

LAVORAZIONI PER DEFORMAZIONE PLASTICA

Introduzione

I processi per deformazioni plastica premettono di ottenere le caratteristiche finali dei prodotti mantenendo costante il volume del materiale. In queste lavorazioni si modifica la geometria di un corpo solido mediante l'applicazione di un sistema di forze che causa un flusso plastico cioè una deformazione permanente. Per fare ciò occorre conoscere bene i legami costitutivi del corpo che si sta considerando. Distingueremo due macro classi di deformazione:

1. Lavorazioni per deformazione massiva = grandi deformazioni
2. Lavorazione delle lamiere = piccole deformazioni

Stato di sforzo triassiale

Come abbiamo già detto le deformazioni possono avvenire in campo elastico o in campo plastico. Le deformazioni elastiche sono transitorie cioè scompaiono al cessare dell'applicazione del carico che le ha provocate. Al contrario le deformazioni plastiche sono permanenti. In campo elastico, noto lo stato tensionale, è possibile ricavare in modo univoco il campo deformativo e viceversa; in campo plastico il comportamento del materiale dipende dalla storia di deformazione. Si dice dunque che il materiale ha una memoria. Per dimostrare questa capacità del materiale di "ricordare" la sua storia occorre introdurre l'esperimento di Mendelsson. Egli sottopose un provino tubolare a due storie di campi di sforzi diversi:

- Carico di trazione assiale + carico di torsione
- Carico di torsione + carico di trazione assiale

Con questo esperimento egli dimostrò che lo stato di deformazione del provino dipende non dallo stato finale di carico ma dalla storia dell'applicazione del carico stesso; intendeva dunque dimostrare che il materiale ha una memoria e non vi è una corrispondenza biunivoca tra la deformazione e gli sforzi ma che la deformazione dipende dalla storia cioè dall'ordine di applicazione dei carichi. Più nello specifico l'esperimento consistette nell'applicare queste due storie di carico:

- A B C D = il provino risulterà essere sottoposto a degli allungamenti
- E F H D = il provino risulterà essere sottoposto a deformazioni tangenziali e quindi non ha subito un allungamento

Ciò dimostra che non si ha corrispondenza biunivoca nel campo plastico tra sforzi e deformazioni. Da questo esperimento è possibile dedurre che:

1. Se si volesse rappresentare con un'equazione questo comportamento occorrerebbe utilizzare una forma incrementale così da mettere in evidenza l'importanza del cammino di deformazione.
2. In campo plastico non sono ammesse variazioni permanenti di volume e quindi il coefficiente di Poisson deve valere 0,5.
3. Il modulo elastico di Young E deve essere sostituito con una quantità variabile che tenga conto del cammino di deformazione che il materiale ha già percorso.

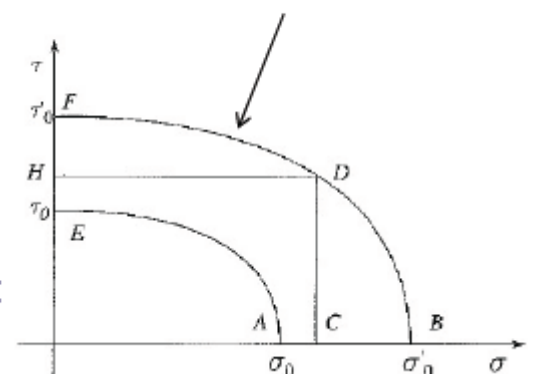
Questi tre aspetti sono le differenze principali tra lo stato monoassiale e quello triassiale. Le relazioni in forma generale sono dunque:

$$d\varepsilon_1 = d\lambda \left[\sigma_1 - \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} \right]$$

$$d\varepsilon_2 = d\lambda \left[\sigma_2 - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right]$$

$$d\varepsilon_3 = d\lambda \left[\sigma_3 - \frac{\sigma_2 + \sigma_1}{2} \right]$$

Criterio Von Mises



Il termine $d\lambda$ tiene conto della storia deformativa pregressa del materiale. La sua espressione è stata ricavata da Levy e Von Mises per il caso di comportamento rigido plastico:

$$d\lambda = \frac{d\varepsilon_f}{Y_f}$$

$$\begin{cases} Y_f = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \\ d\varepsilon_f = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2)^2 + (d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3)^2 + (d\varepsilon_3 - d\varepsilon_1)^2} \end{cases}$$

$$\frac{1}{d\lambda} = \frac{Y_f}{d\varepsilon_f}$$

L'inverso di $d\lambda$ prende il nome di modulo di plasticità.

Sforzo di flusso medio

Il lavoro di deformazioni è definito come il prodotto di forza per spostamento, pertanto il prodotto tra tensione e deformazione può essere considerato equivalente al lavoro per unità di volume u :

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

e indicando con V il volume in deformazione, il lavoro può essere determinato come:

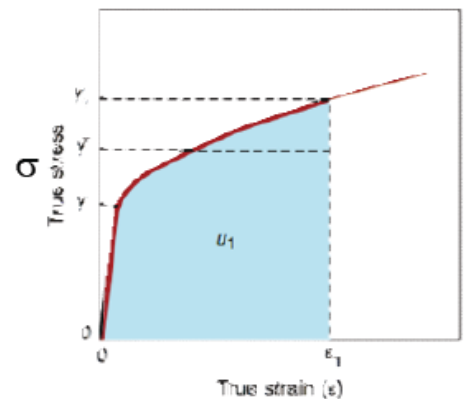
$$L = uV$$

Considerando ora un materiale reale con incrudimento e ricordando l'espressione della curva tensione reale - deformazione reale, si può scrivere il lavoro per unità di volume per uno stato di tensione monoassiale come:

$$\sigma = k\varepsilon^n$$

$$u = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma d\varepsilon = u = \int_0^{\varepsilon_1} k\varepsilon^n d\varepsilon = \frac{k\varepsilon_1^{n+1}}{n+1} = \bar{Y}\varepsilon_1$$

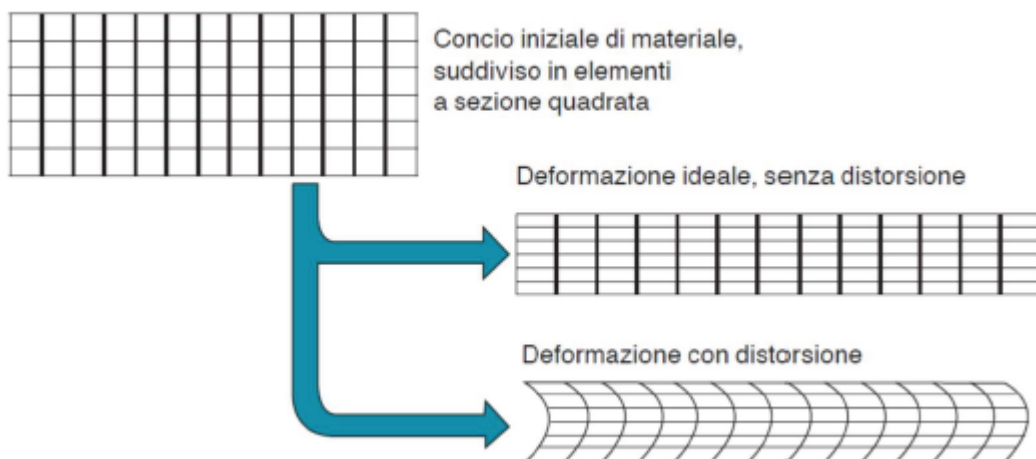
$$\bar{Y} = \frac{k\varepsilon_1^n}{n+1}$$



\bar{Y} è la tensione di flusso media del materiale. Dunque l'area sottesa alla curva è il lavoro di deformazione cioè l'energia minima o l'energia ideale richiesta per una deformazione uniforme. Nella realtà l'energia richiesta per una deformazione effettiva coinvolge in aggiunta altri due fattori:

- Energia specifica dovuta all'attrito = l'attrito tra attrezzature che sono collegate alla macchina e che permettono di esercitare sul pezzo la forza necessaria alla deformazione è all'interfaccia stessa dei componenti
- Energia specifica ridondante o di distorsione = occorre trasferire una forza dalla macchina al pezzo attraverso attrezzature e ciò implica oltre all'attrito anche l'impossibilità di portare il pezzo dalla condizione iniziale a quella finale immediatamente. Occorre infatti passare necessariamente dalla distorsione delle fibre per poter giungere dallo stato iniziale a quello finale. Il valore ridondante è dunque quel lavoro necessario per deformare le fibre affinché si possa passare dallo stato iniziale a quello finale. Si ha una griglia deformata perché il materiale a contatto con lo stampo è rallentato; ha infatti una velocità di flusso inferiore

rispetto alle fibre centrali. L'obiettivo è realizzare una macchina che minimizzi il lavoro di attrito e quello di distorsione.



