

# Prerequisiti

## Disegno tecnico

- Regole del disegno tecnico e della quotatura

## Fisica

- Fenomeni di trasporto (calore, materia, ecc.)

## Scienza delle costruzioni

## Scienza e tecnologia dei materiali

- Struttura e difetti della materia (es.: dislocazioni, ecc.)
- Teoria della deformazione e fenomeni correlati

# Introduzione

## Generalità

### Introduzione

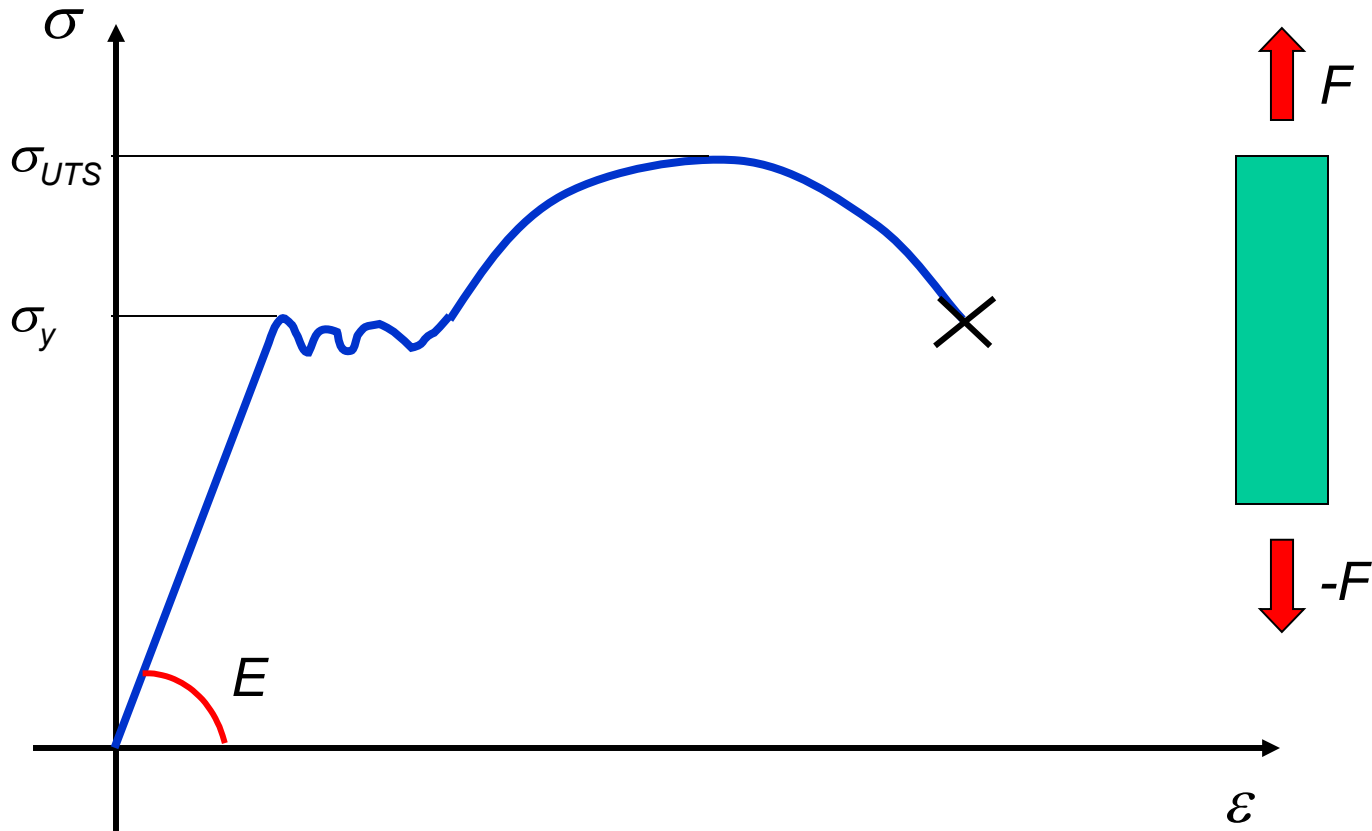
Le lavorazioni per deformazione plastica, effettuate allo stato solido hanno le seguenti caratteristiche peculiari:

- ✓ Sfruttano la caratteristica tipica dei materiali metallici di poter subire deformazioni permanenti se sottoposti a sollecitazioni meccaniche di sufficiente intensità, senza che intervengano fenomeni di frattura.
- ✓ La libertà nella scelta delle forme ottenibili è limitata rispetto a quella dei procedimenti per fusione.
- ✓ Il grado di deformazione massimo ottenibile è funzione del tipo di materiale lavorato e della temperatura di lavorazione.
- ✓ Agendo in maniera opportuna sui parametri di processo è possibile variare le caratteristiche meccaniche del prodotto ottenuto (effetto memoria)

# Sforzo e deformazione

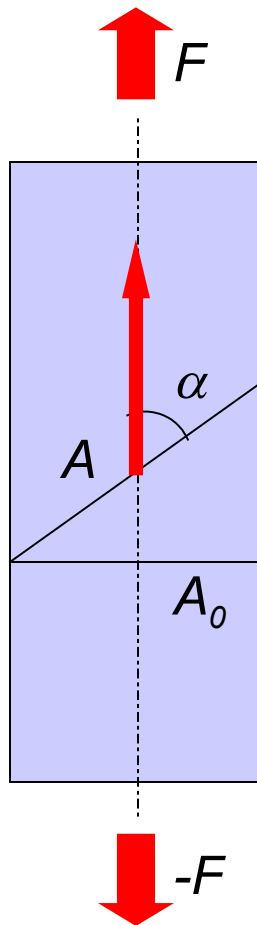
## Prova di trazione

La prova di trazione uniassiale è un ben noto caso di deformazione plastica di un materiale.



# Sforzo e deformazione

In un monocristallo il moto delle dislocazioni si ha quando la tensione tangenziale risolta supera un valore critico. Quest'ultimo dipende dal sistema di scorrimento considerato.



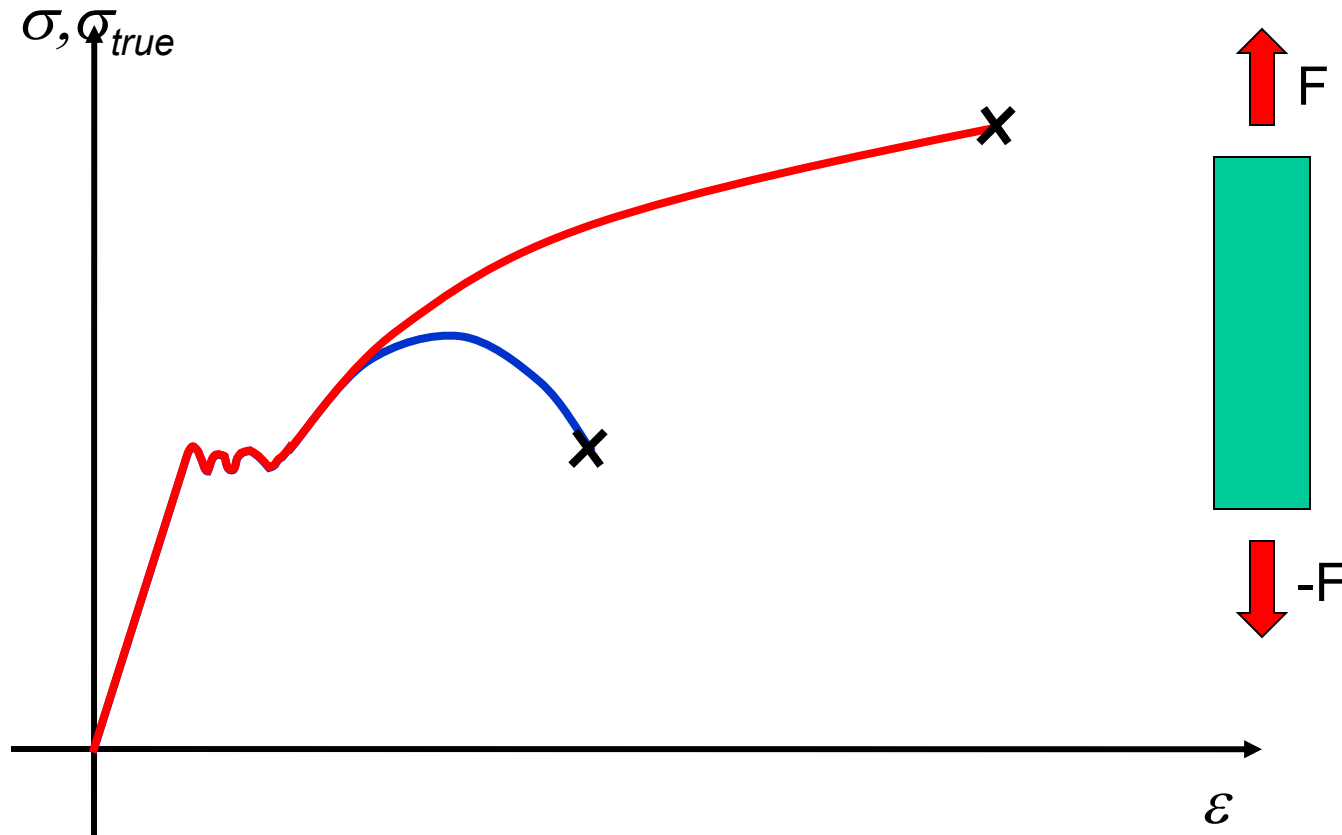
$$\tau = \frac{F \cdot \cos(\alpha)}{A} = \frac{F \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\alpha)}{A_0} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \tau = \frac{\sigma}{2} \cdot \sin(2 \cdot \alpha)$$

$$\max(\tau) \leftrightarrow \alpha = \frac{\pi}{4}$$

# Sforzo e deformazione

Per studiare i processi di deformazione plastica è spesso conveniente riferirsi ai valori di true-stress / true-strain.



# Sforzo e deformazione

Tali valori sono dati dalle seguenti relazioni:

$$\sigma_{true} = \frac{F}{A_{true}}$$

$$\varepsilon_{true} = \int_{L_0}^L \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right)$$

$$\varepsilon_{true} = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right)$$

L'ultima espressione può essere facilmente ricavata supponendo costante il volume del materiale interessato.

# Sforzo e deformazione

E' necessario a questo punto distinguere tra deformazione a freddo e deformazione a caldo.

## Deformazione a freddo

Nel caso di materiali monocristallini la deformazione plastica a freddo può essere spiegata e modellizzata utilizzando la ben nota teoria delle dislocazioni.

Nel caso, più comune, di materiali policristallini, il moto delle dislocazioni ha inizio nei grani i cui piani cristallografici siano favorevolmente orientati rispetto alla forza agente.

Si tenga presente, tuttavia, che la presenza di altri grani circostanti, orientati meno favorevolmente, può parzialmente inibire tali deformazioni.

Durante la deformazioni la densità delle dislocazioni aumenta notevolmente e così pure le interazioni tra i campi di stress generati dalla presenza delle dislocazioni stesse e tra tali campi di stress ed altri difetti presenti nel materiale (bordi di grano, precipitati, ecc.).

Tale fenomeno conduce al fatto che, in una prova di trazione uniassiale, lo stress tende ad aumentare nel campo delle deformazioni plastiche anziché risultare costante come in un fluido viscoso.

# Sforzo e deformazione

Le conseguenze della deformazione a freddo, e quindi dell'incrudimento, sono:

- ✓ Aumento della resistenza a trazione
- ✓ Aumento del limite di snervamento  $\Rightarrow$  OK caratteristiche manufatto
- ✓ Diminuzione della duttilità  $\Rightarrow$  Limite alla deformazione massima possibile

Per attenuare o eliminare gli effetti dell'incrudimento possono essere effettuati opportuni trattamenti termici: se l'energia termica fornita al materiale è sufficiente, esso può **ricristallizzare**. In tal caso si riforma una struttura non incrudita ed, in genere, a grano più fine rispetto a quella di partenza.

Tale processo, detto **ricristallizzazione statica**, può avvenire solo se la temperatura supera un valore critico detto **temperatura di ricristallizzazione**.



# Sforzo e deformazione

## Deformazione a caldo

Si ha, per definizione, quando il materiale viene deformato ad una temperatura superiore a quella critica di ricristallizzazione.

Il materiale, in queste condizioni, può ricristallizzare dinamicamente: in questo caso la densità delle dislocazioni può rimanere bassa.

L'equilibrio tra incrudimento ed addolcimento del materiale è governato essenzialmente da due fattori:

- Temperatura
- Velocità di deformazione ( $d\varepsilon/dt$ )

Ciò comporta la possibilità di ottenere, operando in condizioni opportune, anche valori elevati della deformazione complessiva.

# Sforzo e deformazione

## Classificazione delle lavorazioni

In base a quanto detto le lavorazioni per deformazione plastica possono essere classificate in:

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

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

# Sforzo e deformazione

## Modello per la deformazione a freddo

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

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

$K$  ed  $n$  sono tabellati per diversi materiali e diverse temperature ( $\ll T_{rixx}$ )

Note:

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

# Sforzo e deformazione

## Modello per la deformazione a caldo

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

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

$C$  ed  $m$  dipendono da materiale e temperatura e si trovano tabellati.

Viene aggiunto un pedice “ $f$ ” ad indicare il termine *flow stress*.

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

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

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

# Sforzo e deformazione

## Criteri di plasticità

Nel caso più generale in cui tutte le componenti del tensore di sforzo siano non nulle, è possibile individuare una terna di assi tale che il tensore sforzo riferito a tale terna ha solo le componenti di sforzo normale ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) non nulle (direzioni principali  $\Rightarrow$  tensioni principali). Se  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  sono la massima e la minima tra le tensioni principali, il valore massimo della tensione tangenziale risolta sarà:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

Nello studio della deformazione plastica interessa stabilire i valori dei carichi esterni applicati necessari per provocare l'insorgenza di fenomeni di deformazione plastica. Mentre nel caso della tensione uniassiale (prova di trazione) si può ritenere valido, come criterio, il raggiungimento di una tensione pari al limite di snervamento del materiale, in un caso più generale bisogna adottare criteri adeguati.

# Sforzo e deformazione

Nelle ipotesi che:

- ✓ La componente idrostatica non influenzi la plasticizzazione
- ✓ Il materiale sia omogeneo ed isotropo
- ✓ Il volume possa ritenersi costante durante la deformazione

Si può adottare il criterio di Tresca:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = C$$

C può essere valutata considerando che, nel caso di tensione uniassiale si ha  $\sigma_3=0$ , per cui:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_{yield} - 0}{2} = C \Rightarrow C = \frac{\sigma_{yield}}{2}$$

Altro criterio molto usato è quello energetico di Von Mises.

# Sforzo e deformazione

## Lavoro di deformazione

Nel caso della deformazione provocata da tensione uniassiale l'espressione per il lavoro specifico è la seguente:

$$W = \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon') \cdot d\varepsilon'$$

L'integrale può essere valutato introducendo, ad esempio, il legame già visto tra  $\sigma$  ed  $\varepsilon$  nella deformazione a freddo. Si ottiene, in tal caso:

$$W = K \frac{\varepsilon^{n+1}}{n+1}$$

Il flow stress medio sarà allora:

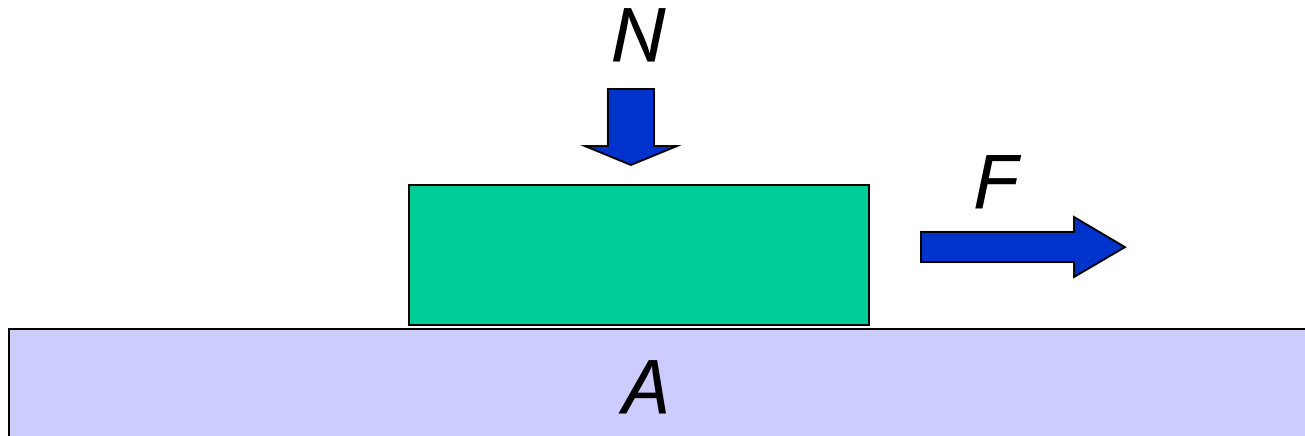
$$\bar{\sigma}_f = \frac{W}{\varepsilon} = K \frac{\varepsilon^n}{n+1}$$

# Attrito

## Attrito

Le forze d'attrito che si sviluppano nel contatto radente tra materiale in lavorazione ed utensile possono essere descritte mediante il coefficiente di attrito dinamico:

$$\mu_d = \frac{F}{N} = \frac{F/A}{N/A} = \frac{\tau}{p}$$





# Attrito

Se  $\tau$  raggiunge, all'interfaccia di un determinato sistema, in conseguenza di fenomeni d'attrito, il valore di plasticizzazione  $\tau_{max}$  (vedi criteri di plasticizzazione), si dice che il materiale "aderisce" alla superficie in quanto, localmente, non si muove più rispetto ad essa (in ciò favorito dal fatto che il coefficiente d'attrito statico –o di primo distacco- è generalmente più alto di quello dinamico).

Si parla, in questo caso, di **attrito adesivo**.

Talvolta il valore di  $\tau$  viene espresso come frazione della tensione tangenziale di snervamento (in un materiale il massimo sforzo generabile è quello di snervamento):

$$\tau = m^* \cdot \tau_{max}$$

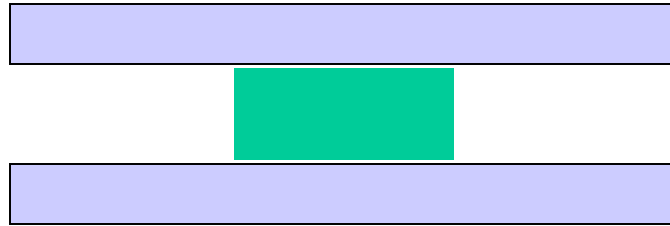
$$0 < m^* < 1$$

Il valore di  $m^*$  dipende essenzialmente dalla coppia di materiali considerati, dalla temperatura e dal tipo di lubrificazione adottata.

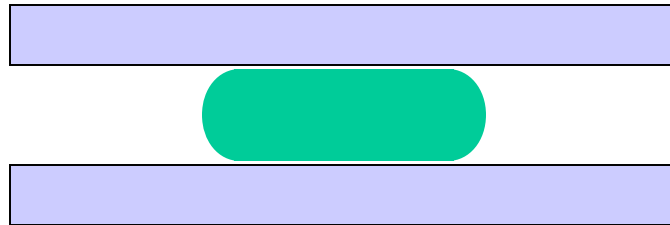
# Forgiatura

Tre casi a confronto:

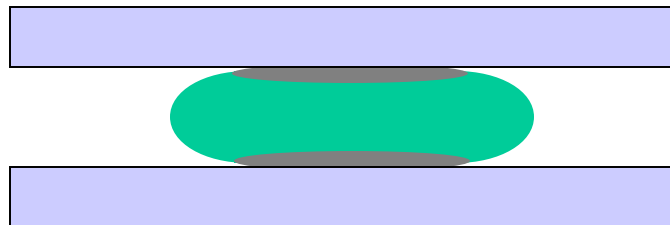
$m^*=0$



$m^*=0.5$



$m^*=1$

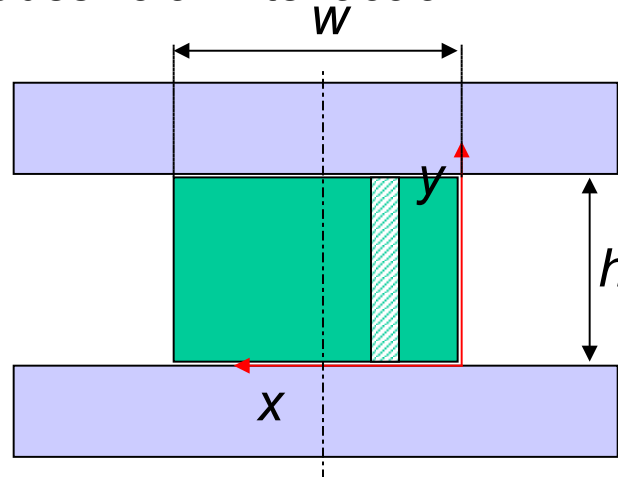


# Forgiatura

## Slab analysis

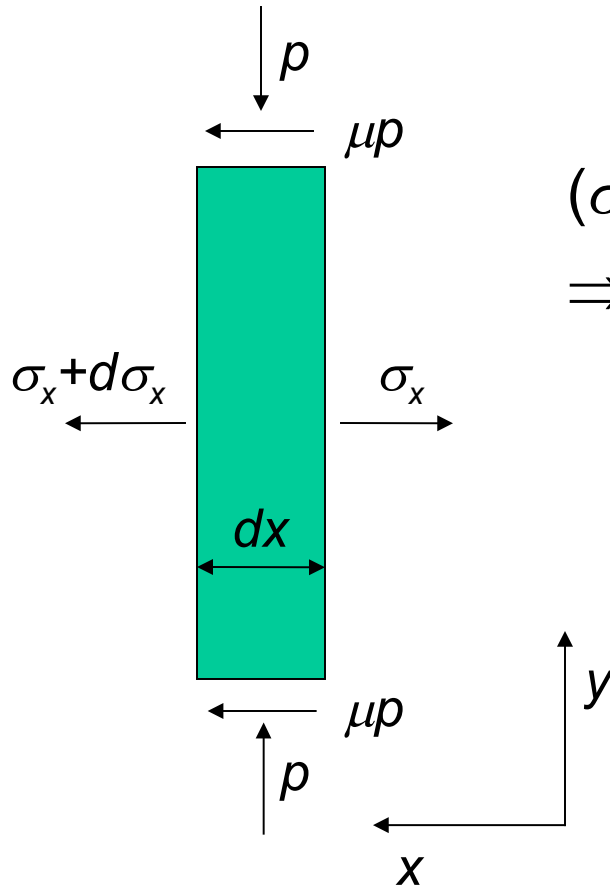
Il caso appena illustrato può essere analizzato mediante la tecnica della slab analysis. Supponiamo di comprimere un parallelepipedo, di spessore unitario in direzione normale al piano del foglio, tra due piastre piane nelle seguenti ipotesi:

- ✓ Deformazione piana ed uniforme.
- ✓ Coefficiente d'attrito costante ed uniforme all'interfaccia.
- ✓ Utilizziamo il criterio di plasticizzazione di Tresca.
- ✓ Non c'è attrito adesivo all'interfaccia



# Forgiatura

Scriviamo la condizione di equilibrio alla traslazione in direzione x:



$$\begin{aligned}
 (\sigma_x + d\sigma_x) \cdot h - \sigma_x \cdot h + 2 \cdot \mu \cdot p \cdot dx &= 0 \Rightarrow \\
 \Rightarrow h \cdot d\sigma_x + 2 \cdot \mu \cdot p \cdot dx &= 0
 \end{aligned}$$

# Forgiatura

Si osservi ora che:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_x - \sigma_y = 2 \cdot C \\ \sigma_y = -p \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \sigma_x + p = 2 \cdot C \\ d\sigma_x = -dp \end{array} \right.$$

Sostituendo nell'espressione precedente si ottiene:

$$h \cdot dp = 2 \cdot \mu \cdot p \cdot dx \Rightarrow$$

$$\frac{dp}{p} = \frac{2 \cdot \mu}{h} \cdot dx$$

Integrando:

$$\int_{2 \cdot C}^p \frac{dp}{p} = \frac{2 \cdot \mu}{h} \int_0^x dx$$

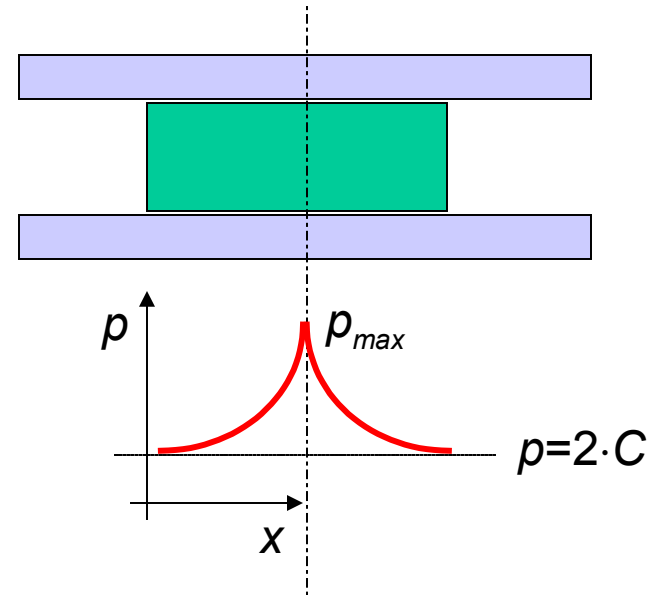
# Forgiatura

Si osservi che è stata imposta la condizione al contorno per cui, sulle superfici libere,  $\sigma_x=0$ . In tala caso, per Tresca, si ha che  $p=2 \cdot C$ .

$$\ln(p) - \ln(2 \cdot C) = \frac{2 \cdot \mu}{h} \cdot x \Rightarrow$$

$$\frac{p}{2 \cdot C} = \exp\left(\frac{2 \cdot \mu}{h} \cdot x\right)$$

$$p_{\max} = 2 \cdot C \cdot \exp\left(\frac{\mu}{h} \cdot w\right)$$



# Forgiatura

Se  $p$  aumenta in maniera tale che  $p \cdot \mu = \tau_{interfaccia} > \tau_{max}$ , ovvero se  $m^*$  prima definito vale 1, si può avere adesione all'interfaccia (attrito adesivo). In tal caso le ipotesi fatte non sono più valide ed il modello va corretto opportunamente.

