



# Deformazione plastica dei materiali

- È una trasformazione che interessa un materiale allo stato solido che può avvenire a diverse temperature
- Esistono, nell'ambito della deformazione plastica due tipi di processo:
  - Processi primari per la trasformazione del materiale di fuso in semilavorati di tipo commerciale
  - Processi secondari per la trasformazione dei semilavorati commerciali nei pezzi specifici



# Comportamento dei materiali

- La curva della prova di trazione è tra le più significative per comprendere il comportamento dei materiali.

Presenta:

- Un primo tratto caratterizzato da comportamento elastico
- Una fase di snervamento
- Un tratto caratterizzato da deformazioni di tipo plastico e dal fenomeno dell'incrudimento,
- Il carico massimo
- Il fenomeno della strizione
- La rottura



# Caratteristiche dei materiali

- Si definisce modulo elastico o di Young il valore  $E$ , ovvero la costante di proporzionalità tra la tensione e l'allungamento in campo elastico ed è indice della rigidità del materiale. È individuata dalla prima pendenza della curva
- Il carico di snervamento identifica il valore di tensione in cui si manifesta una deformazione plastica dello 0,2% e quanto più è basso, tanto più il materiale è utilizzabile per essere lavorato per deformazione



# Caratteristiche dei materiali

- I processi di deformazione plastica utilizzano la capacità del materiale di deformarsi prima di rompersi
- La deformazione plastica avviene quando il materiale si trova nel tratto di curva tra lo snervamento ed il carico massimo



# Caratteristiche dei materiali

- L'allungamento a rottura indica la duttilità del materiale, ovvero la capacità dello stesso di subire deformazioni anche profonde
- La tenacità del materiale è individuata dall'area sottesa del grafico, ovvero dall'energia assorbita dal materiale per portarlo a rottura
- La malleabilità è la capacità del materiale di subire forti deformazioni plastiche senza eccessivi incrudimenti ed è individuata dalla pendenza della curva nella zona plastica



# Classificazione dei processi di deformazione plastica

## ■ A freddo

- Avviene a temperatura ambiente
- Il materiale di fatto si scalda ugualmente durante la deformazione
- Vantaggi:
  - Miglior finitura superficiale
  - Precisione dimensionale
  - Ricottura finale
  - Buona lubrificazione pezzo-stampo

## ■ A caldo

- Avviene normalmente a temperature non molto lontane dalla fusione. Ovviamente prevede il riscaldamento del materiale prima di effettuare la deformazione
- Vantaggi:
  - Necessarie minori forze e potenze
  - Possibilità di grandi deformazioni
  - Ottenimento di forme complesse con macchine piccole
- Svantaggi:
  - Energia spesa per il riscaldamento
  - Ossidazione dei metalli con conseguente cattiva finitura
  - Poca precisione dimensionale



# Deformazioni a freddo

- La deformazione a freddo avviene per lo scorrimento tra due piani di molecole/atomi al superamento della tensione tangenziale di scorrimento e lo scostamento conseguente è sempre pari alla distanza interatomica.
- Il valore della tensione tangenziale di scorrimento è:
  - direttamente proporzionale alla distanza interatomica
  - inversamente proporzionale alla distanza tra i piani di scorrimento
- Come conseguenza di ciò la deformazione si ha dunque tra due piani sui quali è massima la densità atomica



# Deformazioni a freddo

- Durante la deformazione, oltre allo scorrimento dei piani, a causa di imperfezioni reticolari o comunque incurvamenti, anche i grani subiscono delle deformazioni, allungamenti, etc., così che nuove deformazioni possono aver luogo su piani che sono caratterizzati da una maggiore tensione di scorrimento: questo fenomeno è detto incrudimento.
- L'incrudimento consente di avere, a seguito di deformazione, dei materiali più resistenti da un punto di vista meccanico.
- Per avere deformazioni intense occorre spesso effettuare più passaggi con ricottura intermedia.



# Deformazioni a freddo

- Per grandi deformazioni a freddo, e solo a partire dal fenomeno di snervamento, la relazione che lega tensione e deformazione risulta allora:

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

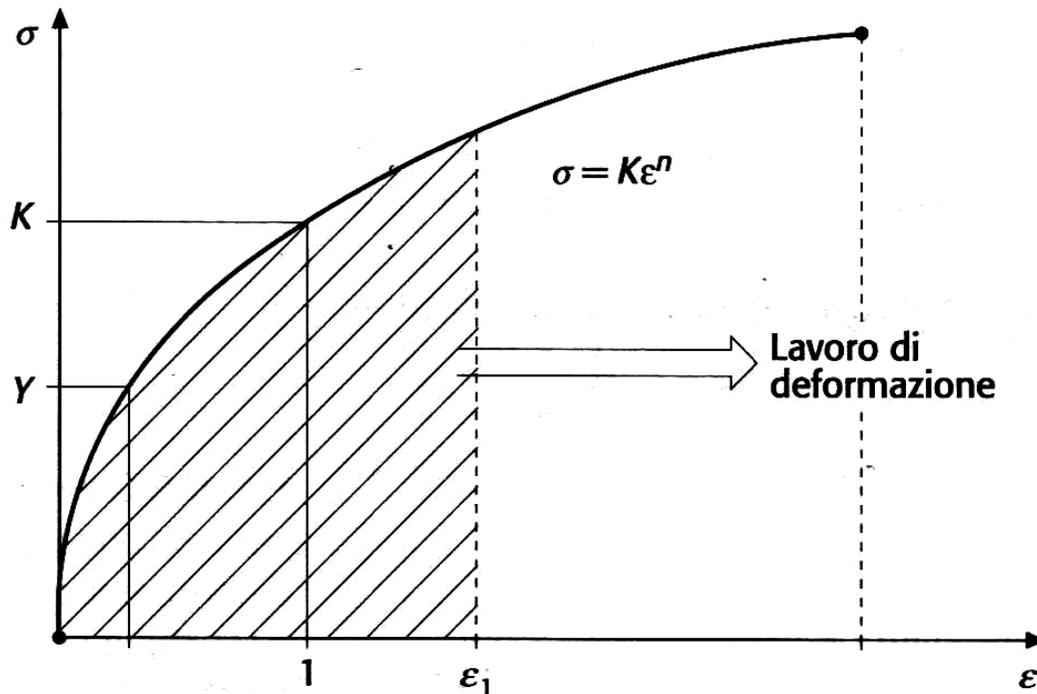
ove  $k$  ed  $n$  dipendono dal materiale:

$k$  = coefficiente di resistenza

$n$  = fattore di incrudimento

- Si verifica altresì che la deformazione è influenzata dalla velocità con la quale essa avviene

# Deformazioni a freddo



Curva «tensione vera-deformazione vera». L'area tratteggiata rappresenta il lavoro ideale di deformazione per unità di volume, per deformazione pari a  $\epsilon_1$ .

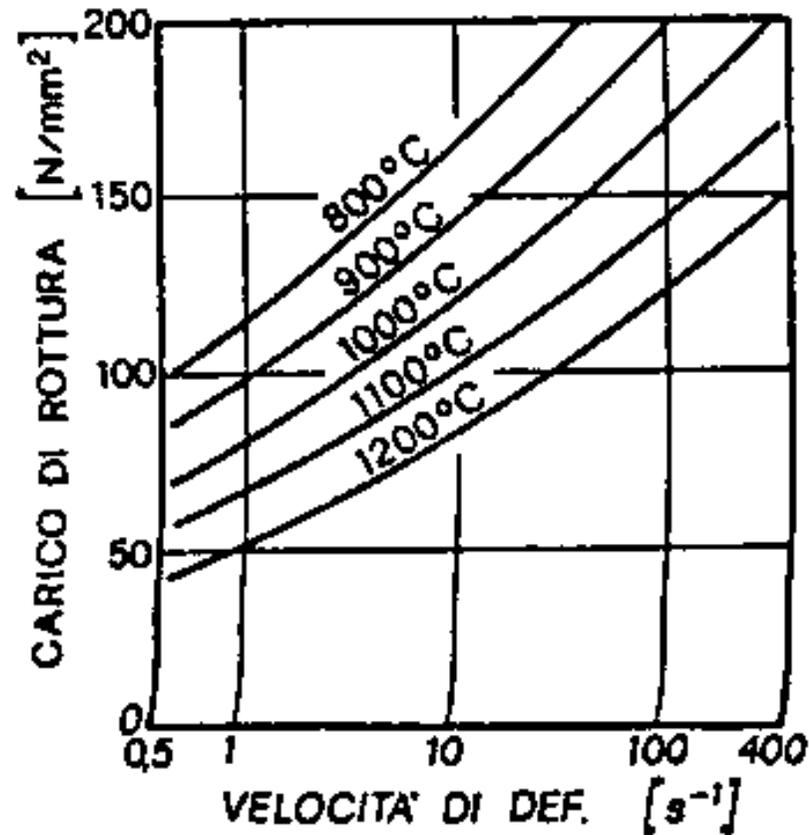


# Deformazioni a caldo

- Si definiscono “a caldo” quei processi di deformazione aventi temperature superiori a quella di ricristallizzazione del materiale. Si ha in tal caso una maggiore possibilità di deformazione in quanto le dislocazioni atomiche si riorganizzano e possono dar luogo a spostamenti più ampi
- L'aumento della temperatura diminuisce la resistenza alla deformazione
- La velocità di deformazione aumenta la resistenza alla deformazione
- Se la velocità di deformazione è bassa e la temperatura abbastanza elevata, la riorganizzazione delle molecole (ovvero l'effetto ricottura) avviene abbastanza velocemente tanto da prevalere sull'effetto incrudimento e dunque il materiale ha un comportamento molto duttile

# Temperatura e velocità di deformazione

Resistenza a rottura di un acciaio al variare della  $\dot{\epsilon}$  e della temperatura.





# Ulteriori considerazioni

- Il valore di  $\sigma$  necessario per iniziare e mantenere il processo di deformazione è chiamato *flow stress* e dipende da:
  1. Temperatura del corpo
  2. Materiale
  3. Velocità di deformazione (molto più importante per processi a caldo che a freddo)

- Di fatto, per processi a caldo la relazione che lega tensione e deformazione diventa funzione della velocità di deformazione:

$$\sigma_m = C\varepsilon^m$$

ove  $C$  e  $m$  dipendono dal materiale e sono valori sperimentali tabellati

# Processo di deformazione

<b>Materiale</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>C (Mpa)</b>	<b><i>m</i></b>
Leghe di Al	200-500	300-40	0,05-0,02
Leghe di Cu	200-800	400-20	0,02-0,3
<b>Acciai</b>			
• bassa % C	900-1200	170-50	0,08-0,20
• media % C	900-1200	180-55	0,07-0,25
• inossidabili	600-1200	420-40	0,02-0,4

Valori indicativi dei parametri  $C$  e  $m$  per alcuni materiali per valori di  $\epsilon$  compresi tra 0,2 e 1.



# Lavoro di deformazione

- Il lavoro di deformazione è esprimibile con la formula

$$W = \int \sigma d\varepsilon$$



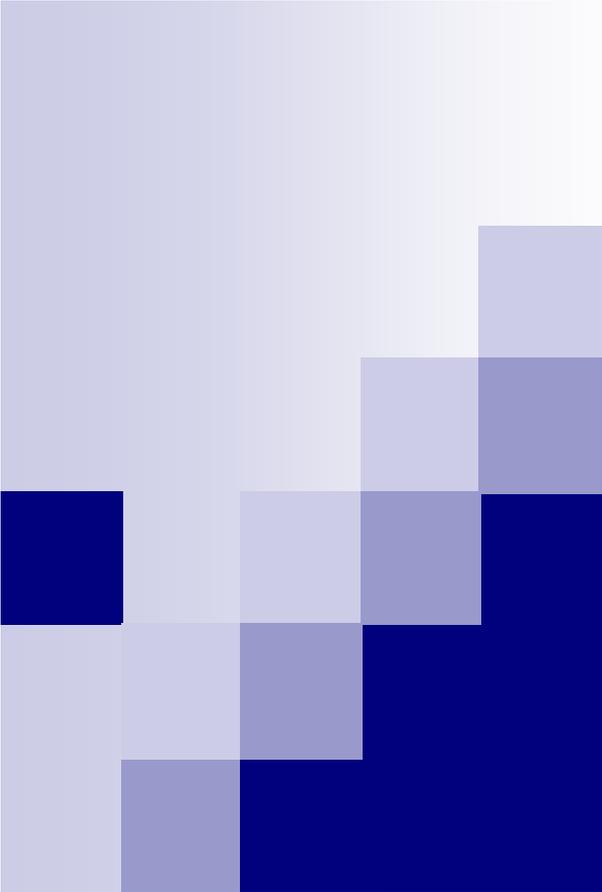
# Rendimento del processo

- Il lavoro calcolato in via teorica è però sottostimato in quanto vi sono forme di energia perse nelle operazioni, tra cui:
  - Il lavoro per vincere l'attrito tra materiale deformato e organi della macchina
  - Il lavoro perso per le “distorsioni” di scorrimento interne che non danno luogo ad alcun cambio di forma



# Rendimento del processo

- Il rapporto tra lavoro teorico e lavoro reale è detto rendimento del processo e varia in funzione del processo utilizzato:
  - Estrusione 30-60%
  - Laminazione 75-95%
- Gran parte dell'energia assorbita dal pezzo è dissipata in calore che fa aumentare la temperatura del pezzo



# Lavorazioni per deformazione plastica



# Laminazione

- Il materiale è costretto a passare dentro due cilindri contro-rotanti che ne riducono la sezione ed incrementano la lunghezza
- La sollecitazione principale è quella di compressione



# Estrusione

- Il materiale è costretto da un pistone a fluire attraverso una sezione di sagoma obbligata
- La sollecitazione è quella di compressione



# Trafilatura

- Il materiale è costretto a passare dentro una sezione di sagoma definita riducendo la sezione ed incrementando la lunghezza attraverso una forza di trazione
- La sollecitazione principale è quella di compressione esercitata dalla matrice



# Fucinatura e stampaggio

- Il materiale sottoposto a temperatura variabile è costretto a riempire una sagoma definita da due metà stampo
- La sollecitazione è soprattutto di compressione



# Tranciatura

- Il materiale, ridotto a lamiera viene tagliato secondo una forma desiderata attraverso la compressione tra un punzone ed una matrice
- La sollecitazione prevalente è appunto di taglio



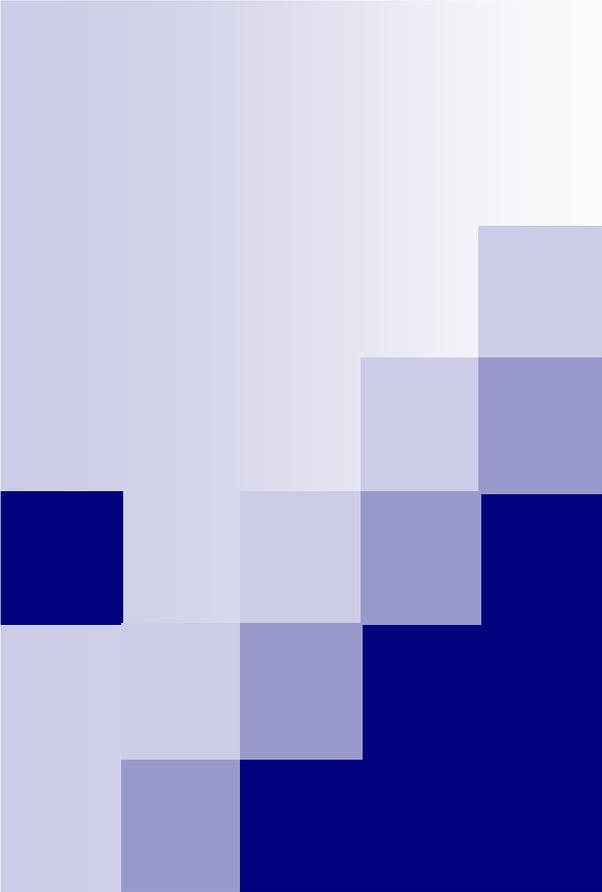
# Imbutitura

- Il materiale sotto forma di lamiera è costretto da un punzone a fluire in una matrice assumendone la sagoma
- Le sollecitazioni prevalenti sono quelle di trazione, compressione, flessione



# Piegatura

- Il materiale, dopo laminatura, viene piegato localmente mediante stampi, rulli, punzoni
- La sollecitazione prevalente è di flessione

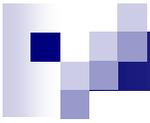


# Laminazione e laminato

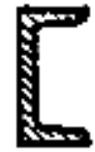


# Laminazione

- È un processo impiegato nell'industria siderurgica per la trasformazione del materiale colato (lingotti o colata in continuo) in semilavorati commerciali
- I prodotti più comuni sono:
  - Blumi: sezione quadrata, lato  $>130$  mm
  - Billette: sezione quadrata, lato 40-130 mm
  - Bramme: sezione rettangolare, lato min. -100mm
  - Profilati speciali: semitondi, etc, lunghezza 6m
  - Barre: sez. quadrata, rettangolare, esagonale, ottagonale e piatti
  - Lamiere: in tutti i formati, sottili ( $<3$ mm) e grosse ( $>3$ mm) in fogli
  - Vergella: tondino con diametro nominale  $> 5$ mm in rotoli
  - Travi: ad I, H, U, T, L
  - Nastri: avvolti in rotolo, larghi ( $>600$ mm) o stretti ( $<600$ mm)
  - Materiale ferroviario



Principali forme  
dei laminati com  
merciali.

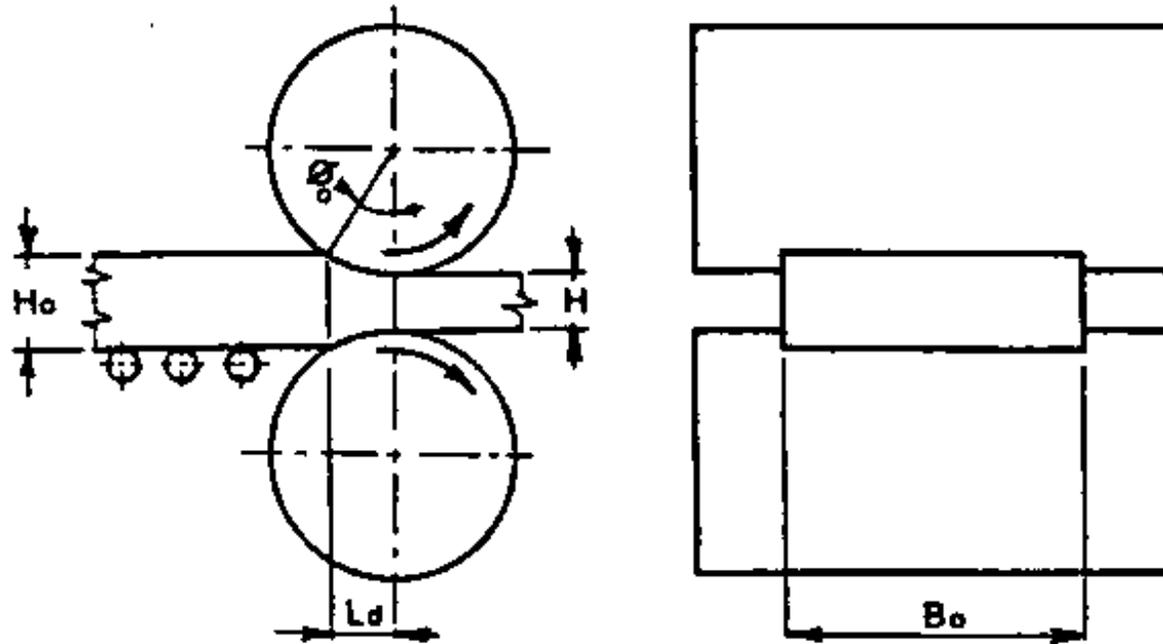




# Laminazione

- La laminazione viene effettuata a caldo tranne che nel caso di lamiere di spessore inferiore ad 1 mm.
- La struttura cristallina disomogenea del metallo viene trasformata in una struttura a grani allungati
- Consiste nel passaggio di un pezzo di sezione rettangolare attraverso due cilindri laminatori ruotanti in senso opposto, subendo uno schiacciamento, un allungamento ed un allargamento

# Schema di laminazione



Schema della laminazione.

$H_0, H$  = spessore iniziale, finale del laminando,  
 $B_0$  = larghezza iniziale del laminando,  
 $L_d$  = lunghezza della zona di deformazione,  
 $\phi_0$  = angolo di primo contatto.



# Calibratura

Studio delle sezioni delle incisioni sui cilindri (calibri) al fine di realizzare le forme dei laminati

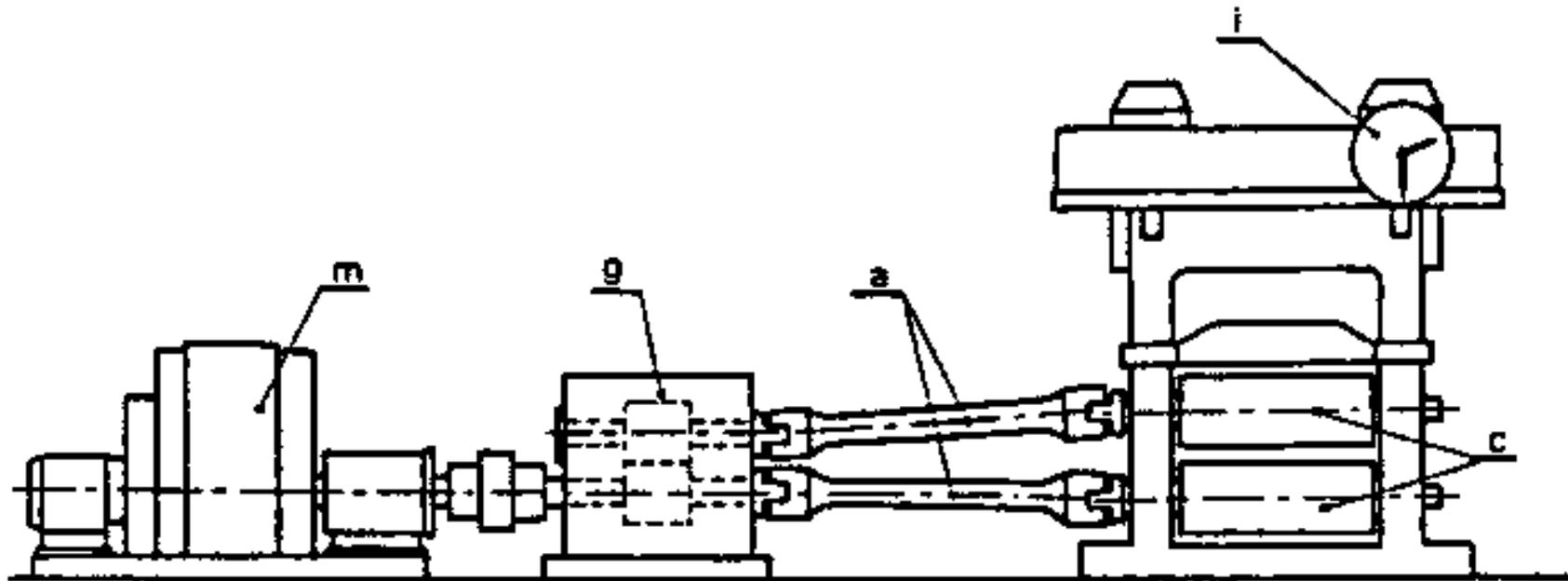
- Conoscendo:

- la sezione di partenza e quella di arrivo
- le caratteristiche dell'impianto
- le condizioni di allargamento e di trascinamento
- il coefficiente di riduzione

- Si determina il numero di passaggi per ottenere la sezione voluta nelle tolleranze stabilite cercando inoltre di:

- Ottimizzare l'uso dell'impianto
- Ridurre i costi di ciclo
- Limitare l'usura dei cilindri

# Linee o treni di laminazione



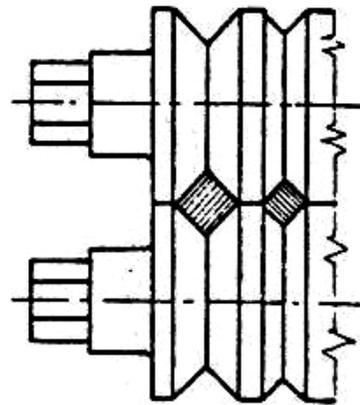
Gabbia di laminazione

c: cilindri,  
i: indicatore della distanza  
fra i cilindri,

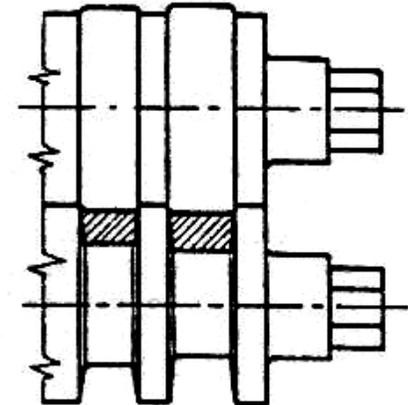
a: allunghe,  
g: gabbia a pignoni,  
m: motore.