Dunque nella realtà sono tre le componenti di energia che il processo richiede. Si può dunque definire efficienza del processo il rapporto tra il lavoro ideale e quello reale.

Categorie di lavorazioni

È possibile classificare le lavorazioni in funzione dell'intervallo di temperatura di fusione del materiale stesso. Le lavorazioni possono dunque avvenire a:

- Freddo
- Tiepido
- Caldo

Quando si vuole deformare molto si tenderà a lavorare a caldo, viceversa quando si vuole deformare poco si lavorerà a freddo. Generalmente tutti i processi di lavorazione massiva ad eccezione della trafilatura usano lavorazioni a caldo. Quando si lavorano lamiere invece tipicamente si lavora a freddo perché migliorano la qualità del finito. La temperatura non ha un effetto solo sulle forze di deformazione ma anche sul coefficiente di attrito. Se si lavora a freddo il coefficiente è più basso quindi nelle lavorazioni a freddo le perdite per attrito sono minori. Viceversa quando si lavora a caldo l'energia di deformazione è più bassa così come l'efficienza.

| Categoria | Intervallo di temperatura | Coefficiente di attrito |
|-----------------------|---------------------------|-------------------------|
| Lavorazione a freddo | $\leq 0.3 T_f$ | 0.1 |
| Lavorazione a tiepido | $0.3 T_f - 0.5 T_f$ | 0.2 |
| Lavorazione a caldo | $0.5 T_f - 0.75 T_f$ | 0.4-0.5 |

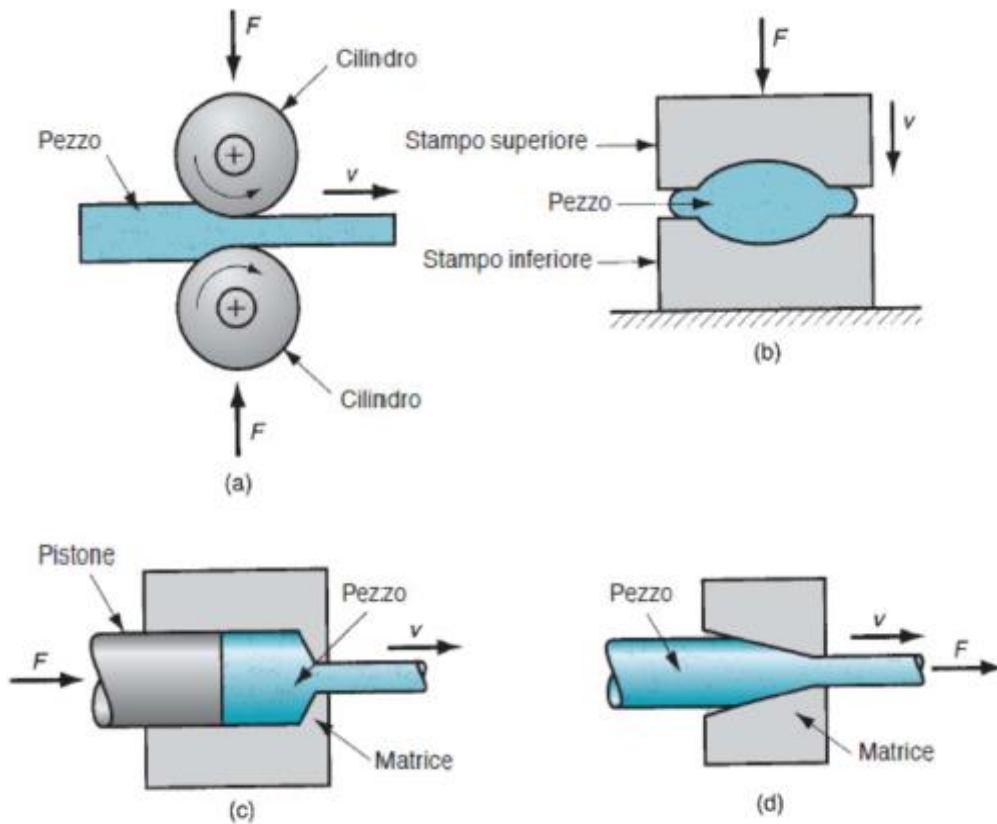
Deformazione massiva

Esempi di lavorazioni

Nei processi industriali di deformazione massiva i componenti realizzati hanno tipicamente un rapporto limitato tra superficie e volume. I principali processi sono:

- Laminazione = permette la diminuzione dello spessore di un laminando iniziale mediante l'azione di due rulli
- Forgiatura = avviene attraverso l'applicazione di una forza verticale su un sistema costituito da due stampi tra cui è interposto il materiale

- c. Estrusione = consente di ottenere a partire da un semilavorato iniziale di geometria semplice un componente in uscite che si chiama estruso di geometria complessa. Avviene per compressione
- d. Trafilatura = diverso dall'estrusione perché nonostante la matrice cioè lo stampo sia il medesimo avviene per trazione. Serve per realizzare fili e cavi



Deformazione massiva: forgiatura

Forgiatura

La forgiatura è un processo di deformazione in cui il pezzo viene premuto tra due stampi chiusi o piani. Tipicamente è un processo o a caldo o a tiepido. La compressione può essere realizzata con una deformazione:

- A impatto = mediante l'uso dei magli che applicano forze in un tempo breve
- Quasi statica = mediante delle presse di forgiatura che applicano forze graduali

Il flusso del metallo può essere:

- a. Libero (processo di fucinatura) cioè il pezzo non è vincolato allo scorrimento laterale.
- b. Vincolato da uno stampo che può essere aperto con la conseguente formazione di bavette oppure può essere chiuso.

Forgiatura libera

Nella forgiatura libera si applica una forza allo stampo che comprime il materiale. In questa fase il diametro del pezzo aumenta, in condizioni ideali il pezzo all'interno dello stampo rimarrebbe perfettamente cilindrico e quindi i parametri da cui dipende sono sempre diametro e altezza. Se così fosse la deformazione sarebbe:

$$\varepsilon_f^* = \ln \frac{h_0}{h_f}$$

$$F = Y_f A_f$$

Il problema è che nella realtà il materiale non rimane cilindrico perché in condizioni reali si ha attrito tra superficie inferiore dello stampo e il pezzo in lavorazione. Occorre dunque tenere presente questo effetto dell'attrito. Il pezzo subirà il fenomeno dell'imbarilimento cioè si allarga a metà della sua altezza, più o meno, quindi il profilo sarà quello di una botte. Occorre determinare l'andamento delle pressioni verticali in funzione della coordinata radiale considerando proprio la presenza dell'attrito.

Modello dello slab: analisi forze

Per definire lo stato tensionale di un elemento infinitesimo si usa il metodo dello slab cioè un modello approssimato della deformazione con attrito. Tale metodo permette di determinare la forza necessaria da avere in quel determinato stato tensionale concentrandosi su una fotografia del pezzo. Questo è modello analitico e non sperimentale. Le ipotesi necessarie per applicare tale modello sono:

- Il materiale deve avere un comportamento plastico quindi deve esserci assenza di incrudimento
- Si considera la presenza di attrito ma non si considera l'effetto dell'imbarilimento quindi anche in presenza di attrito il pezzo rimane radiale. Essendoci attrito darà presente un coefficiente di attrito μ . Con questo modello dunque caratterizziamo bene ciò che accade all'interfaccia ma caratterizziamo meno bene ciò che accade nel centro.
- Si hanno 3 tipi di sforzi che si considerano come principali cioè lo sforzo radiale P_r , quello assiale P_z e quello circonferenziale P_θ .
- Non è presente alcun vincolo alla deformazione radiale

Consideriamo ora un elementino di materiale e analizziamo tutti gli sforzi a cui è sottoposto esplicitandoli in funzione delle coordinate di posizione:

Scriviamo ora l'equilibrio delle forze in direzione radiale:

$$P_r r d\theta h - (P_r + dP_r)(r + dr)d\theta h - 2\tau r d\theta dr + 2P_\theta \sin \frac{d\theta}{2} dr h = 0$$

$$\sin \frac{d\theta}{2} \sim \frac{d\theta}{2}$$

$$P_r r d\theta h - (P_r + dP_r)(r + dr)d\theta h - 2\tau r d\theta dr + 2P_\theta \frac{d\theta}{2} dr h = 0$$

$$P_r r h - (P_r + dP_r)(r + dr)h - 2\tau r dr + P_\theta dr h = 0$$

$$P_r r h - P_r r h - P_r dr h - dP_r r h - dP_r dr h - 2\tau r dr + P_\theta dr h = 0$$

$$-P_r drh - dP_r rh - dP_r drh - 2\tau r dr + P_\vartheta drh = 0$$

$dP_r drh \sim 0$ perché infinitesimo di ordine superiore agli altri quindi è trascurabile

$$-P_r drh - dP_r rh - 2\tau r dr + P_\vartheta drh = 0$$

$$P_\vartheta drh - P_r drh - dP_r rh - 2\tau r dr = 0$$

Notiamo ora che se R aumenta diventando R'

$$\varepsilon_r = \ln \frac{R'}{R}$$

$$\varepsilon_\vartheta = \ln \frac{2\pi R'}{2\pi R}$$

$$\ln \frac{R'}{R} = \ln \frac{2\pi R'}{2\pi R}$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\vartheta$$

Dato che $\varepsilon_r = \varepsilon_\vartheta$ varrà anche $d\varepsilon_r = d\varepsilon_\vartheta$ quindi notiamo che

$$d\varepsilon_r = \frac{d\varepsilon_f}{Y_f} \left[P_r - \frac{P_z + P_\vartheta}{2} \right]$$

$$d\varepsilon_\vartheta = \frac{d\varepsilon_f}{Y_f} \left[P_\vartheta - \frac{P_z + P_r}{2} \right]$$

$$\frac{d\varepsilon_f}{Y_f} \left[P_r - \frac{P_z + P_\vartheta}{2} \right] = \frac{d\varepsilon_f}{Y_f} \left[P_\vartheta - \frac{P_z + P_r}{2} \right]$$

$$P_r - \frac{P_z + P_\vartheta}{2} = P_\vartheta - \frac{P_z + P_r}{2}$$

$$P_r - \frac{P_z}{2} - \frac{P_\vartheta}{2} = P_\vartheta - \frac{P_z}{2} - \frac{P_r}{2}$$

$$\frac{3}{2} P_\vartheta = \frac{3}{2} P_r$$

$$P_\vartheta = P_r$$

Applichiamo ora il criterio di Von Mises:

$$\begin{aligned} Y_f &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(P_z - P_r)^2 + (P_z - P_\vartheta)^2 + (P_r - P_\vartheta)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(P_z - P_r)^2 + (P_z - P_\vartheta)^2} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2(P_z - P_r)^2} = \frac{\sqrt{2}(P_z - P_r)}{\sqrt{2}} = P_z - P_r \end{aligned}$$

Ricordando che lo sforzo radiale al bordo è nullo si ha che:

$$P_r = 0 \rightarrow P_z > 0 \rightarrow P_r = P_z - Y_f$$

Abbiamo ora tutte le equazioni necessarie per esprimere l'equazione dell'equilibrio delle forze in direzioni radiale in un'unica variabile:

$$P_{\theta} drh - P_r drh - dP_r rh - 2\tau r dr = 0$$

$$P_r drh - P_r drh - dP_r rh - 2\tau r dr = 0$$

$$-dP_r rh - 2\tau r dr = 0$$

$$dP_r h + 2\tau dr = 0$$

$$\tau = \mu P_z$$

$$dP_r h + 2\mu P_z dr = 0$$

$$dP_r = dP_z \text{ perché } Y_f \text{ è costante}$$

$$dP_z h + 2\mu P_z dr = 0$$

$$\frac{dP_z}{P_z} + \frac{2\mu dr}{h} = 0$$

$$\int_{P_z(r)}^{P_z(R)} \frac{dP_z}{P_z} + \int_r^R \frac{2\mu dr}{h} = 0$$

$$\int_r^R \frac{2\mu dr}{h} = \frac{2\mu}{h} (R - r)$$

$$\int_{P_z(r)}^{P_z(R)} \frac{dP_z}{P_z} = \ln P_z \Big|_{P_z(r)}^{P_z(R)} = \ln \frac{Y_f}{P_z(r)}$$

$$\ln \frac{Y_f}{P_z(r)} + \frac{2\mu}{h} (R - r) = 0$$

$$\ln \frac{Y_f}{P_z(r)} = -\frac{2\mu}{h} (R - r)$$

$$P_z(r) = Y_f e^{\frac{2\mu}{h}(R-r)}$$

Possiamo ora trovare gli sforzi in funzione di r:

$$P_r(r) = Y_f \left[e^{\frac{2\mu}{h}(R-r)} - 1 \right] = P_{\theta}(r)$$

Rappresentando graficamente tutte le risposte si ottiene la collina delle pressioni:

Procedendo con un'analisi possiamo affermare che:

- L'istante di pressione massima sarà quella finale in cui il raggio R è massimo e l'altezza h è minima. La pressione quindi aumenta all'aumentare del tempo del processo
- Se non ci fosse attrito si sarebbe nel caso ideale poiché si avrebbero delle pressioni costanti. L'attrito genera un profilo di pressione non uniforme il cui contributo è segnato nel grafico in rosso
- Nella zona in cui le pressioni normali sono molto elevate si crea una deformazione nel materiale (stessa cosa che accade nel truciolo). Nella zona centrale sarà presente il fenomeno dell'adesione mentre nella zona laterale sarà presente il fenomeno dello strisciamento

Per trovare ora il punto in cui avviene la transizione tra zona di adesione e zona di strisciamento occorre imporre che τ sia uguale alla τ limite di snervamento che è un parametro del materiale:

$$\tau = \mu P_z = \tau_{lim}$$

$$\tau_{lim} = \mu P_z = \mu Y_f e^{\frac{2\mu}{h}(R-r)}$$

Si ricava così r. Questo metodo qui scritto non viene però usato; si predilige il metodo della pressione media:

$$\bar{P}_z = \frac{1}{R} \int_0^R Y_f e^{\frac{2\mu}{h}(R-r)} dr = \frac{1}{R} \int_0^R \left(Y_f e^{\frac{2\mu R}{h}} - Y_f e^{\frac{2\mu r}{h}} \right) dr = \frac{1}{R} Y_f e^{\frac{2\mu R}{h}} \int_0^R Y_f e^{-\frac{2\mu r}{h}} dr$$

$$\frac{1}{R} Y_f e^{\frac{2\mu R}{h}} = Q$$

$$\bar{P}_z = Q \int_0^R Y_f e^{-\frac{2\mu r}{h}} dr = Q \left[-\frac{h}{2\mu} \right] \left[e^{-\frac{2\mu R}{h}} - 1 \right] = \frac{Y_f}{R} \left[-\frac{h}{2\mu} \right] \left[1 - e^{\frac{2\mu R}{h}} \right] = \frac{Y_f}{R} \frac{h}{2\mu} \left(e^{\frac{2\mu R}{h}} - 1 \right)$$

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2} \text{ grazie a McLaurin}$$

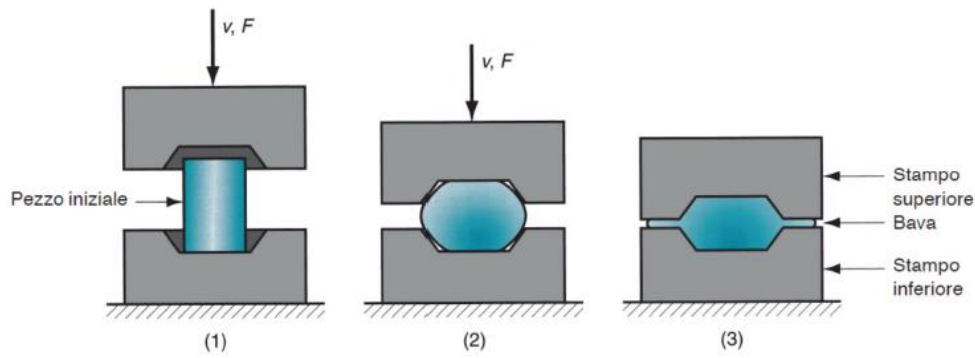
$$e^{\frac{2\mu R}{h}} = 1 + \frac{2\mu R}{h} + \frac{1}{2} \frac{4\mu^2 R^2}{h^2}$$

$$\bar{P}_z = \frac{Y_f}{R} \frac{h}{2\mu} \left(1 + \frac{2\mu R}{h} + \frac{1}{2} \frac{4\mu^2 R^2}{h^2} - 1 \right) = \frac{Y_f}{R} \frac{h}{2\mu} \left(\frac{2\mu R}{h} + \frac{2\mu^2 R^2}{h^2} \right) = \frac{Y_f}{R} \left(1 + \frac{\mu R}{h} \right)$$