Ricordando che  $C = \tau_{max}$ , possiamo ricavare il valore dell'ascissa  $x_s$  tale che, per  $x \geq x_s$ , sarà verificata la condizione di attrito adesivo:

$$\left. \begin{array}{l} p \cdot \mu = \tau_{max} = C \Rightarrow p = \frac{C}{\mu} \\ \frac{p}{2 \cdot C} = \exp\left(\frac{2 \cdot \mu}{h} \cdot x\right) \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{1}{2 \cdot \mu} = \exp\left(\frac{2 \cdot \mu}{h} \cdot x_s\right)$$

$$\frac{x_s}{h} = \frac{1}{2 \cdot \mu} \cdot \ln\left(\frac{1}{2 \cdot \mu}\right)$$

Se  $x_s > w/2$ , la condizione di attrito adesivo non sarà verificata in nessun punto.

# Forgiatura

L'equazione differenziale esprime la condizione di equilibrio alla traslazione può allora essere integrata nelle nuove condizioni, tra  $x_s$  e  $x$ , osservando che la tensione tangenziale, in tale caso, è pari al flow stress ed è quindi costante ed indipendente da  $p$ .

$$x \geq x_s \rightarrow h \cdot d\sigma_x + 2 \cdot \tau_{\max} \cdot dx = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow dp = \frac{2 \cdot \tau_{\max}}{h} \cdot dx \Rightarrow$$

$$\Rightarrow p(x) - p(x_s) = \frac{2 \cdot C}{h} (x - x_s)$$

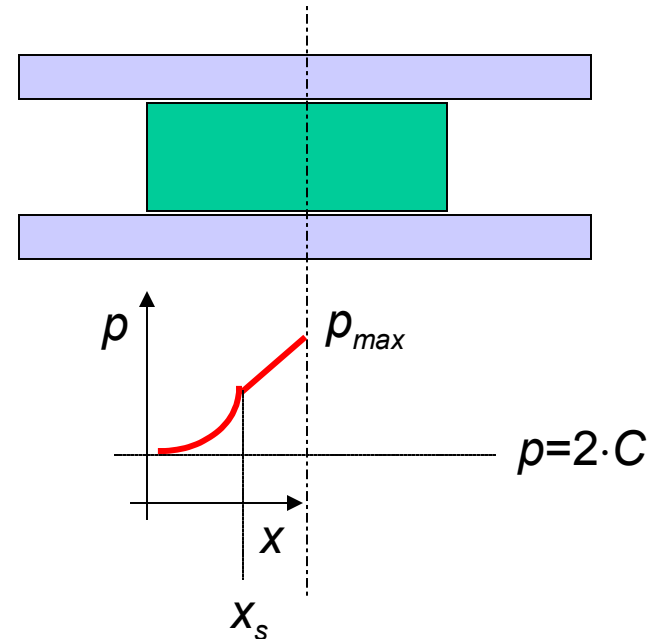


# Forgiatura

Osservando che per  $x=x_s$  si ha che  $p(X_s) \cdot \mu = \tau_{max}$ , cioè  $p(X_s) = \tau_{max} / \mu = C / \mu$  ed utilizzando l'espressione per  $x_s$  già ricavata, si ha infine:

$$\frac{p(x)}{C} = \frac{1}{\mu} + 2 \cdot \left( \frac{x}{h} - \frac{x_s}{h} \right) = \frac{1}{\mu} + 2 \cdot \left( \frac{x}{h} - \frac{1}{2 \cdot \mu} \cdot \ln \left( \frac{1}{2 \cdot \mu} \right) \right)$$

$$\frac{p(x)}{2 \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \mu} \cdot \left( 1 - \ln \left( \frac{1}{2 \cdot \mu} \right) \right) + \frac{x}{h}$$

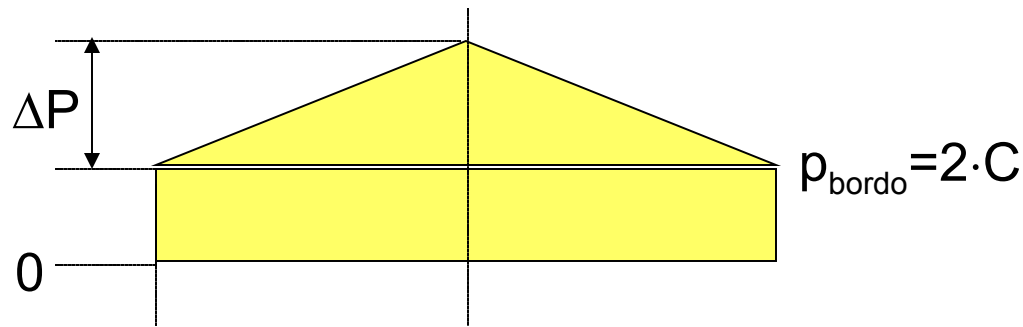


# Forgiatura

Per quanto riguarda il calcolo della forza necessaria per la deformazione, possiamo distinguere tre casi pratici:

1. Adesione su tutta la superficie.
2. Adesione in nessun punto.
3. Caso misto adesione/non adesione.

Il primo caso può essere analizzato in maniera semplice mettendo in evidenza l'andamento lineare della pressione:



$$\frac{\Delta p}{2 \cdot C} = \left[ \frac{1}{2 \cdot \mu} \cdot \left( 1 - \ln \left( \frac{1}{2 \cdot \mu} \right) \right) + \frac{(w/2)}{h} \right] - \left[ \frac{1}{2 \cdot \mu} \cdot \left( 1 - \ln \left( \frac{1}{2 \cdot \mu} \right) \right) + \frac{0}{h} \right]$$

$$\frac{\Delta p}{2 \cdot C} = \frac{w}{2 \cdot h}$$

# Forgiatura

Si ottiene, complessivamente:

$$\frac{p}{2 \cdot C} = 1 + \frac{x}{h}$$

Per il calcolo della forza è utile ricavare il valore della pressione media:

$$\frac{\bar{p}}{2 \cdot C} = \frac{\int_0^{w/2} \left(1 + \frac{x}{h}\right) dx}{w/2} = \frac{2}{w} \cdot \left(x + \frac{x^2}{2 \cdot h}\right) \Bigg|_0^{w/2} = 1 + \frac{w}{4 \cdot h}$$

Osserviamo infine che:

$$\bar{p} \stackrel{\Delta}{=} \frac{F}{\text{profondità} \cdot w} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F = p \cdot \text{profondità} \cdot w = 2 \cdot C \cdot \text{profondità} \cdot w \cdot \left(1 + \frac{w}{4 \cdot h}\right)$$

# Laminazione

## La laminazione

### Introduzione

Il processo di laminazione può essere convenientemente analizzato considerando il caso relativamente semplice in cui un massello parallelepipedo venga fatto passare attraverso due cilindri controrotanti.

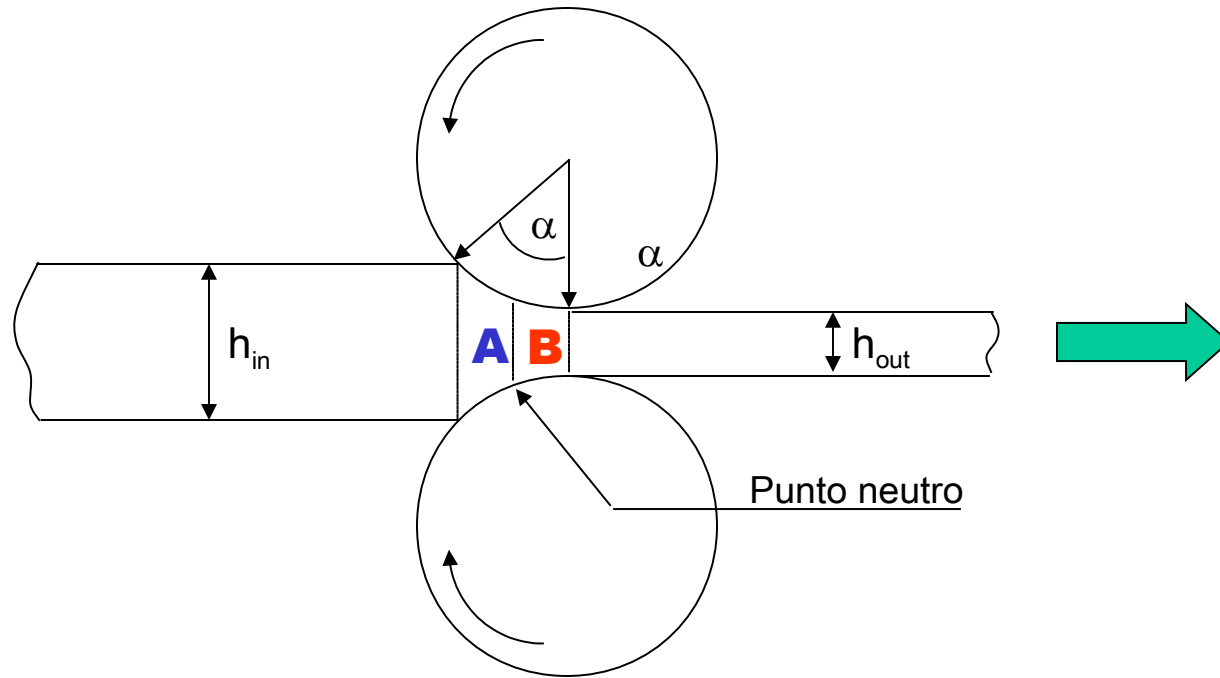
Per semplificare le considerazioni successive si fa l'ipotesi che non ci sia flusso laterale di materiale: essa è generalmente ben verificata in quanto:

- ✓ La gabbia di laminazione stessa è configurata in modo tale da impedire tale flusso.
- ✓ L'allargamento percentuale è trascurabile rispetto alla riduzione percentuale di altezza.

Si osservi che in virtù della costanza della portata, la velocità media in una sezione del laminato varia passando dall'ingresso all'uscita.

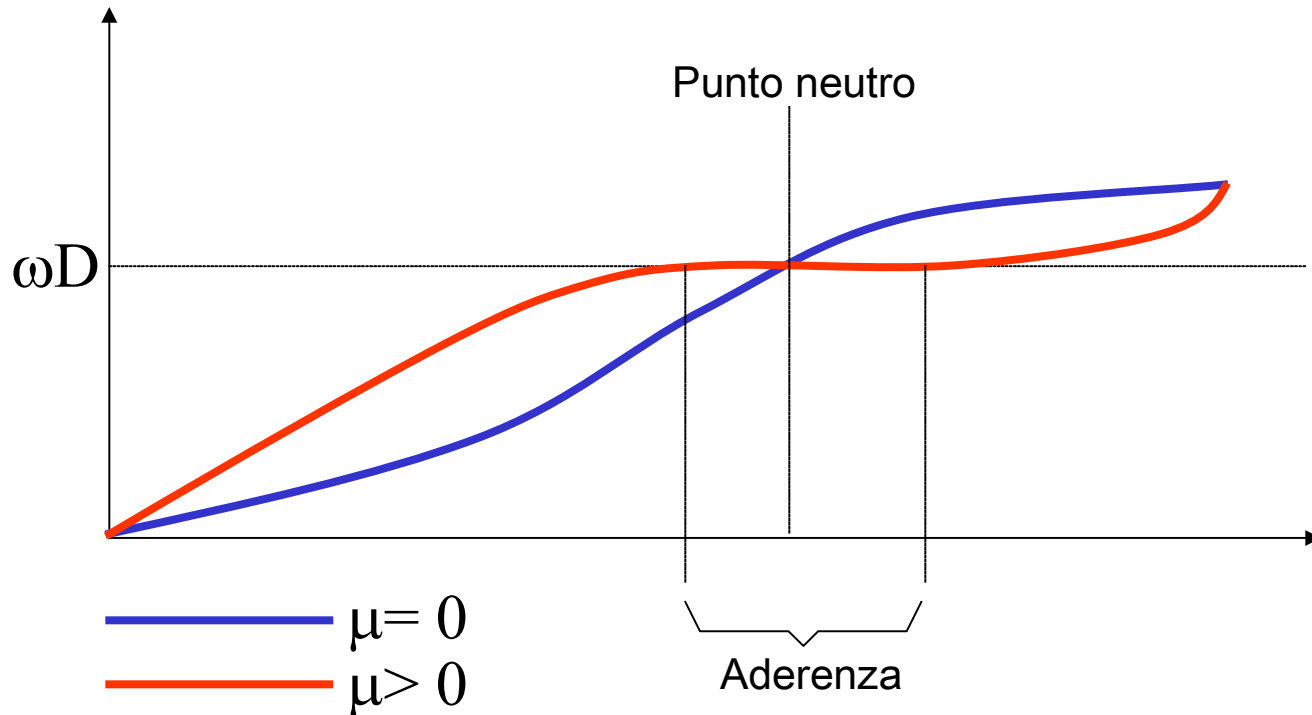
# Laminazione

Rappresentazione schematica del processo di laminazione, con riportati alcuni simboli che saranno utili nel seguito:



# Laminazione

Andamento qualitativo teorico della velocità del materiale laminato (in direzione di laminazione) in prossimità della zona di contatto con la superficie dei cilindri ed andamento qualitativo reale della medesima. Le differenze sono legate al fatto che, passando in regime di attrito statico, il coefficiente d'attrito è generalmente superiore (attrito di primo distacco).



# Laminazione

Si osservi che a sinistra del punto neutro si sviluppano forze di attrito agenti sul massello orientate in direzione di laminazione, mentre a destra di tale punto accade il contrario.

Si definisce **riduzione di spessore** la grandezza:

$$r = h_{in} - h_{out}$$

Nelle considerazioni che seguiranno saranno considerate valide le ipotesi appena formulate.

La domanda alla quale bisogna effettivamente rispondere è: qual è l'andamento delle forze di attrito lungo l'arco di contatto tra massello e cilindro?

Per rispondere, è necessario conoscere l'andamento delle pressioni normali all'interfaccia in quanto si suppone, semplificando, che  $\mu$  sia costante e, come già visto:

$$\tau = \mu \cdot p$$

# Laminazione

Vi è quindi una semplice relazione di proporzionalità tra pressioni normali e forze d'attrito.

Per risolvere il problema introduciamo le seguenti ulteriori ipotesi semplificative:

- ✓ Geometria di contatto ideale (no deformazioni elastiche, ecc.)
- ✓ Punto neutro interno all'arco di contatto
- ✓ Deformazione del massello piana ed omogenea

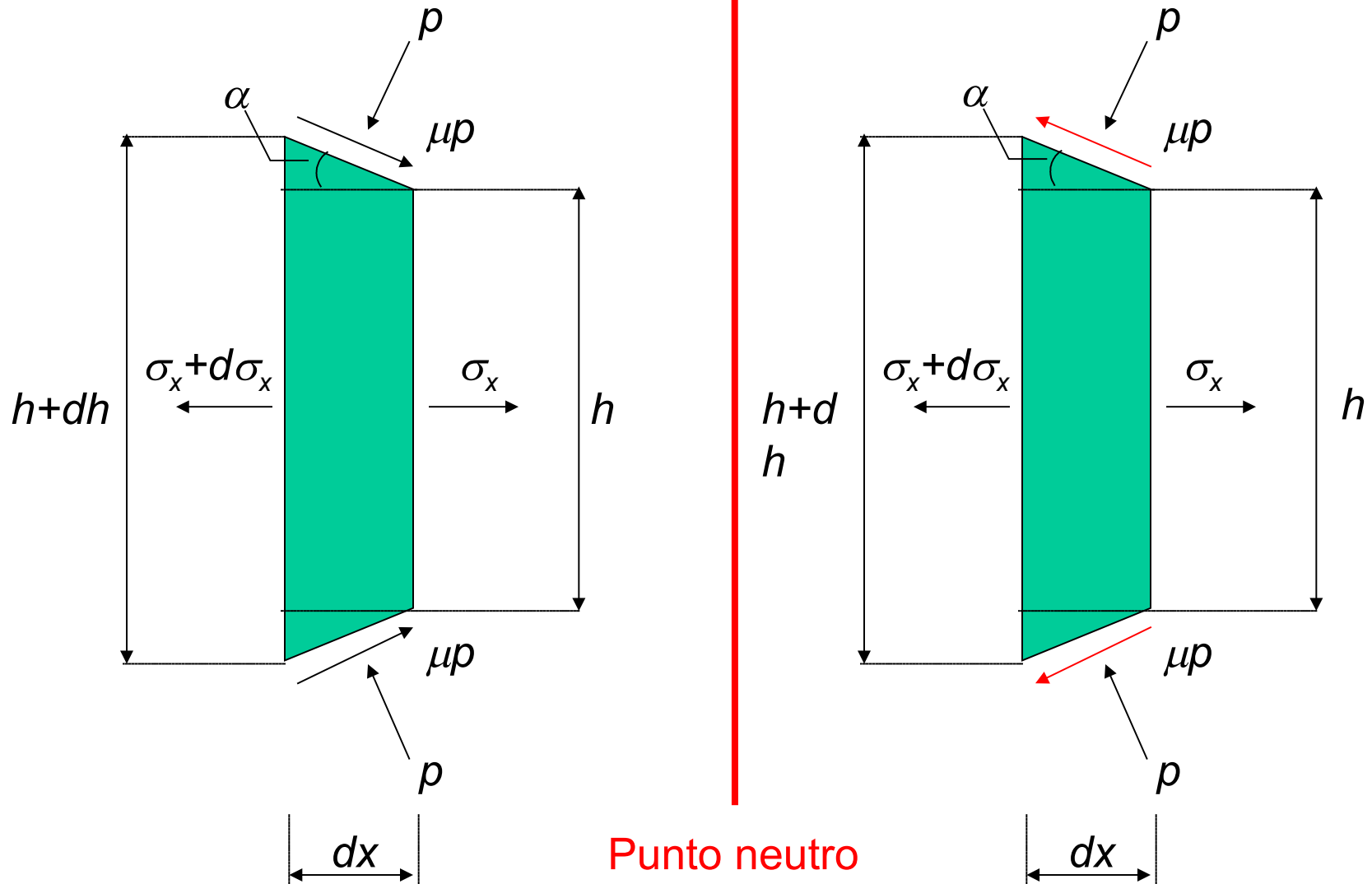
L'ultima ipotesi formulata può essere espressa anche, in maniera alternativa, affermando che le sezioni piane del massello prima dell'ingresso nella gabbia di laminazione, rimangono tali durante e dopo la deformazione e che il flusso laterale è nullo.

In tali condizioni si può effettuare la slab analysis scrivendo le equazioni di equilibrio alla traslazione orizzontale di una sottile "fettina" (al limite di spessore infinitesimo) del massello prima e dopo il punto neutro.



# Laminazione

Geometria di lavoro:



# Laminazione

Equazione di equilibrio per la traslazione orizzontale (a **destra** del punto neutro):

$$(h + dh) \cdot (\sigma_x + d\sigma_x) - h \cdot \sigma_x + 2p \cdot dx \cdot \operatorname{tg}(\alpha) + 2\mu \cdot p \cdot dx = 0$$

Infatti, chiamando “s” la superficie inclinata, il contributo della forza p è dato da:

$$p \cdot s \cdot \sin(\alpha) = p \cdot \frac{dx}{\cos(\alpha)} \cdot \sin(\alpha) = p \cdot dx \cdot \operatorname{tg}(\alpha)$$

Il contributo della forza d'attrito è dato da:

$$\tau \cdot s \cdot \cos(\alpha) = (\mu \cdot p) \cdot \frac{dx}{\cos(\alpha)} \cdot \cos(\alpha) = \mu \cdot p \cdot dx$$

L'equilibrio alla traslazione verticale è assicurato dalla simmetria geometrica e delle forze presenti.

# Laminazione

Eseguendo le moltiplicazioni e trascurando i termini infinitesimi di ordine superiore al primo si perviene alla seguente espressione:

$$\sigma_x \cdot dh + h \cdot d\sigma_x + 2p \cdot dx \cdot \operatorname{tg}(\alpha) + 2\mu \cdot p \cdot dx = 0$$

Dividendo per  $dx$  si ottiene:

$$\sigma_x \cdot \frac{dh}{dx} + h \cdot \frac{d\sigma_x}{dx} + 2p \cdot \operatorname{tg}(\alpha) + 2\mu \cdot p = 0$$

Ora, nell'ipotesi posta di deformazione piana, supponiamo di utilizzare il già discusso criterio di Tresca per il flow stress:

$$\sigma_x - \sigma_y = 2C$$

Nel nostro caso  $\sigma_y$  (trascurando la comp. verticale della forza di attrito, per piccoli valori di  $\alpha$ ) è dato da:

$$\sigma_y = -p \cdot \frac{dx}{\cos(\alpha)} \cdot \cos(\alpha) \cdot \frac{1}{dx} = -p$$

# Laminazione

Sostituendo nel criterio di Tresca si ottiene:

$$\sigma_x - (-p) = \sigma_x + p = 2C$$

Ovvero:

$$\sigma_x = -p + 2C$$

$$d\sigma_x = -dp$$

Infine, per scrivere un'espressione utile, è necessario:

- ▶ Effettuare il cambio di variabile  $x \rightarrow \phi$ , indicando con  $\phi$  la posizione angolare lungo l'arco di contatto (come indicato in figura)
- ▶ Scrivere tutte le grandezze in funzione di  $\phi$ .

