, Pa

M_T = momento torcente, Nm

r = distanza radiale misurata dal centro della barra, m

J = momento polare di inerzia, m⁴

Poiché la tensione di taglio è massima sulla superficie della barra, per un provino solido cilindrico in cui $J = \pi D^4 / 32$, il massimo sforzo di taglio vale:

$$\tau_{\max} = \frac{M_T D / 2}{\pi D^4 / 32} = \frac{16 M_T}{\pi D^3} \quad (2.62)$$

Per provini tubolari la tensione di taglio sulla superficie esterna vale:

$$\tau = \frac{16M_T D_1}{\pi(D_1^4 - D_2^4)} \quad (2.63)$$

dove D_1 = diametro esterno del tubo; D_2 = diametro interno del tubo.

Sia θ l'angolo di rotazione espresso in radianti e misurato con un troptometro, L la lunghezza del provino, dalla figura 2.42 si osserva che la deformazione di taglio è data da:

$$\gamma = \tan \phi = \frac{r\theta}{L} \quad (2.64)$$

Durante il test di torsione le quantità misurate sono il momento torcente M_T e l'angolo di torsione θ . Dai valori di tali grandezze si ottiene il diagramma momento-rotazione.

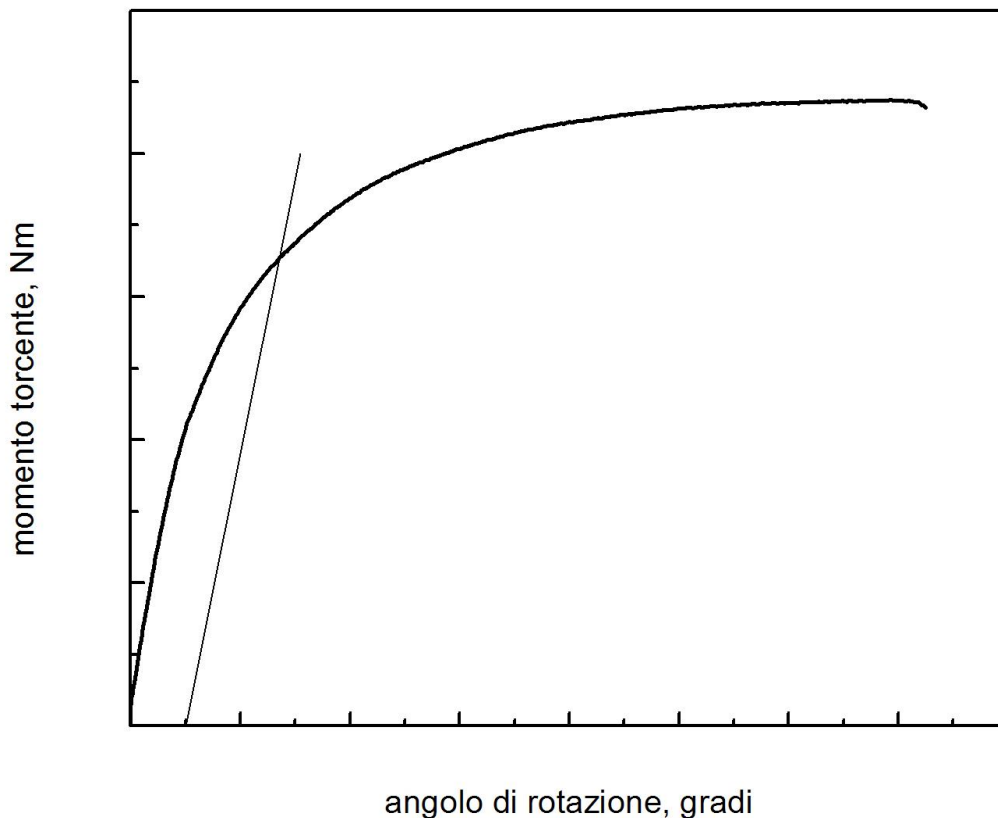


Figura 2.42: tipica curva momento torcente-rotazione.