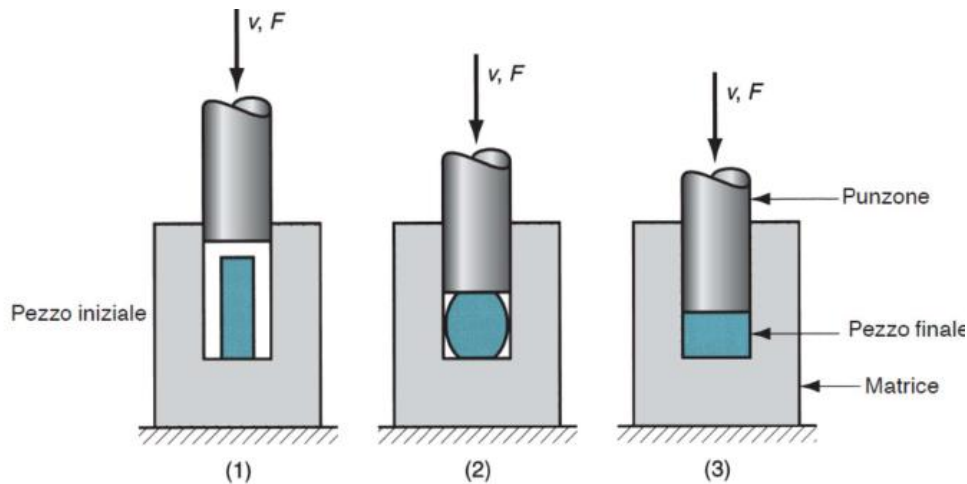
Forgiatura in stampo [processo di stampaggio]

Lo stampaggio o forgiatura a stampo permette di raggiungere buone finiture superficiali. Si possono avere due grandi categorie:

- Con bava = inizialmente il pezzo viene posta tra gli stampi, la pressa avanza con una certa velocità e applicando una certa forza, il materiale si deforma. Occorre sovradimensionare il materiale che riempire la cavità e poiché si avrà del materiale in eccesso che riempia la zona tra gli stampi nota come "scarica bava", questo processo avviene a caldo per ridurre la resistenza a deformazione. Il materiale si raffredda più velocemente dove la superficie di scambio termico è maggiore. La bava si raffredda dunque per prima quindi ha due effetti importanti:
 1. Accomodare il materiale in eccesso dovuto al sovradimensionamento del materiale stesso
 2. Crea un vincolo allo scorrimento del materiale verso l'uscita essendo la zona che solidifica per prima



- Senza bava = permette di avere precisioni molto elevate e di avere pezzi near net shape o addirittura net shape

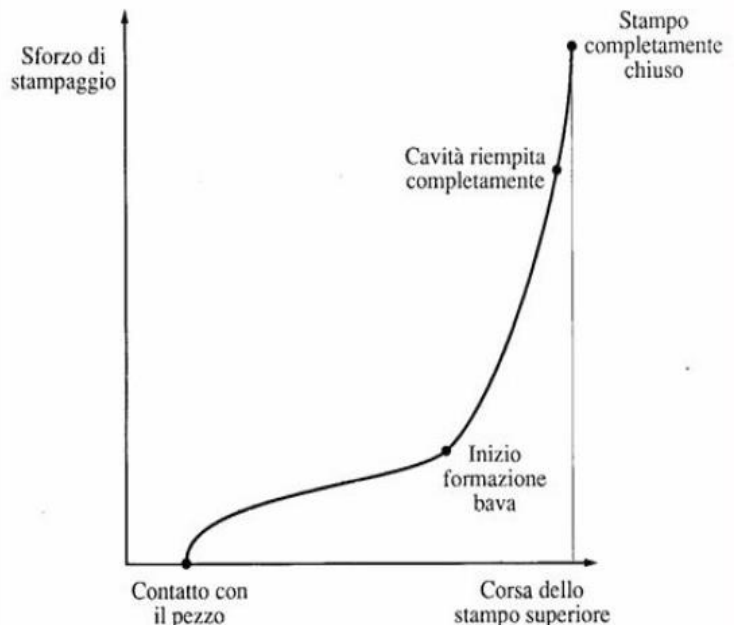


Come abbiamo già detto la formazione di bava è dunque un fenomeno estremamente utile e importante. Se analizziamo come varia la forza in un processo di stampaggio con bava avremmo un grafico come quello riportato, che rappresenta l'andamento dello sforzo in funzione della corsa dello stampo superiore. Il grafico può essere suddiviso in 3 zone:

1. Dal contatto con il pezzo all'inizio della formazione della bava = iniziale forte crescita dello sforzo dovuta al contatto con il materiale e successivo andamento lineare fino a che non si crea la bava
2. Dall'inizio della formazione della bava fino a quando la cavità è completamente riempita = quando si crea la bava lo sforzo ha un picco verso l'alto che permette di riempire molto bene la cavità
3. Da quando la cavità è completamente riempita fino a quando lo stampo è completamente chiuso = lo sforzo aumenta ancora

Lo sforzo massimo è ben più alto dello sforzo medio. Se si volesse calcolare la forza occorrerebbe usare un calcolo approssimato perché il comportamento del materiale dipende dall'attrito e dalla temperatura superficiale dello stampo, in generale variabile da punto a punto. La forza si può approssimativamente calcolare come:

$$F_{max} = k_p Y_f A$$



$$k_p = \begin{cases} \text{con bava} & \begin{cases} \text{semplice} = 6 \\ \text{media} = 8 \\ \text{complessa} = 10 \end{cases} \\ \text{senza bava} & \begin{cases} \text{coniatura} = 6 \\ \text{compelssa} = 8 \end{cases} \end{cases}$$

Si può anche calcolare l'energia necessaria alla macchina come:

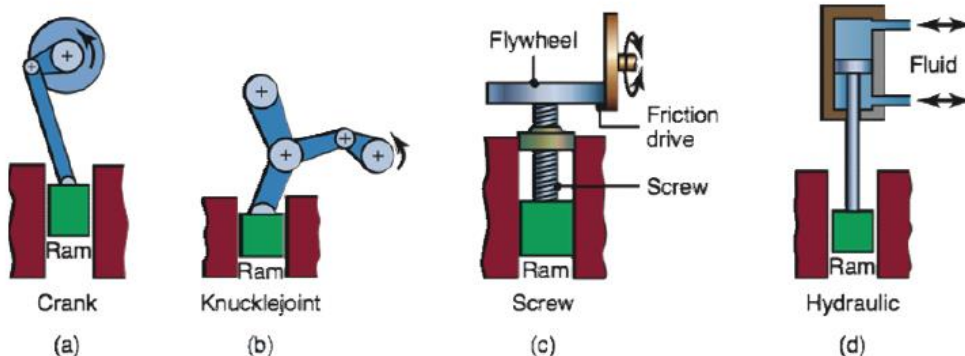
$$E = c\lambda F_{max}$$

dove λ è un valore compreso tra 0,15 e 0,25, λF_{max} è uno stimatore della forza media. Mentre c indica la corsa della presa.

Macchine per la forgiatura

Le presse sono delle macchine estremamente grandi ed estremamente costose quindi il dimensionamento delle forze necessarie per il processo è una parte dell'analisi estremamente critica. Esistono diverse tipologie di presse:

- Idraulica = il meccanismo è ottenuto con un fluido in pressione. Meccanismo di azionamento è di tipo idraulico quindi è presente un pistone che permette di arrivare a forze molto grandi. Permettono di ottenere le forze maggiori.
- Meccanica = il movimento è ottenuto con cinematismi biella-manovella. Sono quelle più comuni, sono compatte, forze limitate ma precisione molto più elevata.
- A vite = il movimento è ottenuto con cinematismo vite-madrevite. Hanno corse tendenzialmente limitate.