# Cilindri di laminazione

- Sono di diversi tipi:
  - Lisci: per prodotti piatti (nastri e lamiere)
  - Scanalati: per profili specifici, a loro volta
    - Aperti
    - Chiusi
  - Le pareti di laterali devono presentare angoli di spoglia di almeno  $1^{\circ}$ - $2^{\circ}$



calibri aperti

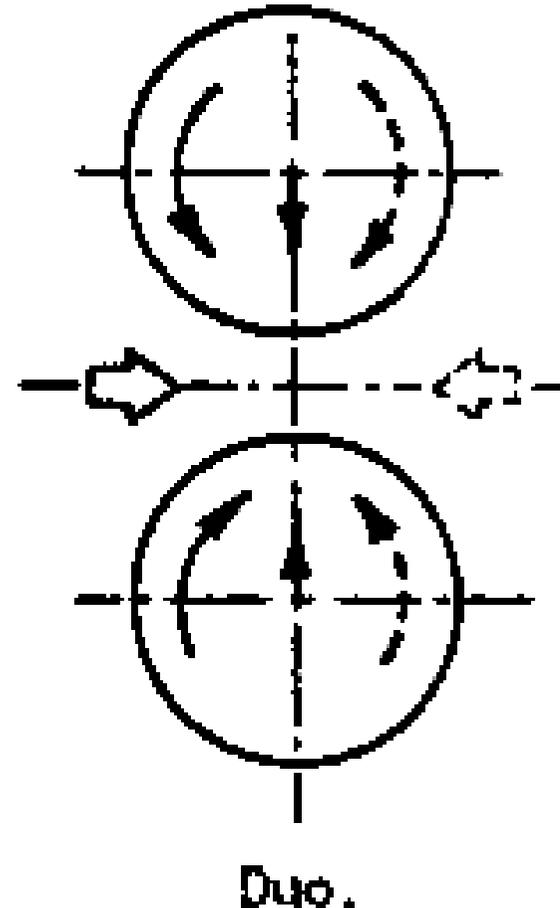


calibri chiusi

Tipi di cilindri scanalati.

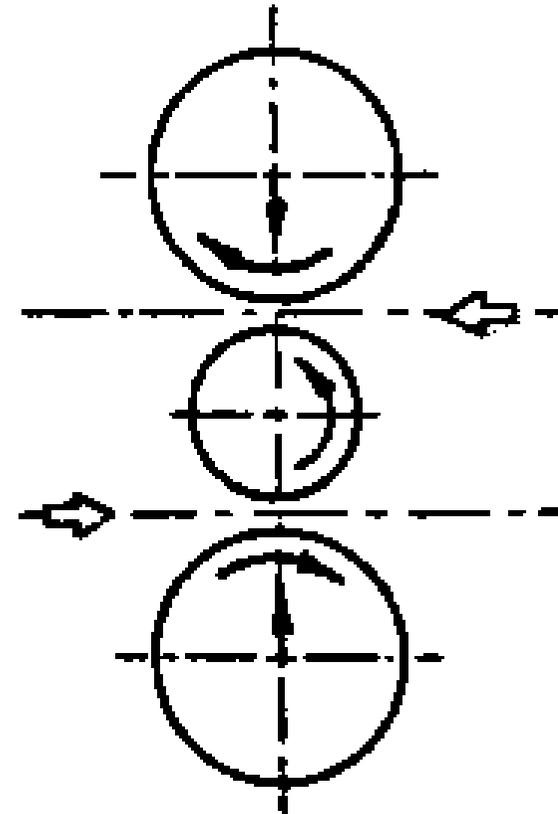
# Disposizione dei cilindri

- Possibili disposizioni:
  - Duo: formato da due cilindri con verso di rotazione reversibile, utilizzato per la sbazzatura



# Disposizione dei cilindri

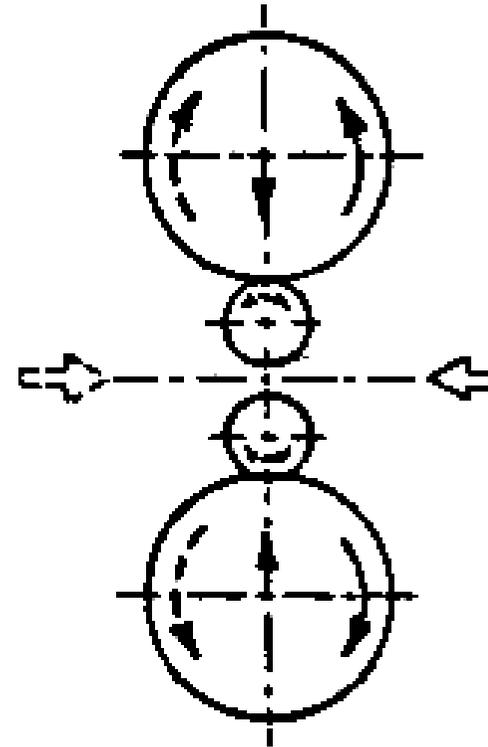
- Possibili disposizioni:
  - Trio: formato da tre cilindri con verso permanente utilizzando le luci alternativamente, anch'esso utilizzato prevalentemente per sbozzatura



**Trio.**

# Disposizione dei cilindri

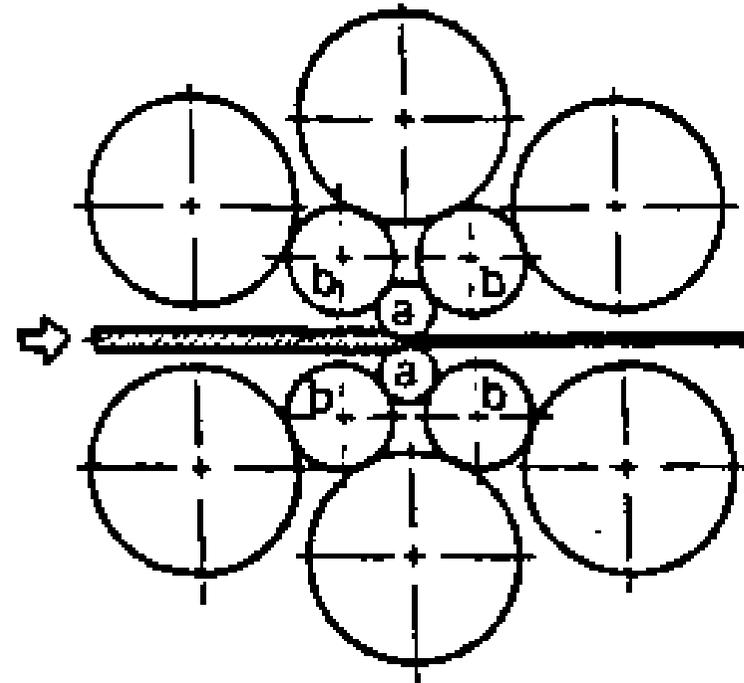
- Possibili disposizioni:
  - Quattro: gabbia di 4 cilindri di cui 2 interni motorizzati, gli esterni solo per irrigidimento anti-deformazione. Reversibili utilizzati per lamiere e nastri



Quarto.

# Disposizione dei cilindri

- Possibili disposizioni:
  - Multiplo: formato da più cilindri per laminazione di prodotti piani di precisione

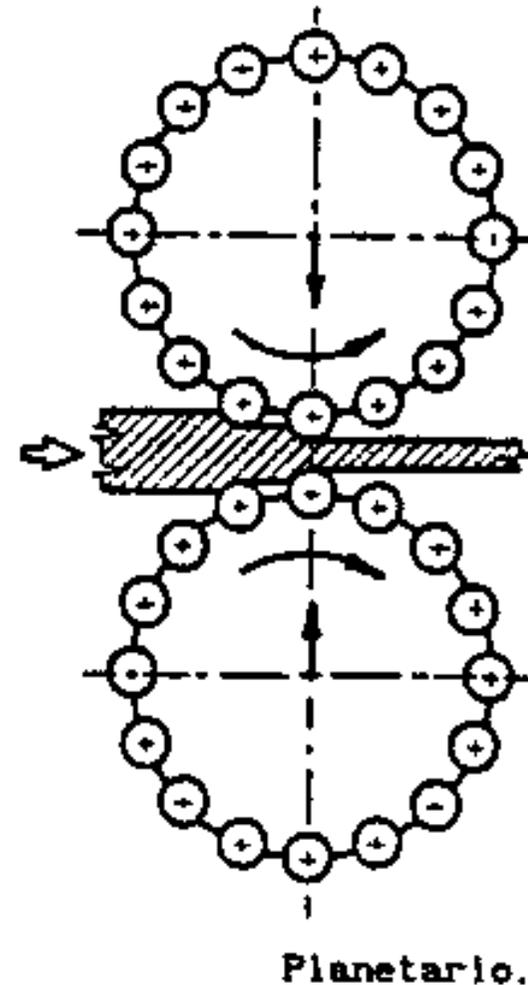


Multicilindro.

**a:** cilindri di lavoro,  
**b:** cilindri motori.

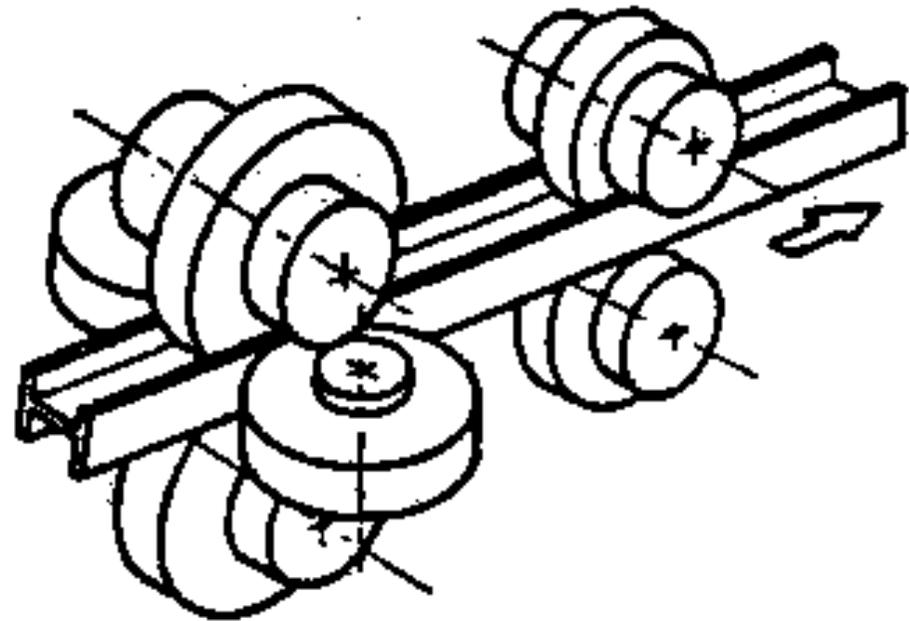
# Disposizione dei cilindri

- Possibili disposizioni:
  - Planetario: composta da 2 grandi cilindri con molti piccoli cilindri che procedono per una progressiva e ampia riduzione



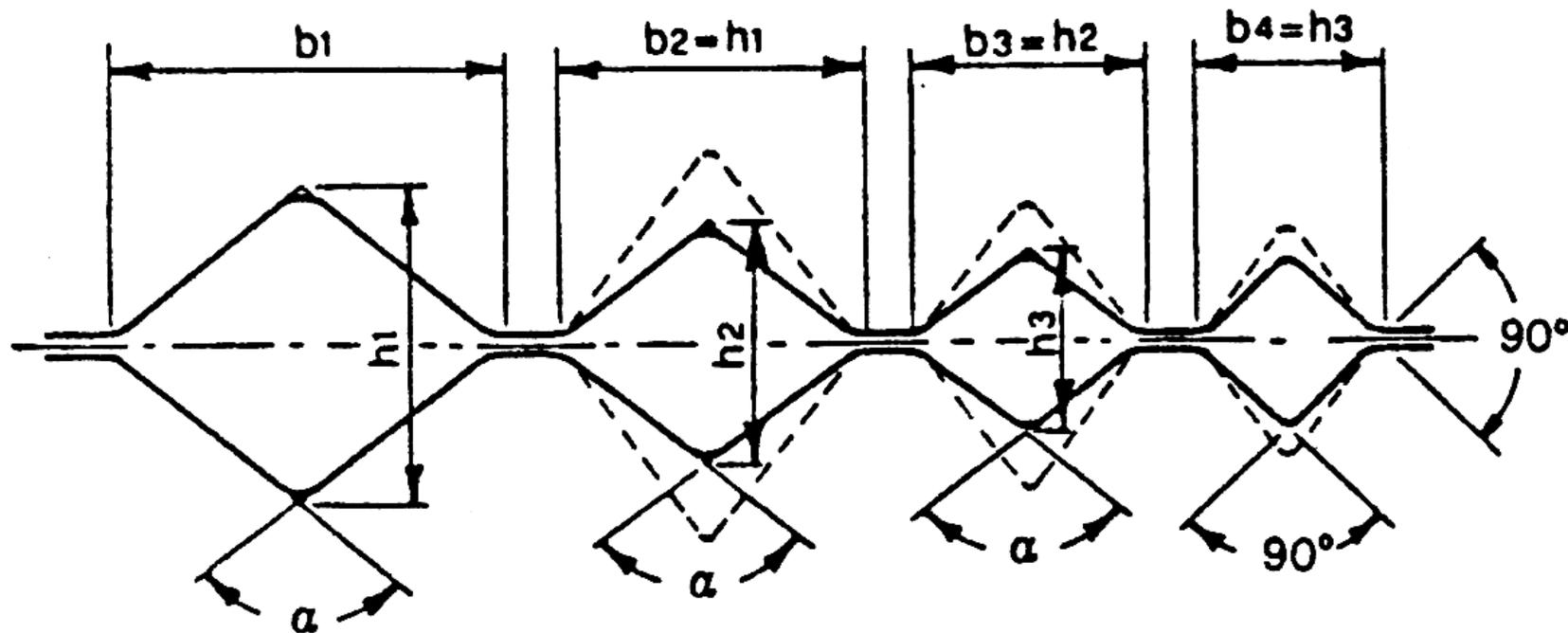
# Disposizione dei cilindri

- Possibili disposizioni:
  - Universale: presenta almeno 2 coppie di cilindri che provvedono anche alla sagomatura delle pareti laterali dei laminati



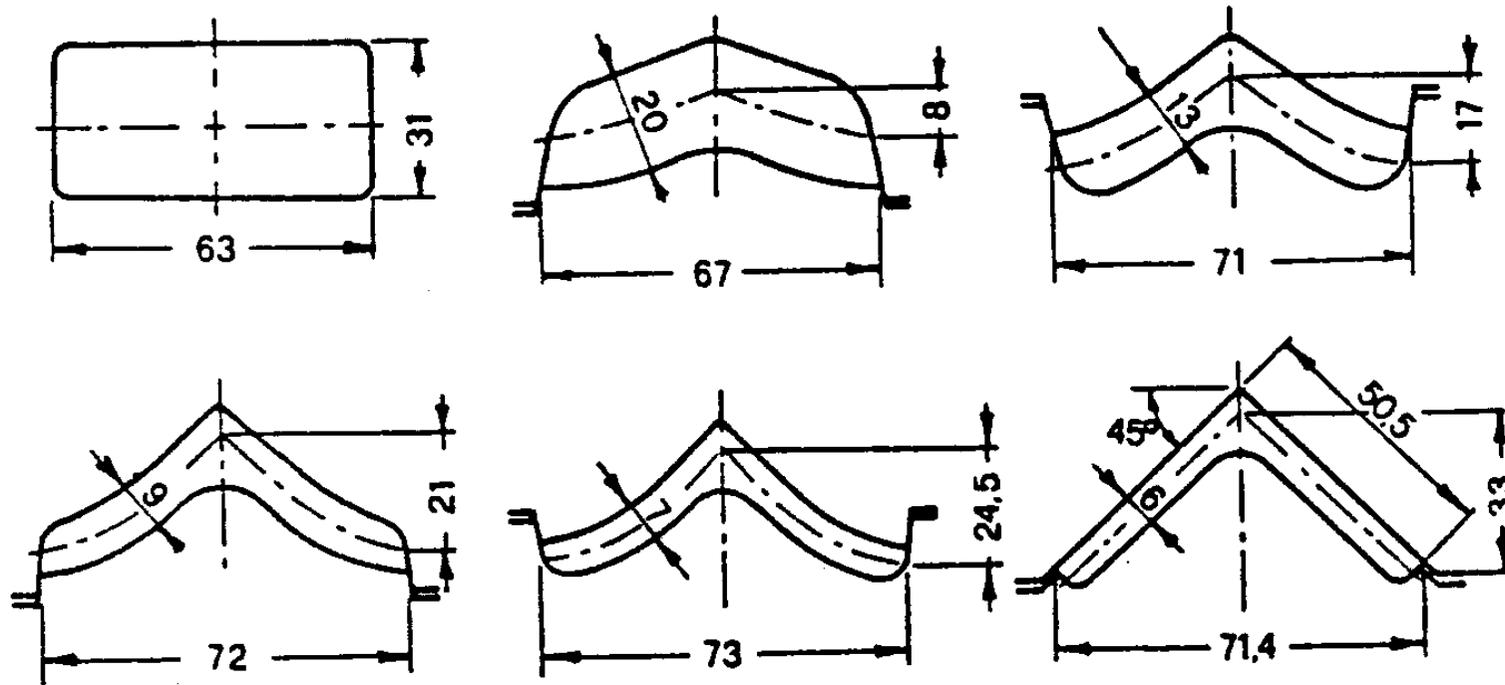
Laminatoio universale  
per travi.

# Calibratura a sezione quadrata



Calibratura per laminati a sezione quadrata.

# Calibratura ad "L"



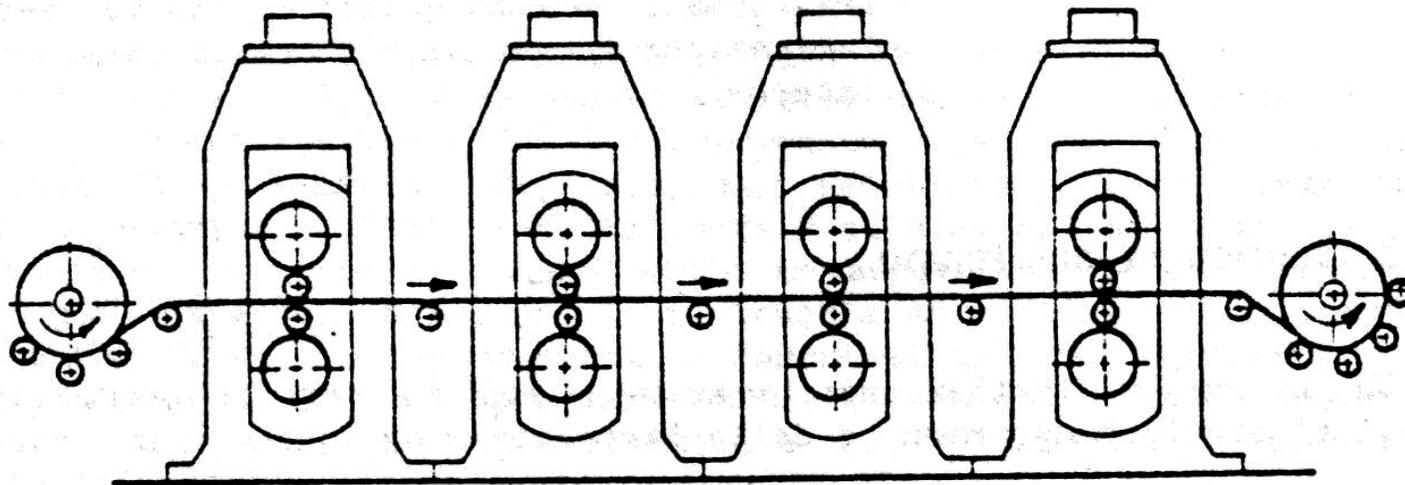
Calibratura per ferri ad L (lato di 50 mm).  
Grezzo di partenza: laminato a sezione ret= tangolare.



# Laminazione a freddo di nastri

- Si applica su nastri già laminati a caldo con l'obiettivo di
  - Ridurre ulteriormente lo spessore (fino 0,5 mm)
  - Migliorare la resistenza meccanica
- È preceduta da un'operazione di decapaggio per eliminare qualunque forma di ossido
- È realizzata con 4/5 gabbie successive che esercitano sul nastro, un'azione di compressione e di tiraggio progressivo fino alla bobina finale di avvolgimento
- È seguita da una laminazione di finitura con processo di ricottura per garantire una superficie idonea a successivi trattamenti di zincatura/verniciatura/smaltatura

# Laminazione a freddo di nastri



Laminatoio continuo a freddo per nastri.



# Velocità di laminazione

laminazione a caldo { treno sbozzatore 3 ÷ 4 m/s  
treno finitore 6 ÷ 11 m/s  
treno continuo 20 m/s

laminazione a freddo di nastri 25 - 30 m/s



# Laminazione di tubi

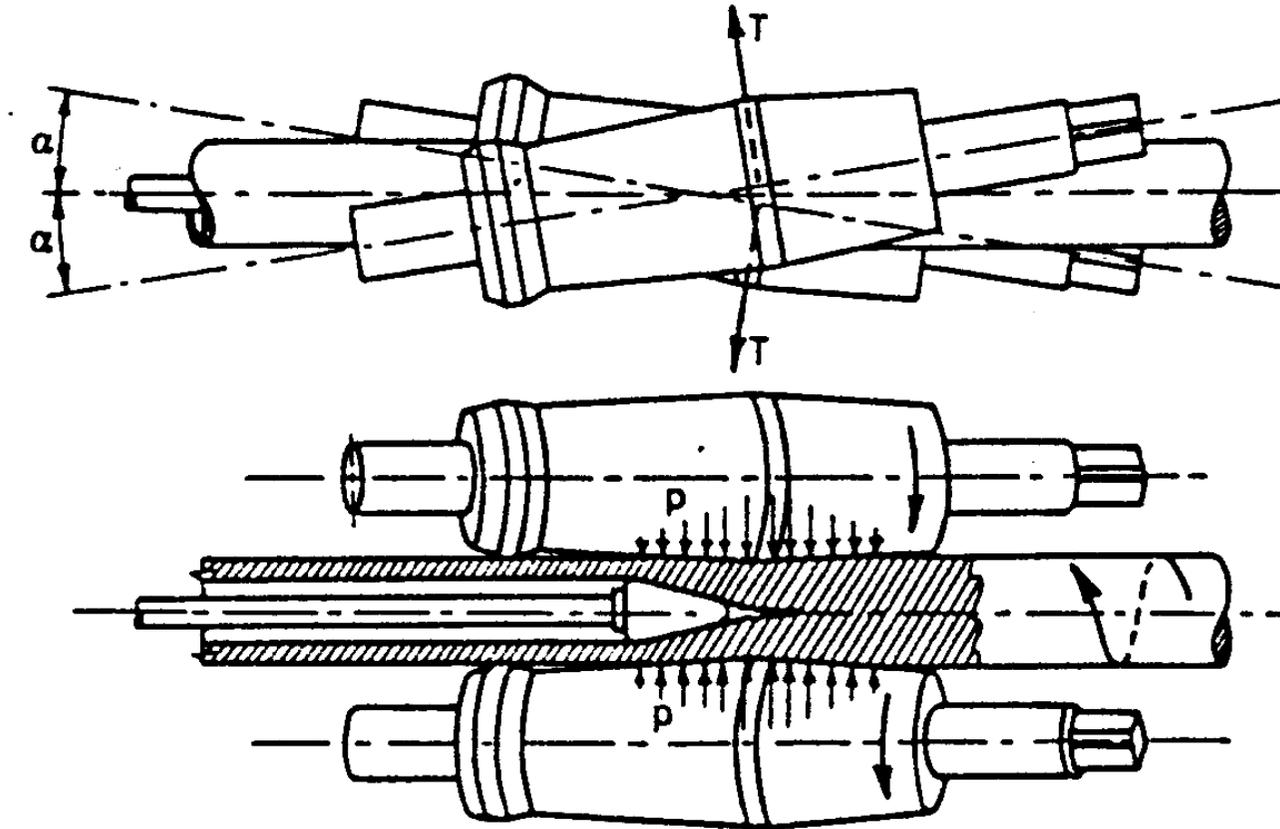
- I tubi si ottengono dal pieno mediante laminazione attraverso due operazioni di base:
  - Produzione del forato a pareti spesse mediante laminazione con spina interna di un lingotto pieno
  - Stiratura e finitura con riduzione dello spessore esterno attraverso laminazione con o senza spina



# Produzione del forato

- Metodo Mannesmann o della laminazione obliqua:
  - Tondo in acciaio
    - Lunghezza max 5-6 m
    - Temperatura 1250-1280 C°
  - Cilindri a tronco di cono con assi obliqui
    - Azione di pressione P progressivamente crescente
    - Azione tangenziale T che sviluppa un a componente assiale  $A = T \sin \alpha$  che consente l'avanzamento del pezzo
    - Forza di trazione massima al centro della sezione circolare del pieno che, guidata dalla spina, provoca la generazione del foro centrale

# Metodo di Mannesmann



Laminatoio obliquo (Mannesmann).