Le proprietà elastiche torsionali possono essere ottenute utilizzando la coppia di torsione al limite di proporzionalità o la coppia di torsione corrispondente ad un determinato valore di offset angolare, di solito 0.04 rad m^{-1} con riferimento al tratto utile. Quindi si calcola la tensione di taglio corrispondente al valore del momento torcente con le equazioni precedentemente espresse.

Di solito per una misurazione precisa del limite elastico torsionale o dello snervamento si utilizza un provino tubolare. Perché a causa del gradiente di tensione lungo il diametro di una barra piena, lo snervamento delle fibre superficiali è impedito dalle fibre interne meno sollecitate. Perciò il

primo grado di snervamento non è prontamente rilevato dagli strumenti di misura ordinari. L'utilizzo di provini tubolari a parete sottile minimizza tale effetto in quanto praticamente elimina il gradiente di tensione.

Ovviamente lo spessore di parete non deve essere troppo sottile per evitare che il provino si rompa per inarcamento piuttosto che per torsione. L'esperienza ha mostrato che per determinare le caratteristiche torsionali, il rapporto fra lunghezza della sezione ridotta per il test ed il diametro esterno dovrebbe essere pari a 10, ed il rapporto diametro/spessore dovrebbe essere da 8 a 10. Superato il valore dello snervamento torsionale la distribuzione dello sforzo di taglio dal centro alla superficie non è più lineare quindi le equazioni 3 e 4 non sono propriamente applicabili. Comunque il valore del modulo di rottura (resistenza torsionale a taglio ultima) spesso si determina sostituendo il valore massimo misurato del momento torcente in queste equazioni. In tale maniera però si tende a sovrastimare lo sforzo di taglio ultimo. Sebbene la procedura espressa finora sia affetta da un errore considerevole, è comunque generalmente accurata per gli scopi di comparazione e selezione dei materiali. Per la determinazione del modulo di rottura con un provino tubolare, il rapporto della lunghezza del tratto utile con il diametro deve essere circa 0.5 ed il rapporto diametro-spessore da 10 a 12. In regime elastico lo sforzo di taglio può essere considerato proporzionale alla deformazione di taglio. La costante di proporzionalità G è detta *modulo di elasticità a taglio* o *modulo di rigidità*:

$$\tau = G\gamma \quad (2.65)$$

Sostituendo l'equazione 2.61 e 2.64 nell'equazione 2.65 si ottiene per G l'espressione:

$$G = \frac{M_T L}{J\theta} \quad (2.66)$$

Oltre il valore di snervamento torsionale la tensione di taglio sulla sezione trasversale della barra non è più una funzione lineare della distanza dall'asse e le equazioni 3 e 4 non si applicano.

Nadai ha presentato un metodo per calcolare la tensione di taglio nel range plastico, nota la curva coppia torcente-angolo di rotazione.

Se si considera l'angolo di rotazione per unità di lunghezza $\theta' = \theta/L$ l'espressione della deformazione dell'equazione 2.64 diventa:

$$\gamma = r\theta' \quad (2.67)$$

L'equazione 2.60, per il momento resistente nella sezione resistente della barra, può essere espressa come segue:

$$M_T = 2\pi \int_0^a r^2 dr \quad (2.68)$$

Dalla trattazione analitica, considerando che il massimo valore della tensione di taglio nella barra si ottiene sulla fibra esterna, se si indica tale valore con τ_a segue:

$$\tau_a = \frac{1}{2\pi a^3} \left(\theta' \frac{dM_T}{d\theta'} + 3M_T \right) \quad (2.68)$$

Se si ha la curva *coppia torcente-angolo di rotazione*, la tensione di taglio può essere calcolata con l'equazione 2.68. La figura 2.43 lato mostra in che modo può essere fatto. L'equazione 2.68 può essere scritta in termini geometrici con l'ausilio della figura.