# Laminazione

Si noti che:

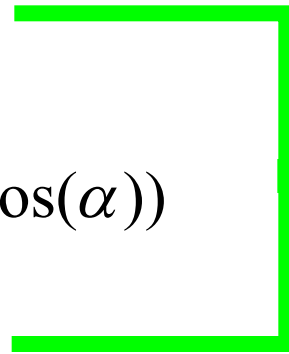
$$x = R \cdot \sin(\alpha)$$

$$dx = R \cdot \cos(\alpha) d\alpha$$

$$\frac{d\alpha}{dx} = \frac{1}{R \cdot \cos(\alpha)}$$

$$h = h_{out} + 2R \cdot (1 - \cos(\alpha))$$

$$\frac{dh}{d\alpha} = 2R \cdot \sin(\alpha)$$



$$\frac{dh}{dx} = 2tg(\alpha)$$

# Laminazione

Riprendiamo dunque l'espressione a cui eravamo arrivati ed effettuiamo le sostituzioni:

$$\sigma_x \cdot \frac{dh}{dx} + h \cdot \frac{d\sigma_x}{dx} + 2p \cdot \operatorname{tg}(\alpha) + 2\mu \cdot p = 0$$

$$(2C - p) \cdot 2\operatorname{tg}(\alpha) - \frac{h(\alpha)}{R \cdot \cos(\alpha)} p' + 2p \cdot \operatorname{tg}(\alpha) + 2\mu \cdot p = 0$$

Raccogliendo otteniamo infine l'equazione differenziale lineare non omogenea a coefficienti non costanti:

$$p' \cdot \left( \frac{h(\alpha)}{R \cdot \cos(\alpha)} \right) - 2\mu \cdot p = 4C \cdot \operatorname{tg}(\alpha)$$

Tale equazione e quella ricavabile in maniera del tutto simile per la zona a destra del punto neutro può finalmente essere risolta per via numerica.

# Laminazione

L'equazione differenziale precedente può essere integrata per via analitica solo semplificandola sulla base di alcune ipotesi che saranno descritte nelle diapositive seguenti.

# Laminazione

L'equazione di partenza è quella precedentemente scritta, ovvero:

$$\sigma_x \cdot \frac{dh}{dx} + h \cdot \frac{d\sigma_x}{dx} + 2p \cdot \operatorname{tg}(\alpha) + 2\mu \cdot p = 0$$

Essa può essere riscritta come (derivata di un prodotto):

$$\frac{d\sigma_x \cdot h}{dx} + 2p \cdot (\operatorname{tg}(\alpha) + \mu) = 0$$

Ovvero, per il criterio di Tresca e per piccoli valori di  $\alpha$ :

$$\begin{aligned} & \frac{d(2C - p) \cdot h}{dx} + 2p \cdot (a + \mu) = \\ & = \frac{d\sigma_{yield} \cdot h}{dx} - \frac{d(p \cdot h)}{dx} + 2p \cdot (a + \mu) = 0 \end{aligned}$$



# Laminazione

Ipotizzando che valga la seguente condizione:

$$\sigma_{yeld} \cdot h = k,$$

con  $k$  costante (tale scelta, pur essendo totalmente arbitraria, è coerente col fatto che il materiale, a causa della deformazione imposta, tende ad incrudire man mano che attraversa il laminatoio), si arriva alla seguente espressione:

$$\begin{aligned} -p' \cdot h - p \frac{dh}{dx} + 2p \cdot (\alpha + \mu) &= \\ = -p' \cdot h_{out} + 2\mu \cdot p &= 0 \end{aligned}$$

$$h \cong h_{out}$$

$$\frac{dh}{dx} \cong 2\alpha$$

Ovvero:

$$\frac{p'}{p} = \frac{2\mu}{h_{out}}$$

# Laminazione

Integrando, nell'ipotesi che le forze applicate sulla sezione di ingresso ed uscita siano trascurabili:

$$\int_{2C}^p \frac{p'}{p} = \int_0^\alpha \frac{2\mu}{h_{out}} \cdot R \cdot \cos(\alpha') d\alpha' \quad dx = R \cdot \cos(\alpha) \cdot d\alpha$$

$$\ln\left(\frac{p}{2C}\right) = \frac{2\mu \cdot R \cdot \sin(\alpha)}{h_{out}}$$

si ha infine, considerando che  $R \cdot \sin(\alpha) = x$ :

$$\frac{p}{2C} = \exp\left(\frac{2\mu}{h_{out}} \cdot x\right) \quad \Leftrightarrow \quad \frac{p}{2 \cdot C} = \exp\left(\frac{2\mu}{h} \cdot x\right)$$

**LAMINAZIONE**

**FORGIATURA**

# Laminazione

Per quanto riguarda le condizioni al contorno, si osservi che al di fuori della zona di contatto non vi è alcuna forza agente sulle sezioni del massello avente componenti nella direzione di laminazione, a partire dai bordi liberi del manufatto sui quali si può affermare con sicurezza che  $\sigma_x=0$ ; con semplici considerazioni si può dedurre che, nelle ipotesi fatte,  $\sigma_x$  sarà nullo anche sulla sezione di ingresso e su quella d'uscita, pertanto, per Tresca sarà, per il profilo di pressione in tali punti (si ricordi anche l'esercizio precedentemente svolto):

$$\sigma_x + \sigma_y = 0 + \sigma_y = \sigma_y = p = 2C$$

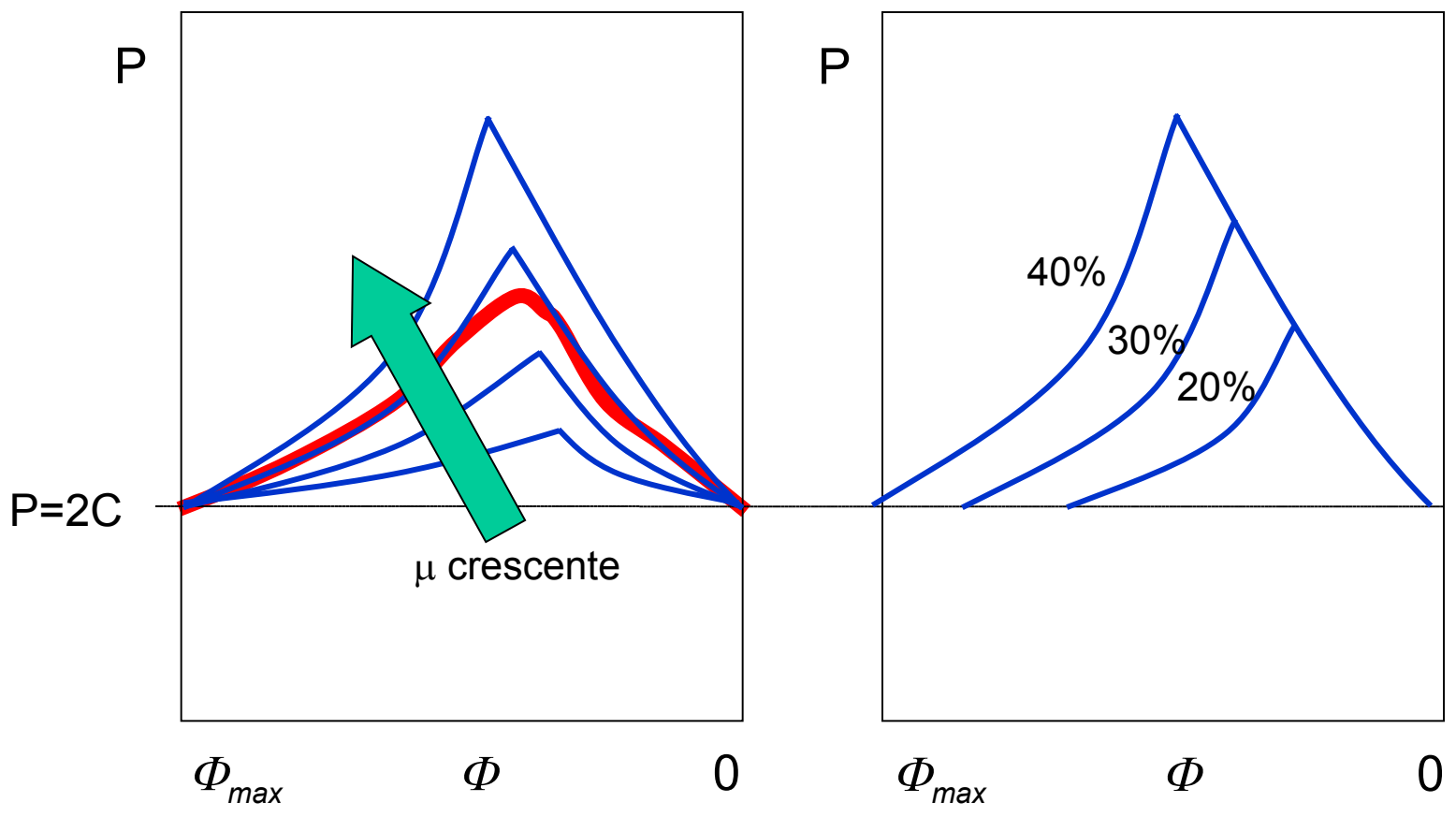
$$p(\phi_{in}) = 2C$$

$$p(0) = 2C$$

Nella pagina seguente sono riportati i profili di pressione ottenuti.

# Laminazione

Profili di pressione al variare di  $\mu$  e della percentuale di riduzione definita come  $(h_{in}-h_{out})/h_{in}$ :



# Laminazione

Si osservi che:

- L'andamento reale (in rosso) differisce da quello calcolato essendo più "arrotondato". Si ricordi quanto detto in precedenza a proposito del fenomeno di "adesione".
- La pressione massima aumenta all'aumentare del coefficiente d'attrito e della percentuale di riduzione. Ciò comporta una maggiore sollecitazione della struttura della gabbia di laminazione.
- Nel punto neutro si ha il massimo della pressione normale. La sua posizione si ricava per intersezione delle curve relative alle due zone di lavoro e dipende dal valore del coefficiente d'attrito e dalla percentuale di riduzione.
- Dall'andamento del profilo di pressione è possibile ricavare quello dello sforzo d'attrito semplicemente moltiplicando per la costante  $\mu$ . Con tali valori è possibile calcolare in modo relativamente diretto il valore della coppia necessaria per la laminazione, considerando che la componente radiale ha momento nullo rispetto all'asse di rotazione dei cilindri.

# Laminazione

## Calcolo short-cut della coppia e della potenza di laminazione

Il modello precedentemente esposto soffre di notevoli limitazioni legate principalmente alle ipotesi restrittive applicate. Per questo motivo, oltre che per praticità nell'effettuare una prima valutazione, è spesso conveniente ricorrere a metodi semplificati per il calcolo della coppia e della potenza di laminazione, valori fondamentali per il dimensionamento della gabbia.

In particolare, se l'arco di contatto è piccolo e se si approssima il volume di materiale sottoposto a deformazione ad un parallelepipedo di altezza  $h_m$  t.c.:

$$h_m = \frac{h_{in} + h_{out}}{2},$$

e si ricorda che per la compressione di un massello tra due piastre piane vale la seguente relazione per l'emi-andamento delle pressioni:

$$p = 2C \cdot \exp\left(\frac{2\mu}{h} \left(\frac{L}{2} - x\right)\right),$$

# Laminazione

Si può valutare il valore della pressione media ( $L$  è la lunghezza dell'arco di contatto):

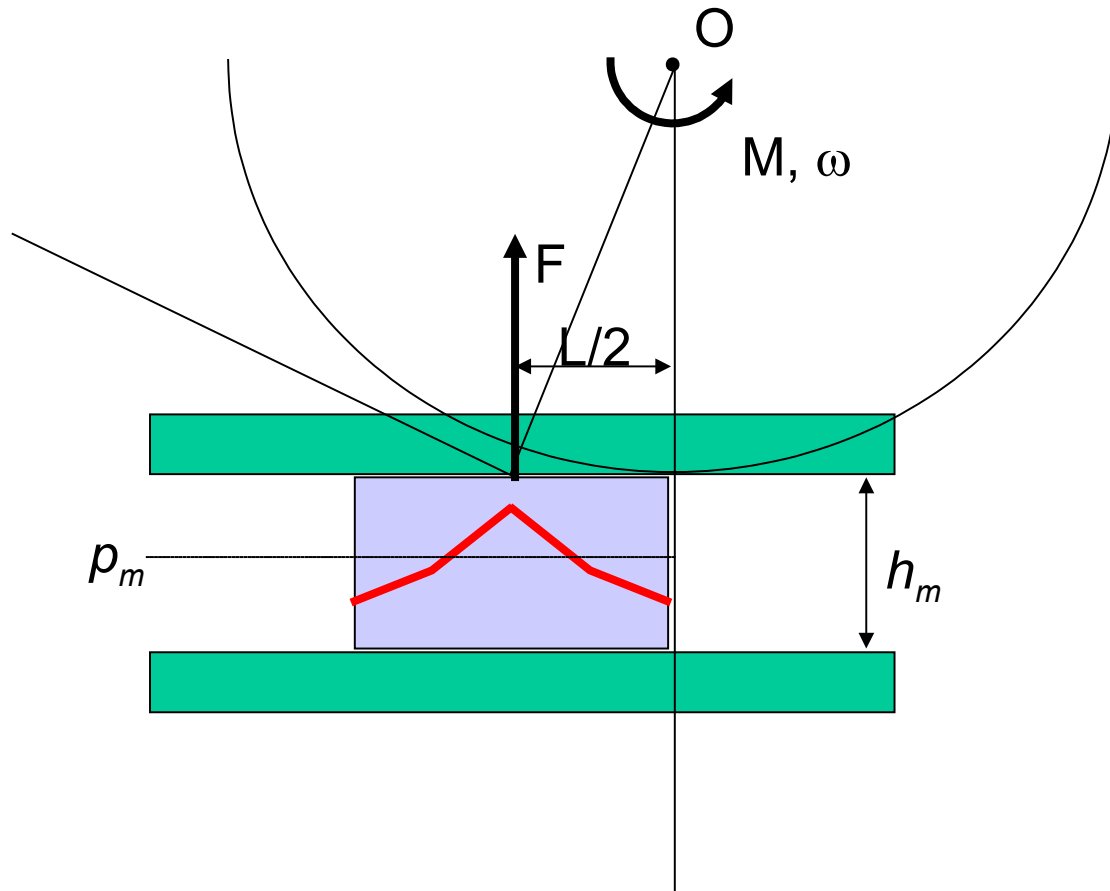
$$\begin{aligned}
 p_m &= 2C \cdot \int_0^{L/2} \exp\left(\frac{2\mu}{h_m}\left(\frac{L}{2} - x\right)\right) dx \Rightarrow \\
 \Rightarrow p_m &= \frac{C \cdot h_m}{L \cdot \mu} \cdot \left[ \exp\left(\frac{\mu \cdot L}{h_m}\right) - 1 \right]
 \end{aligned}$$

La forza radiale totale di laminazione, considerando un laminato di larghezza  $W$ , può essere allora stimata, trascurando la curvatura, come:

$$F = L \cdot W \cdot p_m$$

# Laminazione

Nel nostro modello semplificato la geometria è la seguente:





# Laminazione

La coppia necessaria sarà pertanto:

$$M = F \cdot \frac{L}{2}$$

Inoltre, per piccoli valori dell'arco di contatto, approssimando quest'ultimo con la corda, con semplici considerazioni geometriche possiamo scrivere:

$$L = \sqrt{R \cdot (h_{in} - h_{out})} = \sqrt{R \cdot \Delta h}$$

$$\phi_{\max} = \frac{L}{R} = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$$

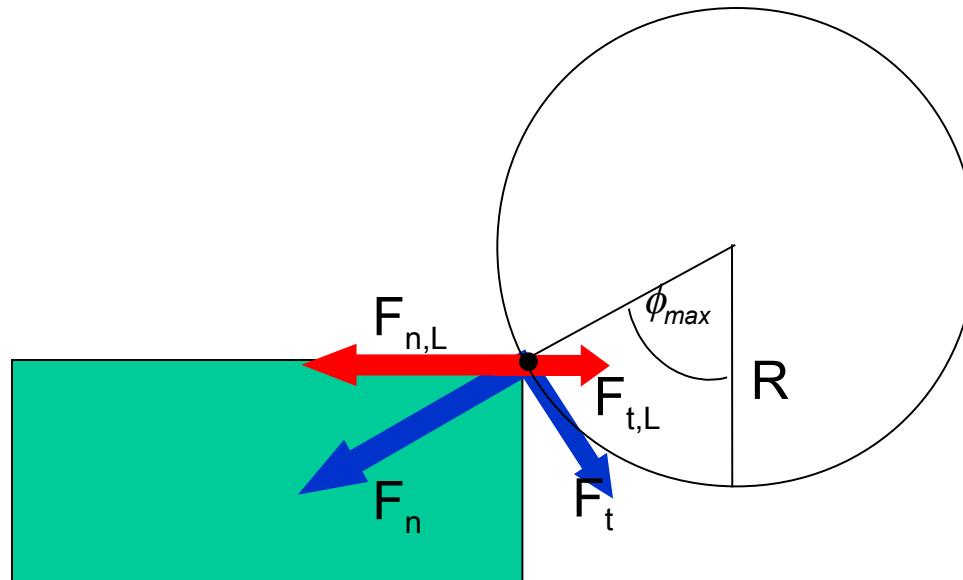
La potenza di laminazione sarà:

$$P = M \cdot \omega = F \cdot \frac{L}{2} \cdot \omega$$

# Laminazione

## Condizioni di imbocco e di trascinamento

La figura seguente illustra la decomposizione delle forze nella condizione di imbocco. Si osservi che le componenti verticali possono essere trascurate nelle valutazioni in quanto automaticamente equilibrate dalle azioni dell'altro cilindro della gabbia.



# Laminazione

La condizione di imbocco è espressa dalla:

$$F_{T,L} > F_{N,L}$$

Si ha che:

$$F_{N,L} = F_N \cdot \sin(\phi_{\max})$$

$$F_{T,L} = F_T \cdot \cos(\phi_{\max})$$

$$F_T = F_N \cdot \mu$$

Perciò la condizione può essere riscritta come:

$$F_N \cdot \mu \cdot \cos(\phi_{\max}) > F_N \cdot \sin(\phi_{\max}) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \mu > \operatorname{tg}(\phi_{\max})$$

# Laminazione

Se  $\phi_{max}$  è piccolo, l'espressione può essere ulteriormente semplificata, utilizzando un'espressione vista precedentemente, come segue:

$$tg(\phi_{max}) \cong \phi_{max} \cong \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$$

$$\Delta h < \mu^2 \cdot R$$

Tale espressione può essere utilizzata per determinare il massimo valore della riduzione dato un diametro dei cilindri ed un valore del coefficiente d'attrito  $\mu$ , stabilito un valore della riduzione, per dimensionare in prima approssimazione i cilindri stessi.

Esistono, tabellati o sottoforma di espressioni empiriche, i dati relativi ai coefficienti di attrito in funzione (principalmente) del materiale costituente i cilindri, della finitura superficiale degli stessi, del materiale da laminare e della temperatura.

# Laminazione

Con considerazioni analoghe, supponendo la risultante delle pressioni di contatto applicata a metà dell'arco di contatto, si può ricavare la condizione di trascinamento:

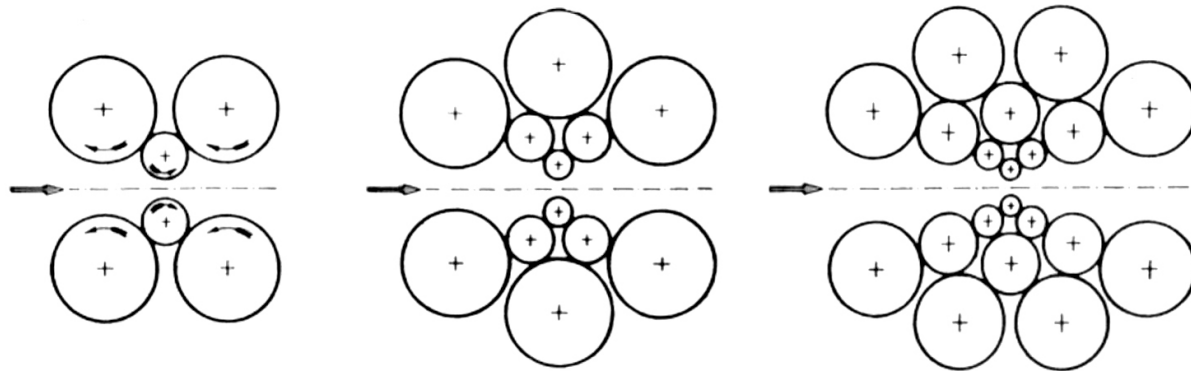
$$\mu > \operatorname{tg}(\phi_{\max})$$

Si osservi che tale condizione è meno severa di quella d'imbocco.

Consideriamo, quale esempio, la laminazione a freddo di lamiere sottili. La pressione di contatto tende ad aumentare notevolmente alla diminuzione dello spessore del materiale lavorato, come si può rilevare, ad esempio, dall'espressione del valore della pressione media  $p_m$ . Il fatto che la lavorazione venga condotta a freddo, comporta un ulteriore aggravio dovuto al notevole valore di  $C$ . Per ridurre le forze agenti sui cilindri è conveniente operare con bassi valori del coefficiente d'attrito  $\mu$ , quindi con cilindri lisci e su materiale ricotto. Ciò implica naturalmente, per le condizioni di imbocco e trascinamento, l'impossibilità di ottenere grosse riduzioni e quindi la necessità di effettuare eventualmente il passaggio in più gabbie.

# Laminazione

Per quanto riguarda il diametro dei cilindri, si osserva dalla risoluzione numerica e dalle valutazioni pratiche del problema della laminazione che il valore della pressione massima diminuisce con il diametro. E' consigliabile quindi agire con cilindri di piccolo diametro opportunamente supportati per ridurre la freccia sviluppata. Ciò contribuisce evidentemente a ridurre ulteriormente il valore delle riduzioni ottenibili.



Gabbie a 6, 12 e 20 cilindri (lamiere sottili)

# Laminazione

## La calibratura

Con **calibratura** si intende l'operazione progettuale mediante la quale viene deciso il profilo dei singoli cilindri di laminazione.

Il problema è complesso e deve tenere presenti le riduzioni possibili, le condizioni di trascinamento e numerosi altri fattori tra i quali:

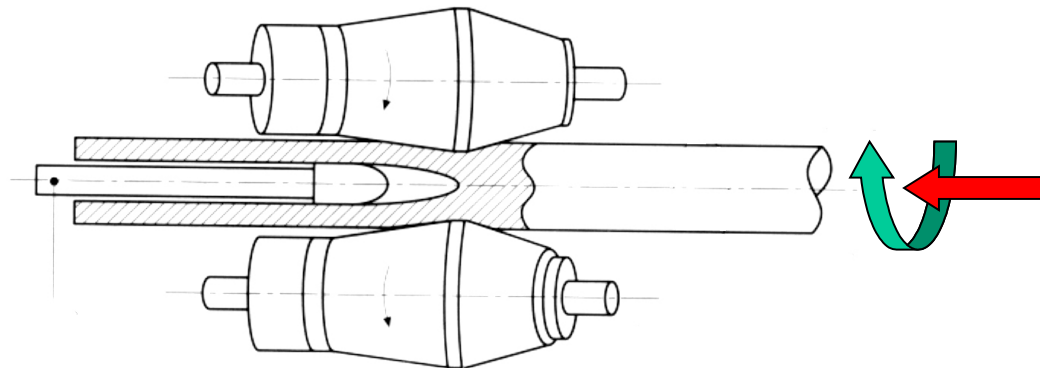
- L'ottimizzazione del numero di **colpi di laminazione** (pochi=usura, troppi=costi elevati e bassa produttività)
- Il minor indebolimento possibile della sezione dei cilindri
- L'adozione di opportuni angoli di spoglia
- La suddivisione del profilo tra i due cilindri in modo tale da bilanciare in maniera equa le forze di laminazione
- I problemi dell'allargamento

# Laminazione

## Laminatoi per tubi

I semilavorati per la produzione di tubi senza saldatura possono venire prodotti mediante laminatoi speciali detti **laminatoi Mannesmann**. Esso è costituito schematicamente da due cilindri corotanti a profilo bitroncoconico e ad assi sghembi rispetto a quello del lingotto di  $\pm 4^\circ \div \pm 8^\circ$ .