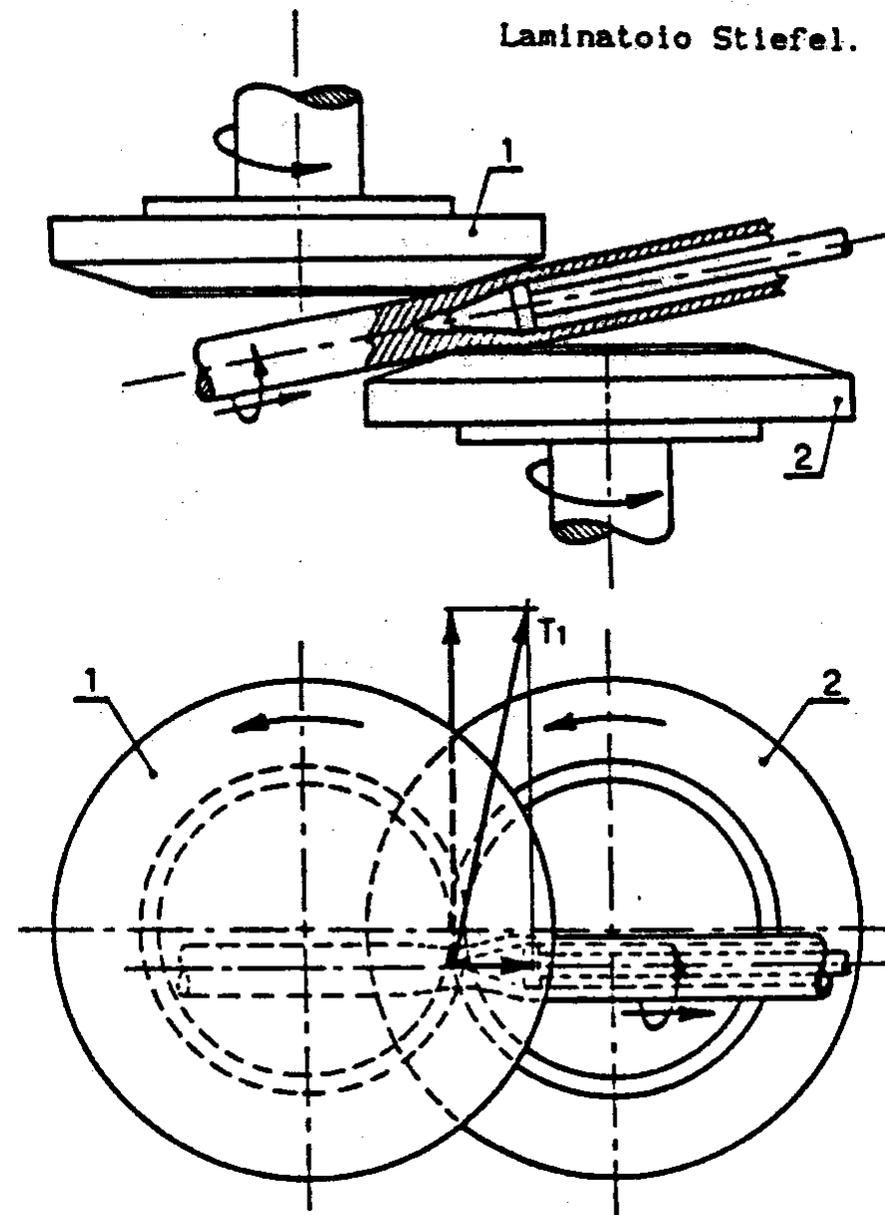


# Produzione del forato

## ■ Metodo di Stiefel:

- È una variante del Mannesmann che prevede l'uso di due dischi di forma piano/conica
- L'asse del pieno è spostato rispetto al piano formato dall'asse dei due dischi così da generare una componente tangenziale della pressione esercitata tale da consentire l'avanzamento del pezzo

# Metodo di Stiefel

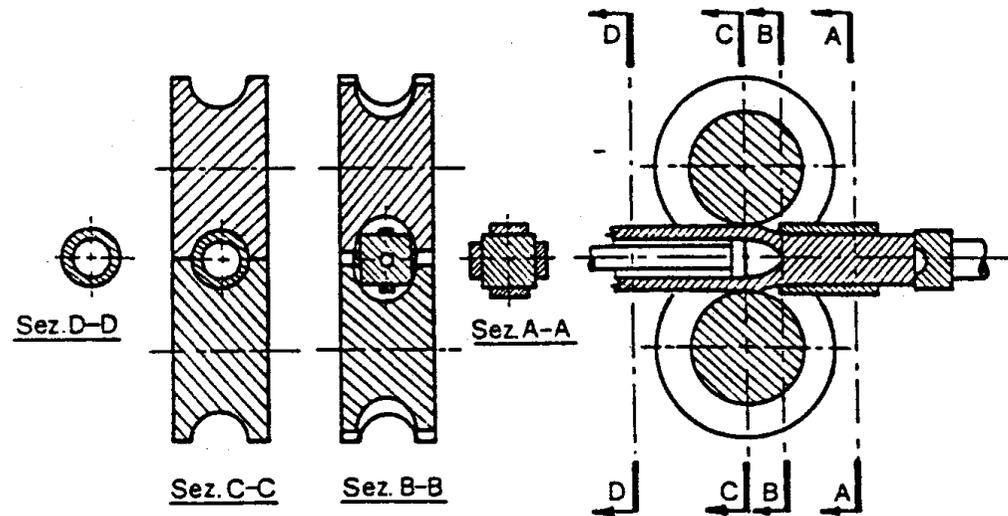
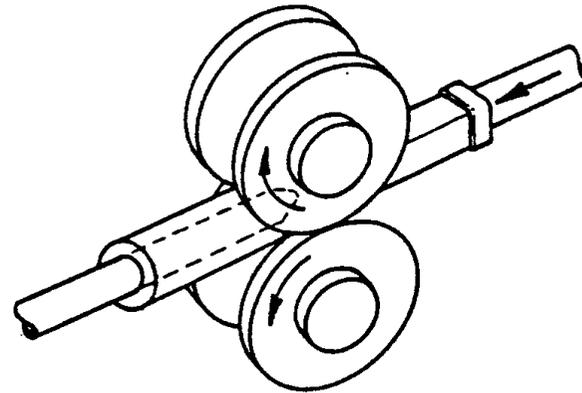




# Produzione del forato

- Metodo PPM (*Press Piercing Mill*) o del laminatoio presso-foratore:
  - Uno spintore forza il pieno all'imbocco di due cilindri motori a gola scanalata e quindi contro un mandrino a punta che penetra nel pieno provocando il rigonfiamento esterno dello spessore che occupa le gole dei cilindri assumendone la forma
  - La qualità è generalmente migliore rispetto alle altre tecnologie

# Metodo PPM



Laminatoio presso-foratore.

Sez. A-A quadro di partenza,  
Sez. B-B fase di imbocco,

Sez. C-C fase di laminazione-foratura,  
Sez. D-D forato (con fondello).



# Stiratura e finitura

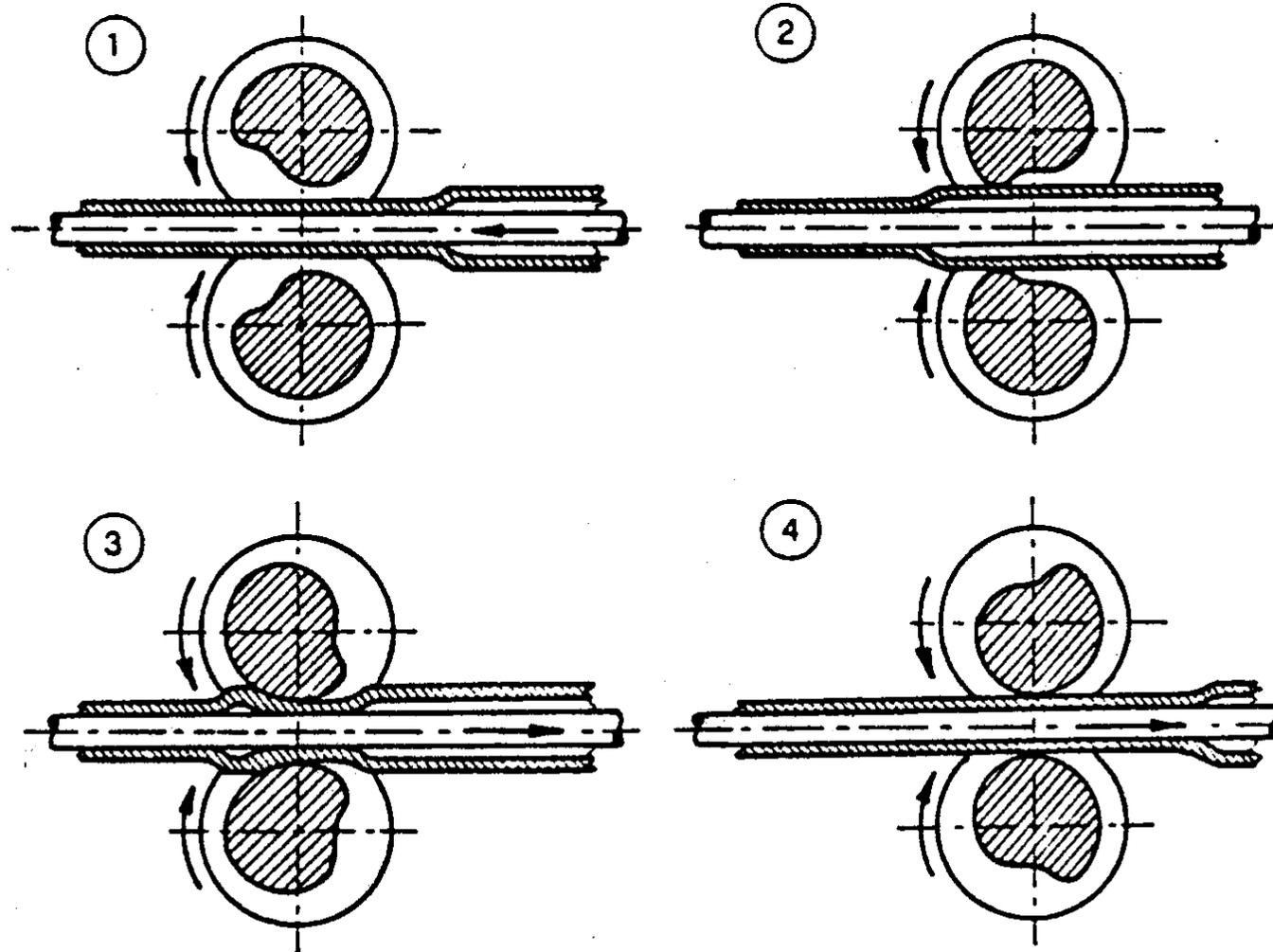
- A tale scopo esistono diverse tecnologie quali:
  - Laminatoio a passo di pellegrino
  - Laminatoio a tappo
  - Laminatoio continuo
  - Laminatoio a spinta
  - Laminatoio riduttore stiratore



# Laminatoio a passo di pellegrino

- Consta di due cilindri sagomati controrotanti in direzione opposta all'avanzamento del forato
- Si alterna una fase di lento avanzamento del forato mosso da un pistone ad una di laminazione effettiva con moto retrogrado del forato

# Metodo LP



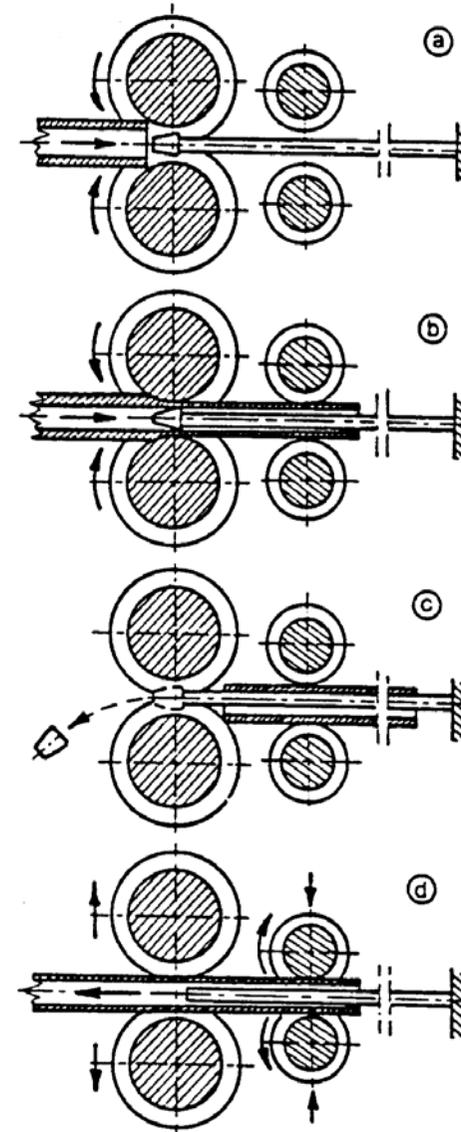
Sequenza di laminazione nel LPP.



# Laminatoio a Tappo

- Consiste in due coppie di cilindri controrotanti con luce di passaggio variabile
- Un'asta centrale con un "tappo" all'estremità e deputata alla calibratura della superficie interna
- Sono generalmente necessari più passaggi in posizioni diverse per giungere al diametro e spessore richiesti

# Laminatoio a tappo



Laminatoio a tappo.

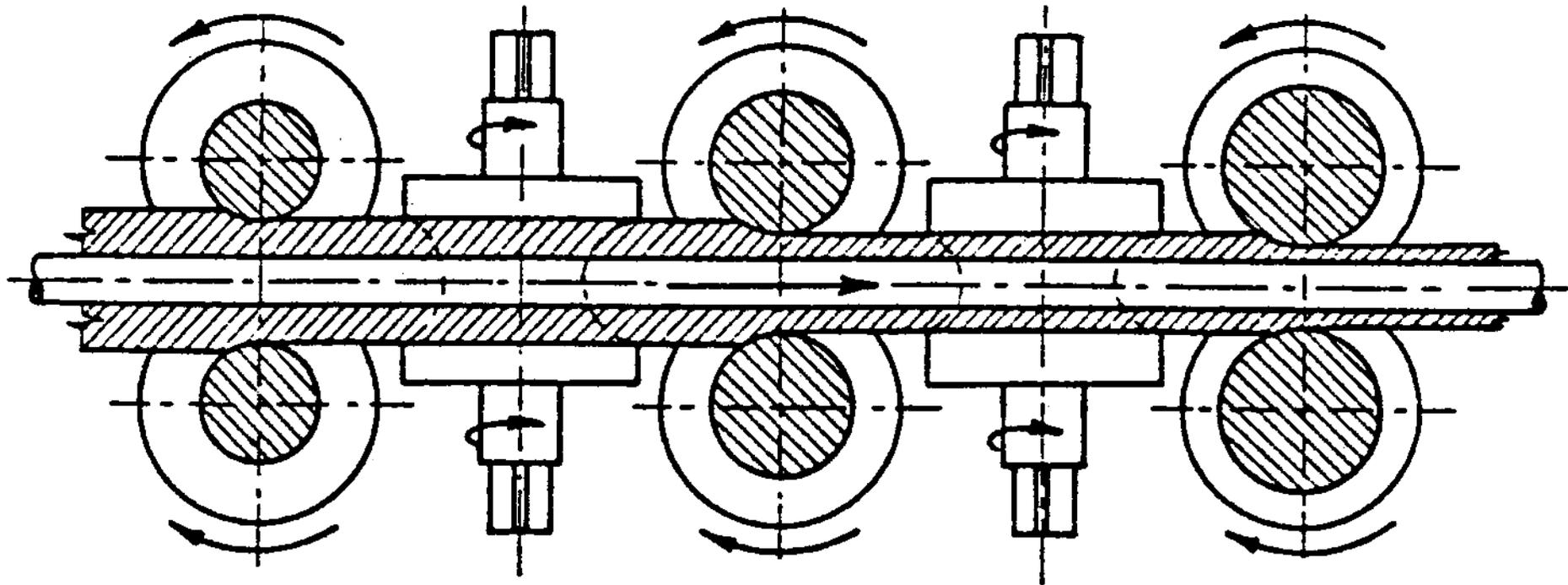
a) imbocco,                      b) laminazione,  
c) espulsione tappo      d) ritorno.



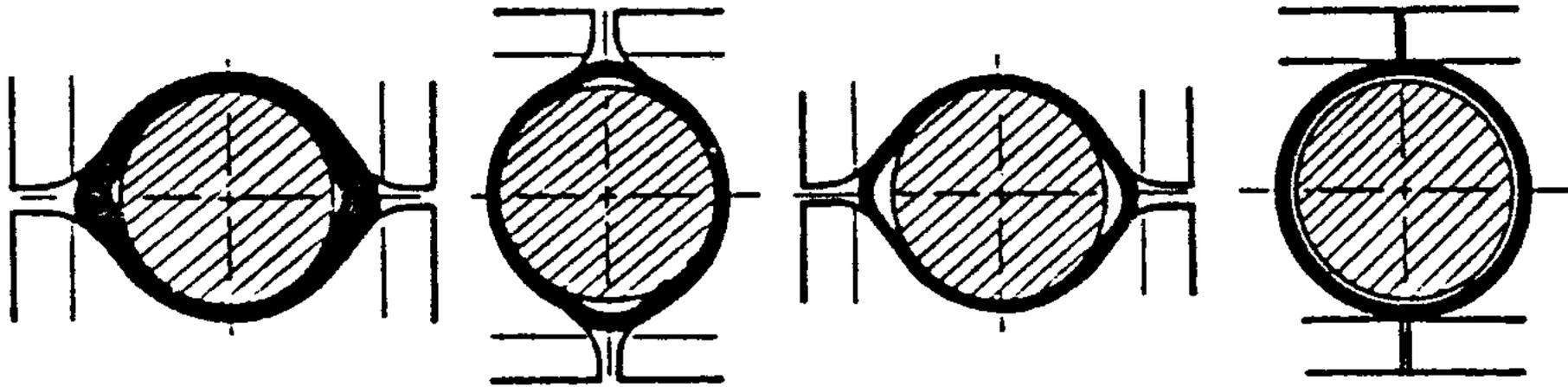
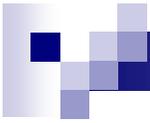
# Laminatoio continuo

- Consiste in una sequenza di 8-9 gabbie con assi disposti a  $90^\circ$  in sequenza che operano le operazioni di sbazzatura/laminazione/finitura
- Il diametro esterno viene progressivamente ridotto
- Il diametro interno viene calibrato su un mandrino a sezione costante

# Metodo LC



Schema del laminatoio continuo.



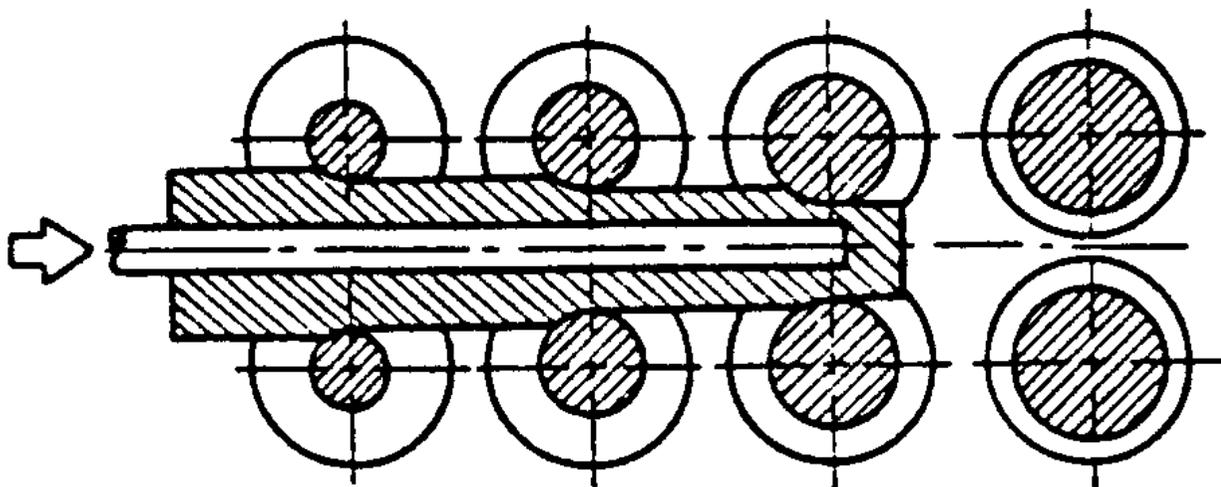
Calibri di un LC a 8 gabbie (1<sup>a</sup>, 4<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 8<sup>a</sup> gabbia).