$$\tau_a = \frac{1}{2\pi a^3}(BC + 3CD) \quad (2.69)$$

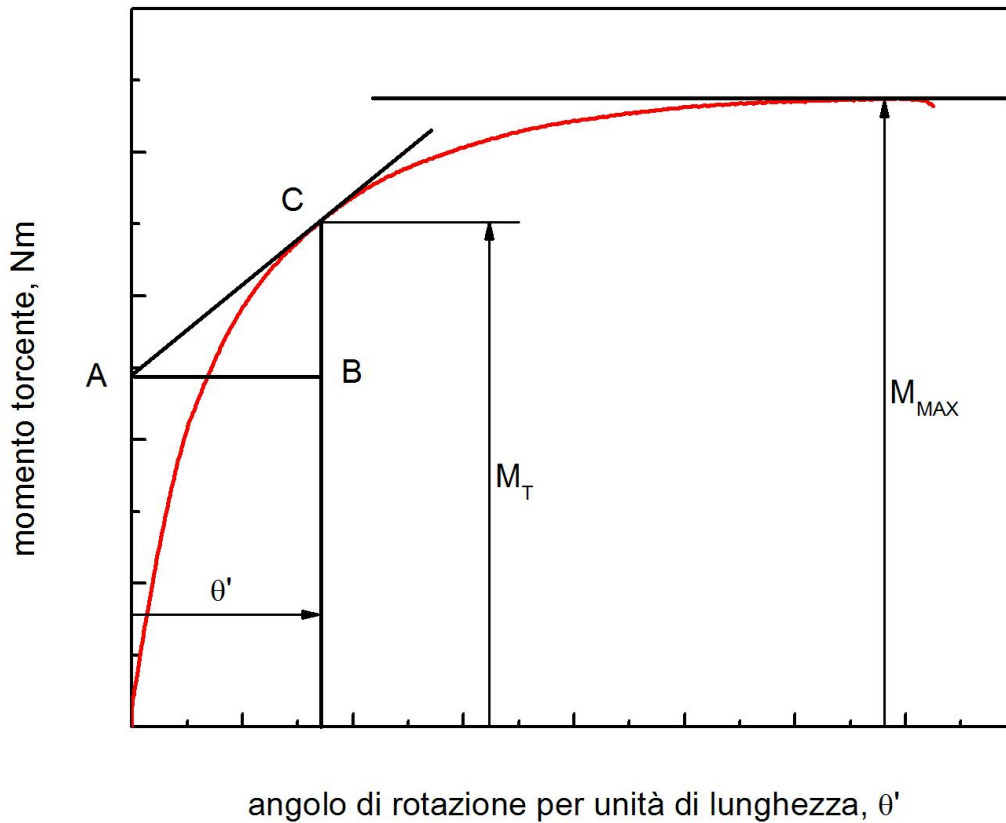


Figura 2.43: calcolo dei parametri meccanici dalla curva di torsione.

Inoltre si osserva dalla figura precedente che al massimo valore del momento $dM_T/d\theta' = 0$. Perciò, la *resistenza torsionale ultima* o *modulo di rottura*, può essere espressa da:

$$\tau_u = \frac{3M_{\max}}{2\pi a^3} \quad (2.70)$$

Le elevate deformazioni plastiche nella torsione risultano in una considerevole variazione di lunghezza del provino. Se entrambe le estremità del provino sono fissate, queste variazioni di lunghezza portano ad una sovrapposizione di tensione longitudinale di entità non nota alla tensione di taglio torsionale. Sebbene questa tensione longitudinale sia piccola rispetto alla tensione di taglio indotta dalla torsione e possa quindi essere trascurata, essa può influenzare la deformazione a rottura. Gli effetti degli allungamenti possono essere eliminati o minimizzati utilizzando macchine di prova in cui un'estremità del provino sia libera di muoversi.