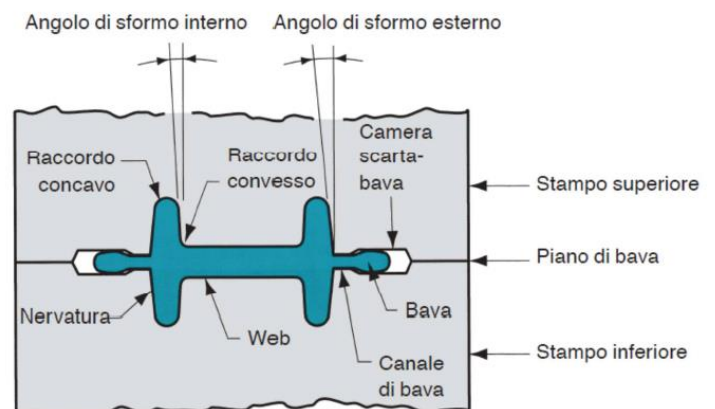
Stampo per forgiatura

È estremamente importante dimensionare correttamente gli stampi ottenibile mediante asportazione di truciolo. Occorre usarli per grandi volumi di produzione perché creare uno stampo è un processo costoso in quanto richiede una precisione elevata come la pressofusione. Se dunque i volumi sono ridotti si predilige la pressofusione se invece il lotto è elevato conviene procedere per stampaggio. Durante la progettazione degli stampi occorre tenere presente:

- Camera scarta bava
- Canale di bava
- Raccordi
- Angoli di sforno che facilitano l'estrazione
- Ritiro

Partendo dalla progettazione del pezzo finale occorre tener conto:

- Sovrametallo e ritiro
- Raggi di raccordo
- Piano di bava
- Angoli di sforno
- Canale di bava
- Dimensioni dello stampo



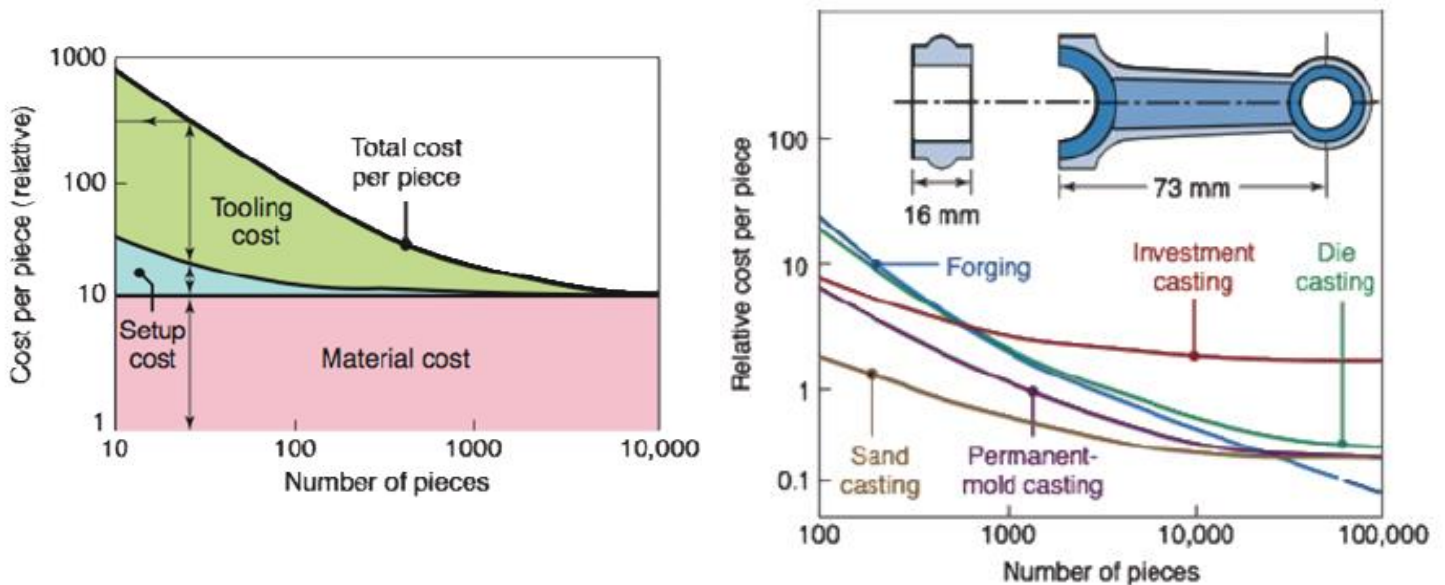
Costi di forgiatura

Occorre tenere conto del costo:

- Costo dello stampo e dell'attrezzatura che è alto se devo produrre pochi pezzi mentre è ridotto se devo produrre una grande quantità di pezzi
- Costo del materiale costante
- Costo di set up che è alto se devo produrre pochi pezzi mentre è ridotto se devo produrre una grande quantità di pezzi

Confronto tra forgiatura e fonderia

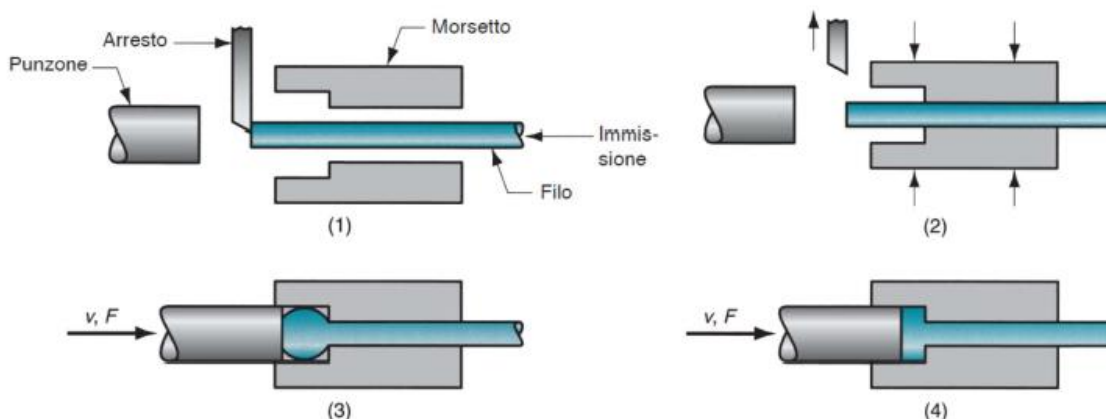
Possiamo affermare che la forgiatura conviene per elevati pezzi. La fonderia in sabbia è conveniente per un lotto ridotto. Nel grafico non si tiene conto della qualità.



Altri processi di forgiatura

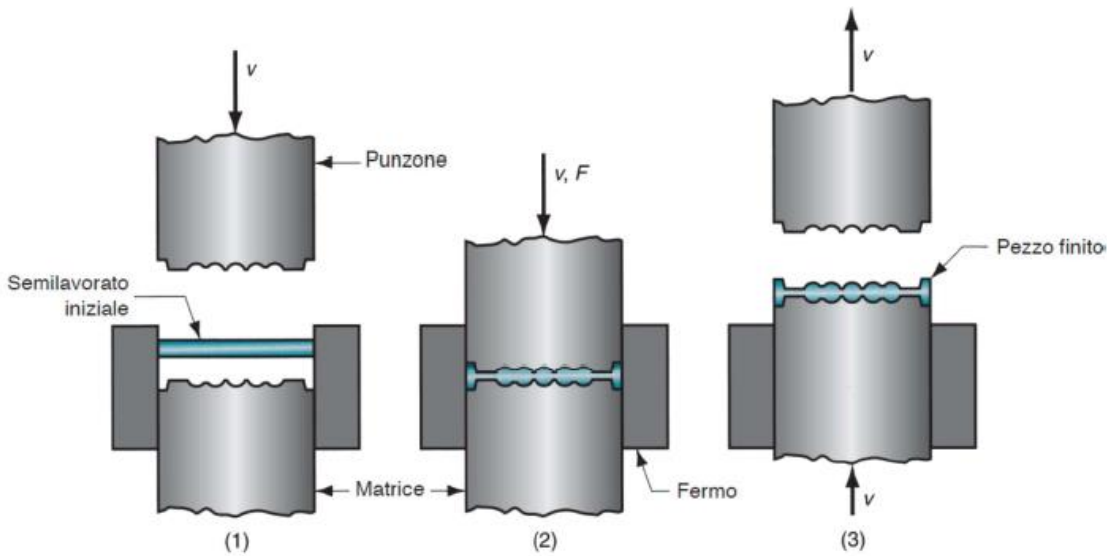
Accenniamo ora altri processi di forgiatura:

- Ricalcatura = permette di fare forgiatura su zone specifiche del pezzo. Si posiziona l'albero bloccandolo, dall'altra parte si agisce con il punzone così da modificare solo la zona all'interno della matrice. Deformazioni concentrate su alcune zone del pezzo



- Coniatura = permette di ottenere deformazioni limitate ad alcune fibre del materiale tipicamente quelle di superficie. Si parte da un semilavorato, tipicamente un disco ottenuto per stampaggio o mediante processi di asportazione in funzione dello spessore, e tramite una pressa avente particolare geometria superficiale si lascia l'impronta sul materiale.