Il lingotto avanza nella gabbia con moto elicoidale ed è soggetto a sforzi che tendono a sfibrarne il centro. L'apertura della lacerazione che tende a crearsi viene favorita e regolarizzata mediante l'uso di un apposito mandrino. Il tubo tende ad espandersi e ad essere approssimativamente calibrato nella zona divergente dei cilindri.





# Laminazione

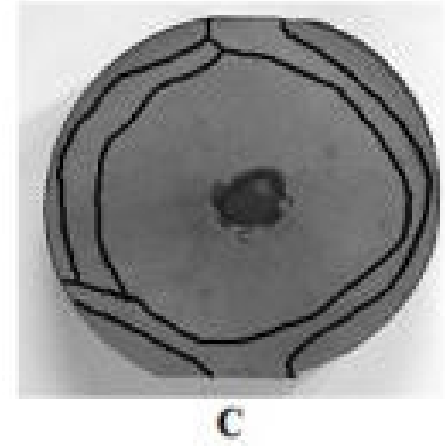
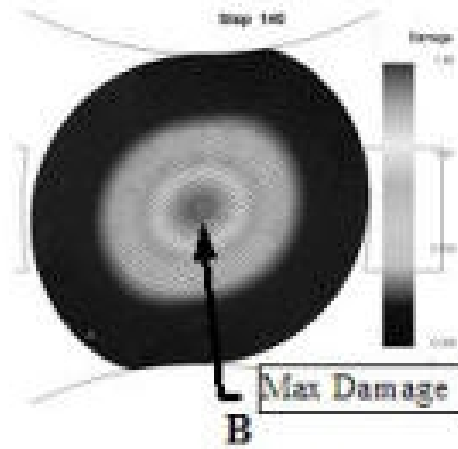
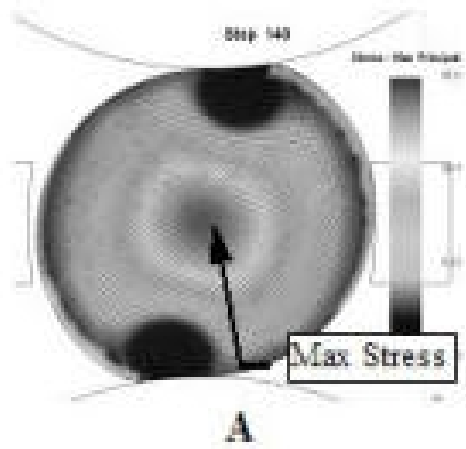
Lo sbozzato ottenuto viene rilaminato per ottenere un prodotto finito. Questa operazione può essere eseguita con varie tecniche, una delle quali è quella del **laminatoio a passo di pellegrino**. In esso i cilindri, orizzontali, paralleli e controrotanti, sono dotati di gole semicircolari a luce variabile (la massima è poco maggiore al diametro dello sbozzato, la minima pari a quella del tubo che si intende ottenere).

Lo sbozzato, riscaldato opportunamente, viene montato su un mandrino calibrato e spinto nella gabbia mediante un sistema idraulico nel periodo in cui la luce è sufficiente. Ad un certo punto i cilindri entrano in contatto con il materiale in lavorazione (la zona di contatto sul cilindro è detta **martello**) ed inizia la fase di stiratura del materiale, durante la quale il moto del laminato è retrogrado. La gola è suddivisa, a questo scopo, in due zone, una avente lo scopo di promuovere la deformazione plastica, l'altra destinata alla calibratura esterna finale.

Il ciclo viene ripetuto sulla stessa porzione di materiale dopo aver ruotato opportunamente lo sbozzato.

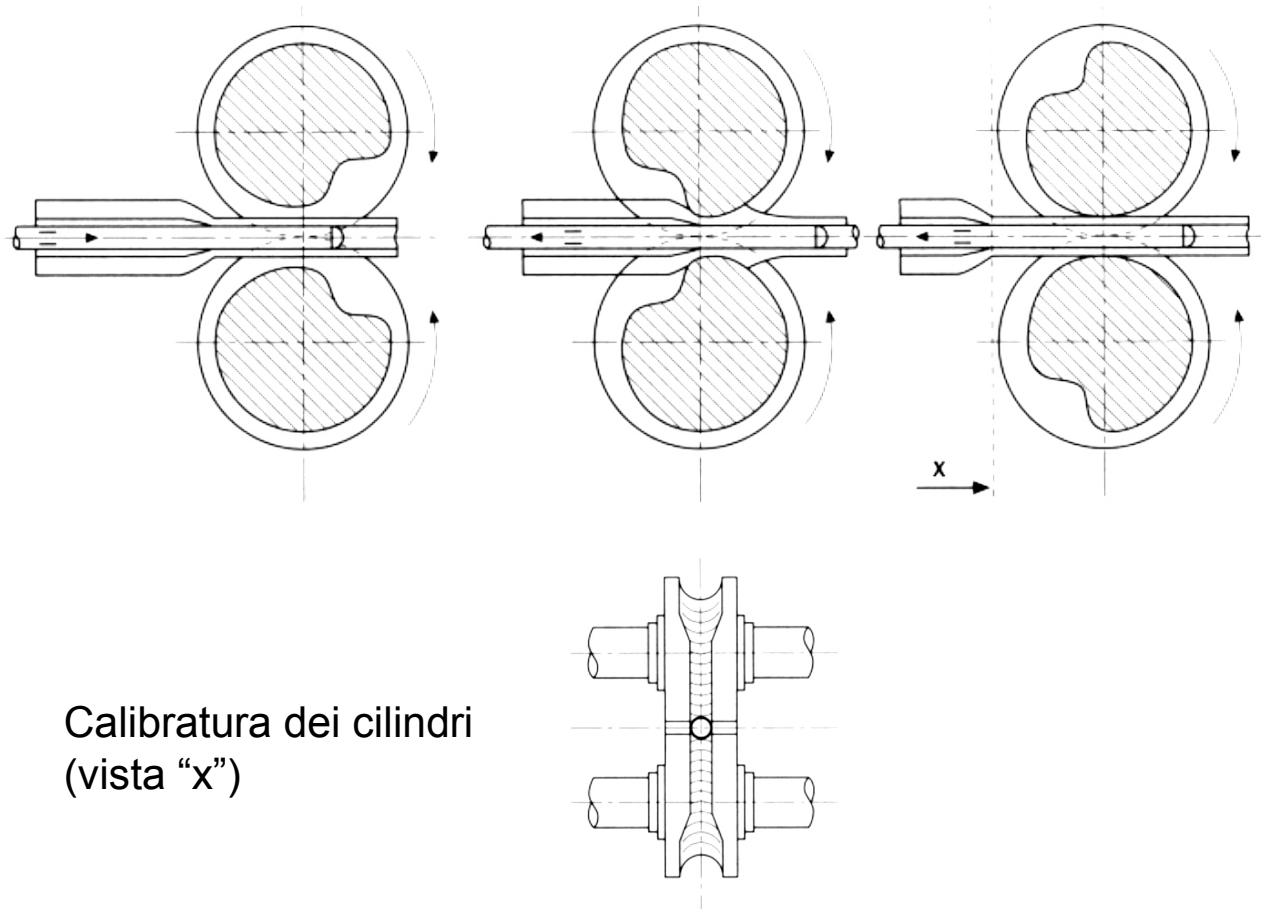
Con questo laminatoio è possibile produrre tubi di diametro esterno fino a circa 600 mm.

# Laminazione



# Laminazione

Laminatoio a passo di pellegrino, con evidenziate alcune fasi di lavorazione.



# Stampaggio

## Lo stampaggio

### Introduzione

Lo stampaggio è un procedimento utilizzato per ottenere manufatti mediante deformazione plastica, generalmente a caldo, per compressione, attuato in apposite macchine (magli e presse).

I principali parametri caratterizzanti tali macchine sono:

- ▶ Energia totale disponibile per compiere il lavoro di deformazione
- ▶ Forza massima disponibile (limite strutturale della macchina)
- ▶ Rendimento: generalmente il rapporto tra l'energia effettivamente fornita al pezzo in lavorazione e quella totale disponibile
- ▶ Velocità di applicazione del carico: come già visto influenza il flow stress
- ▶ Potenzialità

# Stampaggio

## I magli

Nei **magli a stampare**, sui due semistampi (uno fisso, uno mobile), vi sono delle cavità contrapposte che definiscono la forma del pezzo.

Il sistema è costruito in modo tale da garantire la precisione necessaria nell'allineamento dei due semistampi durante la fase attiva della lavorazione.

Quest'ultima viene compiuta dotando la parte mobile di una certa **energia cinetica**. Si possono distinguere:

- ▶ **Magli a semplice effetto** (o a gravità)
- ▶ **Magli a doppio effetto** (a vapore, ad aria compressa)
- ▶ **Magli a contraccolpo**: l'incudine è sostituito da una seconda mazza mobile. Ciò porta ad un maggiore rendimento, ad una notevole diminuzione delle vibrazioni trasmesse, ad una maggiore produttività. Gli svantaggi sono: minore precisione del pezzo ottenuto, impossibilità di lavorare direttamente "dalla barra"

# Stampaggio

## Le presse

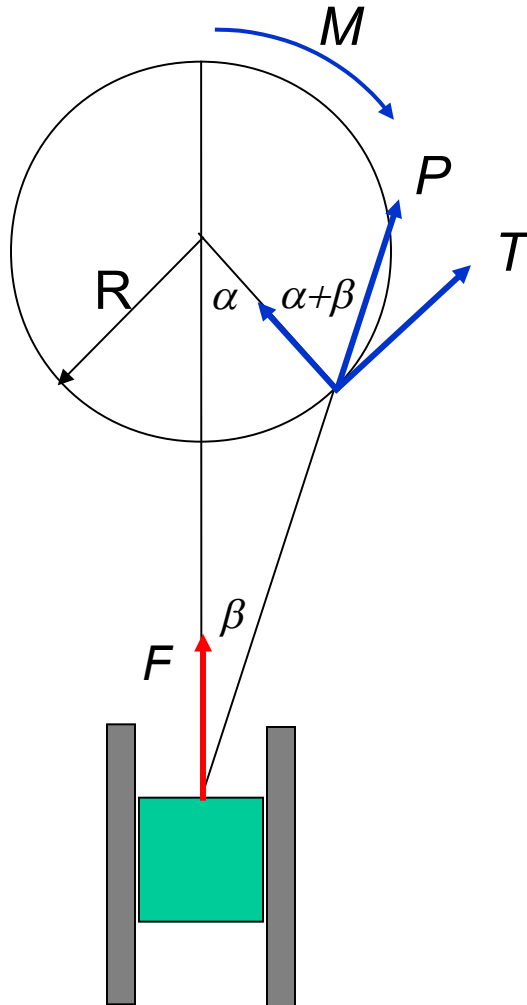
Le presse sono macchine nelle quali un organo mobile (**slitta**), dotato di un moto alternativo, è in grado di esercitare una certa forza sul pezzo in lavorazione durante la **corsa attiva**.

Si distinguono:

**Presse meccaniche ad eccentrico**: sono basate sul cinematismo biel-manovella; l'energia disponibile è accumulata in un volano e restituita al momento opportuno mediante l'innesto di un meccanismo a frizione. Sono dotate sempre di freno per evitare la ripetizione del colpo. La lavorazione può essere eseguita se la forza richiesta è, in ogni istante, minore di quella disponibile (variabile in ogni punto della corsa) e se l'energia complessivamente disponibile è sufficiente per compiere il lavoro globale di deformazione (si noti che entrambi i criteri devono essere soddisfatti!).

# Stampaggio

Il calcolo della forza teorica può essere impostato come segue:



$$P = \frac{T}{\sin(\alpha + \beta)}$$

$$F = P \cdot \cos(\beta)$$

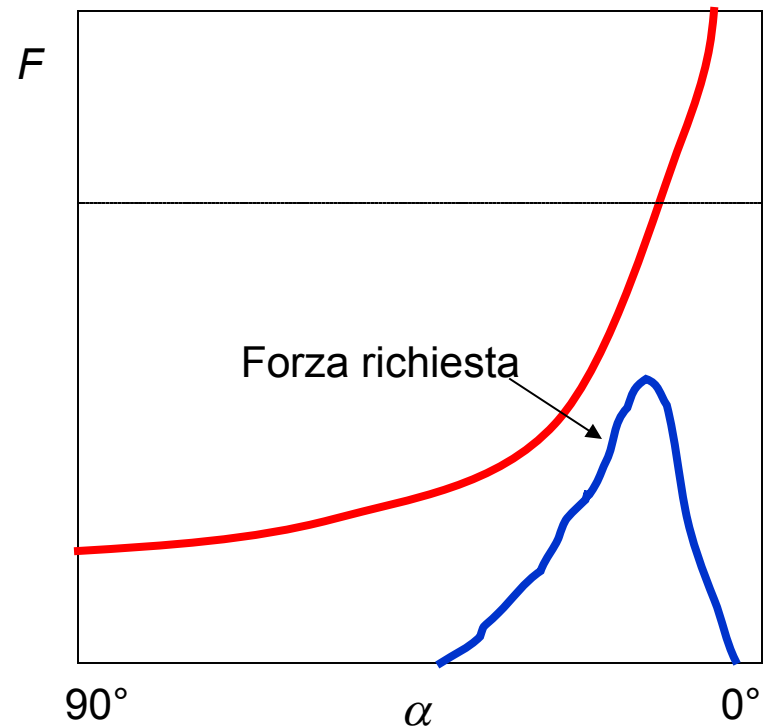
$$F = T \cdot \frac{\cos(\beta)}{\sin(\alpha + \beta)}$$

$$T = \frac{M}{R}$$

# Stampaggio

Per evitare che la forza che agisce trasversalmente sulla slitta (provocando l'usura delle guide) assuma valori troppo elevati, il rapporto tra eccentricità e lunghezza di biella viene mantenuto basso dai costruttori ( $0.25 \div 0.1$ ), cosicchè  $\beta$  risulta pure piccolo. In tal modo si commette poco errore nel semplificare l'espressione per la forza nel modo seguente:

$$F = T \cdot \frac{1}{\sin(\alpha)}$$





# Stampaggio

Durante la lavorazione il volano cede energia cinetica al materiale in lavorazione affinché possa essere eseguito il lavoro di deformazione. Per fare questo, esso rallenta:

$$L_u = \frac{J(\omega_i^2 - \omega_f^2)}{2}$$

Il lavoro utile fornito è tanto maggiore è l'entità del rallentamento. Per lavorazioni normali, la caduta di velocità deve essere compresa al massimo tra il 10% ed il 20% della velocità nominale, pena una riduzione intollerabile della produttività della macchina.

Ne consegue che, in effetti, il lavoro fornibile è dato dalla seguente espressione, in cui  $f$  può variare tra 0.8 e 0.9:

$$L_u = \frac{J \cdot \omega_i^2}{2} (1 - f^2)$$

# Stampaggio

**Presse meccaniche a vite:** la slitta portastampo è collegata alla base di una grossa vite verticale sulla cui sommità è calettato un volano sulla cui periferia è previsto del materiale da frizione. Due dischi solidali con un albero orizzontale sono disposti ai lati opposti del volano e, posti alternativamente in contatto con quest'ultimo, lo pongono in rotazione per attrito. Ciò provoca la discesa del sistema con conseguente esecuzione del colpo.

Il sistema presenta alcuni inconvenienti di tipo strutturale, ma nonostante ciò è abbastanza diffuso. Il lavoro utile disponibile è dato dalla somma dell'energia accumulata nel volano e da quello dell'energia cinetica di discesa:

$$L_u = \frac{J \cdot \omega^2}{2} + \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

# Stampaggio

**Presse oleodinamiche:** sono caratterizzate dal fatto che la massima forza può essere esercitata in qualunque punto della corsa. Hanno la caratteristica di essere facilmente regolabili per quanto riguarda velocità di discesa, limitazione della forza massima esercitata, ecc.

# Stampaggio

## Il processo di stampaggio

Nello stampaggio, un massello metallico è costretto a riempire, grazie ad un'azione di compressione esercitata da un maglio o da una pressa, la cavità formata da due semistampi.

La lavorazione viene normalmente effettuata a caldo per limitare le forze generate e per favorire la deformabilità del greggio.

Lo stampaggio richiede la costruzione di stampi e l'uso di attrezzature di notevolmente costosi: è pertanto una lavorazione adatta alle produzioni di grande serie.

Dal punto di vista metallurgico notevoli vantaggi sono dati dal favorevole orientamento delle "fibre" del prodotto ottenuto (derivanti dal processo di laminazione).

Altri vantaggi derivano dal buon rendimento del processo in termini di materiale impiegato (pochi scarti, piccoli sovrametalli).

Il principale svantaggio è legato al costo delle attrezzature necessarie.

Talvolta la lavorazione deve essere suddivisa in più stadi successivi al fine di ottenere le geometrie desiderate.

# Stampaggio

Il calcolo delle forze necessarie con metodi algebrici è possibile solo in casi estremamente semplici (si vedano gli esercizi precedenti relativi al processo di laminazione). Negli altri casi è necessario ricorrere ai metodi FEA o a metodi short-cut.

Nel caso di pezzi assialsimmetrici si può ricorrere alla seguente procedura semplificata:

- 1) Calcolo del volume totale del pezzo:  $V$
- 2) Calcolo dell'area della sezione del pezzo sul piano di bava, comprendendo quella del canale di bava, ma escludendo quella delle camere di bava:  $A_b$
- 3) Calcolo di un'altezza finale media equivalente  $h_m$  data da:

$$h_m = \frac{V}{A_b}$$

- 4) Definizione dell'altezza iniziale del massello  $h_0$ .

# Stampaggio

- 5) Calcolo della deformazione media e della velocità media di deformazione, nota la velocità di discesa della pressa o del maglio  $v$ :

$$\varepsilon_m = \ln\left(\frac{h_m}{h_0}\right)$$

$$\dot{\varepsilon}_m = \frac{v}{h_m}$$

- 6) Calcolo del flow stress medio:

$$\sigma_{f,m} = C \cdot \dot{\varepsilon}_m^n$$

- 1) Calcolo della forza di stampaggio:

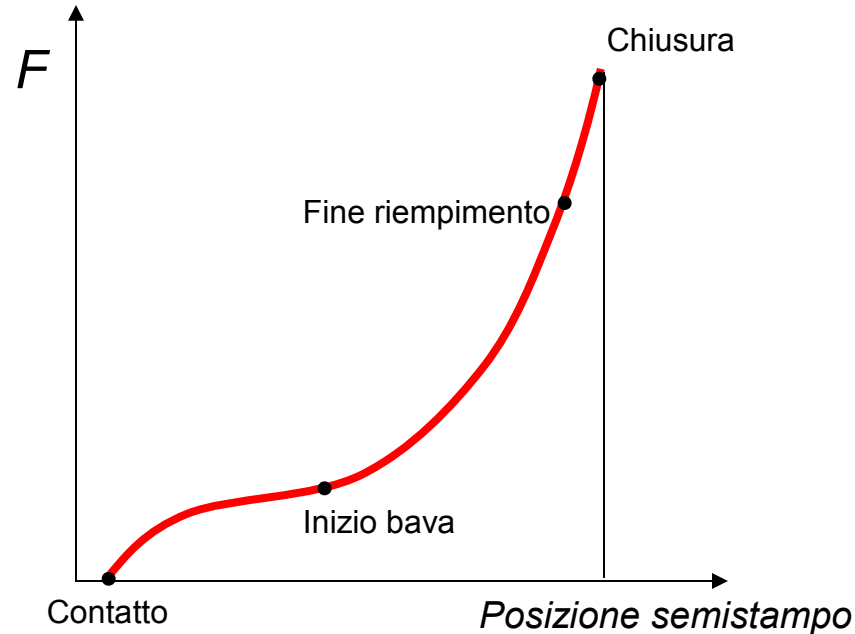
$$F_{\max} = K \cdot \sigma_{f,m} \cdot A_b$$

$K$  è una costante che tiene conto della complessità del pezzo ed è compresa normalmente circa tra 3 e 12.

# Stampaggio

Si osservi che nelle valutazioni fatte il termine “medio” si riferisce alla sezione del manufatto, mentre tutte le grandezze di deformazione e sforzo sono legate alla fase finale della deformazione di un cilindro che si considera equivalente al pezzo in lavorazione.

Ciò in quanto la forza di stampaggio è massima nell’istante finale del processo.



# Stampaggio

## Progettazione nel processo di stampaggio

Il problema presenta notevoli analogie con quanto visto riguardo ai procedimenti di produzione per fusione.

Si tratta di effettuare, una serie di scelte e dimensionamenti che, nei casi più semplici, possono essere così riassunti:

- ▶ Scelta del piano di bava, ovvero del piano di divisione degli stampi
- ▶ Dimensionamento dei sovrametalli
- ▶ Dimensionamento di angoli di spoglia e raccordi
- ▶ Dimensionamento del canale di bava e della camera scartabava
- ▶ Calcolo dei parametri di processo (forza, energia)
- ▶ Verifica del processo di stampaggio in relazione alle macchine disponibili



# Stampaggio

## Scelta del piano di bava

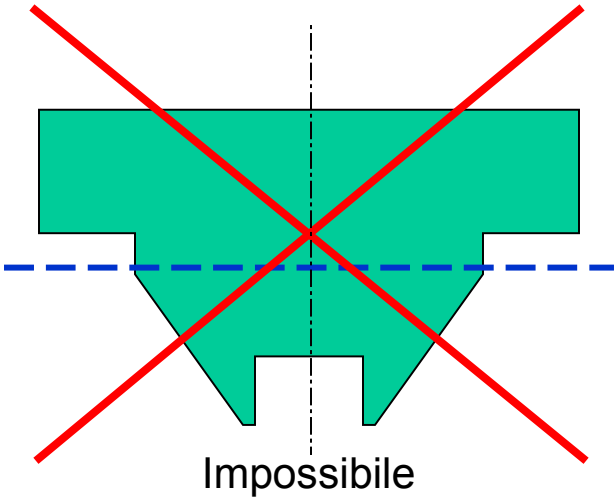
E' il problema analogo a quello della scelta del piano di divisione delle staffe nella lavorazione per fusione: si tratta di risolvere il problema dei sottosquadri.