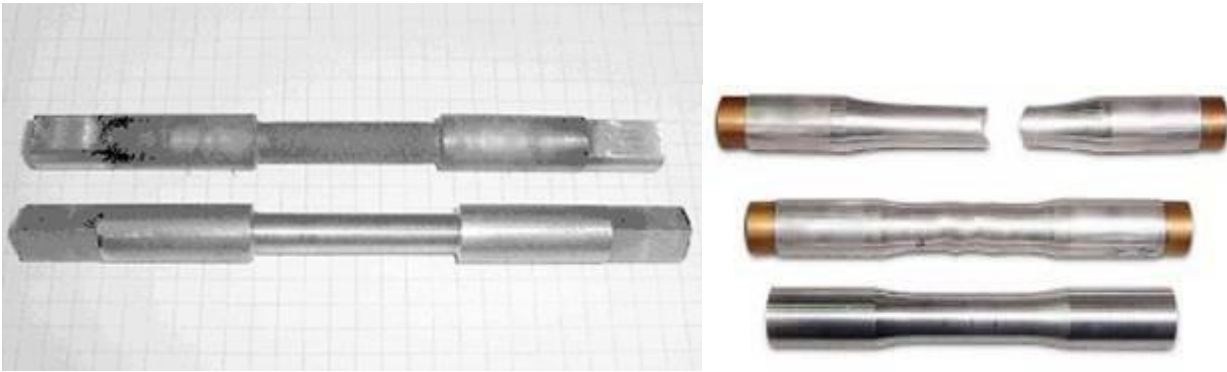


Figura 2.44: tipica geometria di provini di torsione.

La figura 2.45 lato mostra lo stato tensionale in un punto della superficie di una barra sottoposta a torsione. La massima tensione di taglio si ha su due piani mutuamente perpendicolari, il piano yy perpendicolare all'asse longitudinale ed il piano xx parallelo all'asse longitudinale. Le tensioni principali σ_1 e σ_3 formano un angolo di 45° con l'asse longitudinale ed hanno lo stesso valore della tensione di taglio. La tensione σ_1 è di trazione e la σ_3 è di compressione. La tensione intermedia σ_2 è nulla.

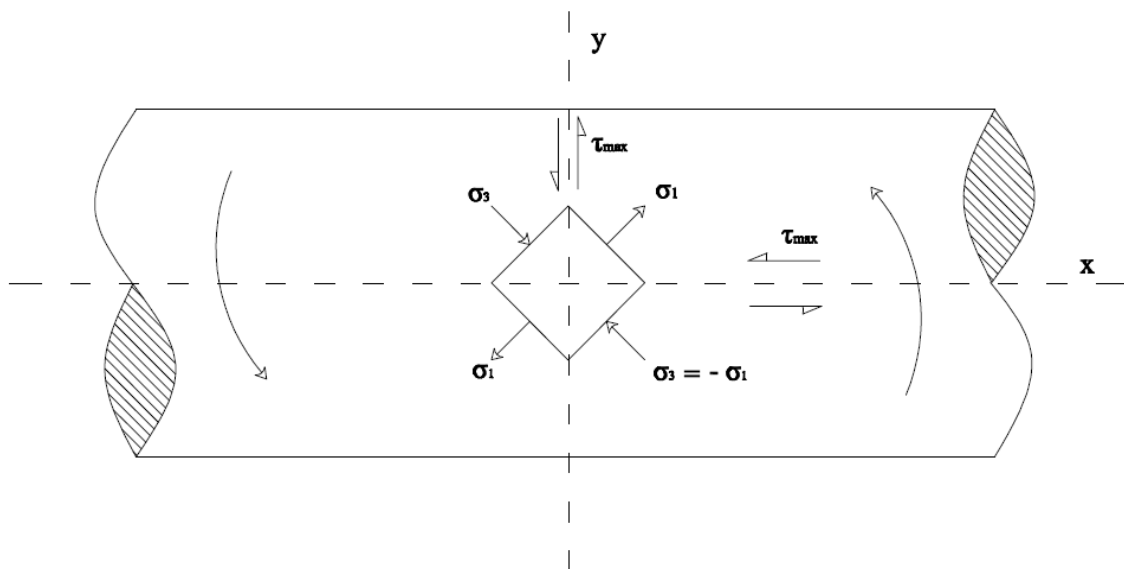


Figura 2.45: stato tensionale generato in una barra sottoposta a torsione.

Le rotture per torsione sono differenti dalle rotture per trazione. Un metallo duttile si rompe a taglio lungo uno dei piani di massima tensione tangenziale. In generale il piano di frattura è normale all'asse longitudinale (figura 2.46 sinistra). Un materiale fragile si rompe a torsione lungo un piano perpendicolare alla direzione di massima tensione di trazione. Poiché questo piano biseca l'angolo compreso tra i due piani di massima tensione tangenziale e forma un angolo di 45° con le direzioni trasversali e longitudinali, la tipologia di frattura risultante è ad elica (figura 2.46 destra).