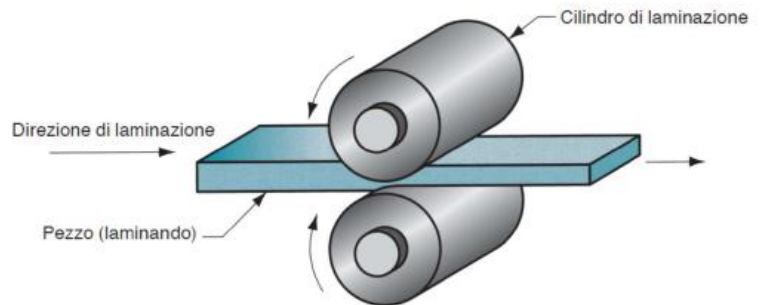
Processo che avviene a freddo perché gli sforzi di deformazioni sono ridotti a fronte di un'alta precisione.



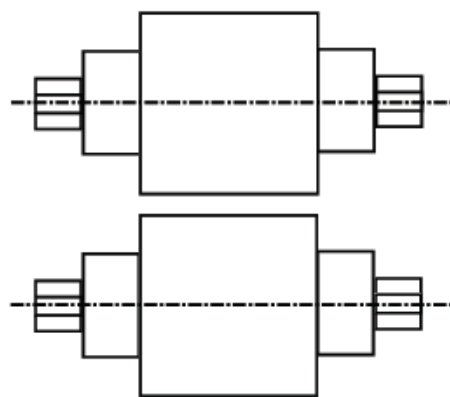
Deformazione massiva: laminazione

Laminazione

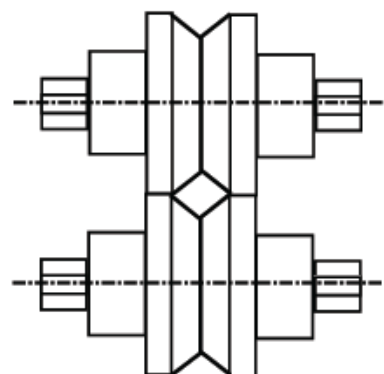
La laminazione è un processo di deformazioni che ha come obiettivo ridurre lo spessore del laminando per ottenere un laminato di spessore ridotto. Lo spessore ridotto viene ottenuto mediante forze di compressione esercitate da due cilindri contrapposti (due rulli controrotanti). Si cerca di applicare processi che in modo graduale tramite più stadi in sequenza riducano lo spessore iniziale. Può avvenire a caldo quando si hanno grandi deformazione ma può anche avvenire a freddo quando si è vicini alla geometria finale e dunque occorrono piccole deformazioni, migliori precisazioni e migliori proprietà meccaniche. Generalmente si inizia con lavorazioni a caldo per poi passare a lavorazioni a freddo. In questi due casi il modello del materiale cambia. La laminazione permette di ottenere anche geometrie di forme più complicata della semplice sezione rettangolare:



- Laminazione piana = eseguita tramite rulli cilindrici non sagomati coassiali controrotanti
- Eseguita con ruoli sagomati in modo da imporre una particolare geometria alla sezione in uscita. I rulli sono detti calibri perché calibrano la geometria progressiva



laminazione piana



laminazione con rulli sagomati

Effetto della laminazione sul materiale: a caldo

Nel momento in cui il materiale passa all'interno dei rulli cambia la sua struttura microscopica. Avviene il fenomeno della ricristallizzazione dunque i cristalli in un primo momento si allungano nella direzione di laminazione e poi a temperatura elevate, durante il raffreddamento rapido, perché lo spessore è ridotto, si ottengono grani più piccoli che forniscono proprietà meccaniche migliori dovute dunque all'effetto contemporaneo tra la compressione e l'elevata temperatura. Si induce anisotropia al pezzo in lavorazione cioè il materiale resiste alla deformazione in modo diverso a seconda della diversa direzione di applicazione del carico. A valle della laminazione avremo un prodotto con proprietà meccaniche migliori ma dipendenti dalla direzione di applicazione del carico stesso.

Analisi forze nella laminazione

Analizziamo ora le principali relazioni che regolano il processo di deformazione massiva della laminazione:

$$\Delta h = h_e - h_u$$

$$l_e h_e b_e = l_u h_u b_u \quad \text{conservazione del volume}$$

$$\Delta b \cong 0 \rightarrow b_e = b_u \rightarrow l_e h_e = l_u h_u \rightarrow h_e > h_u \rightarrow l_e < l_u \rightarrow \frac{h_e}{h_u} = \frac{l_u}{l_e}$$

$$v_e h_e b_e = v_u h_u b_u \quad \text{portata volumetrica}$$

$$\Delta b \cong 0 \rightarrow b_e = b_u \rightarrow v_e h_e = v_u h_u \rightarrow h_e > h_u \rightarrow v_e < v_u$$

$$L = R\alpha$$

$$R = R \cos \alpha + \frac{\Delta h}{2}$$

$$\frac{\Delta h}{2} = R - R \cos \alpha \quad \cos \alpha \cong 1 - \frac{\alpha^2}{2}$$

$$\frac{\Delta h}{2} = R - R \left(1 - \frac{\alpha^2}{2}\right) = R - R + R \frac{\alpha^2}{2} = R \frac{\alpha^2}{2}$$

$$\Delta h = R\alpha^2 \quad \alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$$

$$L = R\alpha = R \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} = \sqrt{R\Delta h}$$

Difetti di laminazione

A causa della spinta del materiale i rulli possono inflettersi, portando ad un errore dimensionale: il laminato presenterà uno spessore maggiore al centro rispetto ai lati. Si può contrastare tale effetto utilizzando rulli opportunamente sagomati. La correzione ottimale si ottiene ovviamente per una ben determinata condizione di processo. Durante la laminazione i rulli vengono raffreddati e lubrificati. Se il liquido lubrificante non è sufficiente si possono avere dei surriscaldamenti locali del materiale e del rullo. In casi particolari si può avere l'adesione del laminando ai rulli con la conseguente "apertura" del laminando in uscita. Il difetto è legato alla presenza di difetti interni al materiale, di tensioni residue e di scarsa lubrificazione.