La situazione è complicata dai seguenti fatti:

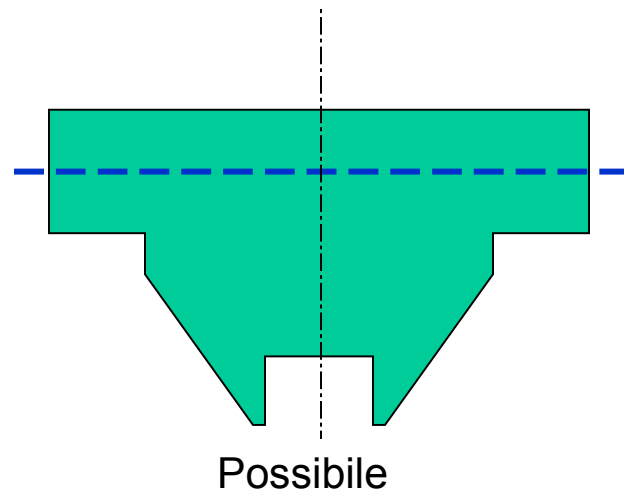
- Non è possibile adottare soluzioni progettuali quali inserti mobili, ecc.
- Bisogna valutare l'effetto delle spinte laterali, le quali tenderebbero ad incrementare l'usura dei sistemi di riferimento e guida
- La lavorazione degli stampi è costosa e quindi la geometria va ottimizzata tenendo presente questo fattore (ad es., dove possibile, è conveniente lavorare solo uno dei due semistampi).
- La scelta del piano di bava influenza la direzione della fibratura nel pezzo ottenuto e quindi la sua capacità di resistere alle sollecitazioni meccaniche
- E' possibile utilizzare più piani di suddivisione del pezzo al fine di risolvere il problema dei sottosquadri

# Stampaggio

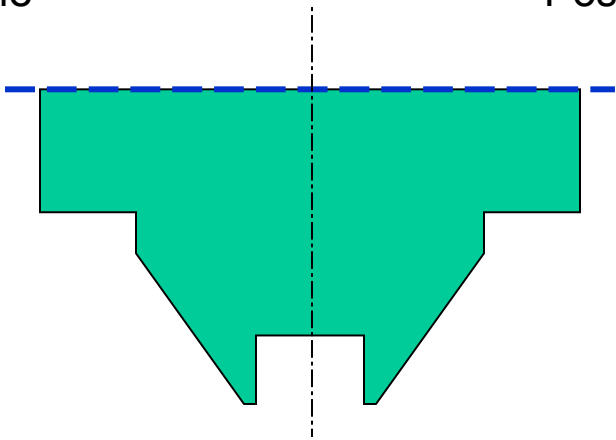
Esempi di scelta del piano di bava:



Impossibile



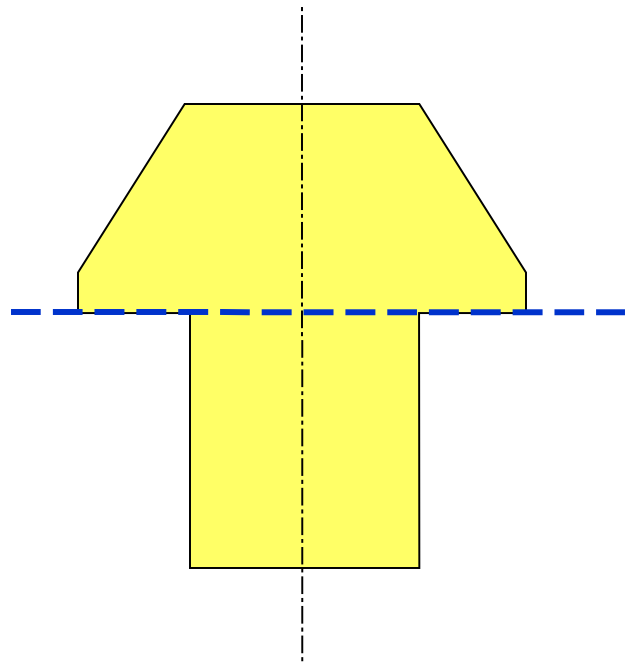
Possibile



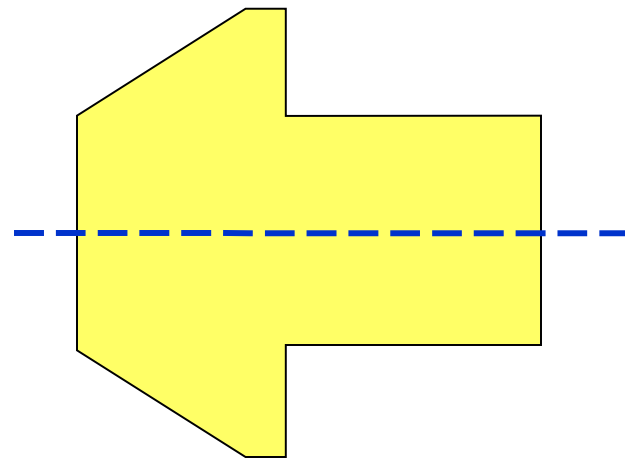
Economica

# Stampaggio

Esempi di scelta del piano di bava:



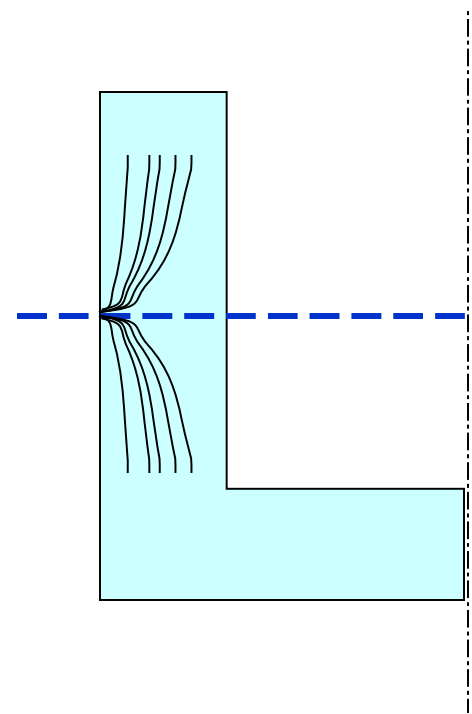
Economica



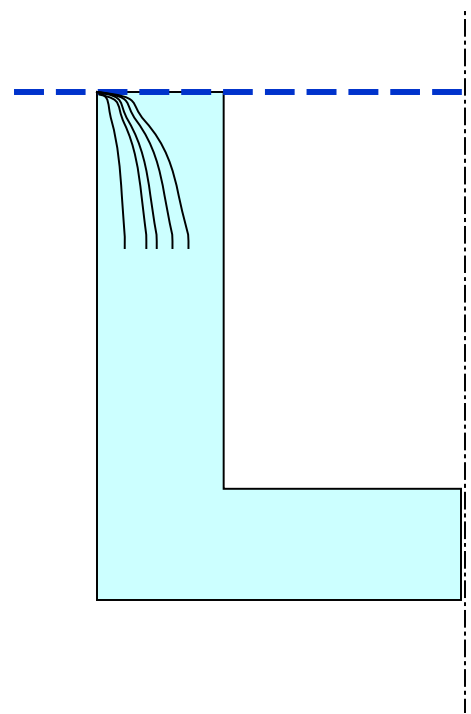
Meno economica

# Stampaggio

Esempi di scelta del piano di bava:



Peggior



Migliore

# Stampaggio

## Dimensionamento dei sovrametalli

I motivi per l'adozione di opportuni sovrametalli sono i seguenti:

- Necessità di conferire particolari caratteristiche alle superfici funzionali mediante lavorazioni successive per asportazione di truciolo
- Ritiri termici
- Perdite di metallo per ossidazione a caldo
- Compensazione di eventuali difetti di riempimento, delle tolleranze dimensionali tipiche del processo, dei difetti superficiali

Generalmente il valore del sovrametallo da adottare aumenta con le dimensioni del pezzo ed i valori consigliati sono riportati in apposite tabelle presenti nelle norme di riferimento.

# Stampaggio

## Angoli di spoglia

E' consigliabile, per facilitare la fuoriuscita del pezzo dallo stampo ed il riempimento dello stesso (in quanto si aumenta la sezione per il flusso plastico del materiale e si aumenta il suo volume e con esso la capacità termica), l'adozione di angoli di spoglia (o di **sformo**) per le superfici che, altrimenti, sarebbero perpendicolari al piano di bava.

In generale tali angoli dovrebbero essere maggiori per le parti concave del pezzo, il cui distacco non è favorito, come in quelle convesse, dal ritiro naturale del pezzo in fase di raffreddamento.

In generale tali angoli possono variare da  $6\div 7$  a  $10 \div 12$  gradi a seconda del rapporto d'aspetto delle parti.

Dal punto di vista dell'analisi economica valgono le considerazioni già fatte: maggiore è l'angolo di spoglia e maggiore sarà probabilmente l'entità dei costi delle lavorazioni di finitura e la quantità di materiale scartato.

# Stampaggio

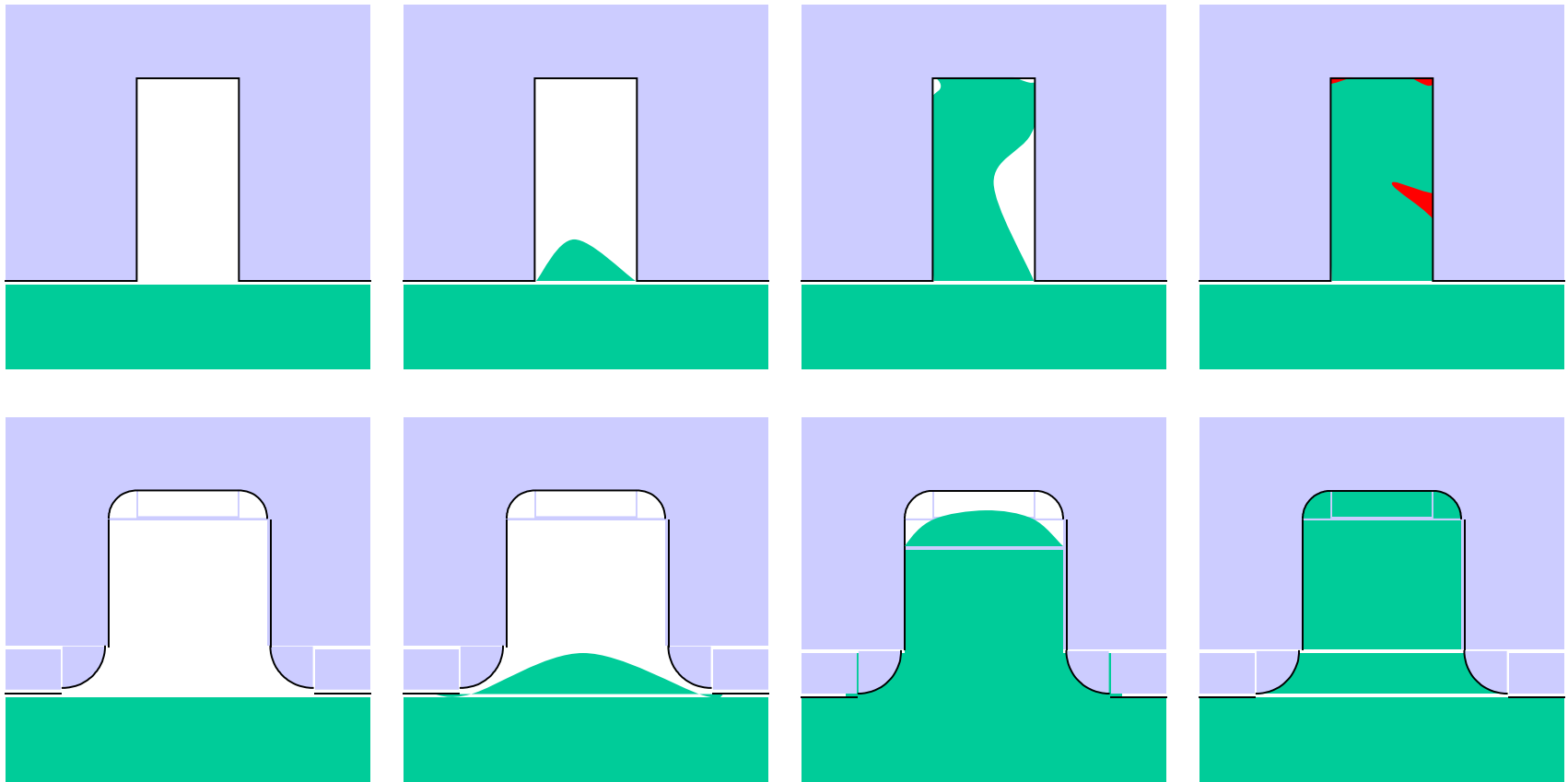
## Raccordi

L'adozione di opportuni raggi di raccordo al posto degli spigoli vivi è fondamentale perché:

- ✓ Si facilita il flusso plastico del materiale e quindi il riempimento dello stampo.
- ✓ Si evitano le concentrazioni di stress nello stampo e si prolunga, quindi, la sua vita.
- ✓ Si evitano le concentrazioni di stress nel pezzo finito e possibili fenomeni di **sopradosso** (**incollature**).

# Stampaggio

Funzione dei raccordi: formazione di un'incollatura e cattivo riempimento della cavità dello stampo.





# Stampaggio

## Canale di bava e camera scartabava

Il canale di bava è una cavità praticata sulla superficie dei due semistampi che circonda completamente l'impronta del pezzo.

Le sue funzioni sono essenzialmente le seguenti:

- ✓ Garantire il riempimento della cavità: quando il materiale, per effetto dello schiacciamento, fluisce nel canale di bava, si raffredda velocemente grazie al modesto spessore e quindi la sua plasticità diminuisce. Si forma quindi, attorno alla cavità, una corona di materiale freddo che si oppone al moto centrifugo di ulteriore materiale, favorendo lo scorrimento verticale ed il riempimento della cavità.
- ✓ Accogliere il materiale in eccesso.
- ✓ Consentire, mediante l'adozione di opportuni solchi, l'espulsione dell'aria.
- ✓ Ammortizzare gli urti tra i due semistampi, diminuendo l'usura ed il pericolo di rotture.

Il dimensionamento di canale e camera scartabava si effettua utilizzando geometrie normalizzate ed in base all'esperienza.

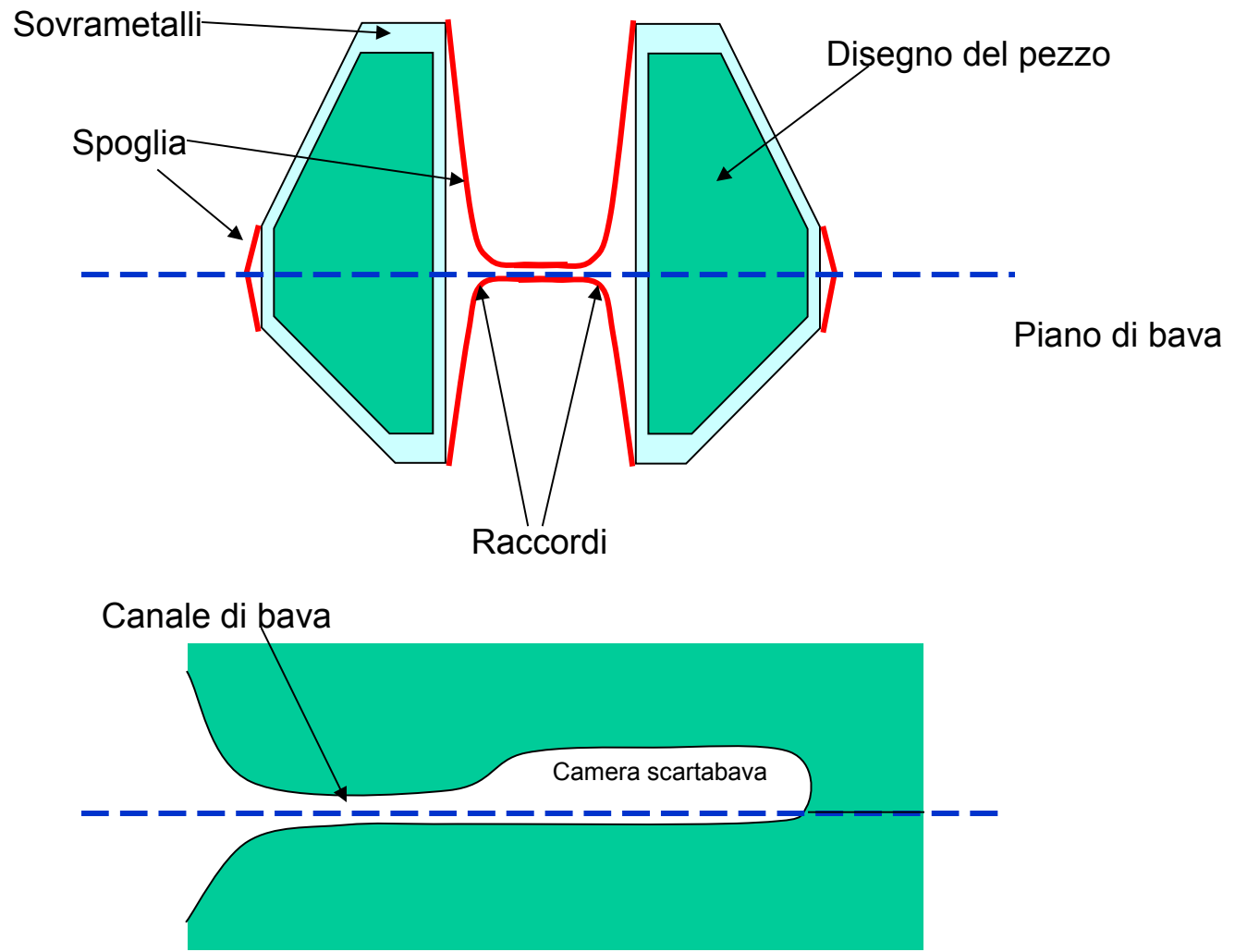
# Stampaggio

## Calcolo dei parametri di processo e verifica delle attrezzature disponibili

I calcoli e le verifiche di processo possono essere effettuati utilizzando metodi short-cut come quello precedentemente delineato o mediante metodi FEA.

# Stampaggio

Componenti del progetto di uno stampo.



# Stampaggio

## Costruzione degli stampi

Gli stampi vengono costruiti in acciai da utensili ad elevata resistenza alle alte temperature, all'usura ed agli shock termici.

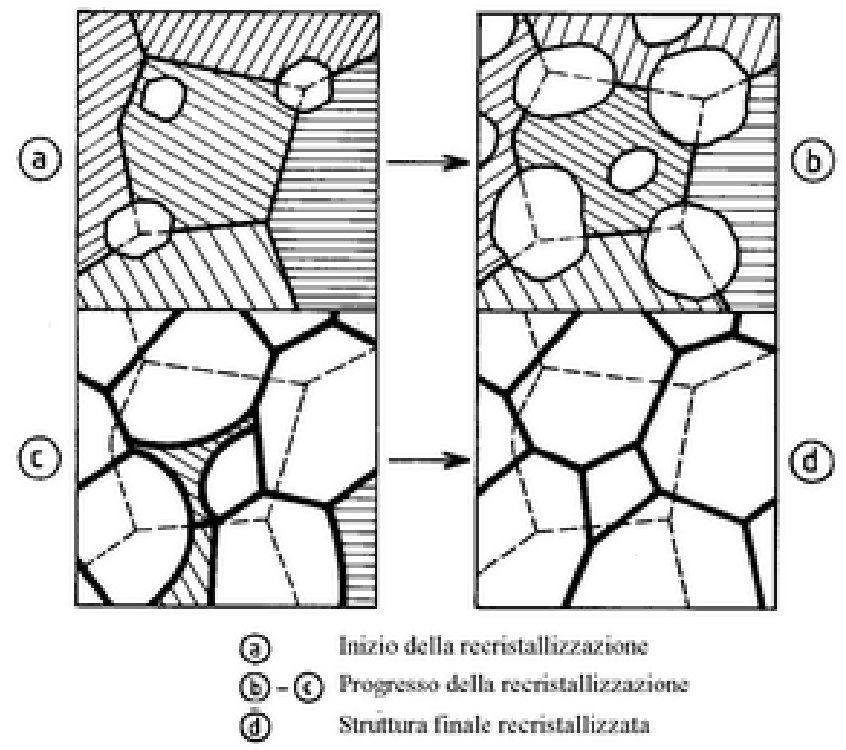
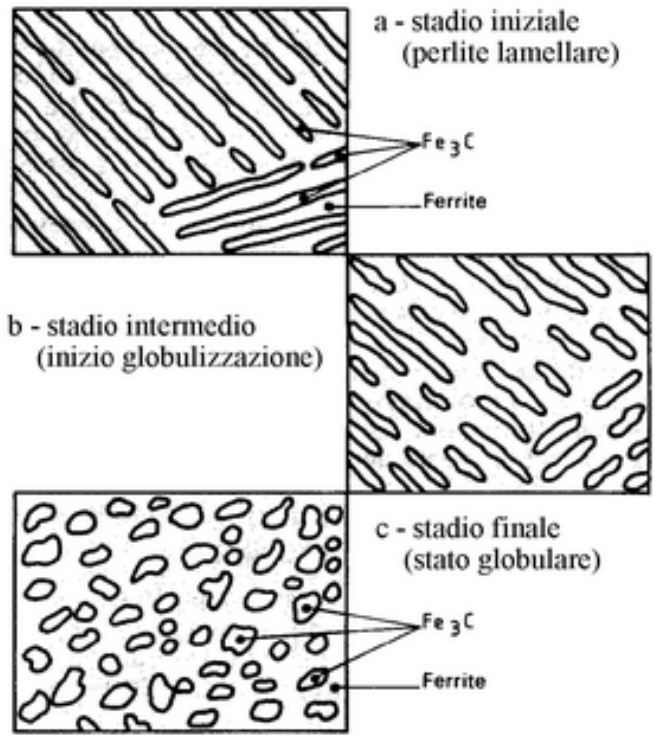
Essi sono forniti e lavorati generalmente allo stato di ricottura di sferoidizzazione: in tali condizioni la durezza è minima e la lavorabilità è massima.

Particolare cura viene prestata dai produttori di acciai da stampi nel controllo delle impurezze presenti, in quanto ogni discontinuità microstrutturale costituisce un potenziale innesco di cricca.

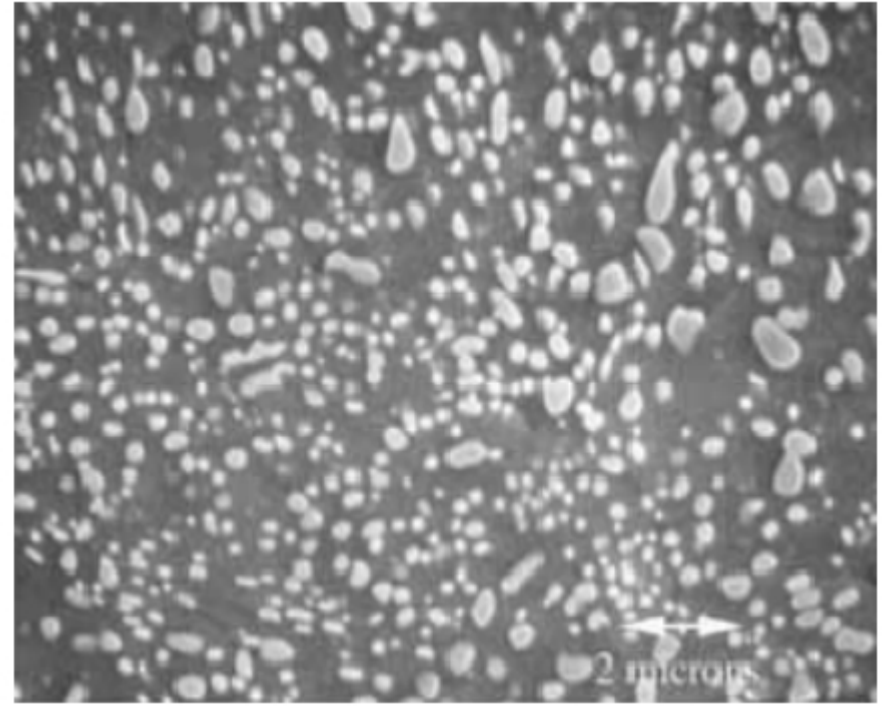
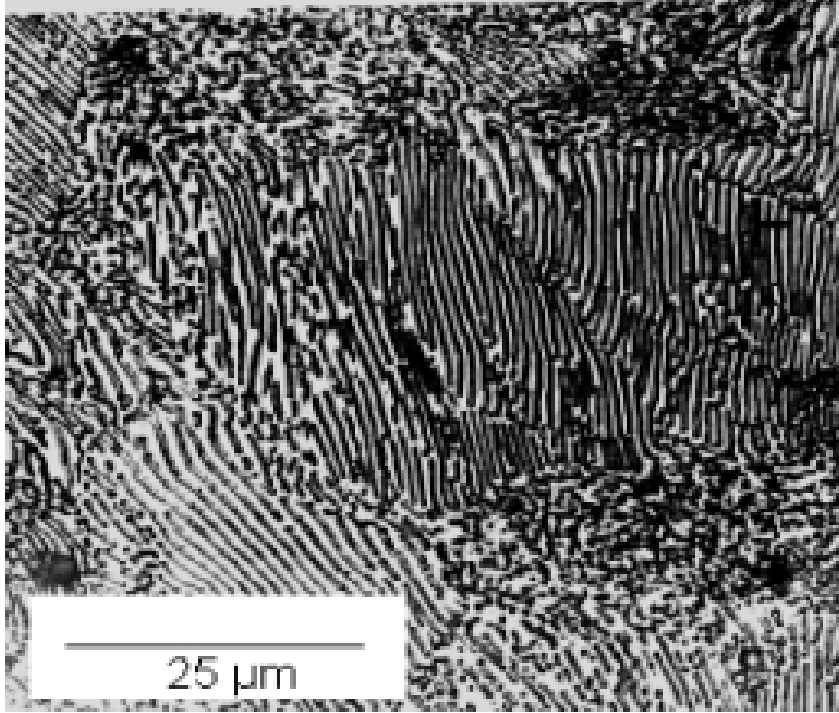
Viene inoltre posta particolare cura nell'assicurare l'assenza di tensioni interne nel materiale, le quali potrebbero compromettere la geometria delle cavità in seguito all'effettuazione di successivi trattamenti termici.