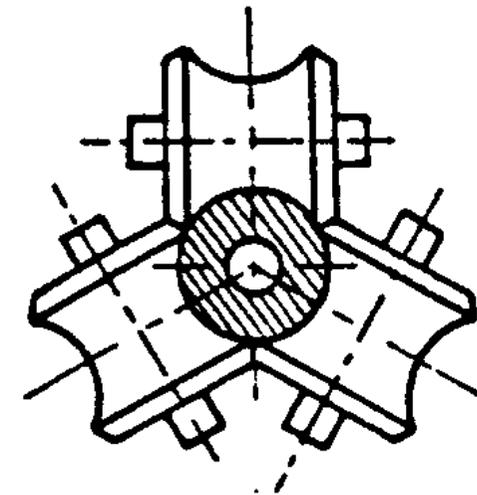
# Laminatoio a spinta

- È un impianto di laminazione composto da due attrezzature:
  - Laminatoio obliquo a spalla
    - Composto da tre cilindri obliqui a tronco di cono controrotanti che provvedono alla laminazione del forato provocandone la riduzione dello spessore
  - Treno di laminazione a spinta
    - Composto da più gabbie ciascuna di tre cilindri a  $120^\circ$  che provvedono alla fase di finitura
  - L'avanzamento del forato (a bicchiere) è garantito da una mandrino calibrato interno

# Laminatoio a spinta



**Schema**



**Disposizione dei cilindri**

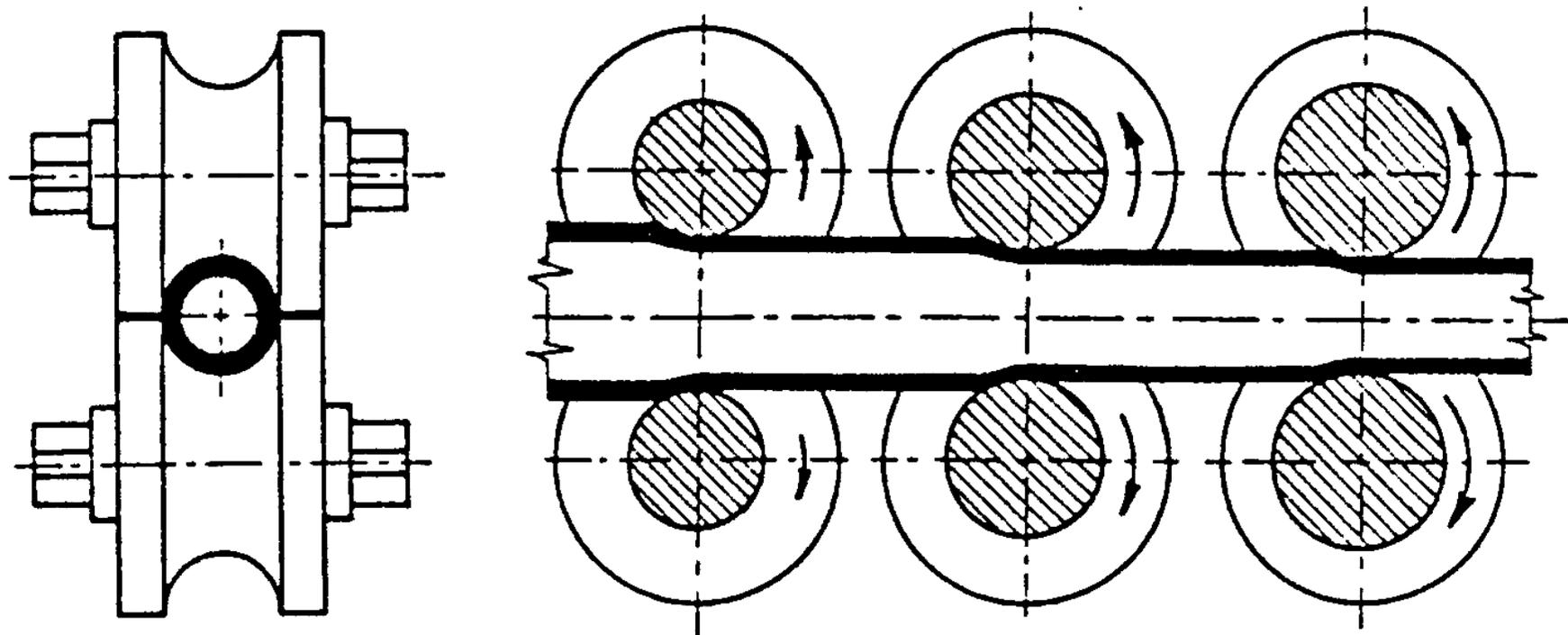
**Treno di laminazione a spinta.**



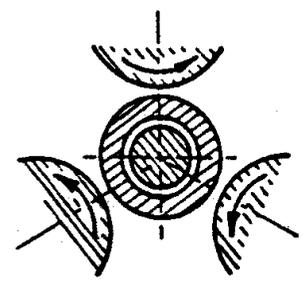
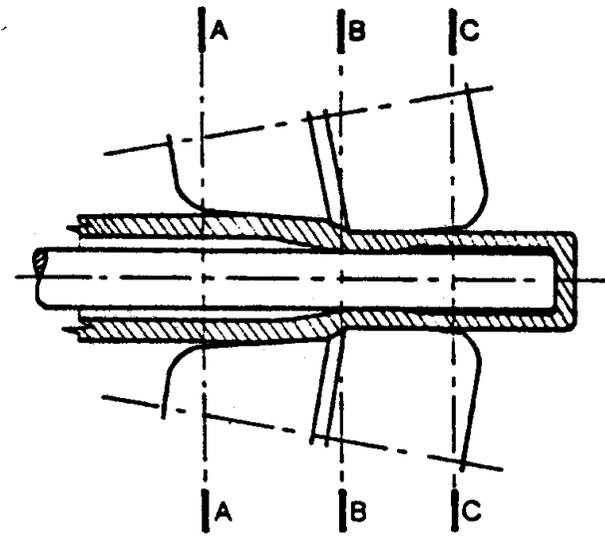
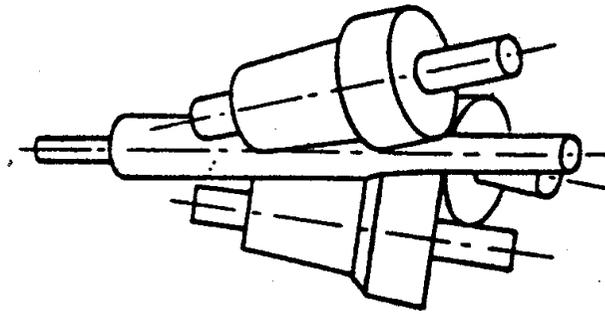
# Laminatoio riduttore-stiratore

- Si differenzia dal precedente per il fatto che la successione delle gabbie non presenta solo una sollecitazione di progressiva compressione del forato, bensì anche di progressiva trazione, cosa che consente di non avere alcun mandrino interno
- L'andamento degli spessori e del diametro interno varia dunque in funzione della gabbia attraversata e dello stato di avanzamento della laminazione
- Il tratto iniziale e finale del forato, a causa della variazione di diametro interno e spessore costituiscono generalmente uno sfrido di produzione
- Gli assi dei cilindri di ciascuna gabbia sono ruotati di  $90^\circ$  rispetto a quelli della gabbia precedente, di  $60^\circ$  nel caso di gabbie a 3 cilindri

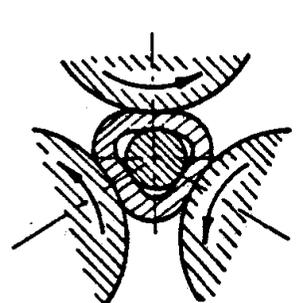
# Metodo LRS



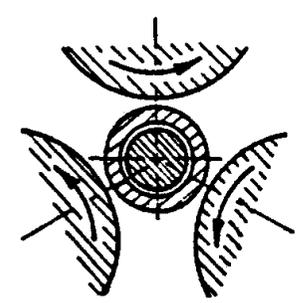
Schema del laminatoio riduttore stiratore.



Sez. A-A

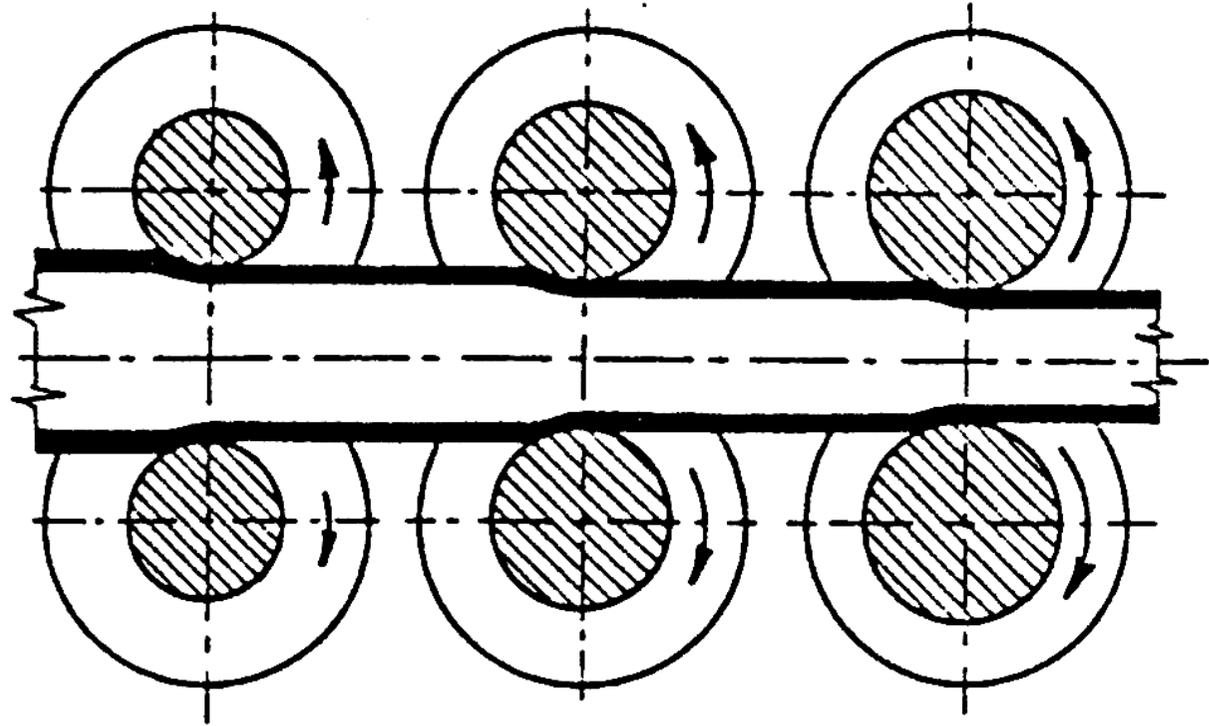
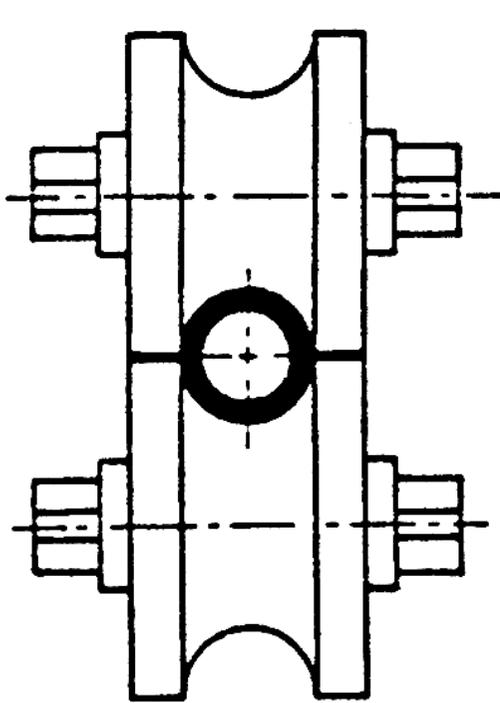


Sez. B-B

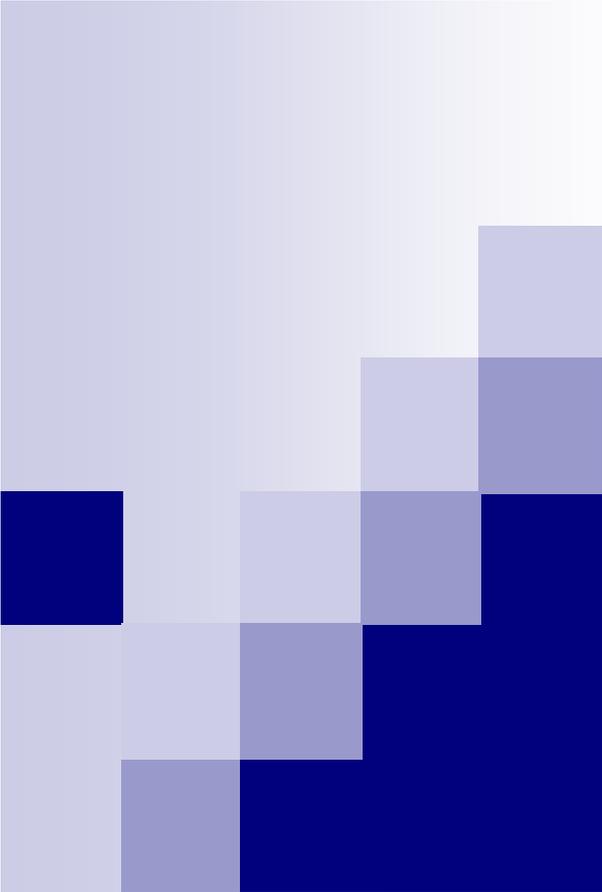


Sez. C-C

Laminatoio obliquo a spalla.



Schema del laminatoio riduttore stiratore.



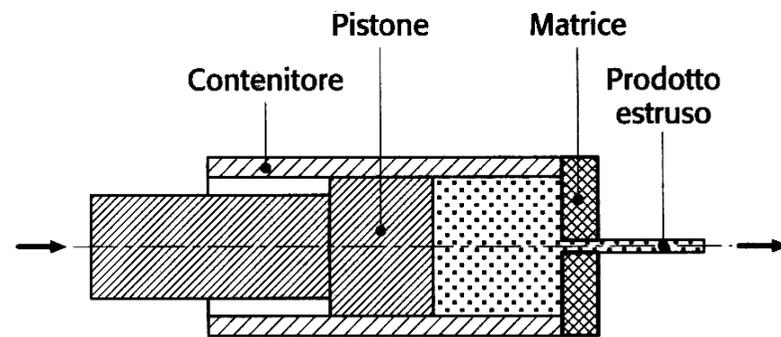
# Estrusione



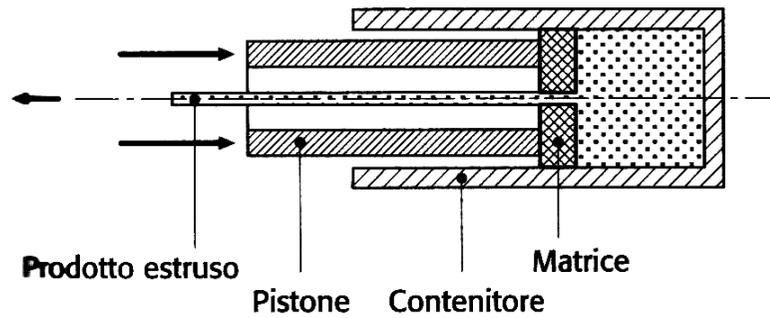
# Processo di estrusione

- Consiste nel processo di compressione di un massello cilindrico di materiale a temperatura ambiente (estrusione a freddo) o riscaldato (estrusione a caldo) mediante una pressa orizzontale così da farlo fluire attraverso un foro (matrice) avente sezione uguale al semilavorato che si desidera ottenere
- Metodi di estrusione
  - Diretta: quando è il massello, spinto dal pistone, a muoversi rispetto alla matrice
  - Inversa: quando è la matrice a muoversi rispetto al massello di materiale.

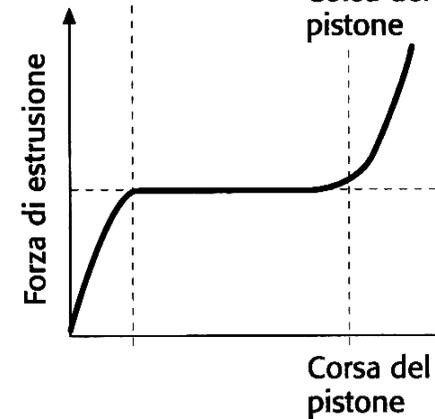
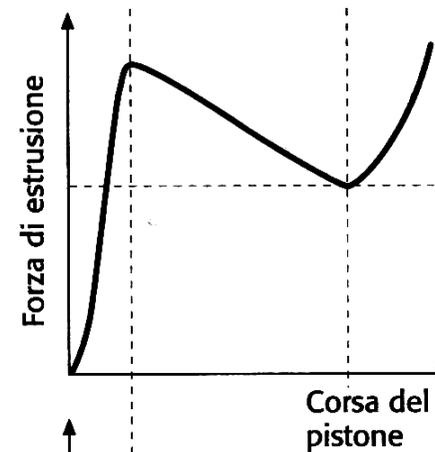
# Processo di estrusione



a)

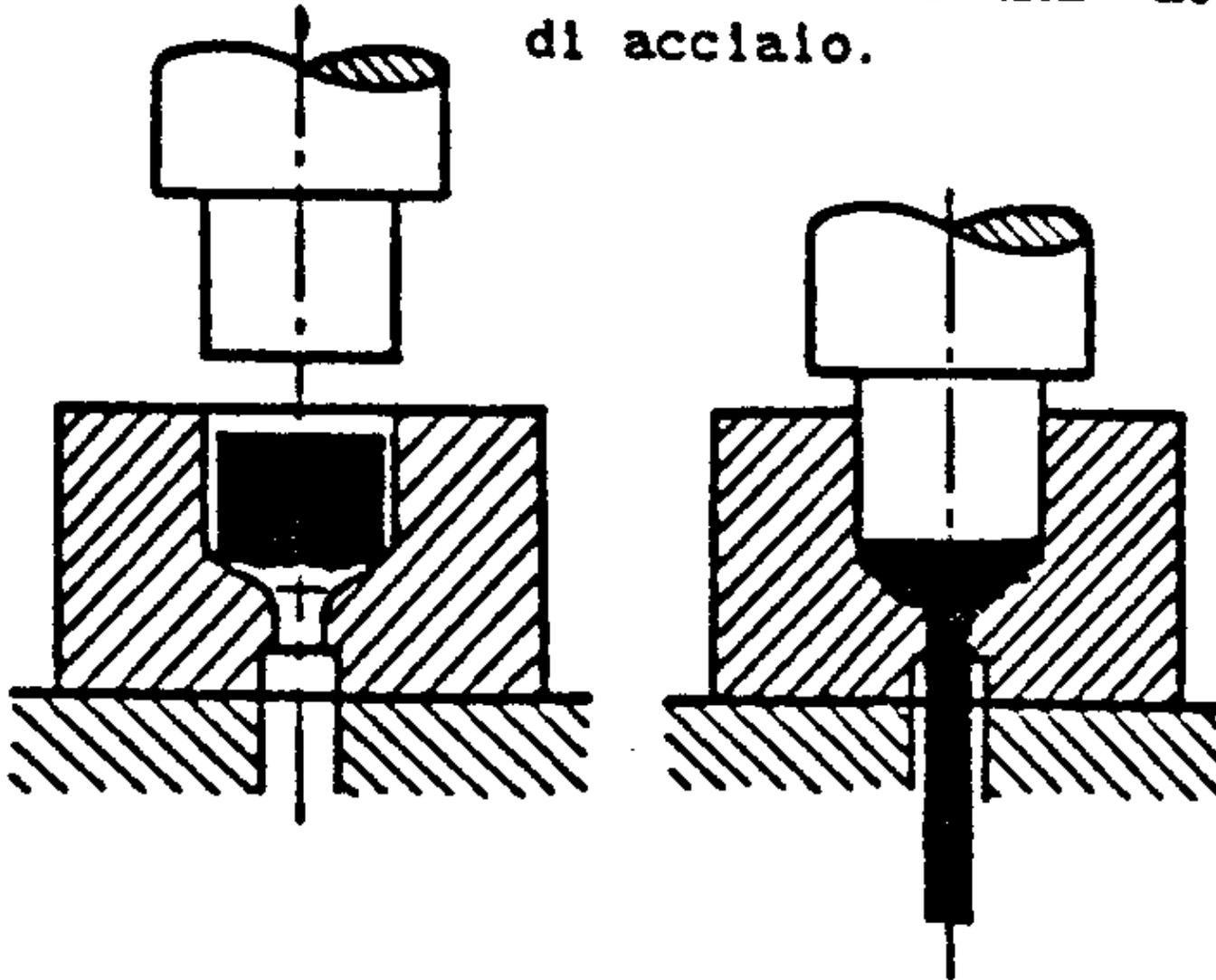


b)

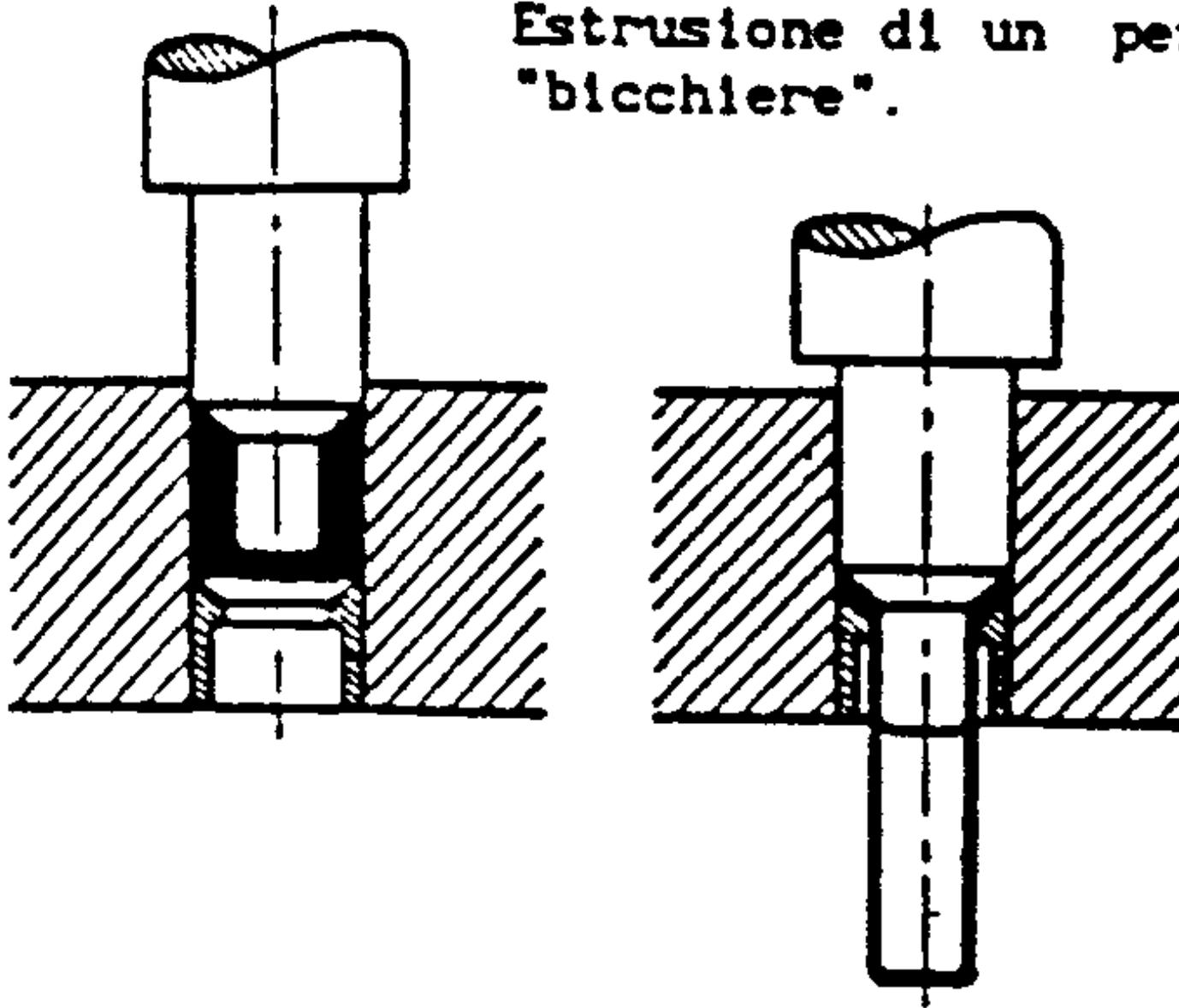


Principio dell'operazione di estrusione, diretta a) e inversa b) e relativi diagrammi qualitativi dell'andamento della forza di estrusione in funzione della corsa del pistone premente.

Estrusione di una valvola di acciaio.



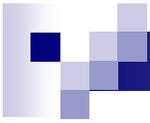
Estrusione di un pezzo a  
"bicchiere".