Deformazione massiva: calibratura

Deformazione massiva: estrusione

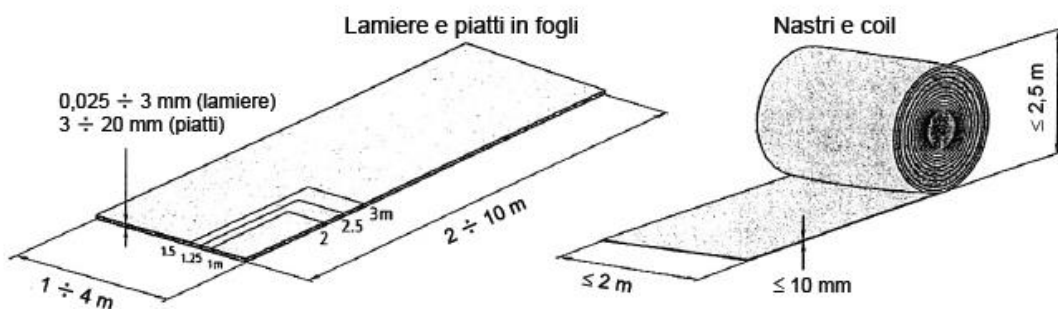
Deformazione massiva: trafilatura

Lavorazione delle lamiere

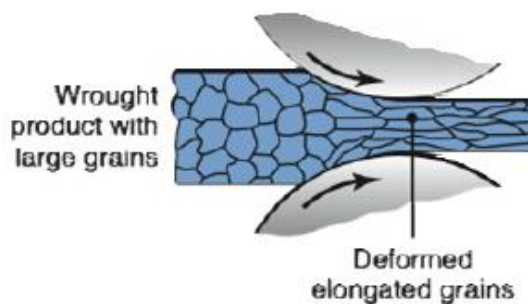
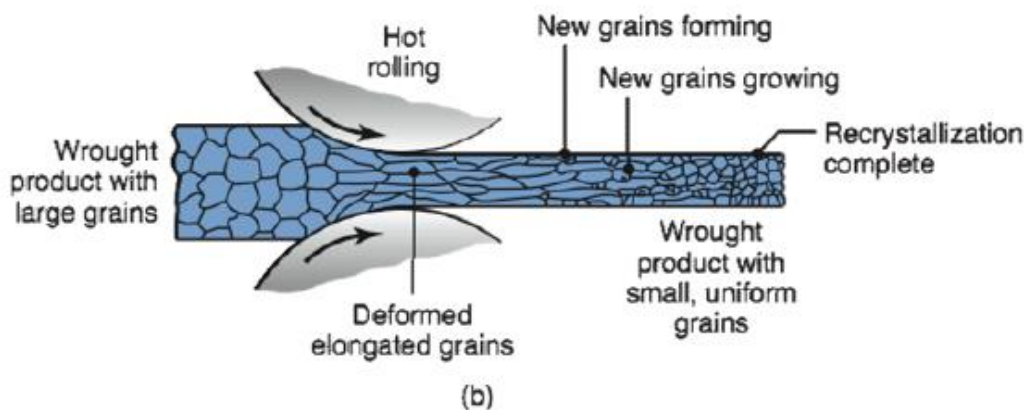
Introduzione

Per effettuare la lavorazione della lamiera occorre partire da due tipi di semilavorati:

- Lamiere e piatti in fogli
- Nastri e coil



I semilavorati sono ottenuti mediante una colata continua. A seconda del materiale si può lavorare a freddo o a caldo. Se la lavorazione viene eseguita a una temperatura pari a $1/3$ di quella di fusione allora si dice a freddo. Se invece la lavorazione viene eseguita a una temperatura pari al 60% della temperatura di fusione si parla di formatura a caldo. La laminazione dunque può essere realizzata sia a caldo che a freddo. In questa fase si deformano i grani che costituiscono i materiali nel senso della direzione di deformazione, nella formatura a caldo i grani sono più piccoli.

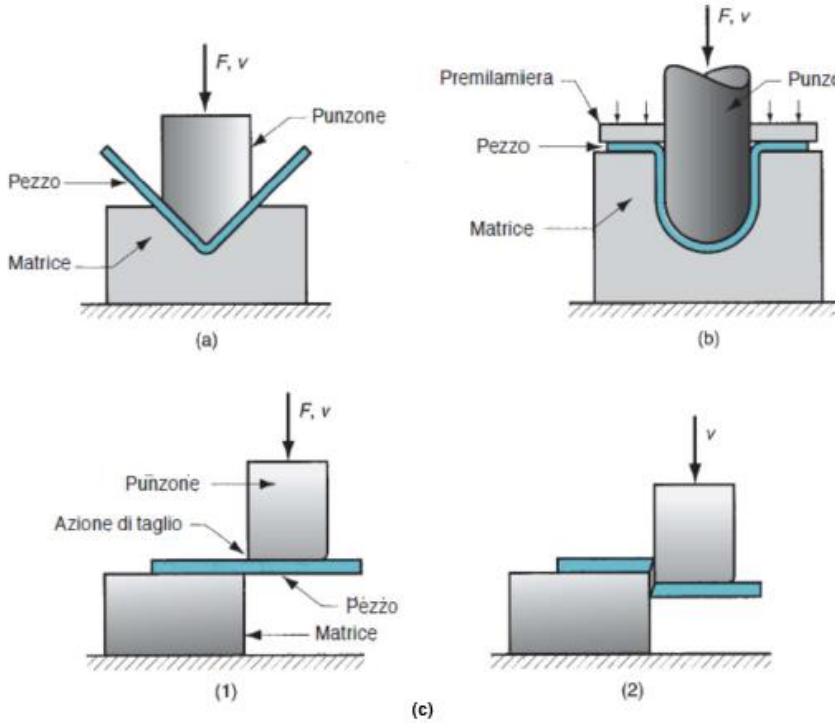


Cold rolling

Esempi di lavorazioni

Le principali lavorazioni per deformazioni plastica delle lamiere sono:

- Piegatura
- Imbutitura e stampaggio =
- Taglio della lamiera mediante troncatura, punzonatura o cesoiatura
- Curvatura o calzatura



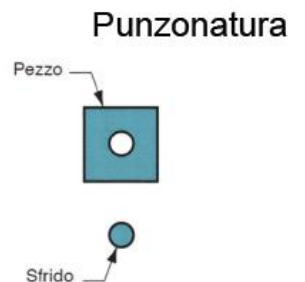
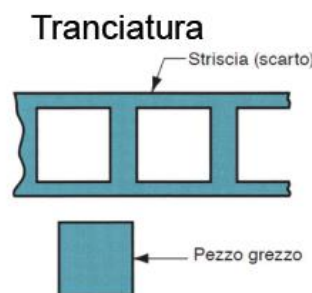
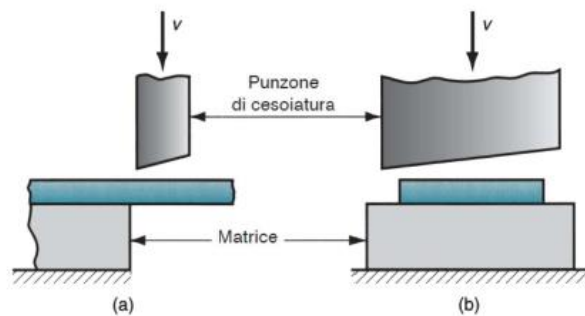
Queste lavorazioni sono generalmente eseguite a freddo anche se è possibile realizzare dei trattamenti di ricottura. La maggior parte di queste lavorazioni richiede la progettazione e la realizzazione di un'attrezzatura opportuna cioè di uno stampo. In generale sono lavorazioni adatte a pezzi prodotti in serie medio-grande. Analizziamo ora più nel dettaglio ogni singola lavorazione.

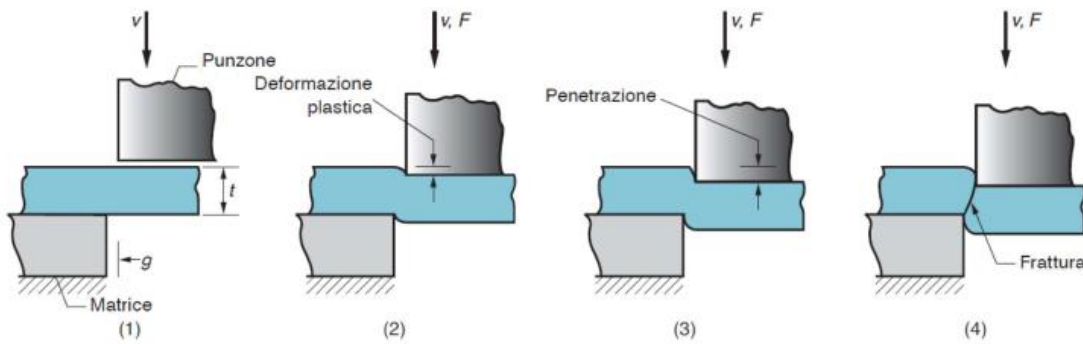
Lavorazione delle lamiere- Tranciatura e punzonatura

Sono processi che permettono di ritagliare un profilo chiuso da una lamiera. La tranciatura si differenzia dalla punzonatura per il fatto che nel primo caso siamo interessati alla parte della lamiera che non rimane sulla matrice, quello che rimane sulla matrice è detto sfrido, viceversa nel secondo caso siamo interessati alla parte che rimane sulla matrice. La cesoiatura è lungo un profilo aperto.