Normalmente, sugli stampi finiti, viene effettuato un trattamento di bonifica utilizzando forni ad atmosfera controllata per evitare reazioni chimiche superficiali (es.: ossidazioni) che porterebbero a perdite o a degrado del materiale.

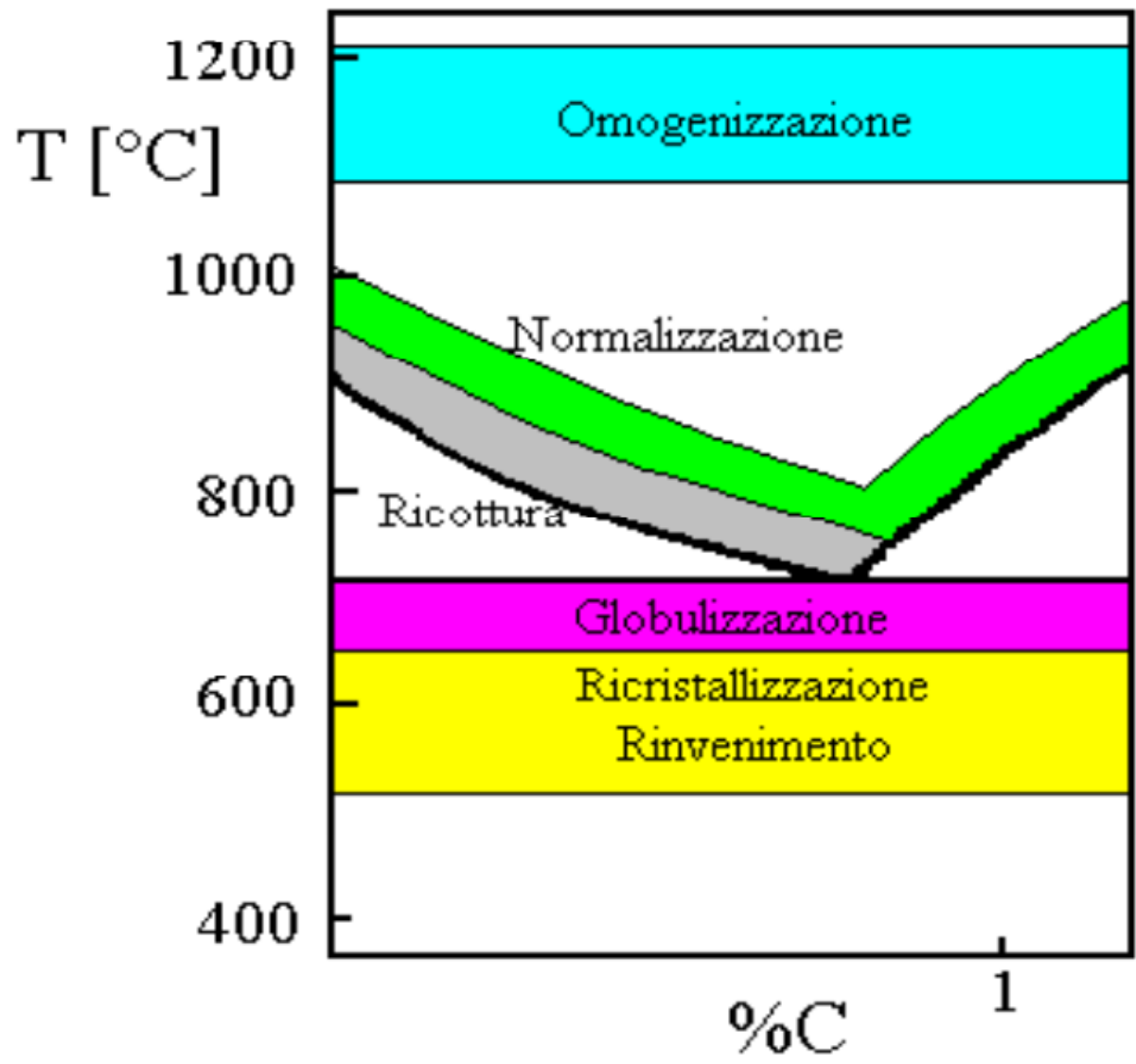
# Stampaggio



# Stampaggio



# Stampaggio



# Stampaggio

Talvolta, per aumentare la durata degli stampi, è consigliabile effettuare opportuni trattamenti superficiali (es.: nitrurazione, rivestimenti PVD, ecc.) per aumentare la durezza superficiale –e conseguentemente la resistenza all'usura- pur mantenendo elevata la tenacità del materiale bulk.

E' interessante osservare che alcuni trattamenti possono mettere in compressione le zone subsuperficiali del materiale, favorendo la resistenza alla fatica termomeccanica. Tuttavia spesso questi trattamenti, specie se non condotti ottimizzando i parametri di processo possono causare un infragilimento del materiale stesso, con effetto negativo per quanto riguarda la resistenza all'usura.

Per conferire particolari caratteristiche meccaniche alle zone particolarmente sollecitate, pur mantenendo intatte le caratteristiche di lavorabilità del materiale costituente lo stampo, vengono effettuati spesso dei riporti di materiale duro (es.: stellite) mediante tecniche di fusione al plasma o mediante laser.

Con queste tecniche è possibile attuare anche riparazioni o ricondizionamenti di stampi usurati.



# Stampaggio

La finitura superficiale degli stampi è importante soprattutto per il contenimento dei valori del coefficiente di attrito tra superficie delle impronte e materiale in fase di deformazione plastica e, in ultima analisi, per assicurare il corretto riempimento delle cavità mantenendo basse le forze di stampaggio.

L'adozione di rivestimenti duri e la superfinitura superficiale sono, in questo senso, particolarmente benefici.

Si adotta spesso, per controllare la temperatura degli stampi, per contenere l'usura, per evitare l'adesione e ridurre l'attrito, la lubrificazione delle superfici delle impronte mediante grafite, bisolfuro di molibdeno o altri prodotti adatti allo scopo.

Le impronte vengono ricavate in genere mediante lavorazioni meccaniche per asportazione di truciolo, adottando, sempre più spesso sistemi integrati CAD-CAM o mediante altre tecniche quali l'elettroerosione.

# Stampaggio

Dato l'elevato costo degli acciai da stampi, si adotta l'accorgimento di costruire con tali materiali solo il volume relativo all'impronta. Il resto dello stampo (sistemi di guide, di centraggio, attacchi, ecc.) viene realizzato in normali acciai da costruzione che oltre a risultare meno costosi, sono anche più facilmente lavorabili.

# Stampaggio

## Uso di stampi sbizzatori

E' spesso necessario, al fine di eseguire una prefissata trasformazione, deformare il semilavorato iniziale in più passaggi. Ciò è dettato da esigenze di:

- ✓ Corretto riempimento dello stampo
- ✓ Corretta disposizione delle fibre del materiale

Talvolta le varie impronte per gli sbizzati intermedi e quella di finitura vengono ricavate da un unico blocco di metallo. In questo modo è possibile attuare un processo di produzione continuo su un'unica pressa.

In ogni caso, tra le varie fasi di stampaggio, viene prevista -a meno che il volume del pezzo e quindi la sua capacità termica non sia sufficiente- una fase di riscaldamento intermedio, in modo tale da poter operare sempre in condizioni ottimali.

# Stampaggio

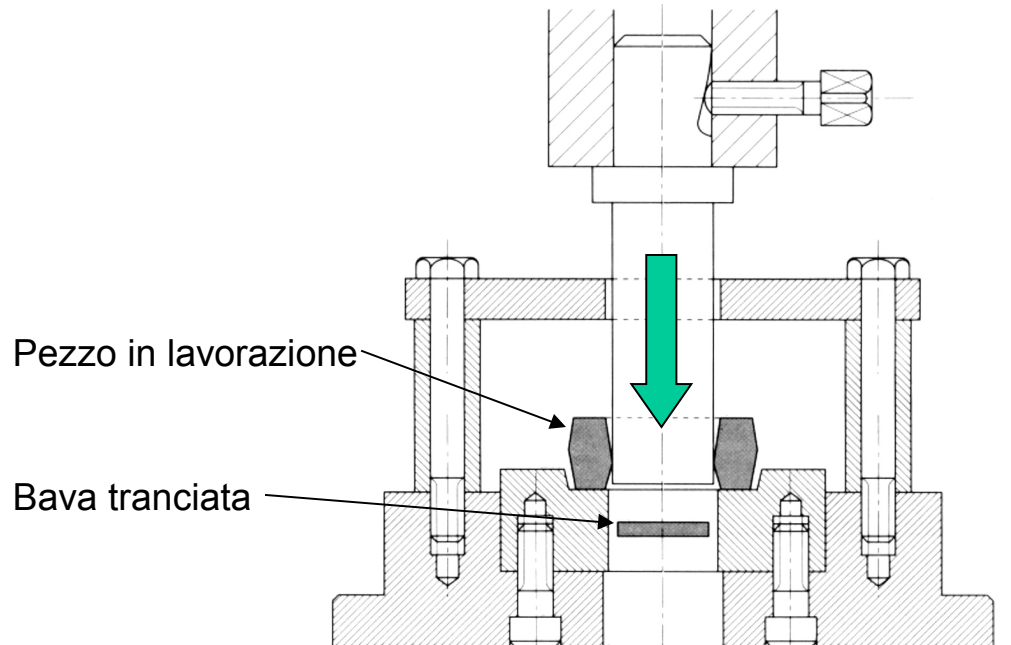
## Operazioni complementari

Sono costituite essenzialmente da:

- ▶ Preparazione dello spezzone di partenza, di dimensioni e forma opportune (normalmente ricavato mediante taglio da billette o barre).
- ▶ Riscaldamento sino alla temperatura di stampaggio, secondo quanto consigliato da apposite tabelle normalizzate in funzione del materiale lavorato.
- ▶ Eventuale sbazzatura su altre macchine utensili (es.: martellatrici, fucinatrici, ecc.)
- ▶ Dopo lo stampaggio: eliminazione delle bave (interne ed esterne), mediante attrezzature tranciabava, normalmente anch'esse montate su magli o presse. Tale operazione può essere condotta, se l'entità della forza richiesta lo permette, anche a freddo.
- ▶ Trattamento termico (bonifica, distensione, ecc.) al fine sia di conferire particolari caratteristiche al prodotto ottenuto, che di rilassare le tensioni interne accumulate.
- ▶ Discagliatura chimica (decapaggio) o meccanica (sabbatura, pallinatura, ecc.).

# Stampaggio

- ▶ Eventuale calibratura a freddo (**coniatura**), utile per ridurre i sovrametalli e le tolleranze delle zone non destinate ad ulteriori lavorazioni. Si effettua solo su pezzi di piccole dimensioni, dato che le forze richieste sarebbero, altrimenti, eccessive.
- ▶ Controlli non distruttivi sui pezzi finiti, al fine di mettere in evidenza eventuali difetti di lavorazione (incollaggi, porosità, inclusioni di scoria, ecc.)



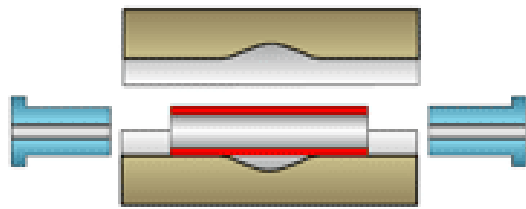
# Idroformatura

L'idroformatura è una tecnologia recente che consiste nella formatura di un componente mediante la pressione esercitata su di esso da un fluido idraulico – ad esempio acqua - contro uno stampo.

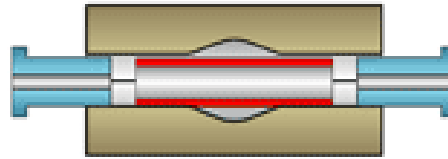
È applicabile a lamiera o ad elementi cavi come tubi o profilati estrusi, sia in lega leggera che in acciaio.

L'idroformatura di un profilato cavo avviene mediante il posizionamento dello stesso in uno stampo e l'introduzione al suo interno del fluido a pressione, ed è utilizzata soprattutto per ottenere geometrie complesse.

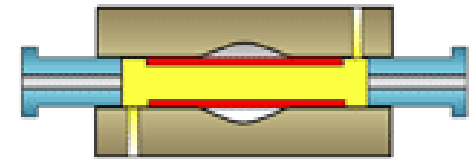
# Idroformatura



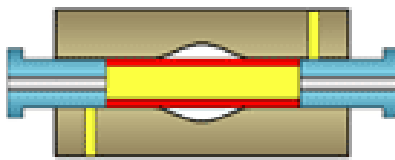
1. Posizionamento pezzo



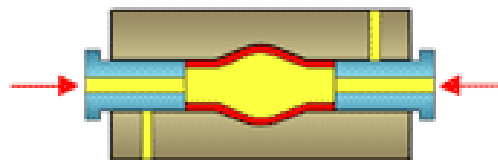
2. Chiusura stampi



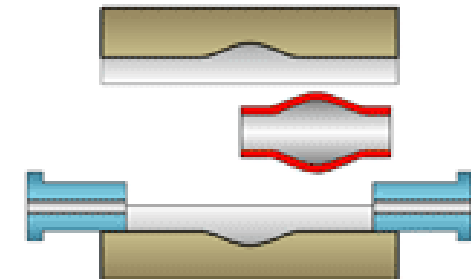
3. Immissione fluido



4. Chiusura sezioni



5. Formatura con fluido in pressione



6. Rimozione pezzo finito

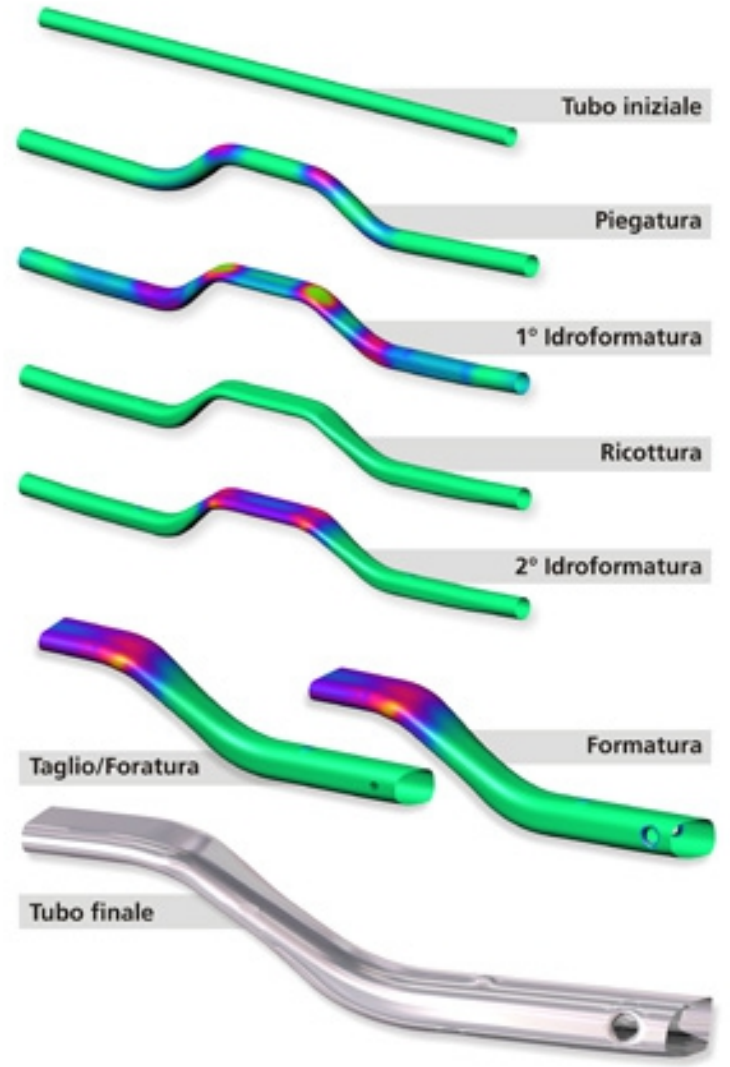
# Idroformatura

Vantaggi offerti dal processo:

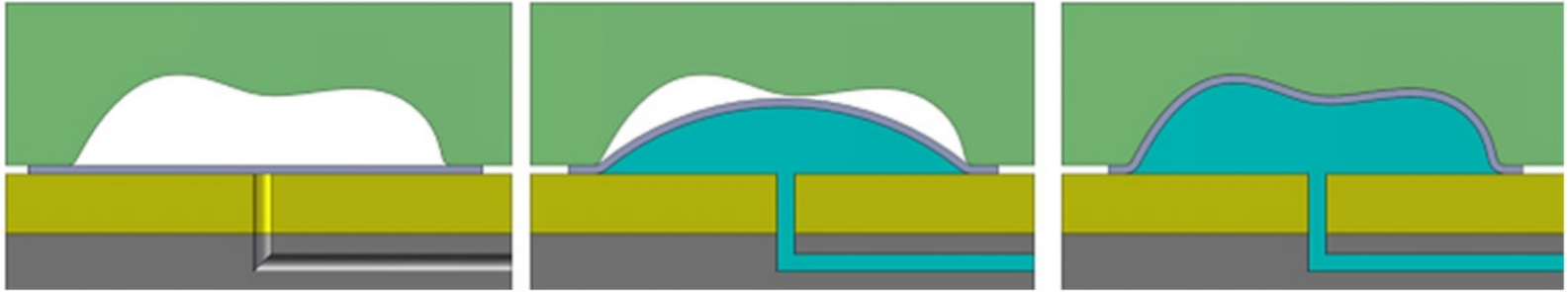
- Possibilità di variare la sezione nel senso della lunghezza del pezzo;
- Integrazione di parti e funzioni con conseguente riduzione del numero di componenti;
- Eliminazione di saldature;
- Stabilità dimensionale;
- Riduzione dei pesi.



# Idroformatura



# Idroformatura



L'idroformatura è probabilmente il processo più economico per ottenere componenti stampati partendo da lamiera. Lo stampo, così concepito, risulta essere di facile costruzione e nello stesso tempo molto economico. È possibile stampare tipologie di materiali diversi, spessori differenti o addirittura sandwich di acciaio e materiali plastici di vario genere, senza modificare minimamente lo stampo, infatti, è l'acqua che si adatta allo spessore della lamiera inserita.

# Idroformatura

La qualità superficiale della lamiera a contatto con l'acqua è ottima.

Il componente idroformato risulta poco sensibile al fenomeno del ritorno elastico ai fini della stabilità dimensionale dopo stampaggio. Infatti, come si può notare dalla figura centrale, la lamiera si deforma uniformemente e al cessare della pressione idraulica d'idroformatura, il ritorno elastico è uniforme su tutta la superficie del pezzo facendola rimanere stabile e non distorcendo la geometria del componente.

# Idroformatura



# Idroformatura



# Idroformatura



# Estrusione

## L'estrusione

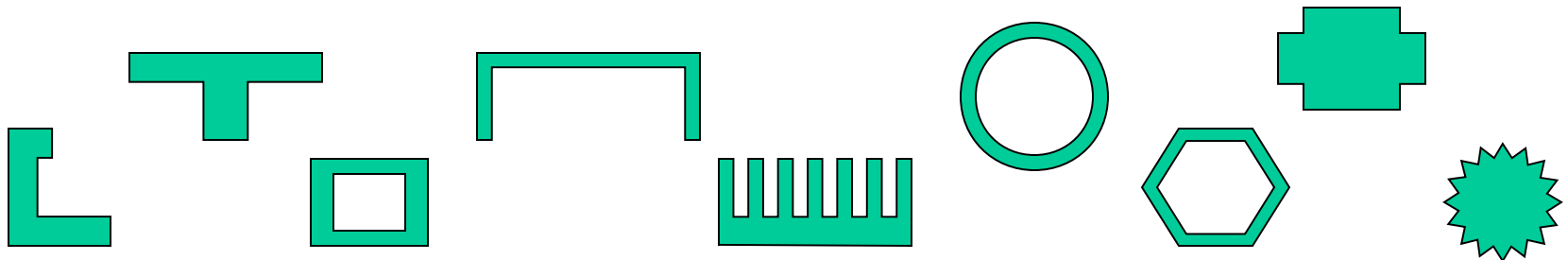
### Introduzione

E' una lavorazione per deformazione plastica nella quale il materiale in lavorazione viene forzato, mediante un pressa, a fuoriuscire da una matrice di sezione opportuna.

Normalmente le presse impiegate sono ad asse orizzontale, data la talvolta notevole estensione in lunghezza dei prodotti ottenuti (**estrusi**).

Tale lavorazione viene impegnata prevalentemente per la trasformazione di leghe leggere ed ottoni, ma anche (a caldo) per gli acciai.

La produttività e le riduzioni di sezione ottenibili sono notevoli.



# Estrusione

Il procedimento più comune è quello a caldo ( $400^{\circ} \div 500^{\circ}$  per leghe leggere,  $900^{\circ} \div 1300^{\circ}$  per gli acciai) attuato mediante l'ausili di appositi lubrificanti (materiali vetrosi, grafite, bisolfuro di molibdeno, talco, ecc.)

L'estrusione a freddo, pur comportando condizioni di lavoro più gravose, permette di ottenere migliori finiture superficiali e tolleranze dimensionali più ristrette, nonché migliori caratteristiche meccaniche in virtù dell'incrudimento introdotto.

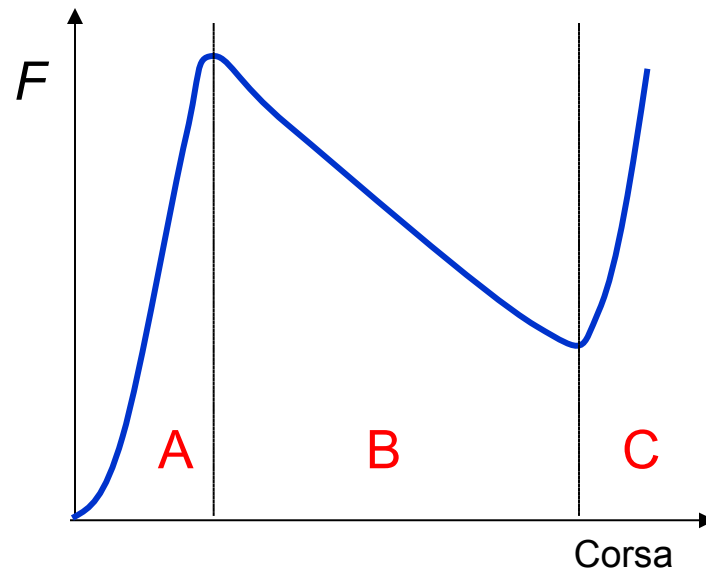
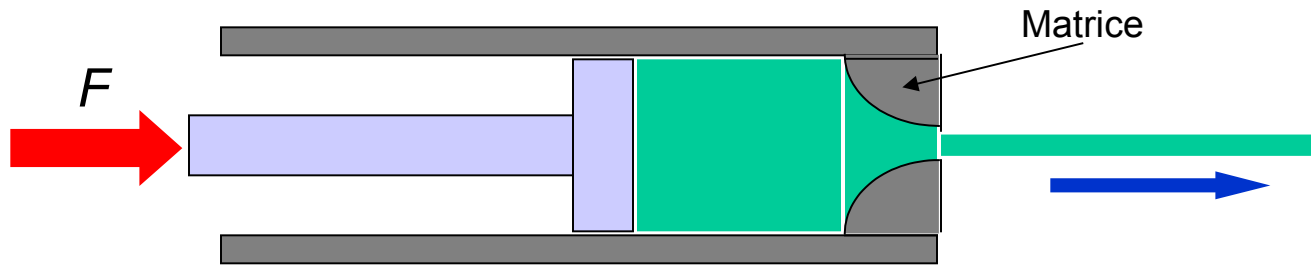
Si distinguono solitamente due metodi di estrusione: quella **diretta** e quella **inversa**.