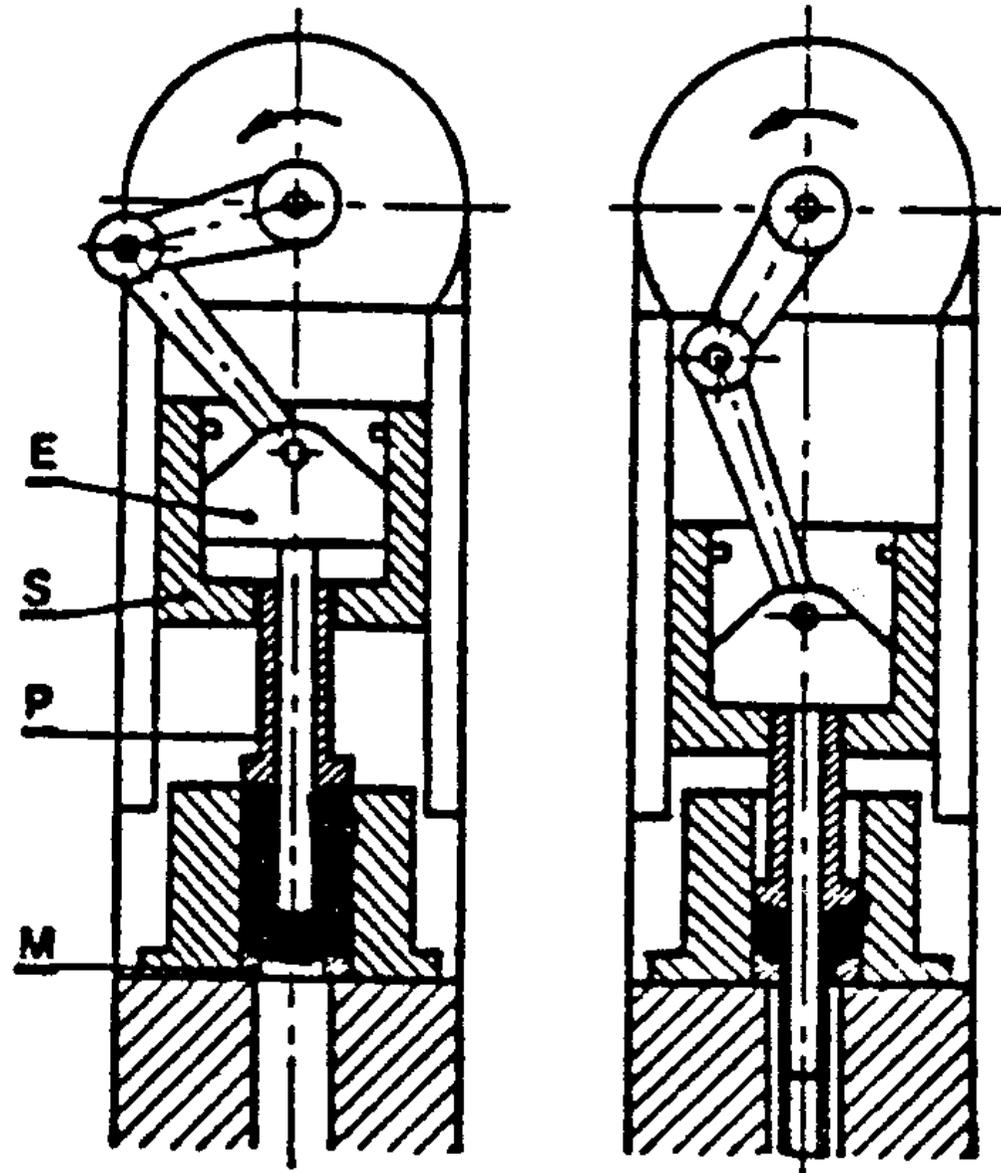


# Processo di estrusione

- Consente di ottenere profili anche complessi e di lunghezza definita dal peso del massello di partenza
- Macchine
  - Presse meccaniche: con sistema biella-manovella, consentono alte velocità di estrusione
  - Presse idrauliche: con sistema cilindro-pistone, consentono oggi anch'esse elevate velocità e pressioni più uniformi



Pressa meccanica per estrusione di tubi.





# Estrusione a caldo

- È adatta per materiali con un'elevata resistenza alla deformazione (leghe di ferro, leghe di alluminio, ottone).
- Richiede minori forze di deformazione ma presenta problemi quali:
  - l'ossidazione della superficie del pezzo risolvibile cercando di provocare, in vari modi, il distacco dell'ossido dal pezzo durante il processo
  - la lubrificazione per facilitare il processo, per via delle alte temperature. Si utilizzano lubrificanti speciali, p.e. vetrosi per materiali ferrosi, a base di grafite per i non ferrosi



# Estrusione a freddo

- È adatta per materiali con bassa resistenza alla deformazione come leghe di stagno e piombo
- Il processo a freddo consente di ottenere:
  - Migliori caratteristiche meccaniche
  - Migliore finitura superficiale
  - Migliore precisione dimensionale

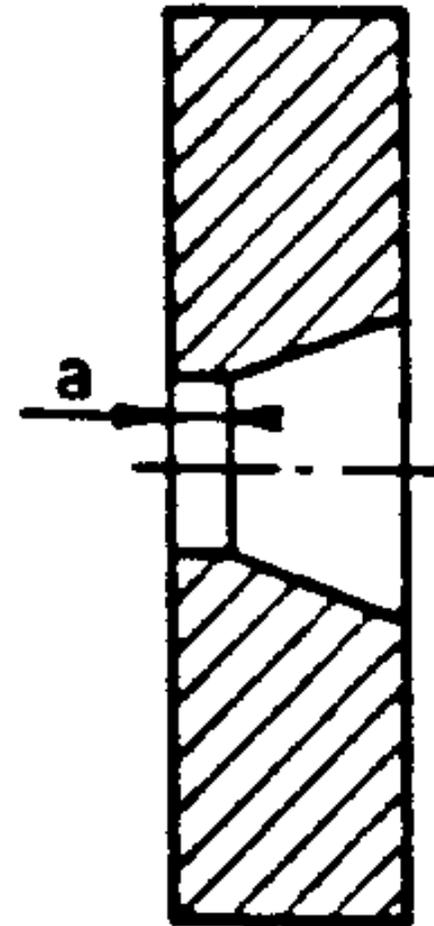


# Matrici di estrusione

- Le matrici sono l'elemento più importante per l'estrusione
- Normalmente sono fabbricate in acciai speciali per utensili o in metalli duri sinterizzati
- È composta da due parti:
  - Sezione conica di imbocco
  - Sezione cilindrica di calibratura
- È fondamentale la relazione tra angolo di apertura della matrice ed angolo di scorrimento del materiale per evitare angoli “morti” nel contenitore

# Matrice di estrusione

- Il foro presenta un collare calibrato con duplice funzione:
  - Rifinire e stabilizzare la superficie del profilato
  - Evitare la rapida usura della matrice
- Il collare non deve essere eccessivamente esteso per non creare troppo attrito

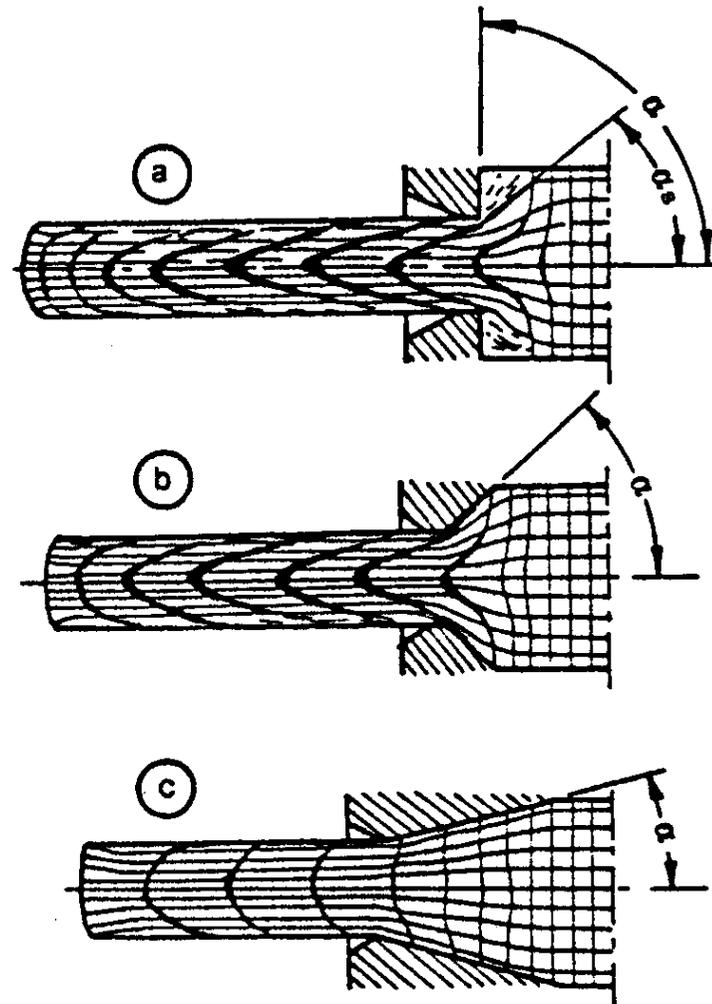


**Matrice.**

# Angolo di apertura e di scorrimento

Distorsione del materiale nella estrusione diretta per differenti valori dell'angolo  $\alpha$  di semi apertura del foro nella matrice.

$\alpha_s$  = angolo di scorrimento del materiale.





# Forza di estrusione

- La forza di estrusione deve essere tale da:
  - Operare la deformazione
  - Vincere gli attriti
- Andamento della forza
  - È diversa tra estrusione diretta ed estrusione inversa
  - Diventa elevatissima in concomitanza della fine del processo a causa del complicarsi del flusso di materiale
- In generale l'estrusione diretta richiede macchine più grandi ma il pistone per l'estrusione inversa è più costoso
- La temperatura influenza grandemente la forza di estrusione



# Andamento della forza di estrusione

## ■ Estrusione diretta

- La forza è massima all'inizio per la sovrapposizione delle forze di attrito e di deformazione
- Si riduce con il progredire del processo al decrescere della forza di attrito
- Torna a crescere alla fine in concomitanza della formazione di angoli morti nel massello

## ■ Estrusione inversa

- La forza è massima all'inizio per via del processo di deformazione
- La componente di attrito ha un valore costante e minimo non essendoci moto tra massello e contenitore
- La forza aumenta alla fine in concomitanza della formazione di angoli morti nel massello

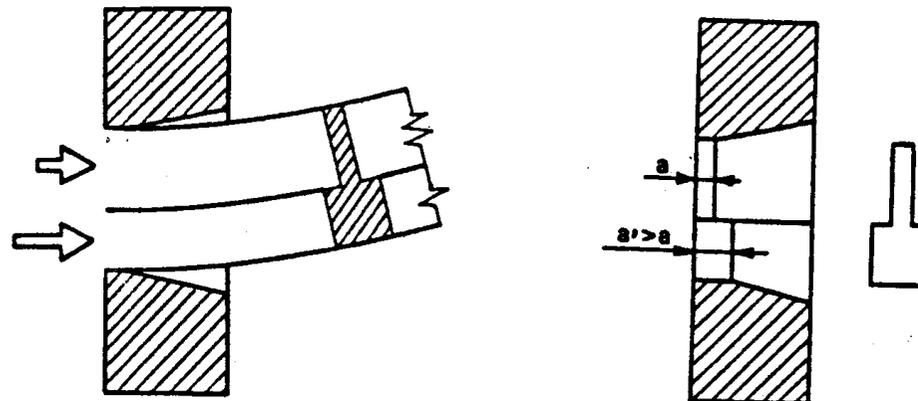


# Forza di estrusione

- La forza necessaria per estrudere un materiale è quindi variabile in funzione di.
  - Metodo di estrusione utilizzato
  - Angolo di apertura della matrice
  - Deformazioni interne del materiale
  - Temperatura alla quale avviene il processo

# Difetti di estrusione

- Occorre evitare che gli attriti sulle diverse sezioni del profilato possano innescare tensioni e deformazioni a causa di diverse velocità di efflusso
- A tal fine è opportuno dimensionare diversamente le lunghezze del collare in funzione della sezione interessata



Difetti sul prodotto dovuti alle tensioni interne (a sinistra) e matrice con collari di lunghezza differente per uniformare il flusso del materiale (a destra).



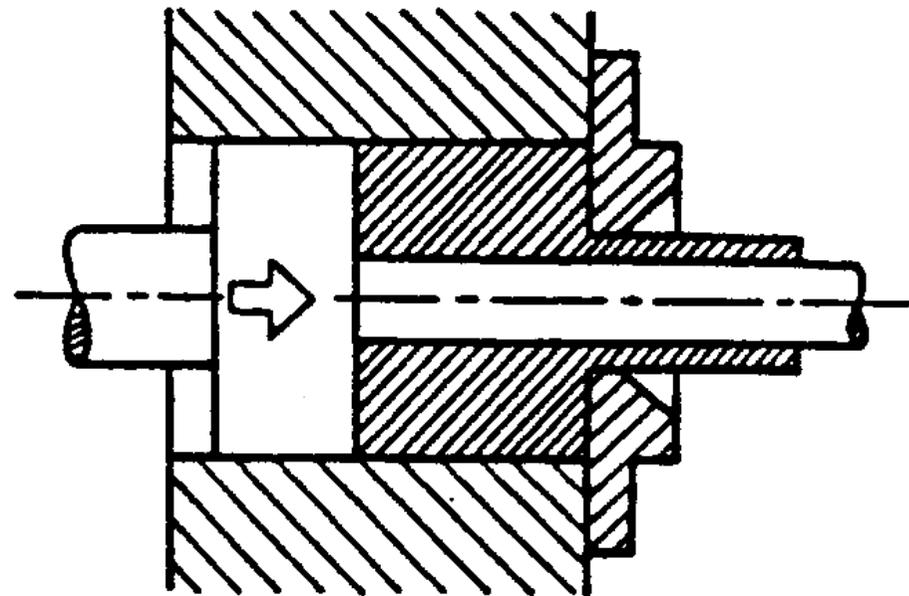
# Estrusione di tubi

- L'estrusione è un processo utilizzato anche per la produzione di tubi, partendo:
  - Da un forato utilizzando l'estrusione diretta
  - Da un pieno utilizzando l'estrusione inversa ed ottenendo un estruso “a bicchiere”

# Estrusione da forato

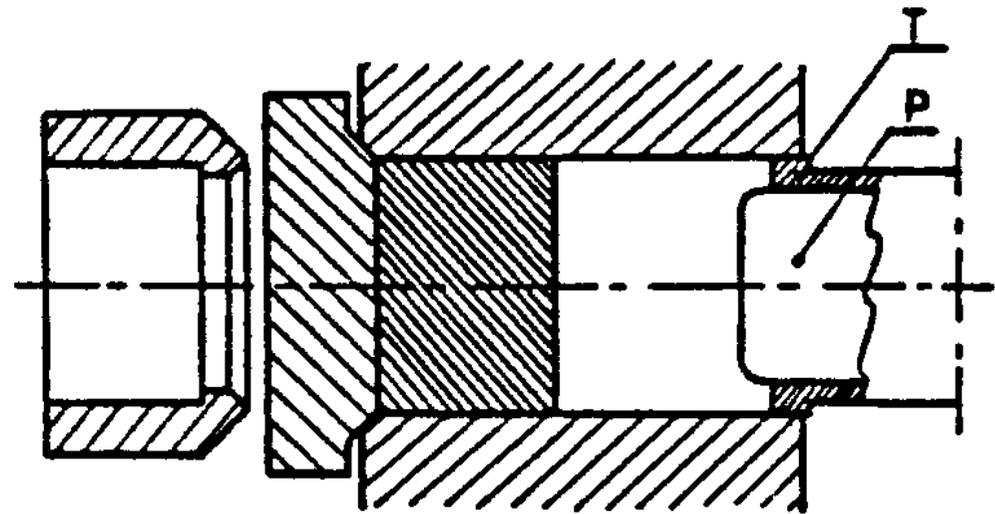
- Il forato viene inserito nel contenitore ove il pistone è munito di mandrino con diametro pari al diametro interno del tubo da ottenere
- Il materiale deve fluire tra la matrice ed il mandrino ottenendo il profilo richiesto

Estrusione di tubi partendo da un forato.



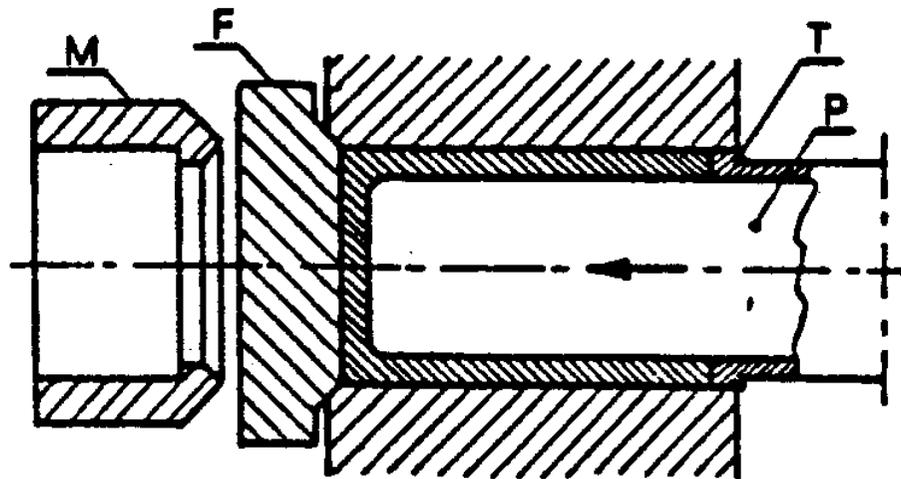
# Estrusione da pieno

- Il pistone estrude “a bicchiere” il massello cilindrico
- Il tappo viene tolto e sostituito da una matrice con il diametro richiesto



**a - Fase iniziale.**

# Estrusione da pieno



b - Fase di estrusione inversa.

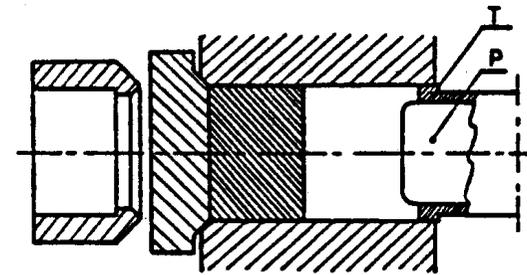


Fig. 5.12-a - Fase iniziale.

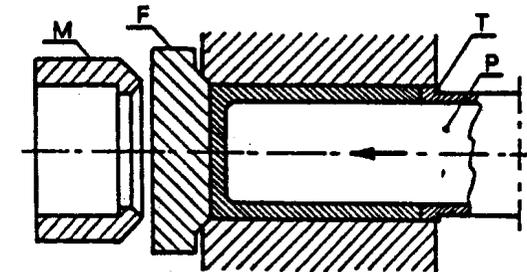
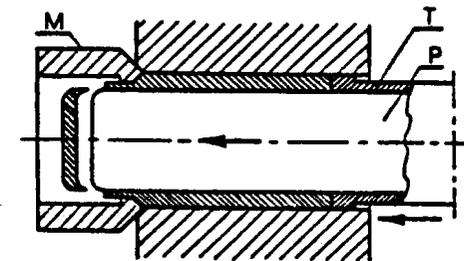


Fig. 5.12-b - Fase di estrusione inversa.



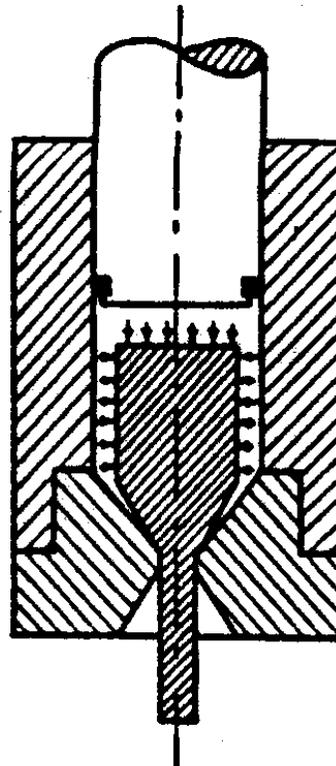
c - Fase di tranciatura e di estrusione diretta.



# Estrusione idrostatica

- La forza viene esercitata da un fluido ad alta pressione che, evitando il contatto massello-contenitore, evita le resistenze di attrito
- La forza necessaria risulta simile a quella del processo inverso
- Come fluido sono utilizzabili i lubrificanti del processo di estrusione tradizionale come sostanze vetrose che fondono a contatto con il massello a  $T^\circ$  di circa  $1200^\circ\text{C}$
- Problemi:
  - Preparazione del contenitore per renderlo ermetico al fluido
  - Lo stesso dicasi per le fasi di apertura-chiusura del contenitore

# Estrusione idrostatica



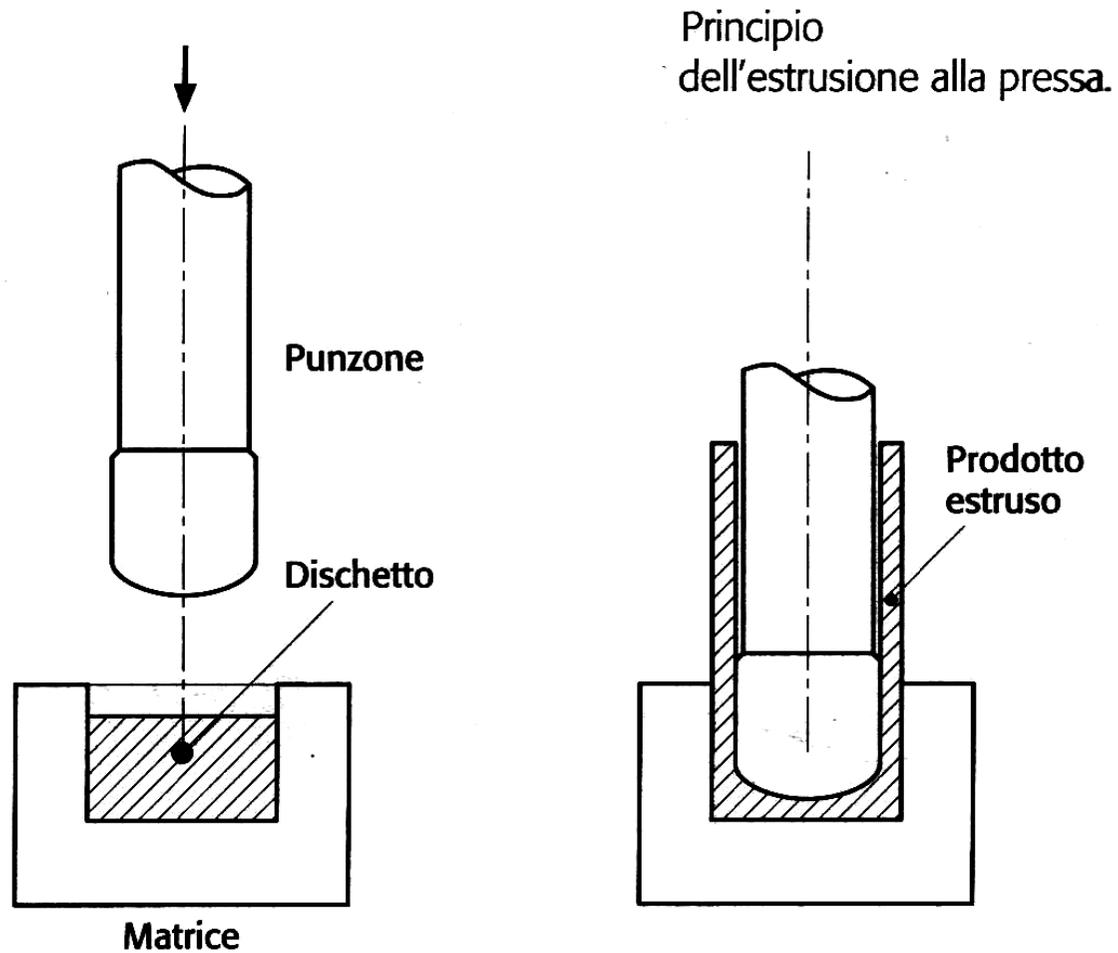
**Schema dell'estrusione  
idrostatica.**