Figura 2.46: modalità di rottura a torsione, duttile (sinistra), fragile (destra).

Qualche volta si osservano fratture in cui il provino si frammenta. In questi casi si può asserire che la frattura inizia su un piano di massima tensione tangenziale parallelo all'asse del provino. Uno studio delle rotture per torsione in acciai da utensili in funzione della durezza, ha mostrato che la frattura si origina sui piani di massima tensione tangenziale fino a valori di durezza Vickers di 720 ed al di sopra di tale valore sono responsabili dell'inizio della frattura le componenti tensionali di trazione.

La prova di torsione misura molto meglio le caratteristiche plastiche del materiale rispetto al test di trazione, in quanto fornisce direttamente la curva tensione di taglio-deformazione di taglio che meglio si presta ad uno studio del comportamento plastico del materiale rispetto alla curva di trazione. Nella prova di torsione si possono ottenere elevati valori di deformazione senza le complicazioni dovute alla strizione tipiche di una prova di trazione. Una prova di torsione può essere condotta più semplicemente ad alte velocità di deformazione. A meno di utilizzare un provino tubolare, vi è un gradiente tensionale lungo la sezione trasversale del provino. Tale gradiente rende difficile misurare in maniera accurata la tensione di snervamento.

La comparazione tra le due prove dal punto di vista degli stati tensionali e deformativi è riportata di seguito.

Prova di trazione

$$\sigma_1 = \sigma_{\max}; \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{\sigma_{\max}}{2}$$

$$\varepsilon_{\max} = \varepsilon_1; \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\frac{\varepsilon_1}{2}$$

$$\gamma_{\max} = \frac{3\varepsilon_1}{2}$$

Prova di torsione

$$\sigma_1 = -\sigma_3; \sigma_2 = 0$$

$$\tau_{\max} = \frac{2\sigma_1}{2} = \sigma_{\max}$$

$$\varepsilon_{\max} = \varepsilon_1 = -\varepsilon_3; \varepsilon_2 = 0$$

$$\gamma_{\max} = \varepsilon_1 - \varepsilon_3 = 2\varepsilon_1$$

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

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{2} [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$\bar{\sigma} = \sigma_1$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{3}\sigma_1$$

$$\bar{\varepsilon} = \sigma_1$$

$$\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_1 = \frac{\gamma}{\sqrt{3}}$$

Questo confronto mostra che τ_{max} per un dato valore di σ_{max} nella torsione è doppio rispetto al valore di trazione. Poiché in prima approssimazione si può considerare che la deformazione plastica avvenga al raggiungimento del valore critico di τ_{max} e la frattura fragile avvenga al valore critico di σ_{max} , la possibilità di una frattura duttile è maggiore nella torsione piuttosto che nella trazione. Ciò è schematizzato nella figura 2.47, che può essere considerata rappresentativa delle condizioni di un materiale fragile come ad esempio un acciaio da utensili indurito.