Avviene in quattro fasi:

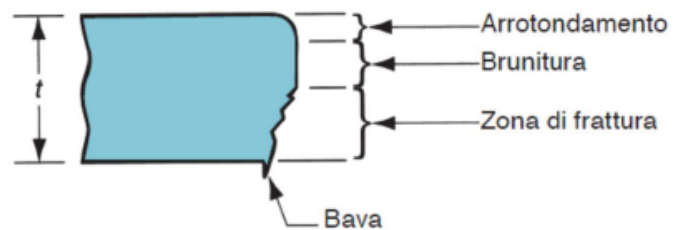
- La pressa fa scendere il punzone con una certa velocità
- Il punzone inizia a deformare plasticamente la lamiera
- Si creano delle cricche in corrispondenza dello spigolo del punzone e della matrice
- Le cricche si propagano fino a che non avviene la frattura della sezione





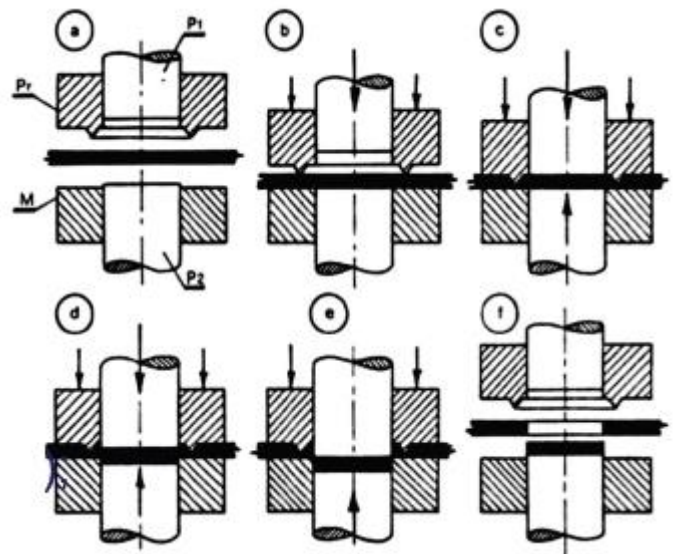
Questa modalità di frattura del materiale lascia sui componenti una finitura della superficie laterale caratterizzata da delle zone specifiche e facili da identificare. Nella matrice si troveranno:

- Arrotondamento = dovuta alla seconda fase della tranciatura
- Brunitura = strisciatura del punzone
- Zona di frattura = finitura è scabra perché ho traccia della propagazione della cricca
- Bava



Nel caso del pezzo si ha un profilo speculare. Per ottenere componenti migliori dal punto di vista della finitura si usa la tranciatura fine. Non esistono delle punzonature fine. La tranciatura fine è una variante del processo di tranciatura definita così per l'elevata qualità delle superfici ottenute e l'elevata precisione dimensionale del prodotto ottenuto. La tranciatura fine è caratterizzata dalla presenza di una premilamiera e dalla presenza di un bordino di ritenuta o cuneo di conciatura. Le fasi sono:

- Caso iniziale
- La premilamiera viene spinta contro la lamiera e la vincola
- I due punzoni vengono chiusi sulla lamiera
- Il punzone superiore viene azionato con una forza maggiore del punto è inferiore in modo da farlo affondare nel materiale realizzando la tranciatura
- Il punzone superiore non viene azionato consentendo quindi al punzone inferiore di risalire estraendo il pezzo
- Viene sollevato il premilamiera per liberare la lamiera stessa



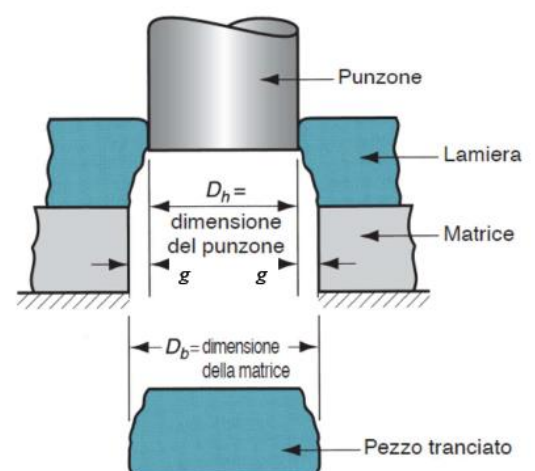
Analisi delle forze nelle operazioni di taglio

Dal momento che matrice e punzone non hanno la stessa dimensione si lascia un gioco che dipende dallo spessore della lamiera e da un coefficiente che dipende dalla resistenza del materiale. Il gioco va dimensionato in modo corretto perché se è troppo piccolo aumenta troppo gli sforzi mentre se è troppo elevato si accentuano una serie di difetti che comportano una cattiva finitura superficiale. Il gioco si calcola come:

$$g = A_g t$$

dove A_g è un valore appartenente al range $A_g \in [0,045; 0,075]$. Nella tranciatura:

- Diametro della matrice: $D_b = D$
- Diametro del punzone: $D_h = D - 2g$



Nella punzonatura:

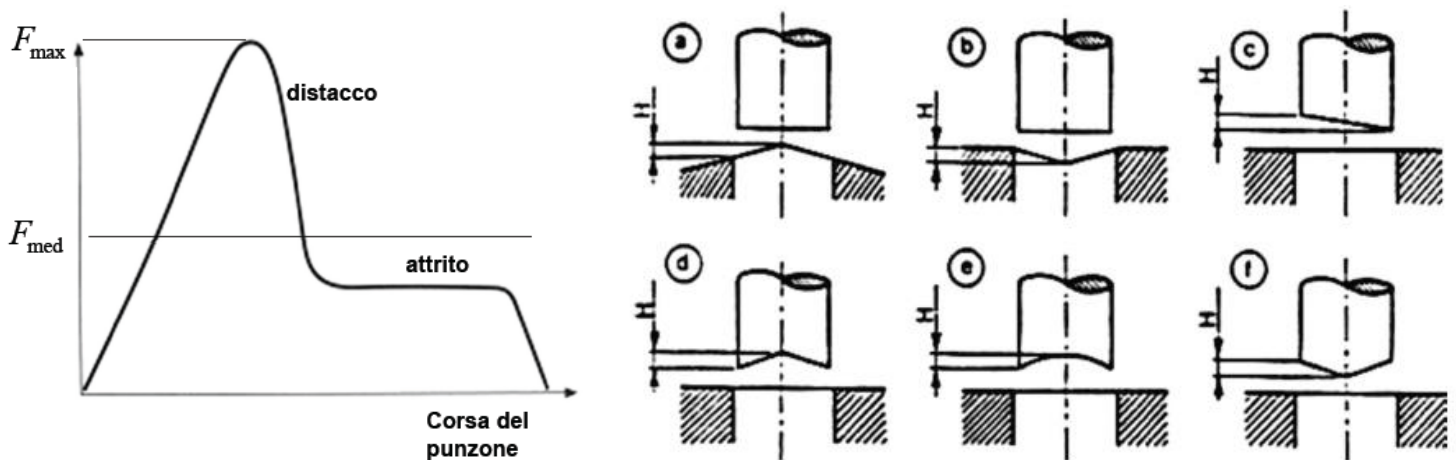
- Diametro della matrice: $D_b = D + 2g$
- Diametro del punzone: $D_h = D$

La forza si calcola come il prodotto tra lo spessore, il perimetro e R_t cioè una percentuale dello sforzo:

$$F_{max} = R_t t l$$

$$R_t = (0,7 - 0,8)R_m$$

L'andamento tipico della forza in funzione della posizione del punzone è riportato in figura. L'energia aumenta al diminuire del gioco in quanto aumentano gli attriti. L'energia richiesta per la tranciatura è pari al prodotto tra la forza e lo spessore. Se la forza massima di tranciatura è troppo elevata è possibile ridurla inclinando la superficie di tranciatura della matrice o del punzone. Quindi è possibile definire l'angolo di inclinazione del punzone o della matrice in modo da contenere la forza di tranciatura al livello richiesto.



Macchine per lavorazione nelle operazioni di taglio

Le macchine per realizzare queste lavorazioni sono di due tipi:

- Presse con stampi dedicati = sono sistemi dedicati ad un unico prodotto, ad elevata rigidità ed elevata capacità produttiva, in cui lo stampo è progettato e realizzato ad hoc considerando il pezzo in lavorazione. Generalmente lavorano i nastri.
- Contro di lavoro a CN = sono centri di lavoro non specializzati ad elevata flessibilità e limitata capacità produttiva in cui matrici e punzoni sono standard e sostituibili. Generalmente lavorano i fogli di lamiera. È costituito da un sistema di presa e movimentazione della lamiera. Hanno una capacità produttiva inferiore. Si ottengono rifili semplici che possono poi essere lavorati mediante la roditura cioè una tranciatura di profili complessi in passare sovrapposte.

Esistono due tipi di produzione:

- Flessibile
- Non flessibile

Lavorazione delle lamiere: piegatura

Lavorazione delle lamiere: imbutitura