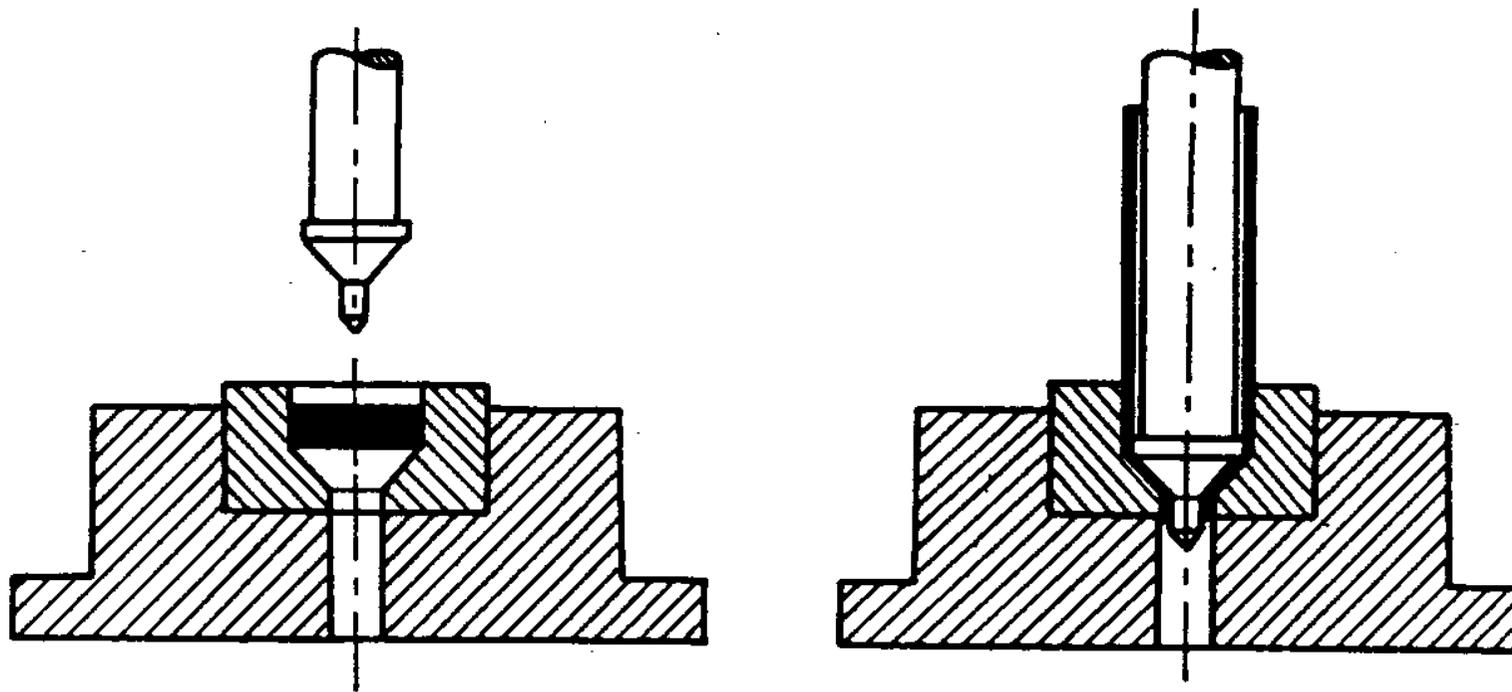
# Estrusione per urto

- Per la realizzazione a freddo di tubetti e contenitori di stagno o alluminio
- Circa il 90% del lavoro di deformazione speso si trasforma in calore che rimane nel pezzo
- Per l'estrusione di acciaio si procede con il riscaldamento del massello utilizzando presse molto veloci
- Le dimensioni massime consentite sono lunghezze di circa 250 mm e larghezze da 10 a 100 mm

# Estrusione per urto

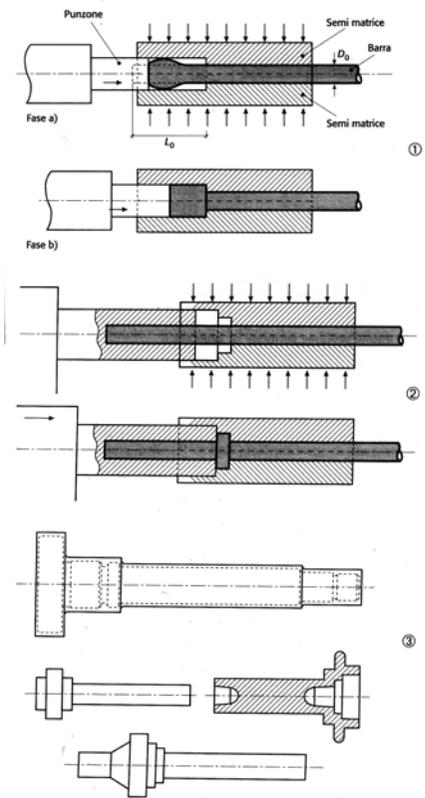


# Estrusione per urto

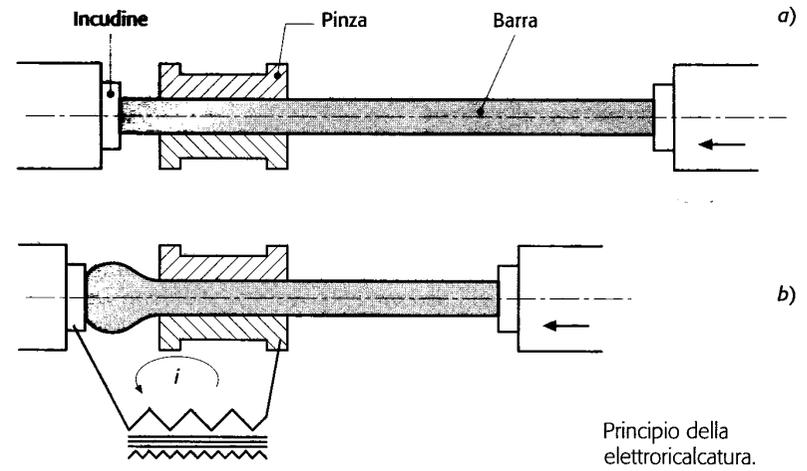


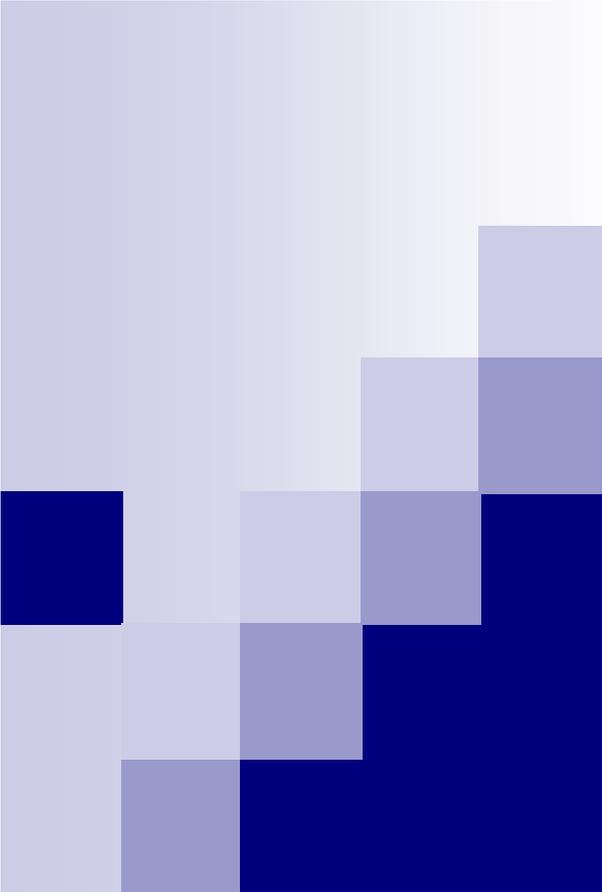
Esempio di estrusione per urto di tubetti.

# Ricalcatura



1) Principio della ricalcatura effettuata per una estremità della barra.  
 2) Lo stesso principio applicato a una parte centrale della barra. 3) Esempio di pezzi ottenuti per ricalcatura.





# Trafilatura



# Trafilatura

- È un procedimento di deformazione plastica a freddo ove il materiale è soggetto ad una forza di trazione che lo costringe attraverso un foro calibrato detto filiera (o trafila)
- Consente di ottenere prodotti finiti con notevole precisione dimensionale e finitura superficiale quali:
  - Fili
  - Barre tonde o profilate
  - Tubi
  - Nastri

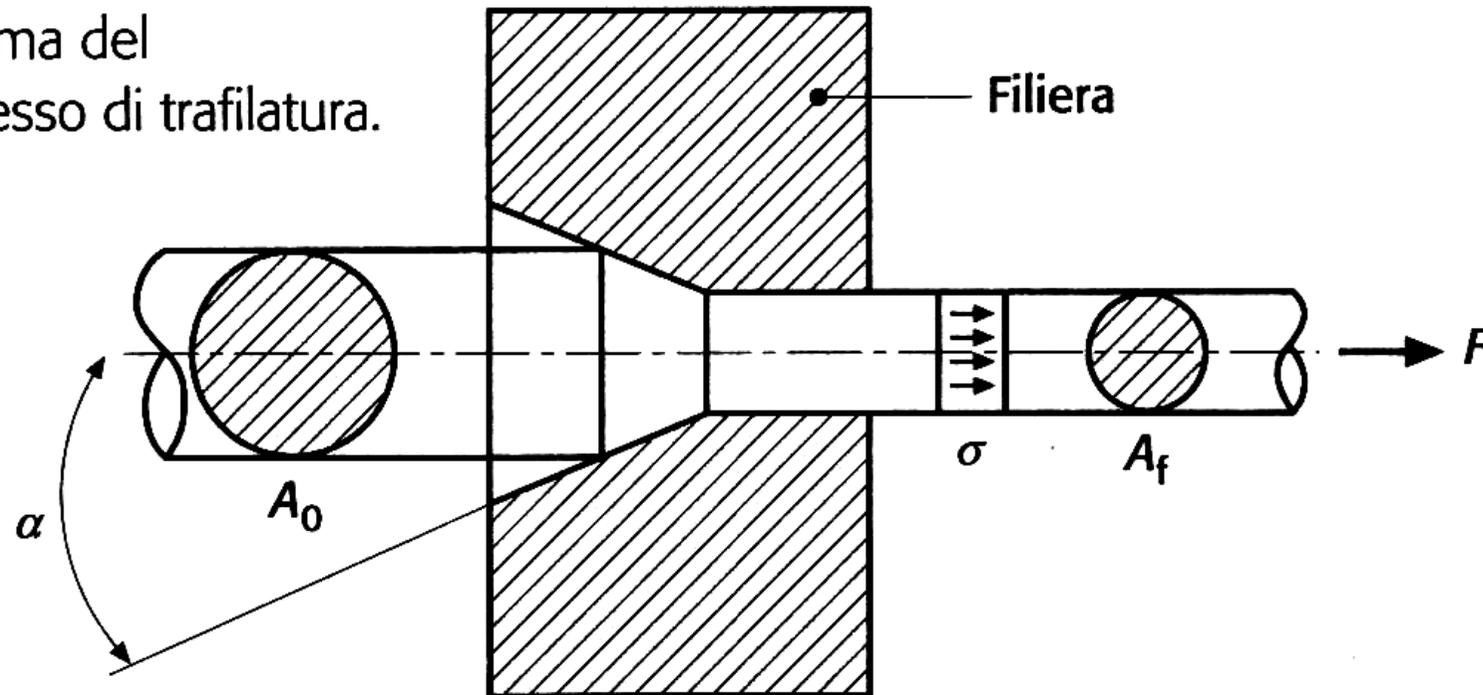


# Filiera

- Elementi della filiera:
  - Zona di imbocco
  - Zona conica di trafilatura
  - Zona cilindrica di calibratura
  - Zona conica di uscita
- La filiera deve tenere conto dimensionalmente dell'elasticità del materiale e dell'usura per compressione cui è soggetta
- È prodotta in ghisa dura, acciai speciali per utensili, metalli duri sinterizzati e diamante
- L'angolo di semiapertura assume valori da  $6^\circ$  a  $20^\circ$  per grandi rapporti di riduzione

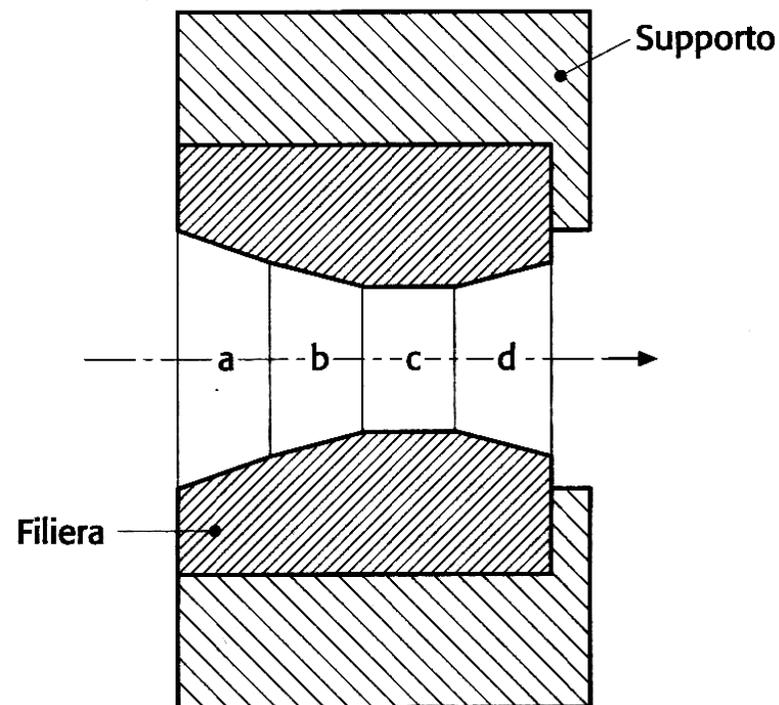
# Filiera

Schema del  
processo di trafilatura.



# Geometria della filiera

Tipica geometria  
di una filiera per trafilatura.

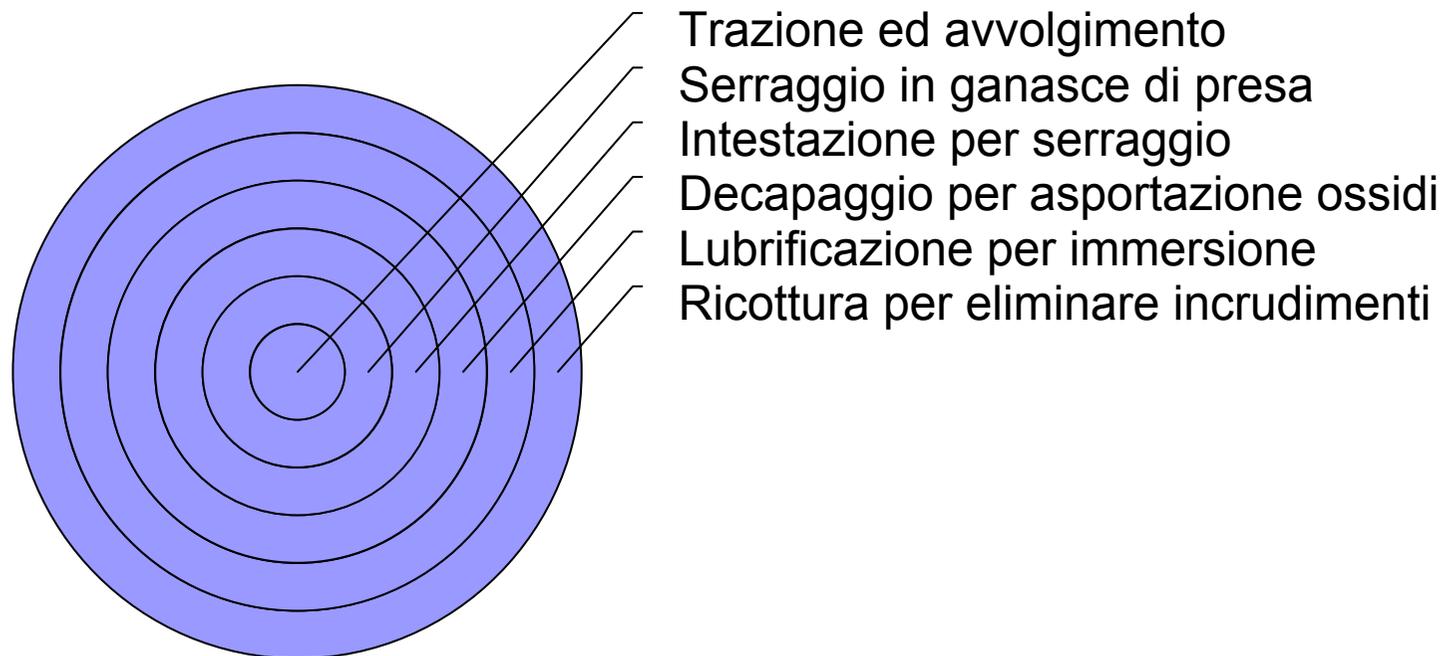




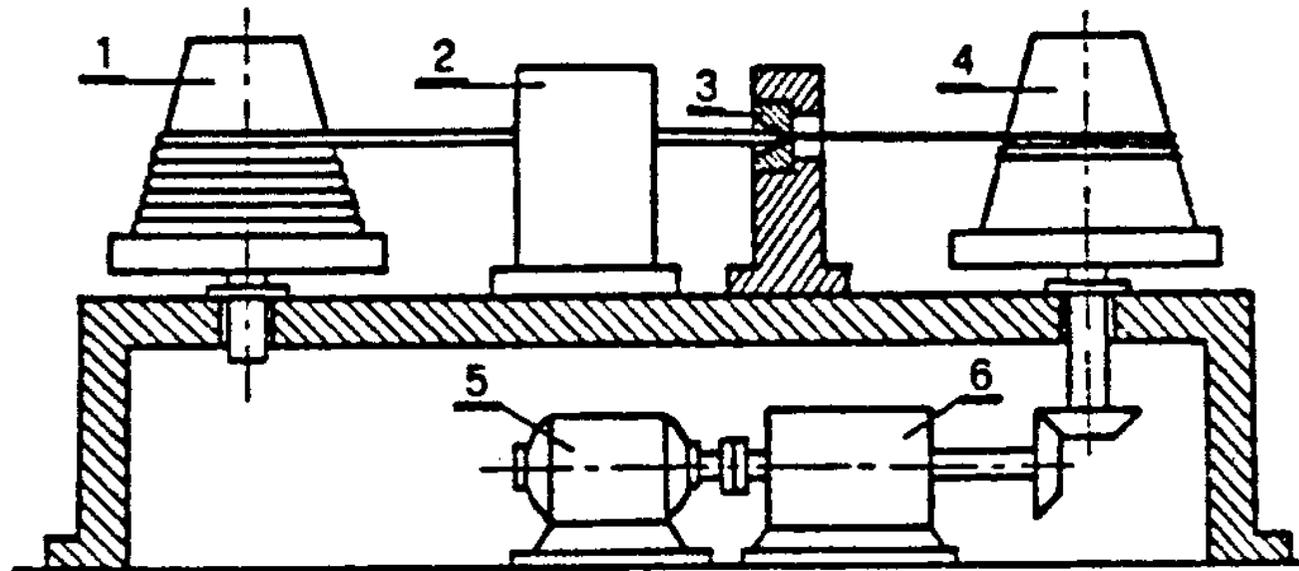
# Trafilatura di fili

- Si possono ottenere diametri inferiori ai 5 mm della vergella da laminazione per cavi elettrici, filo di ferro, funi, molle
- I diametri di partenza possono essere dell'ordine di 10-15 mm
- Si utilizzano quali lubrificanti saponi in polvere, grassi, olii minerali
- La fosfatazione dell'acciaio consente di:
  - Accrescere la velocità di lavorazione
  - Ridurre l'usura della filiera
  - Aumentare il rapporto di riduzione
  - Migliorare la finitura superficiale
  - Ridurre i costi di processo

# Ciclo di trafilatura di fili



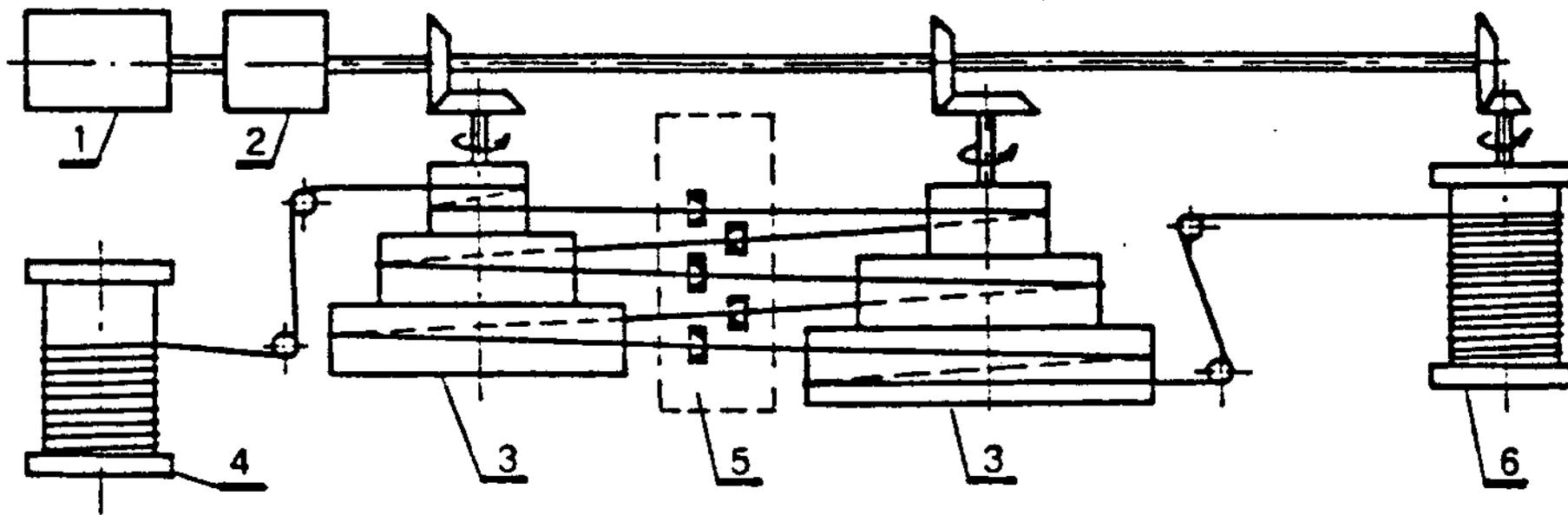
# Schema di trafilatrice



Schema di una trafilatrice.