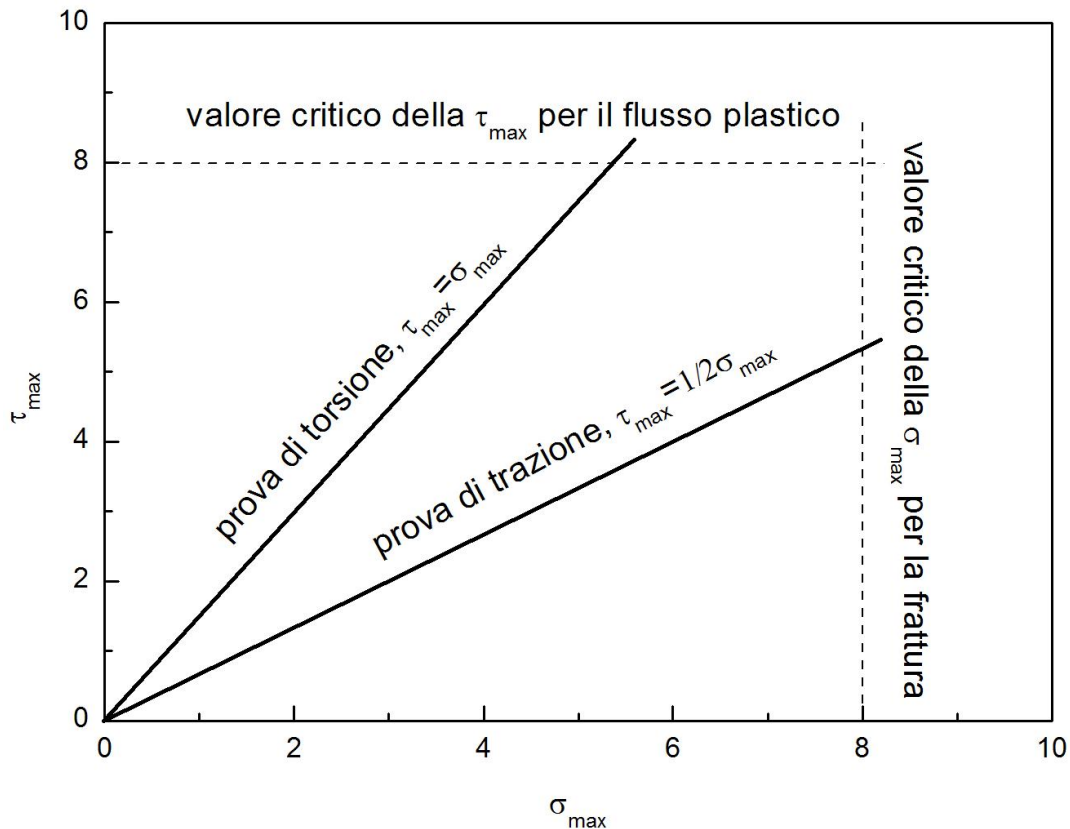


Figura 2.47: differenza nel flusso plastico in torsione e in trazione.

Nella prova di torsione la tensione di taglio critica per il flusso plastico si raggiunge prima rispetto allo sforzo normale critico per la frattura, mentre nella trazione lo sforzo normale critico per la frattura si raggiunge prima che la tensione di taglio raggiunga il valore critico per il flusso plastico. Persino per un metallo duttile a trazione la quota di deformazione plastica è maggiore nella torsione che nella trazione.

La prova di torsione viene spesso usata per ottenere dati sulle proprietà di flusso e sulla frattura dei metalli in condizioni di lavorazioni a caldo, ovvero a temperatura $T > 0.6 T_m$ (T_m è la temperatura di fusione) e a velocità di deformazione fino a 10^3 s^{-1} . Poiché è molto semplice variare e controllare la velocità di rotazione, le prove possono essere in un intervallo ampio di velocità di deformazione. Inoltre controllando la temperatura e la velocità di deformazione è possibile simulare le strutture metallurgiche prodotte in processi multi passata come ad esempio la laminazione. Non essendo il

provino soggetto a strizione come nella trazione, è possibile condurre prove con deformazioni plastiche elevate.

La figura 2.48 mostra una tipica curva ottenuta dalla prova di torsione a caldo. La curva più alta (700 K) è tipica delle condizioni di una lavorazione essenzialmente a freddo in cui la coppia torcente aumenta continuamente sino a rottura. La curva più bassa (1255 K) è caratteristica di una deformazione a caldo. Si osserva un picco della tensione di flusso ad un valore di deformazione plastica relativamente piccolo, quindi diminuisce leggermente e si mantiene quasi costante fino alla frattura che avviene ad elevati valori di deformazione plastica. La curva a 1144 K è invece caratteristica delle condizioni di deformazione di una lavorazione a tiepido.