# Estrusione

## Estrusione diretta

Schema del processo e delle forze generate.

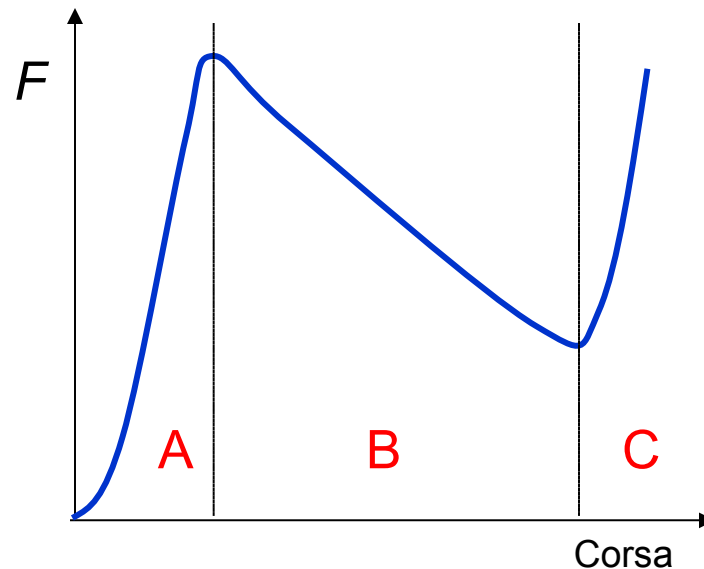


# Estrusione

**Fase A:** la forza cresce a causa dell'attrito di primo distacco della billetta dalle pareti della camera di estrusione ad la progressivo riempimento di quest'ultima.

**Fase B:** la forza diminuisce perché diminuisce l'area della superficie di contatto billetta-camera e quindi la forza d'attrito dinamico che è necessario vincere. Il moto del materiale è prevalentemente assiale

**Fase C:** Il materiale fluisce radialmente, cosicché la superficie d'attrito complessiva –e quindi la forza necessaria- tende ad aumentare.



# Estrusione

Il materiale non può essere completamente estruso a causa del notevole aumento della forza necessaria nella fase C, per cui:

O si elimina una parte della billetta

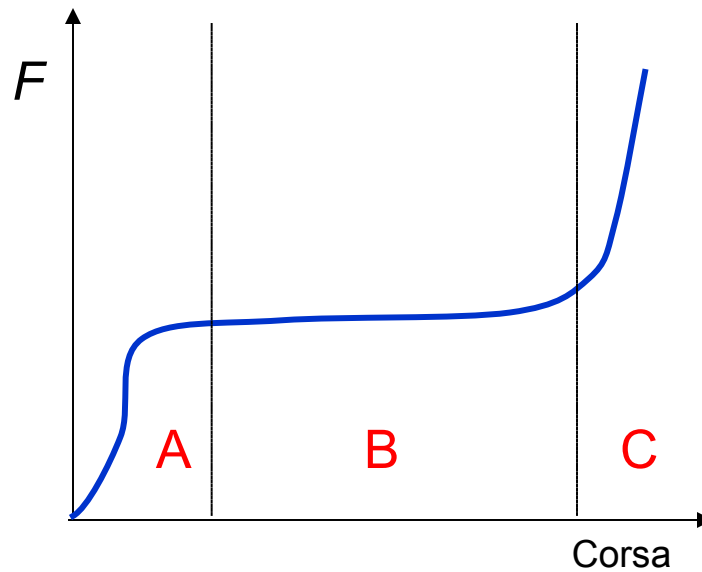
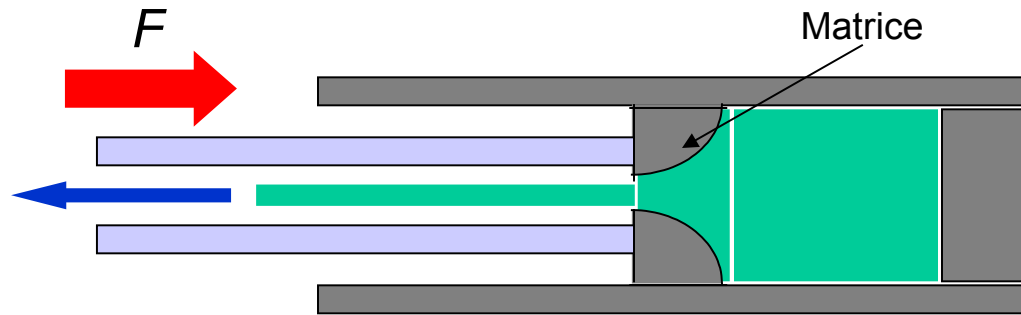
O si inserisce in camera di estrusione un'altra billetta e si prosegue l'estrusione. Questo procedimento porta spesso alla necessità di scartare (**scattivare**) parte del prodotto finito a causa di difetti di incollaggio.

In questo tipo di estrusione, a causa dell'attrito tra materiale e pareti del contenitore, il profilo di velocità in camera di estrusione non è piano: ciò può comportare dei difetti nel prodotto finito.

# Estrusione

## Estrusione inversa

Schema del processo e delle forze generate.

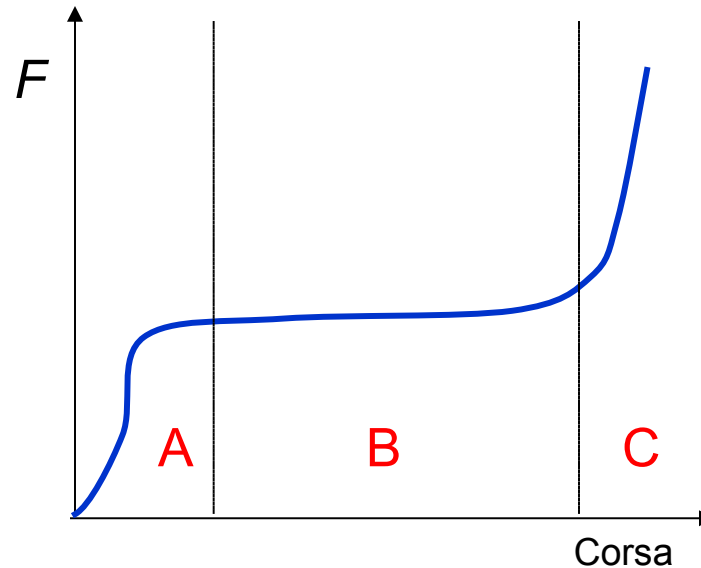


# Estrusione

**Fase A:** la forza cresce a causa del progressivo riempimento della camera di estrusione (non vi è distacco tra materiale e pareti della camera). Il valore della forza raggiunta è minore che nel caso dell'estrusione diretta

**Fase B:** la forza si mantiene pressochè costante.

**Fase C:** Il materiale fluisce radialmente, cosicché la superficie d'attrito complessiva –e quindi la forza necessaria- tende ad aumentare.



# Estrusione

Gli argomenti esposti porterebbero a concludere che, in ogni caso, sia favorevole adottare la tecnica di estrusione inversa grazie, in particolare, alla minore entità della forza necessaria ed alla sua costanza nella fase di estrusione. Tuttavia bisogna tenere presenti i maggiori costi legati all'uso del pistone cavo ed alle conseguenti complicazioni nella macchina attuatrice oleodinamica.

# Estrusione

## La matrice

Viene generalmente realizzata in acciaio da utensili ad alta resistenza (di caratteristiche simili a quelle degli acciai da stampi) o in carburi sinterizzati.

Data la complessità della forma è quasi sempre necessario effettuare la lavorazione della matrice, o perlomeno la sua finitura, mediante elettroerosione.

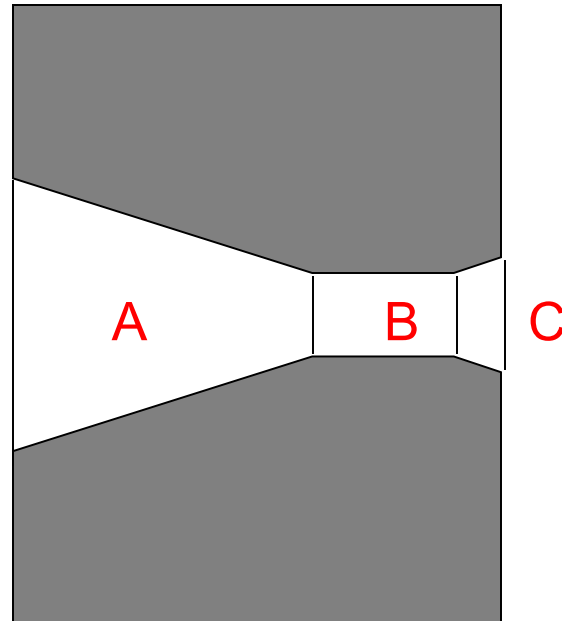
Generalmente la matrice è suddivisa in almeno tre zone: una di imbocco, una di calibrazione ed infine una di uscita. La dimensione di quest'ultima zona è particolarmente importante in quanto:

- ▶ Dimensioni eccessive comportano l'insorgenza di forze d'attrito elevate
- ▶ Dimensioni troppo piccole comportano una rapida usura, con conseguente messa fuori servizio della matrice in quanto non le tolleranze dimensionali non vengono più rispettate.
- ▶ Dimensioni scelte opportunamente permettono la compensazione della maggior capacità di fuoriuscita delle sezioni massicce con maggior forza d'attrito: in tal modo si può evitare la curvatura del prodotto.

# Estrusione

Il dimensionamento effettivo deve tenere conto fra l'altro:

- Nel caso di estrusione a caldo, dei ritiri termici
- Nel caso di estrusione a freddo, del ritorno elastico. In questo caso è importante prevedere una zona di raccordo all'uscita della matrice per evitare la formazione di criccate della medesima.



A: imbocco e riduzione

B: calibrazione

C: raccordo d'uscita



# Trafilatura

## La trafilatura

### Introduzione

E' una lavorazione per deformazione plastica a freddo nella quale il materiale in lavorazione viene forzato a fuoriuscire da una matrice di sezione opportuna (**filiera**) mediante forze di trazione.

La trafilatura viene considerata un'operazione di finitura in quanto le tolleranze dimensionali e le proprietà superficiali ottenibili sono eccellenti.

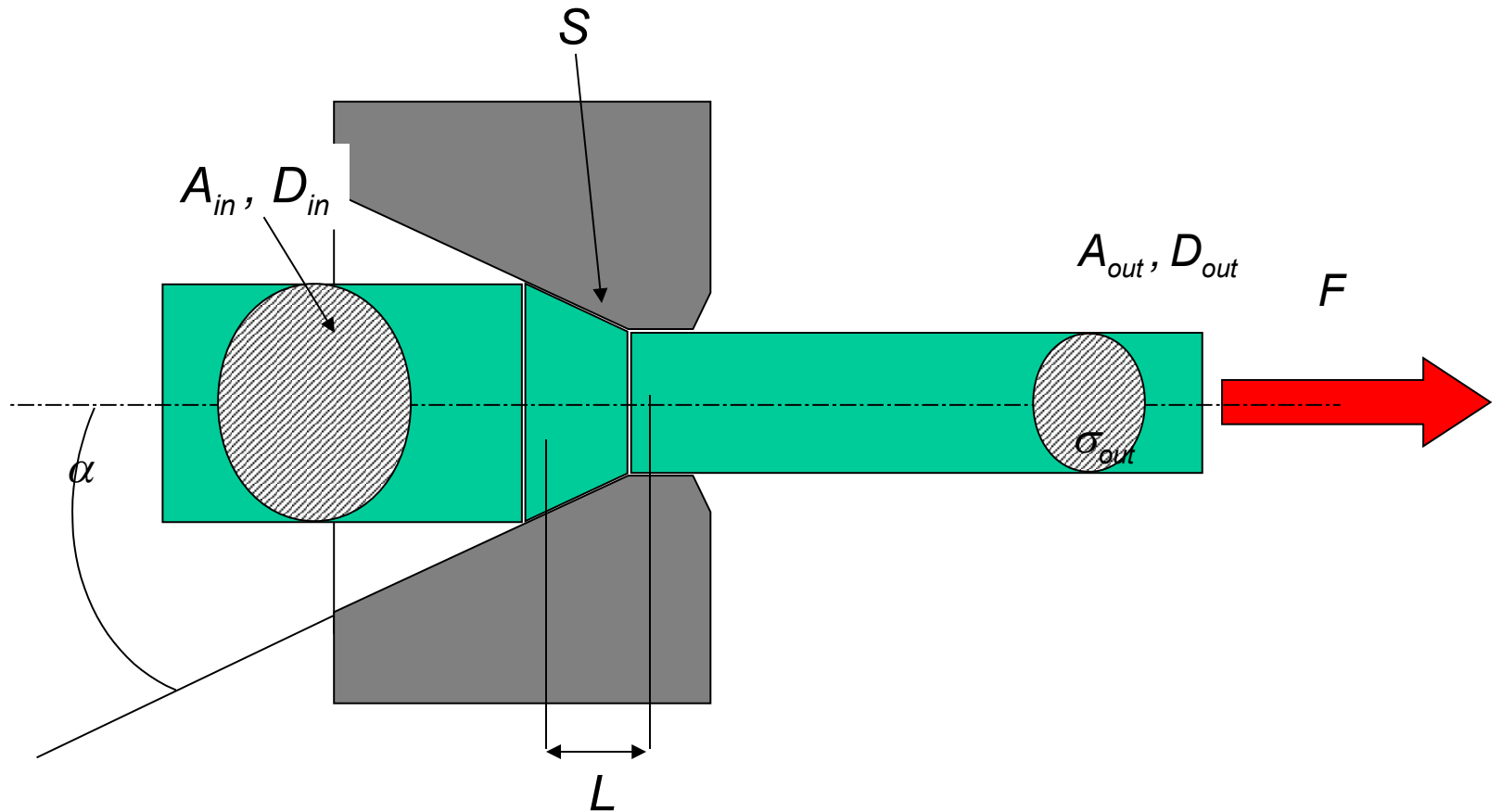
Le proprietà del materiale risultante sono ottime grazie alla deformazione direzionale del grano e del grado di incrudimento introdotto.

A volte risulta necessario eseguire più passaggi di trafilatura in serie al fine di ottenere i diametri richiesti: in tal caso può essere necessaria una ricottura intermedia del materiale.

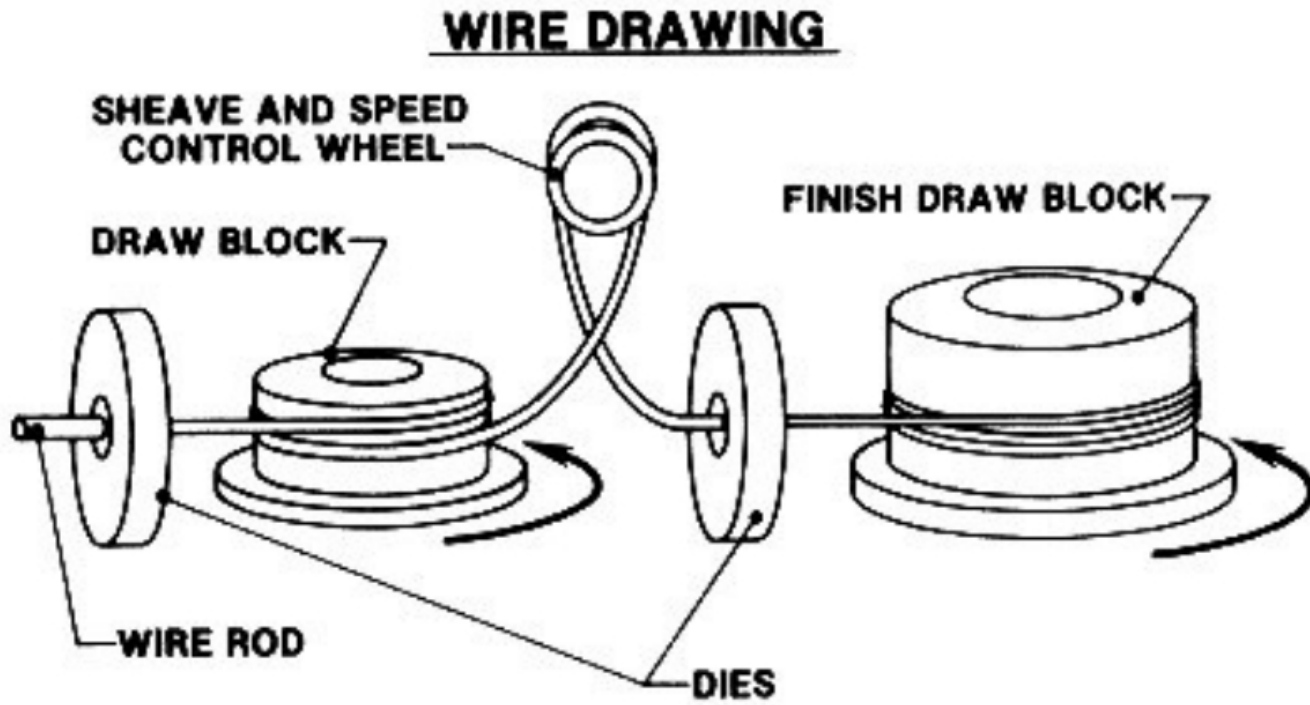
Fondamentale per la riuscita del processo è la lubrificazione, effettuata depositando un film di materiale opportuno (grasso, olio, saponi) sulla superficie della vergella prima dell'ingresso in filiera.

# Trafilatura

Schema per lo studio del processo di trafilatura.



# Trafilatura



# Trafilatura



# Trafilatura

Si noti innanzitutto che vi è un limite alla forza  $F$  applicabile dettato dal fatto che il materiale in uscita non deve venire snervato. Deve valere cioè la condizione:

$$F < \sigma_{y,out} \cdot A_{out}$$

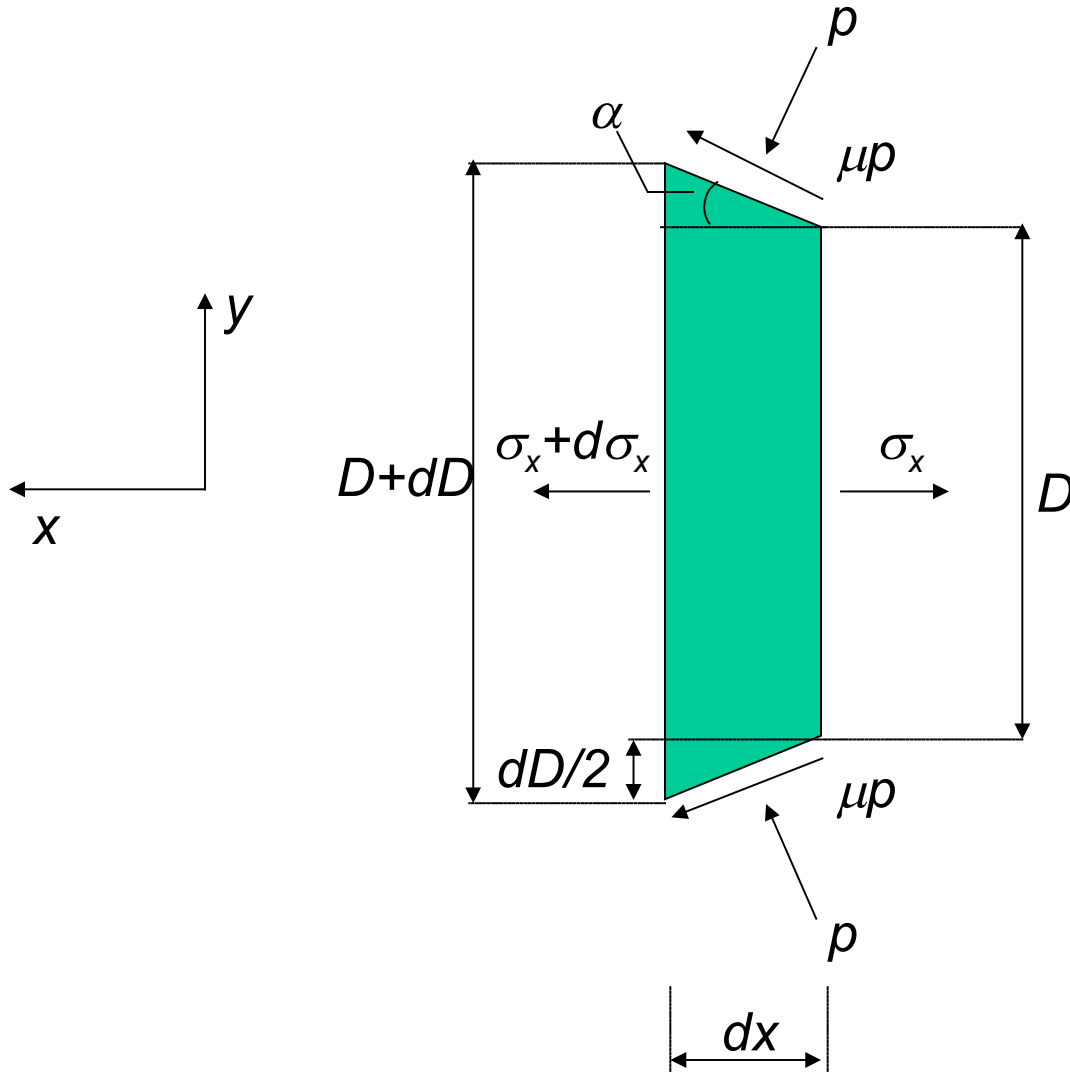
Con  $\sigma_{y,out}$  è stato indicato il limite di snervamento del materiale all'uscita della filiera (e quindi, incrudito).

Nelle ipotesi che il coefficiente d'attrito si mantenga costante nella filiera, si può studiare l'andamento degli sforzi, come nel caso della laminazione, all'interno della filiera troncoconica (trascurando quindi in prima approssimazione gli effetti della sezione di calibrazione d'uscita).

In tale caso è possibile impostare l'equazione differenziale di equilibrio su una "fettina" di materiale all'interno della filiera.

Supponiamo, come al solito, deformazione piana ed uniforme.