- |                      |                                   |             |
|----------------------|-----------------------------------|-------------|
| 1) aspo condotto,    | 2) dispositivo di lubrificazione, | 3) filiera, |
| 4) aspo avvolgitore, | 5) motore,                        | 6) cambio.  |

# Trafilatrice multipla



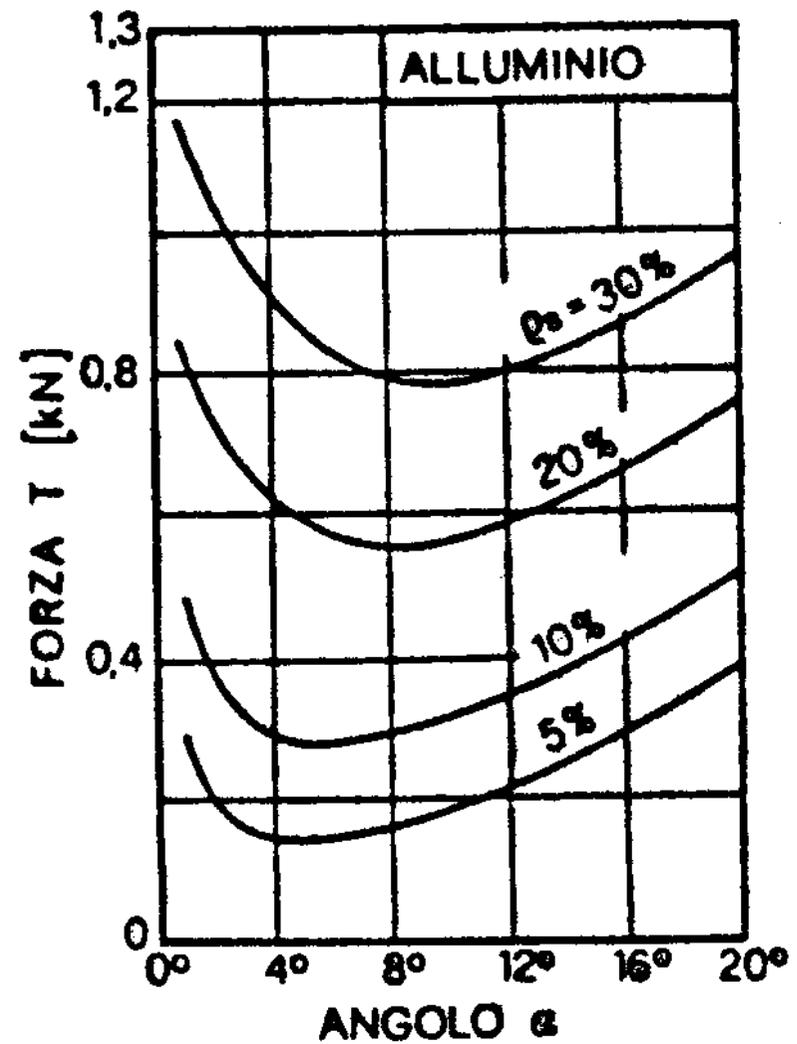
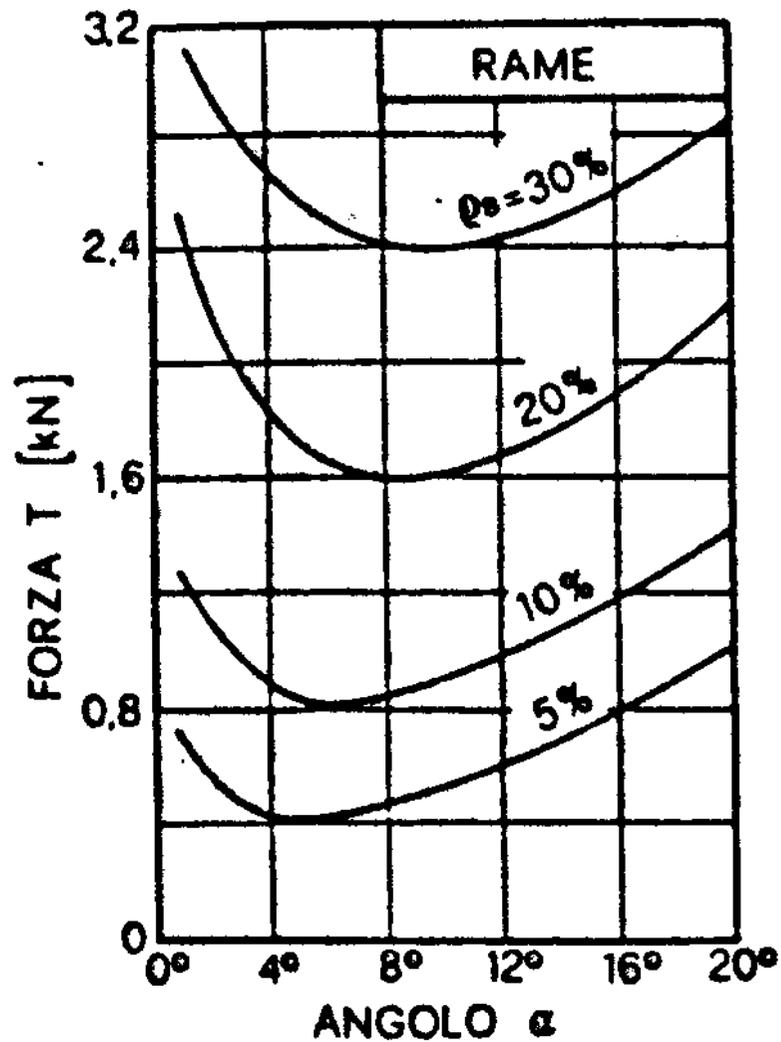
Schema di trafilatrice multipla.

- 1) motore,                      2) cambio,                      3) gruppo dischi di trascinamento,  
4) aspo condotto, 5) gruppo trafile, 6) aspo di avvolgimento.



# Osservazioni

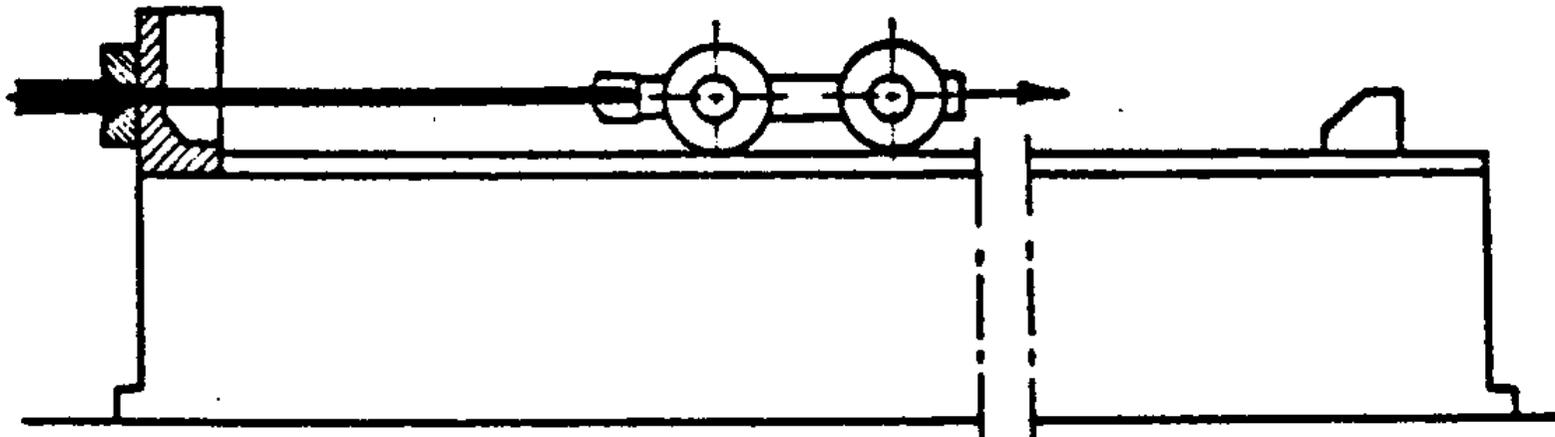
- Per uguali rapporti di riduzione, valori minori dell'angolo di apertura richiedono filiere più lunghe con aumento della forza di attrito
- Per uguali rapporti di riduzione, valori maggiori dell'angolo di apertura richiedono un maggior lavoro speso per distorsione



Andamento della forza di trafilatura.

# Trafilatura di barre

- La trafilatura delle barre serve per ottenere:
  - Buona finitura superficiale
  - Ottima tolleranza dimensionale



Schema di un banco di trafilatura per barre.

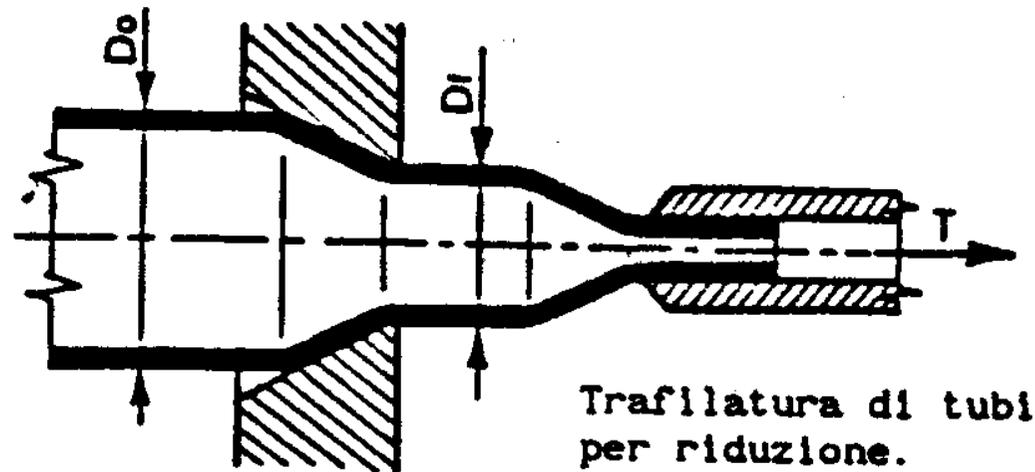


# Trafilatura di tubi

- Serve per ridurre o espandere il diametro di tubi precedentemente ottenuti per laminazione, estrusione, saldatura
- Generalmente utilizzata a freddo o a caldo per ottenere tubi di grande diametro senza saldatura

# Trafilatura con riduzione di diametro

- Necessario operare per più passate
- Creare un imbocco di presa a “collo di bottiglia”
- Velocità di trafilatura di circa 10-14 m/min
- Dimensioni lavorabili da 1mm a 400mm
- Uso di un lubrificante per operazioni a freddo

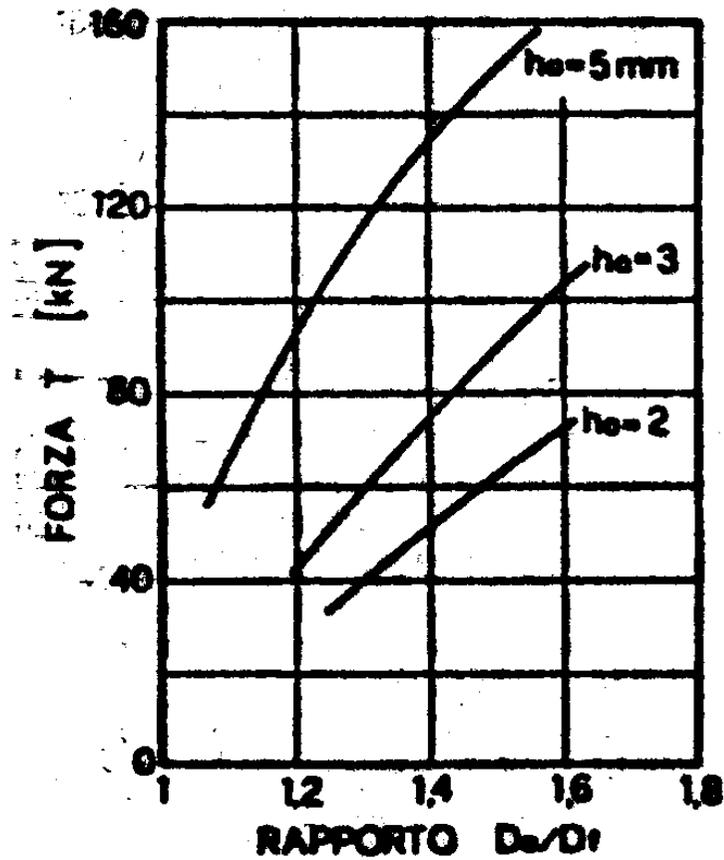




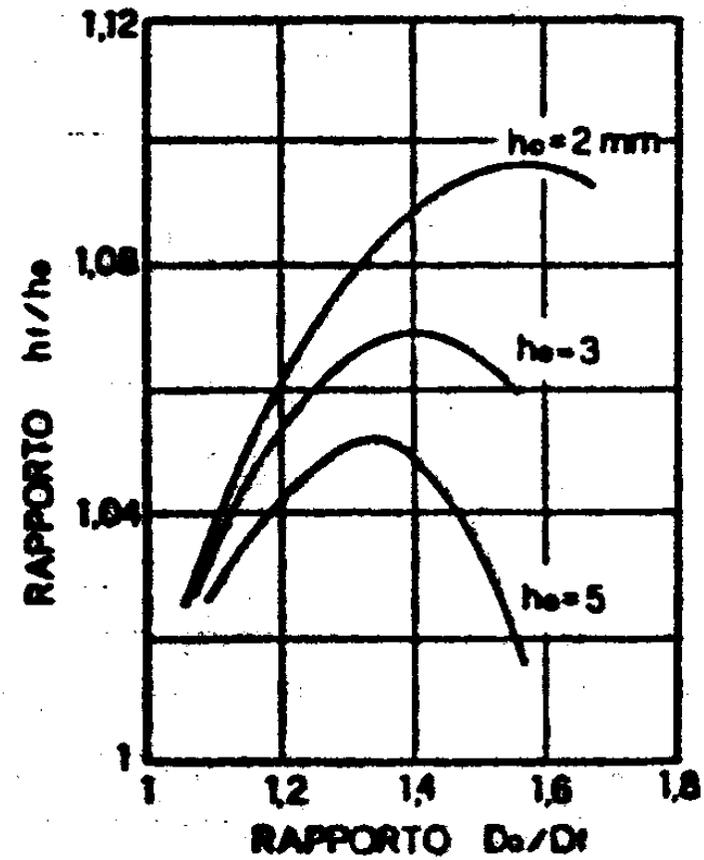
# Osservazioni

- La deformazione plastica avviene per la gran parte nella zona centrale della filiera: a causa della compressione circonferenziale avviene un incremento dello spessore
- La deformazione nella zona iniziale provoca una trazione sulla zona centrale iniziando la deformazione e l'incrudimento
- La deformazione nella zona di uscita provoca comunque un ulteriore aumento della resistenza a trazione ed un'ulteriore riduzione di diametro connessa ad una leggera riduzione dello spessore

# Controllo del diametro interno

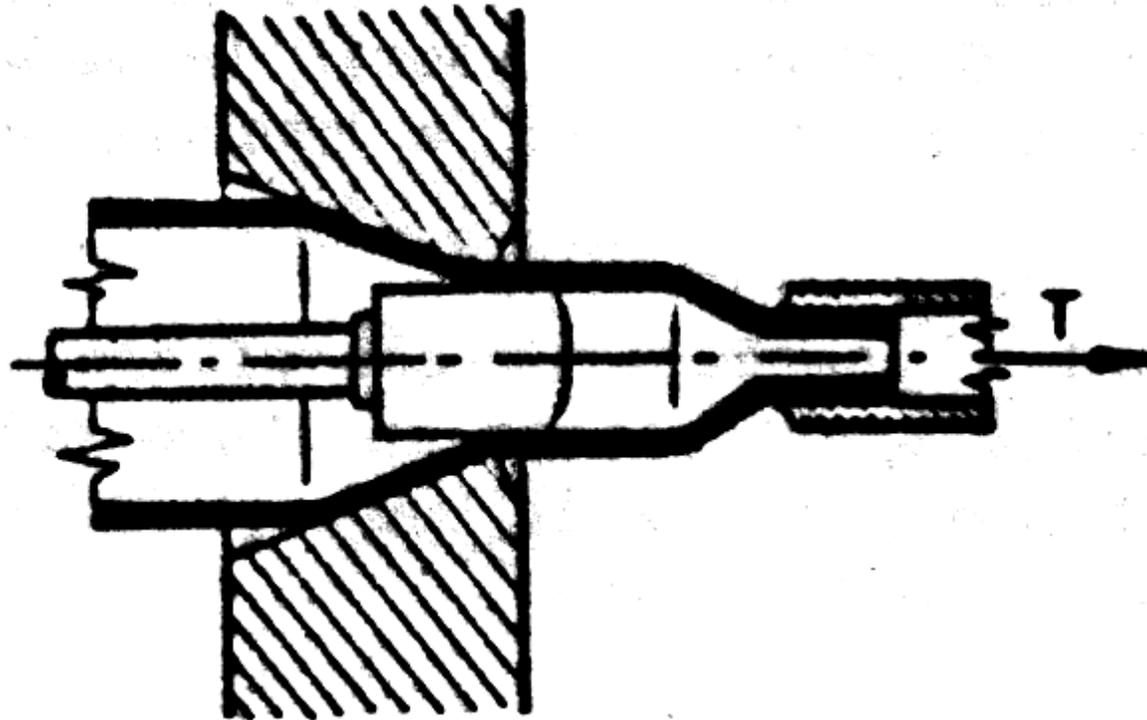


Forza di trafilatura.  
 ( $D_0 = 50$  mm  $\alpha = 15^\circ$ )



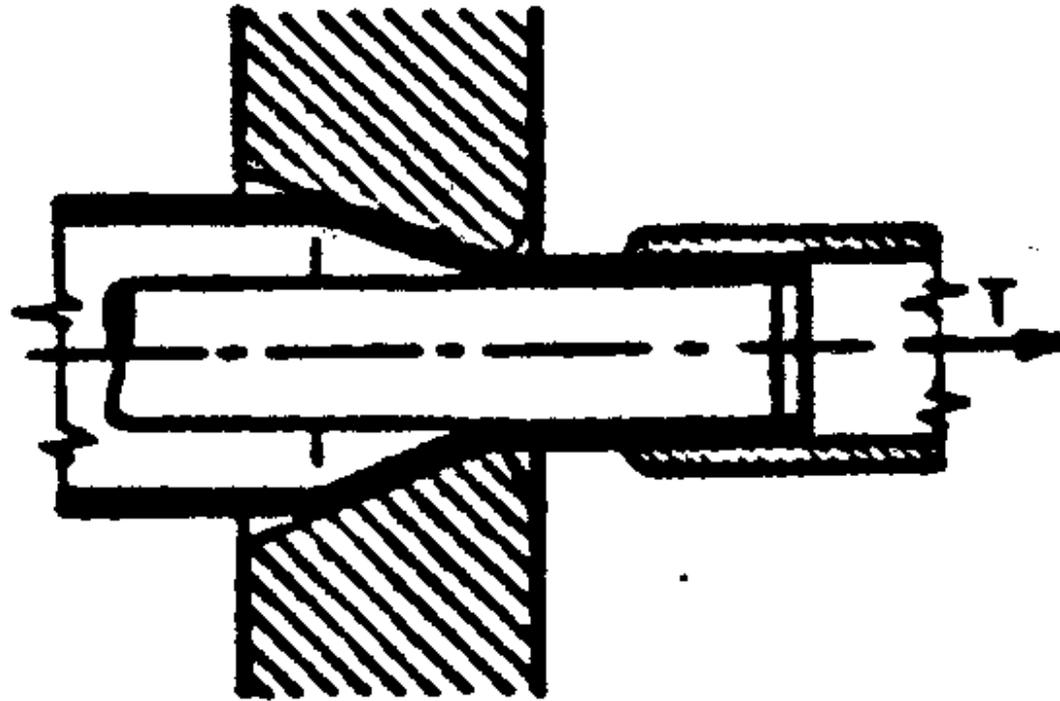
Variazione dello spessore.  
 coeff. di attrito  $f = 0,05$

# Altre applicazioni



**Trafilatura su mandrino  
corte fisse (tappo).**

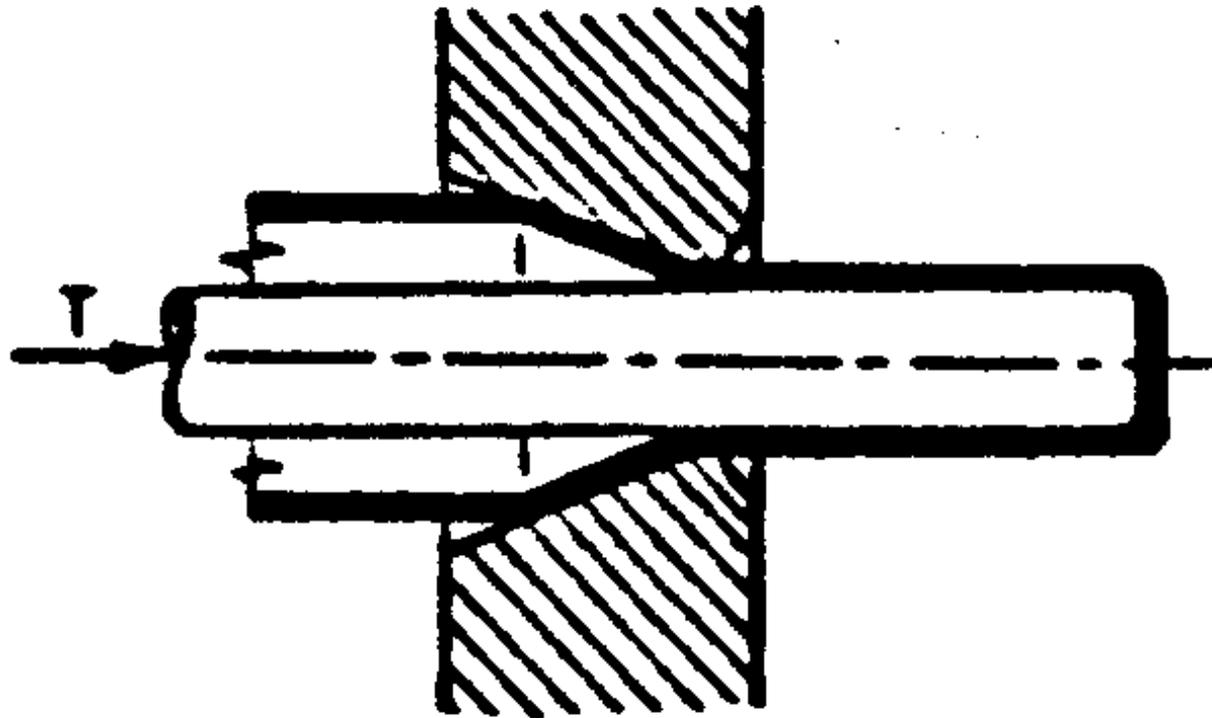
# Altre applicazioni



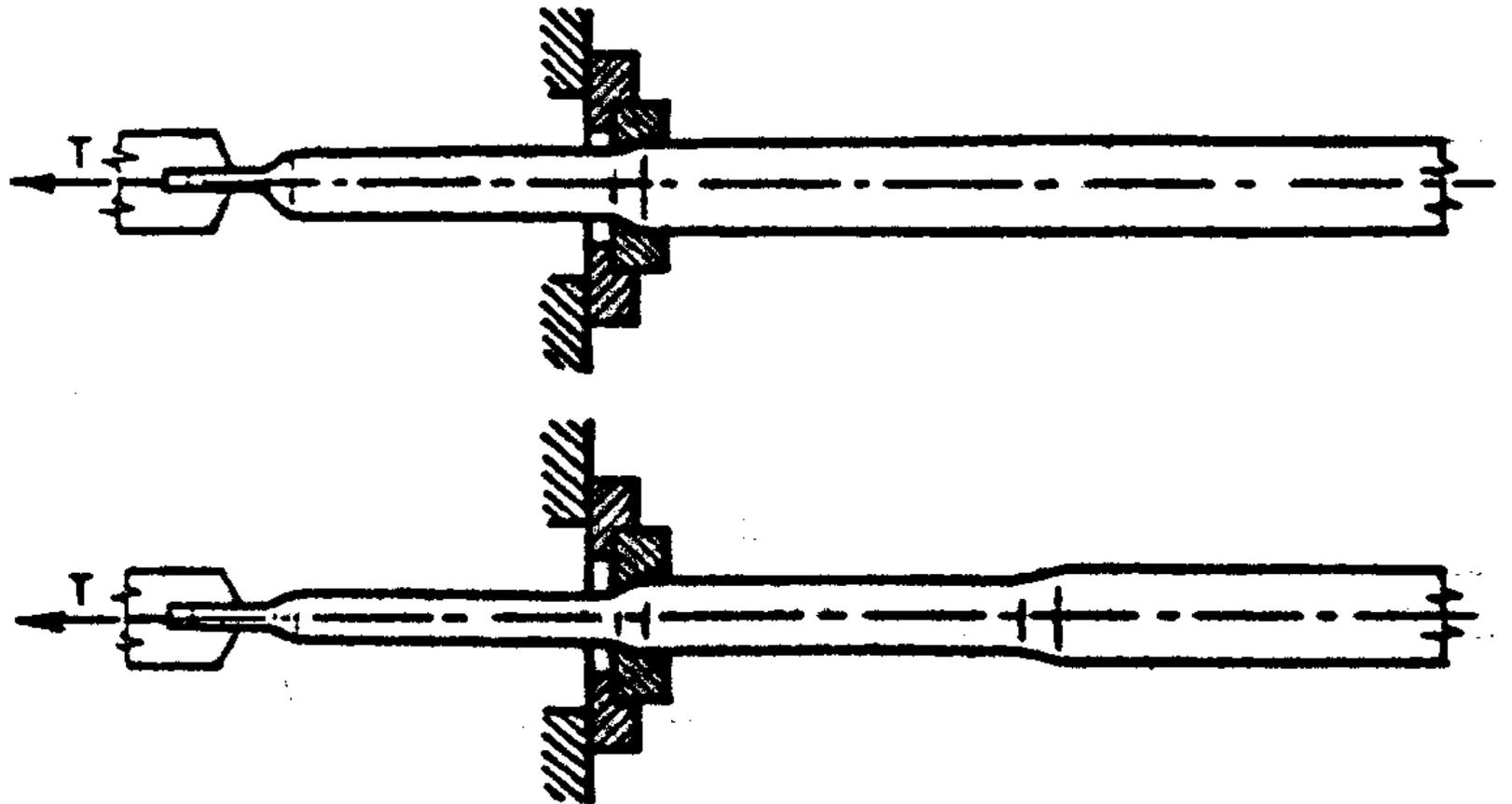
- **Trafilatura su mandrino lungo mobile (anima) che si muove col tubo.**

# Altre applicazioni

Stiro-trafilatura su punzone (anima).