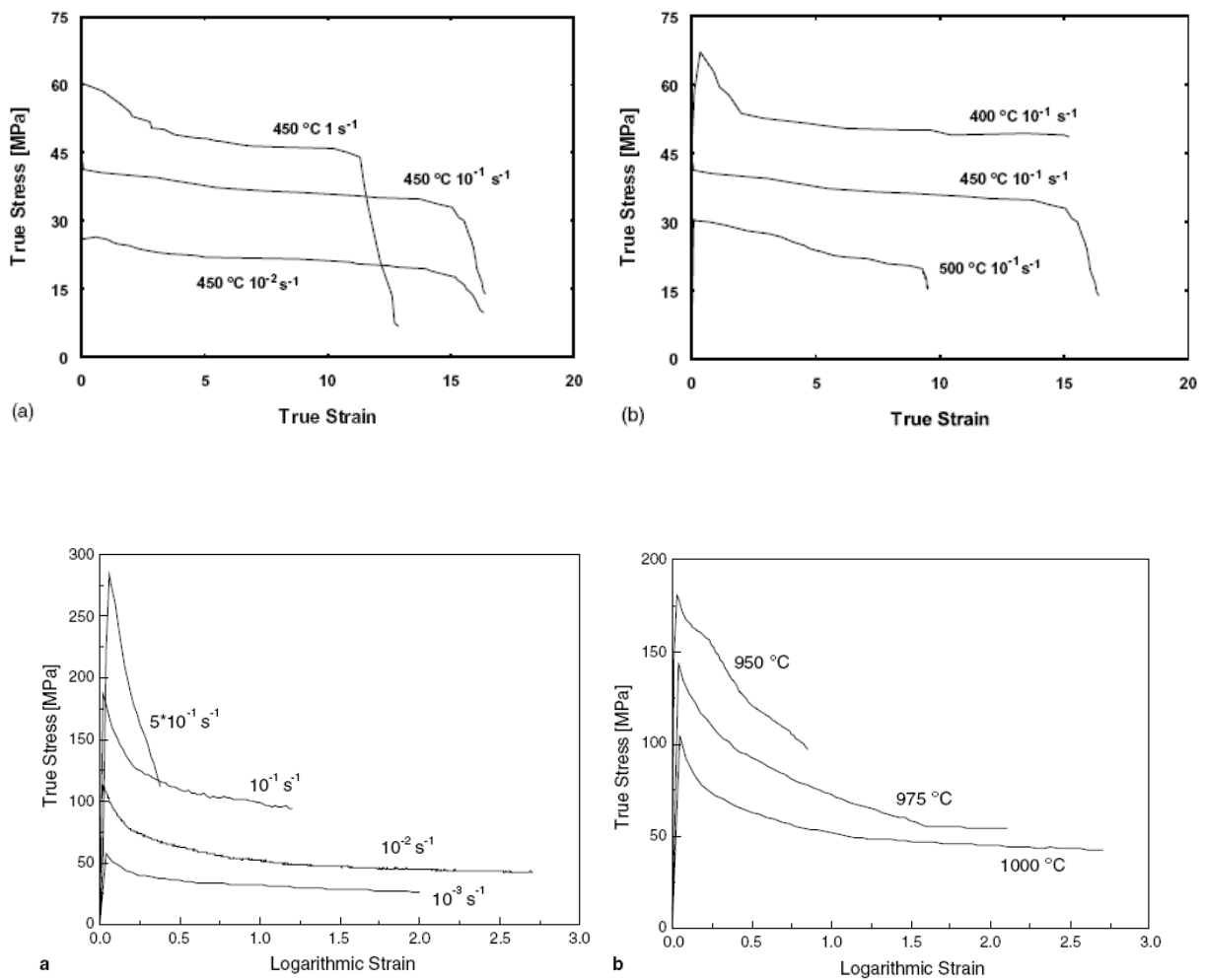


Figura 2.48: tipiche curve di torsione per una lega di alluminio (sopra) e titanio (sotto) condotte a differenti temperature e velocità di deformazione.

L'analisi discussa in precedenza richiede delle variazioni nel caso della torsione a caldo poiché si assume che la tensione è indipendente dalla velocità di deformazione. Un'analisi che considera una forte dipendenza dalla velocità di deformazione della tensione di flusso ad elevate temperature è stata proposta da Fields e Backofen.

La relazione risultante è:

$$\frac{dM_T}{d\theta'} = \frac{M_T}{\theta'} (m+n) \quad (2.71)$$

dove m è la sensibilità alla velocità di deformazione ed n è l'esponente di incrudimento. Ai valori di temperatura tipici delle lavorazioni a caldo $m \gg n$. Sostituendo l'espressione sopra nell'equazione 2.68:

$$\tau_a = \frac{M_T}{2\pi\alpha^3} (3+m+n) \quad (2.72)$$