# Trafilatura



# Trafilatura

L'equilibrio in direzione  $y$  è assicurato dalla simmetria della geometria e delle forze agenti. Per scrivere l'equilibrio in direzione  $x$ , detta  $S$  la superficie laterale del solido troncoconico si noti preliminarmente che:

$$S = \frac{\pi \cdot D \cdot dx}{\cos(\alpha)}$$

$$\tau_{\text{attrito}} = \frac{\rho \cdot S \cdot \mu}{S} = \rho \cdot \mu$$

$$D = D_{\text{out}} + 2 \cdot \text{tg}(\alpha) \cdot x$$

$$dD = 2 \cdot \text{tg}(\alpha) \cdot dx \Rightarrow dx = \frac{dD}{2 \cdot \text{tg}(\alpha)}$$

L'equazione di equilibrio alla traslazione orizzontale può essere scritta allora come:

$$\frac{\pi}{4} \cdot (\sigma_x + d\sigma_x) \cdot (D + dD)^2 - \frac{\pi}{4} \cdot \sigma_x \cdot D^2 + S \cdot (\rho \cdot \mu \cdot \cos(\alpha) + \rho \cdot \sin(\alpha)) = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{\pi}{4} \cdot (\sigma_x + d\sigma_x) \cdot (D^2 + 2 \cdot D \cdot dD) - \frac{\pi}{4} \cdot \sigma_x \cdot D^2 + \frac{\pi \cdot D \cdot dx \cdot \rho}{\cos(\alpha)} (\mu \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha)) = 0 \Rightarrow$$

# Trafilatura

Proseguendo e semplificando:

$$\Rightarrow 2 \cdot \sigma_x \cdot D \cdot dD + d\sigma_x \cdot D^2 + 4 \cdot p \cdot D \cdot (\mu + \operatorname{tg}(\alpha)) \cdot dx = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 2 \cdot \sigma_x \cdot dD + d\sigma_x \cdot D + 4 \cdot p \cdot (\mu + \operatorname{tg}(\alpha)) \cdot dx = 0 \Rightarrow$$

Ricordiamo ed introduciamo l'espressione per  $dx$  in funzione di  $dD$ :

$$\Rightarrow 2 \cdot \sigma_x \cdot dD + d\sigma_x \cdot D + 4 \cdot p \cdot (\mu + \operatorname{tg}(\alpha)) \cdot \frac{dD}{2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha)} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 2 \cdot \sigma_x \cdot dD + d\sigma_x \cdot D + 2 \cdot p \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\operatorname{tg}(\alpha)}\right) \cdot dD = 0$$

Per il flow stress, per Tresca, vale la solita (ricordando però che la deformazione è a freddo):

$$\sigma_x + p = 2 \cdot C$$



# Trafilatura

Ponendo  $\mu / \operatorname{tg}(\alpha) = B$ , sostituendo e raccogliendo, si ottiene:

$$\begin{aligned}
 & 2 \cdot \sigma_x \cdot dD + d\sigma_x \cdot D + 2 \cdot p \cdot (1 + B) \cdot dD = 0 \Rightarrow \\
 & \Rightarrow (4 \cdot C - 2 \cdot p) \cdot dD - dp \cdot D + 2 \cdot p \cdot (1 + B) \cdot dD = 0 \Rightarrow \\
 & \Rightarrow 4 \cdot C \cdot dD - dp \cdot D + 2 \cdot p \cdot B \cdot dD = 0 \Rightarrow \\
 & \Rightarrow \boxed{\frac{dD}{D} = \frac{dp}{4 \cdot C + 2 \cdot p \cdot B}}
 \end{aligned}$$

L'analoga espressione in funzione dello stress  $\sigma_x$  è la seguente:

$$\boxed{\frac{dD}{D} = \frac{d\sigma_x}{2 \cdot B \cdot \sigma_x - 4 \cdot C \cdot (1 + B)}}$$

# Trafilatura

L'equazione può essere integrata ponendo, come condizioni al contorno:

$$D = D_{in} \Rightarrow \sigma_x = \sigma_{back}$$

$$D = D_{out} \Rightarrow \sigma_x = \sigma_{pull}$$

$$\frac{\sigma_{pull}}{2 \cdot C} = \frac{1+B}{B} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{D_{out}}{D_{in}} \right)^{2 \cdot B} \right] + \frac{\sigma_{back}}{2 \cdot C} \cdot \left( \frac{D_{out}}{D_{in}} \right)^{2 \cdot B}$$

$$B = \frac{\mu}{\operatorname{tg}(\alpha)}$$

# Trafilatura

L'equazione ottenuta ci permette (oltre che di effettuare un calcolo dello sforzo sulla sezione di uscita noti i parametri di sistema), di fare alcune deduzioni:

- ✓ Lo sforzo sulla sezione d'uscita è funzione crescente del rapporto di riduzione: esisterà pertanto un valore limite per tale parametro al di sopra del quale il materiale, all'uscita, si deformerà plasticamente per lo sforzo di trazione necessario.
- ✓ Il valore di tale sforzo, com'era da aspettarsi, è funzione decrescente del coefficiente d'attrito.
- ✓ Il valore dello sforzo di trazione diminuisce all'aumentare di  $\alpha$ . Sembrerebbe quindi conveniente operare con valori di  $\alpha$  grandi (in effetti in tale modo la superficie della filiera in contatto con il materiale è più piccola e quindi più piccole sono le forze d'attrito generate). Purtroppo bisogna tenere presente che, all'aumentare di  $\alpha$ , aumentano gli sforzi legati alle deformazioni interne del materiale, che finora non sono stati considerati. Esisterà dunque un valore dell'angolo  $\alpha$  ottimo per ogni valore del rapporto di riduzione t.c. lo sforzo generato sarà minimo.

# Trafilatura

Il massimo valore del rapporto di riduzione può essere valutato, per esempio, supponendo che  $\sigma_{back}=0$  e ponendosi nella condizione di snervamento (si osservi che  $C$  è un valore di flow stress medio per il materiale in fase di deformazione –e ciò costituisce ovviamente un'approssimazione–, mentre il valore di snervamento che deve essere utilizzato per il calcolo della riduzione limite è quello del materiale incrudito)

$$\frac{\sigma_{yeld,pull}}{2 \cdot C} = \frac{1+B}{B} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{D_{out}}{D_{in} \Big|_{MAX}} \right)^{2 \cdot B} \right]$$

Per valutare il valore del flow stress del materiale incrudito si può fare uso del modello già esposto e della relativa espressione per il flow stress medio:

$$\sigma_{yeld,pull} = K \cdot \varepsilon^n$$

$$\bar{\sigma}_f = 2 \cdot C = K \cdot \frac{\varepsilon^n}{n+1}$$

# Trafilatura

Sostituendo si ottiene:

$$1 = \frac{1}{n+1} \cdot \frac{1+B}{B} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{D_{out}}{D_{in} \Big|_{MAX}} \right)^{2 \cdot B} \right]$$

E' possibile ovviamente stimare il valore della forza di trazione richiesta semplicemente come:

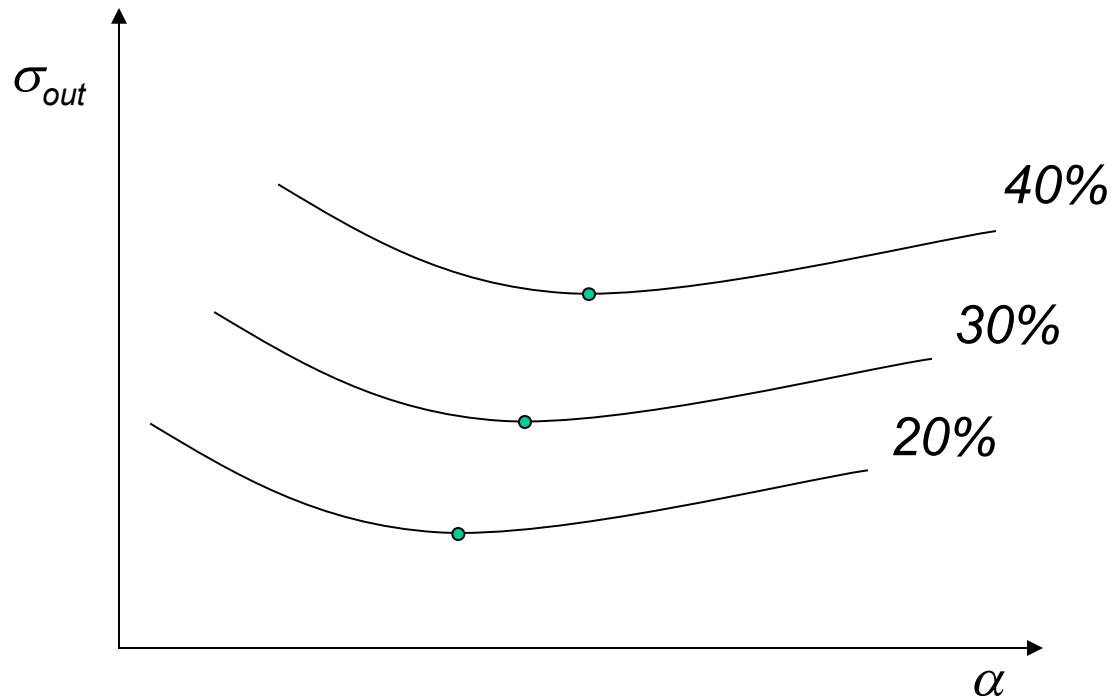
$$F_{pull} = \sigma_{pull} \cdot A_{out}$$

Per la potenza, detta  $v$  la velocità di trafilatura, vale invece l'espressione:

$$P_{draw} = F_{pull} \cdot v$$

# Trafilatura

Andamento dello sforzo sulla sezione d'uscita al variare dell'angolo  $\alpha$  e del rapporto di riduzione  $D_{out}/D_{in}$ .



# Lavorazione delle lamiere

## Lavorazioni delle lamiere

### Introduzione

La gamma e la diffusione di prodotti derivanti dalla lavorazione delle lamiere sono molto vaste (settore automobilistico, elettrodomestici, ecc.).

Alcuni processi importanti sono:

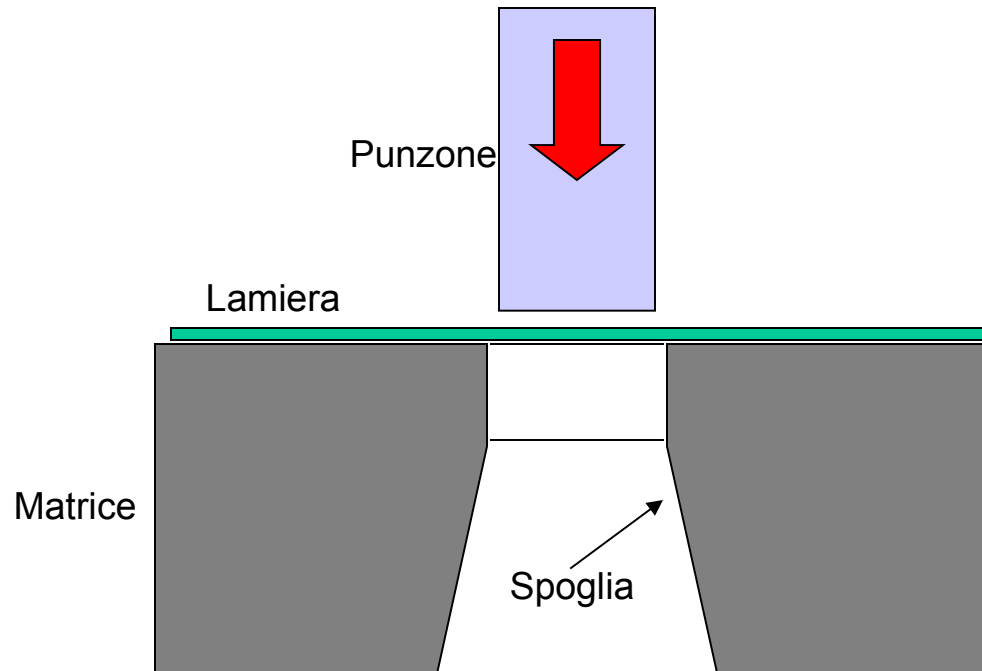
- ✓ Tranciatura
- ✓ Piegatura
- ✓ Imbutitura

# Lavorazione delle lamiere

## Tranciatura (e punzonatura)

Con l'operazione di tranciatura è possibile ottenere figure geometriche piane predefinite a partire, in genere, da un nastro o da un foglio.

La lavorazione si esegue alla pressa secondo il principio illustrato in figura. Si osservi la presenza degli angoli di spoglia, i quali permettono la libera caduta dello **sfrido**.





# Lavorazione delle lamiere

Tra punzone e matrice deve esserci un gioco sufficientemente grande da evitare eccessivi sforzi di tranciatura, ma non tanto da provocare deformazioni eccessive del materiale lavorato (**bave**). Esso viene scelto, mediante l'uso di formule empiriche, in base al tipo di materiale lavorato.

La forza di tranciatura si può valutare, detto  $l$  il perimetro del contorno tranciato,  $s$  lo spessore della lamiera e  $\tau$  la resistenza specifica al taglio, (approssimativamente 4/5 del valore di  $\sigma_{uts}$ ), come:

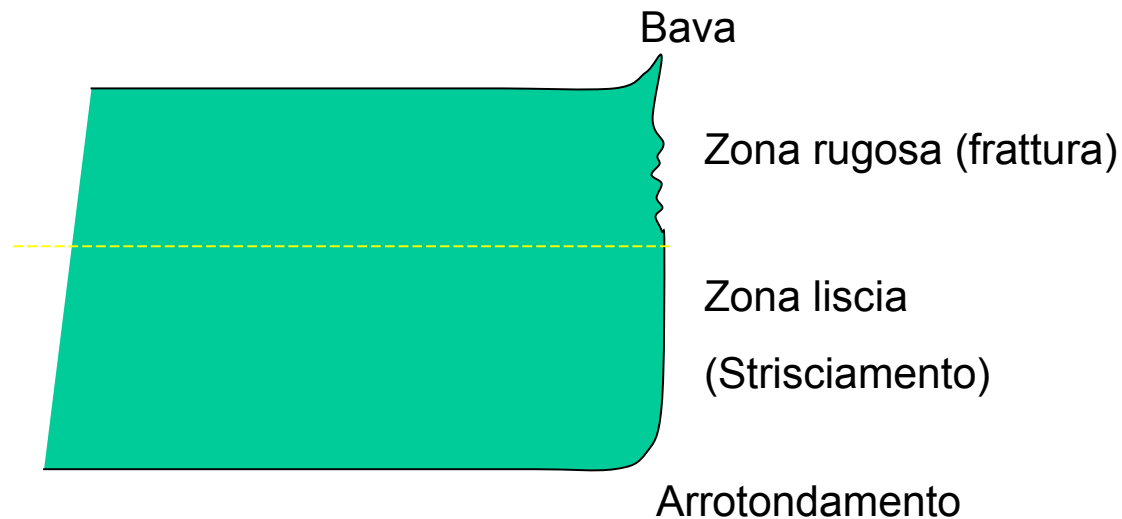
$$F_{\max} = \tau \cdot l \cdot s$$

La forza, in realtà, varia durante il processo, in quanto il punzone inizialmente penetra nella lamiera e la deforma (forza crescente) dopodichè si forma una frattura ed il punzone spinge lo sfrido finchè esso cade (forza calante e costante una volta avvenuto il completo distacco e fino alla caduta dello sfrido).

Il fatto che la spoglia non si estenda sino alla superficie è legato alla necessità di ottenere una migliore precisione nel tranciato ed avere la possibilità di riaffilare la matrice.

# Lavorazione delle lamiere

Il prodotto ottenuto presenta sempre dei difetti, facilmente spiegabili pensando alla modalità di esecuzione del processo.



# Lavorazione delle lamiere

Per ottenere una buona finitura del tranciato è necessario che il raggio di curvatura degli spigoli di punzone e matrice sia piccolo.

Per ridurre la forza necessaria è possibile utilizzare punzoni (o matrici) a superficie angolata, in modo che la tranciatura avvenga progressivamente. Se si inclina il punzone, il tranciato risulterà piano, mentre la lamiera tenderà a svergolarsi.

Si osservi infine che, mentre nella tranciatura il pezzo tagliato risulta essere il prodotto, nella punzonatura esso rappresenta lo sfrido.

Tuttavia è sempre più diffusa la tendenza ad utilizzare macchine punzonatrici (CNC) in sostituzione delle macchine di tranciatura, a causa del minore costo degli utensili e della maggiore versatilità. Un difetto di questo sistema è la relativa lentezza delle operazioni.

# Lavorazione delle lamiere

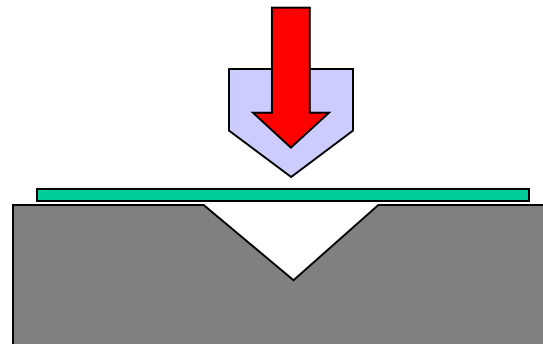
## Piegatura

L'operazione di piegatura segue tipicamente quella di tranciatura; essa permette di ottenere elementi la cui forma deve corrispondere ad una superficie geometricamente sviluppabile in piano.

Essa consiste nel sottoporre la lamiera a flessione nel campo delle deformazioni plastiche.

Nel progettare le matrici di piegatura è necessario tenere presente il ritorno elastico del materiale: i valori correttivi sono catalogati in funzione della geometria che si intende ottenere e del materiale lavorato.

Si osservi che il raggio di curvatura ottenibile ha un limite minimo, al di sotto del quale l'allungamento delle fibre tese del materiale in lavorazione diventa tale da provocarne la frattura.



# Lavorazione delle lamiere

## Imbutitura

E' una lavorazione effettuata tipicamente alla pressa che consente di ottenere oggetti cavi a partire da lastre piane mediante deformazione a freddo in zona di plasticità.

Per evitare la formazione di pieghe nella lamiera si dispone, sopra la medesima, un premilamiera che la solleciti con un opportuno carico di compressione contro la matrice.

Lo stato di sforzo e la conseguente deformazione del materiale è complesso. Lo spessore del prodotto imbutito non risulta, in generale, costante.

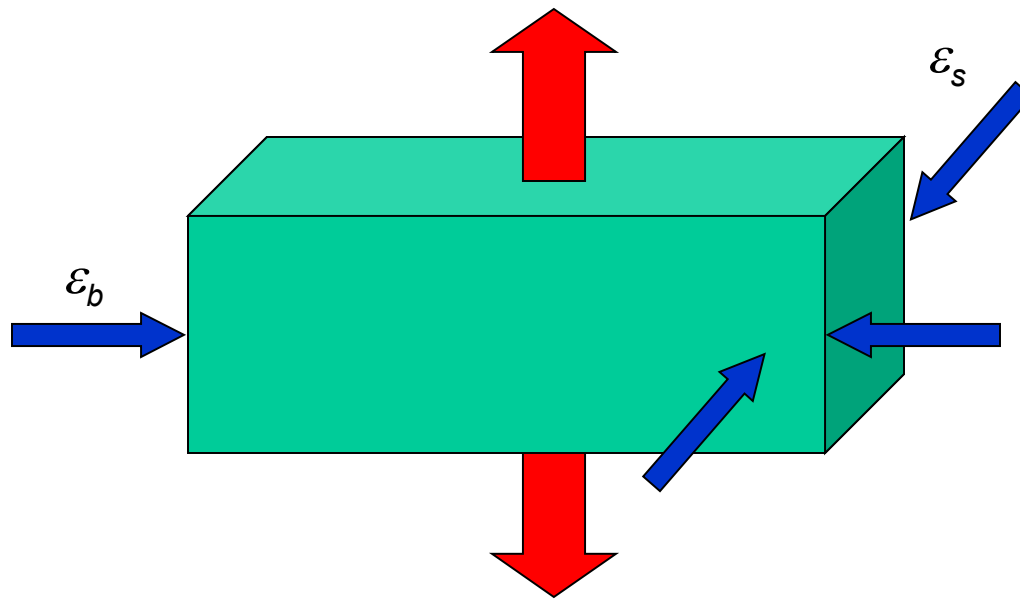
A complicare il problema vi è la questione dell'anisotropia delle lamiere, derivante dal processo di laminazione.

Si definisce anisotropia normale la seguente grandezza:

$$r = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_s}$$

# Lavorazione delle lamiere

Tale coefficiente è il rapporto che si ha, in una prova di trazione, tra deformazione nella direzione della larghezza e deformazione nella direzione dello spessore.



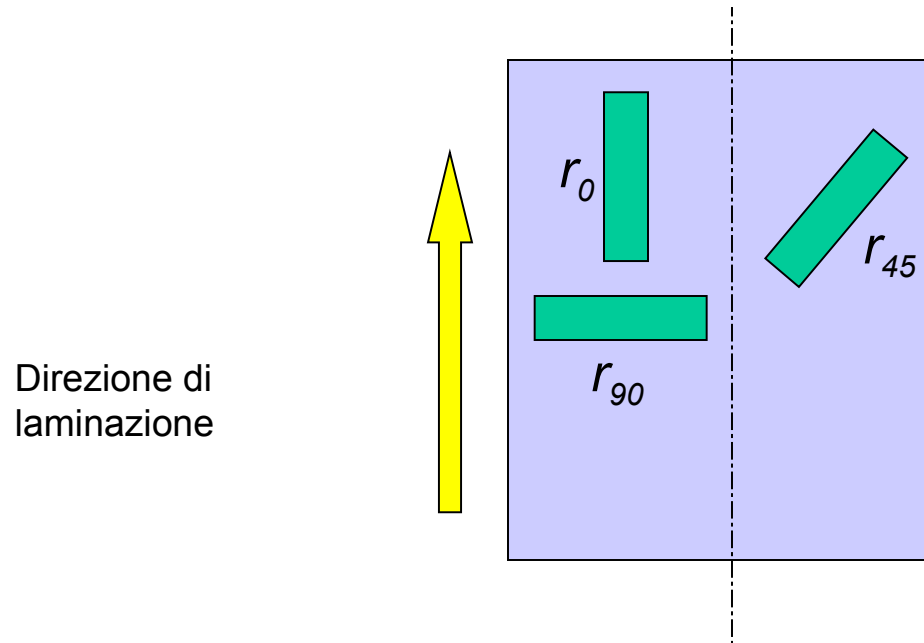
$$r = \frac{\epsilon_b}{\epsilon_s}$$

# Lavorazione delle lamiere

Il valore di  $r$  varia, in generale, con la direzione di laminazione. Per misurare tale variazione si adotta un parametro detto **anisotropia planare**, definita come:

$$\Delta r = (r_0 + r_{90} - 2 \cdot r_{45}) / 2$$

I pedici si riferiscono alla direzione di prelievo delle provette di trazione rispetto alla direzione di laminazione.



# Lavorazione delle lamiera

Il valore di  $r$  e  $\Delta r$  può essere variato:

- ✓ Aggiungendo elementi in lega
- ✓ Effettuando trattamenti termici (ricottura)
- ✓ Effettuando laminazioni incrociate

L'effetto di un  $\Delta r$  elevato è la formazione di ondulazioni sul bordo del prodotto con conseguente necessità di ulteriori lavorazioni.

Per questo motivo i migliori materiali da imbutitura profonda presentano alti valori di  $r$  (per avere piccoli assottigliamenti) e bassi valori di  $\Delta r$  (per evitare la formazione di irregolarità).

Il gioco tra matrice e punzone va determinato come miglior compromesso tra pericolo di formazione di grinze e rischio di assottigliamento della lamiera.



# Lavorazione delle lamiere

Altri importanti parametri in gioco sono:

- ▶ Raggio di arrotondamento dello stampo: se troppo piccolo si può avere una tranciatura, se troppo grande possono insorgere delle grinze per insufficiente contatto col premilamiera.
- ▶ Raggio di arrotondamento del punzone: necessario per evitare la tranciatura della lamiera.
- ▶ Lubrificazione: a base di grafite, olio, ecc. è un accorgimento normalmente adottato per diminuire le forze di imbutitura ed aumentare la durata degli utensili.
- ▶ Pressione del premilamiera: compromesso tra il pericolo di strappo e quello della formazione di pieghe.

Lo studio teorico delle operazioni di imbutitura, per parti aventi una certa complessità geometrica viene condotto generalmente in base all'esperienza accumulata ed a prove sperimentali.