# Altre applicazioni



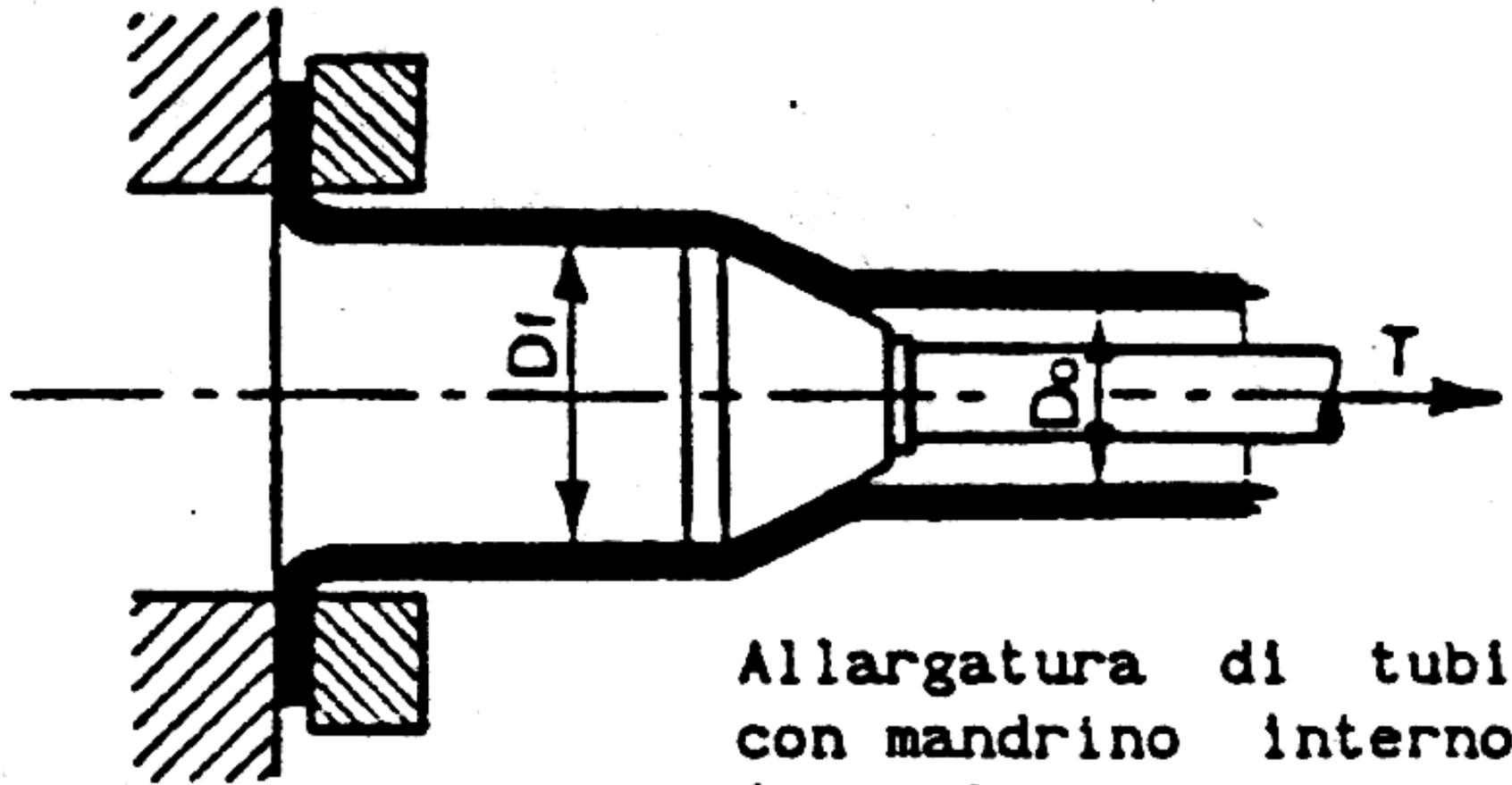
**Schema di trafilatura a caldo per pali rastrenati.**



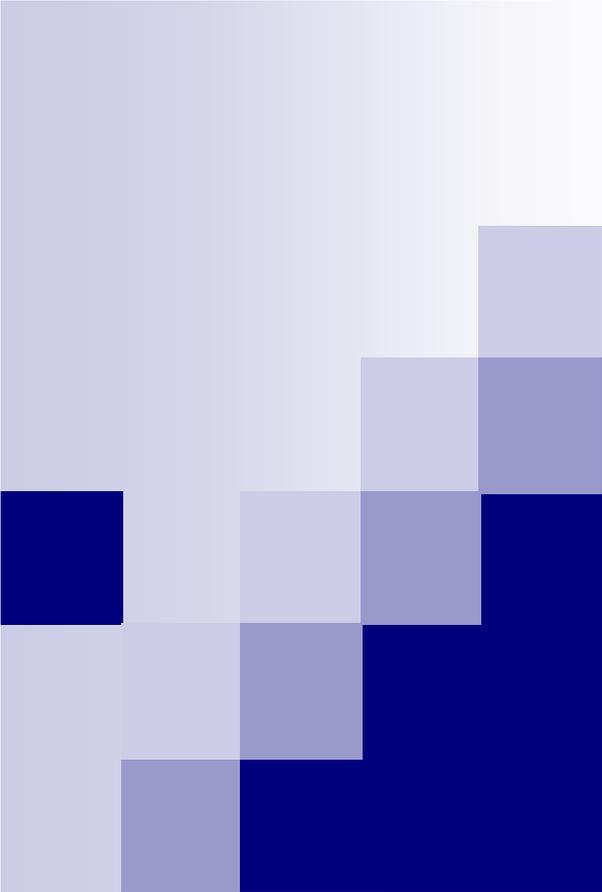
# Trafilatura con aumento di diametro

- La trafilatura ad espansione è utilizzata per la produzione di tubi di grande diametro senza saldatura
- Viene utilizzato un mandrino espandente soggetto ad una trazione  $T$  che esercita una pressione  $p$  sul diametro interno del tubo
- Una resistenza di attrito  $f_p$  si oppone al moto del mandrino

# Trafilatura ad espansione



Allargatura di tubi  
con mandrino interno  
(tappo).



# Fucinatura



# Fucinatura

- Processo utilizzato normalmente per produrre pezzi di grandi dimensioni che non necessitano di tolleranze dimensionali troppo strette
- Consiste nella deformazione a caldo a più riprese di pezzi metallici di volta in volta riportati nelle condizioni di temperatura richieste
- Segue alla fine un trattamento completo di ricottura
- Le macchine usate per fucinare sono i magli



# Magli

- Sono utilizzati per fucinatura e stampaggio a caldo.
- Sono costituiti da:
  - Mazza preposta alla deformazione del pezzo
  - Incudine su cui poggia il pezzo
  - Incastellatura su cui viene sollevata la mazza mediante apposite guide
- Sulla mazza e sull'incudine vengono montati utensili semplici atti a dar luogo ad operazioni di schiacciatura, arrotondamento, piegatura, taglio, ....
- La deformazione è ottenuta per trasformazione dell'energia cinetica dalla mazza:
  - In caduta libera (semplice effetto)
  - Ulteriormente accelerata da un fluido in pressione (doppio effetto)



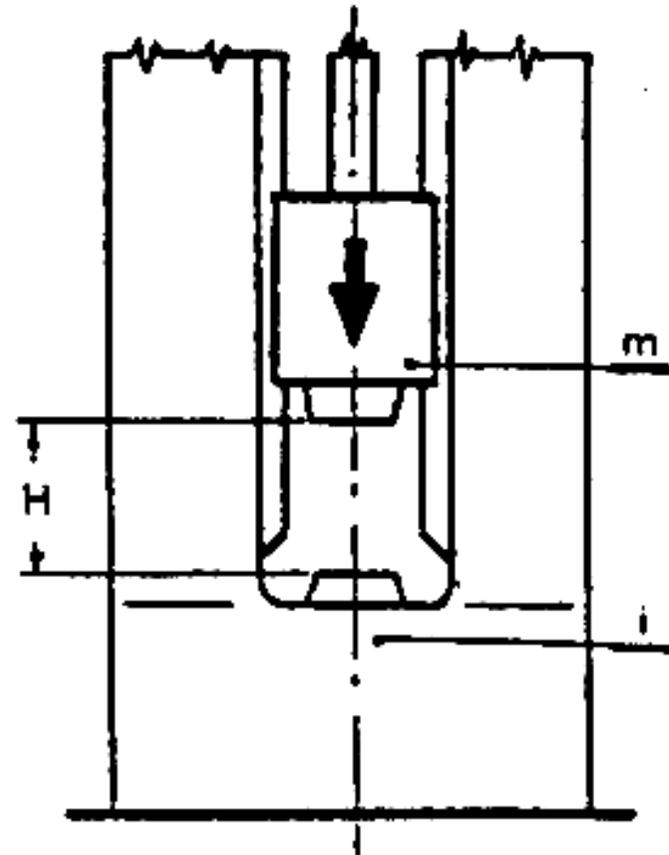
# Maglio a semplice effetto

- La mazza viene sollevata mediante sistemi meccanici, pneumatici ed idraulici ad un'altezza prefissata e lasciata cadere sul pezzo.
- L'energia cinetica assunta dalla mazza in caduta viene trasformata in energia di deformazione e ceduta al pezzo
- Parte dell'energia viene però anche trasferita all'incudine che subisce uno spostamento
- Il rendimento della macchina è tanto maggiore quanto maggiore è il rapporto:  
$$\text{massa incudine/massa mazza}$$
- Le vibrazioni sull'ambiente circostante devono essere accuratamente valutate

# Schema di maglio a semplice effetto

Maglio a semplice effetto.

- m) sazza,
- l) incudine,
- H) altezza di caduta.

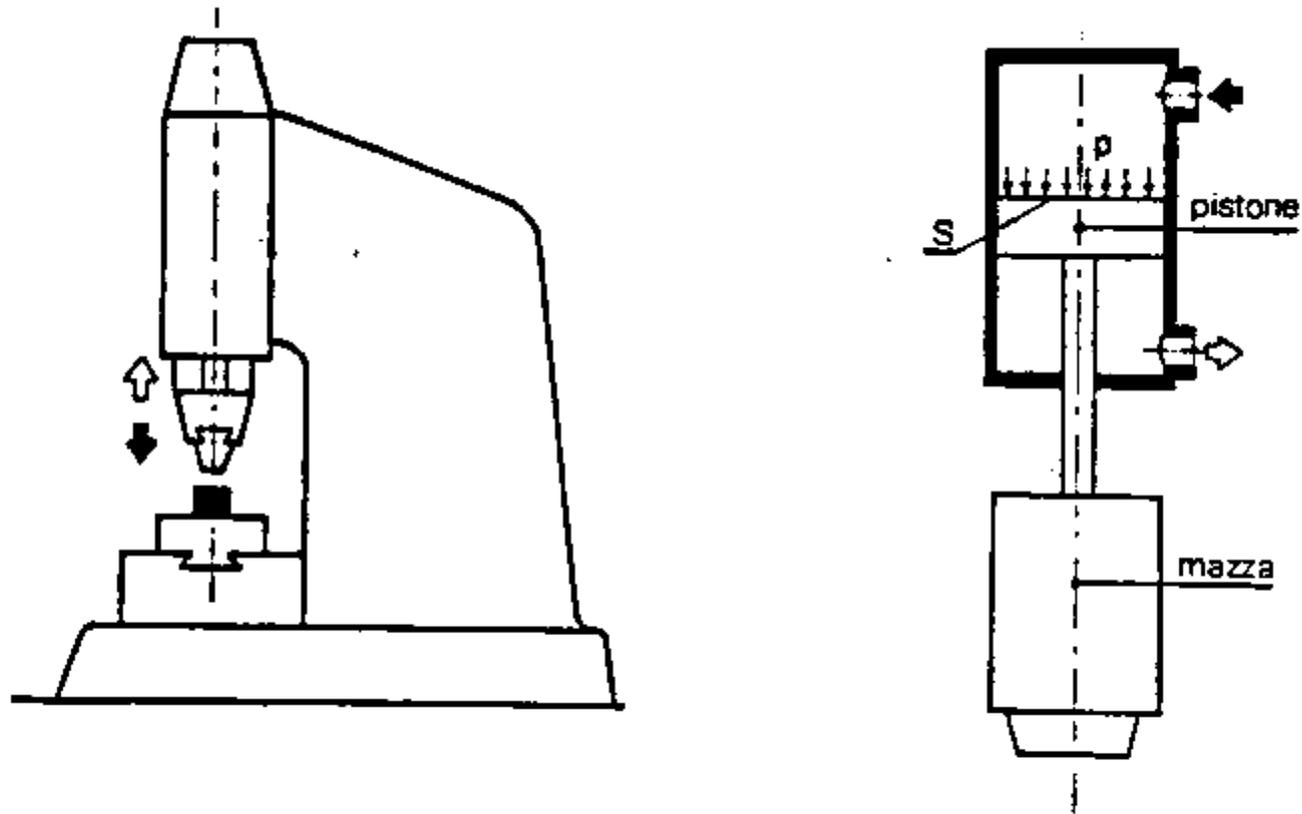




# Maglio a doppio effetto

- Si somma durante la caduta un'energia data da un apparato motore a pistone (pneumatico o idraulico) utilizzando olio, aria o vapore
- È possibile ottenere maggiore energia e maggiore produttività in termini di colpi al minuto
- La regolazione avviene anche sulla portata e pressione del fluido che spinge il pistone

# Schema di maglio a doppio effetto



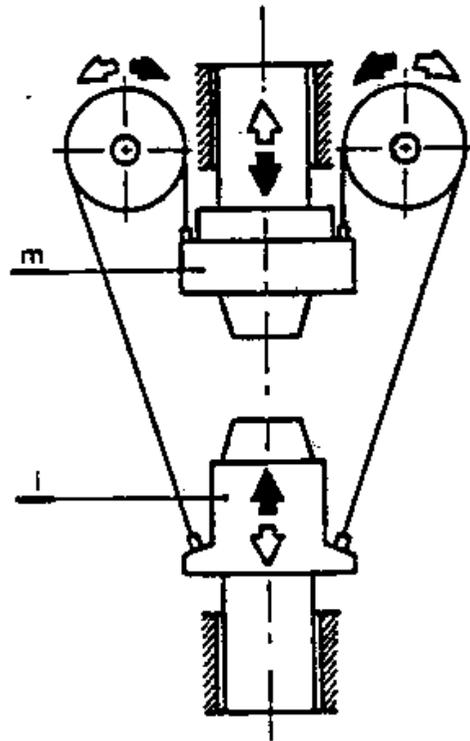
Maglio a doppio effetto e suo principio di funzionamento.



# Maglio a contraccolpo

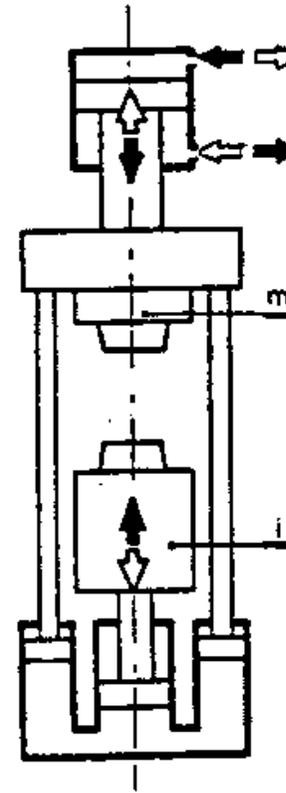
- L'incudine, di massa simile alla mazza si muove contro quest'ultima grazie ad un sistema meccanico o idraulico
- Vantaggi:
  - Maggiore produttività
  - Minore peso dell'incudine
  - Minori vibrazione da disperdere sulle fondazioni
- Svantaggi:
  - Minore precisione nell'allineamento degli stampi e dunque nei pezzi

# Schema di maglio a contraccolpo



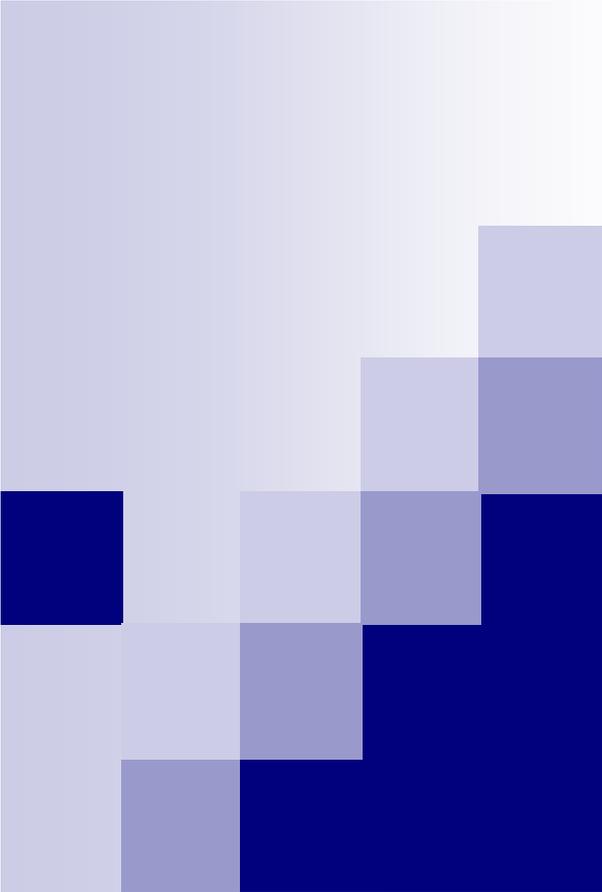
Maglio a contraccolpo  
ad azionamento mecca=  
nico.

m) mazza,



Maglio a contaccolpo  
ad azionamento idrau=  
lico.

i) incudine mobile.



# Stampaggio



# Stampaggio

- Consiste nell'obbligare, mediante compressione, un pezzo metallico ad occupare la cavità contenuta tra due metà di uno stampo riproducente il pezzo da ottenere
- È un processo per produzione di grande serie dati gli investimenti in macchine ed attrezzature
- È eseguito preferibilmente a caldo per ridurre le forze necessarie
- Il materiale in eccesso che non può entrare nello stampo viene spinto all'esterno tramite i canali di bava
- I pezzi stampati presentano grandi caratteristiche meccaniche in quanto conservano il reticolo fibroso del laminato



# Stampaggio

- Elementi che influenzano il corretto e completo riempimento dello stampo:
  - Deformabilità del materiale: la scarsa deformabilità può causare rotture
  - Resistenza allo scorrimento del materiale: la resistenza allo scorrimento può comportare in riempimento incompleto dello stampo
  - Lubrificanti: l'uso di lubrificanti può migliorare sensibilmente lo scorrimento (olio minerale, grafite colloidale, olio di grafite)
  - Temperatura degli stampi: il preriscaldamento degli stampi può portare ad una minore resistenza allo scorrimento in quanto il materiale non subisce un brusco raffreddamento
  - Forma del pezzo: le peggiori sono le forme sottili e lunghe in quanto il basso modulo di raffreddamento (volume/superficie) comporta maggiori difficoltà allo scorrimento del materiale



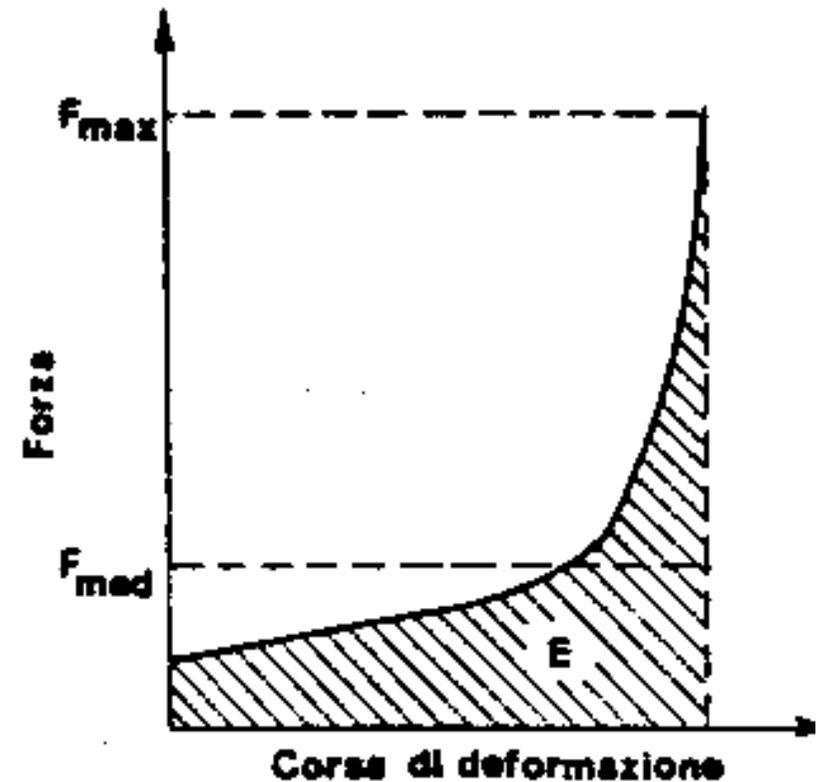
# Fasi dello stampaggio a caldo

- Riscaldamento del materiale di partenza in appositi forni, teso ad aumentarne le caratteristiche plastiche
- Eventuale sbazzatura del pezzo o deformazione preliminare (p.e.: mediante fucinatura) al fine di preparare la forma per lo stampaggio finale
- Stampaggio vero e proprio a dare la forma finale
- Tranciatura delle bave formatesi
- Eliminazione di eventuali scorie superficiale (ad es. con sabbiatura)

# Diagramma forza/deformazione

Fig. 8.30

Andamento della forza  
in funzione della corsa  
di deformazione.





# Presse

## Caratteristiche tecniche:

- Energia disponibile (J): energia fornita dalla macchina tramite il movimento dell'organo mobile
- Forza disponibile (N): forza che la mazza può erogare sul pezzo
- Rendimento: energia disponibile/energia erogata (tiene conto delle perdite per gli attriti e le deformazioni elastiche della macchina)
- Numero di colpi nell'unità di tempo: produttività della macchina
- Tempo di contatto sotto carico: importante nelle lavorazioni a caldo per la trasmissione del calore tra macchina e pezzo
- Velocità sotto carico: velocità dell'organo mobile al momento della deformazione



# Presse

- L'organo mobile (slitta) dotato di una parte battente (mazza), muovendosi alternativamente, esercita la sollecitazione sul materiale da deformare posizionato su una parte fissa
- Tipi di presse:
  - Meccaniche
  - Idrauliche



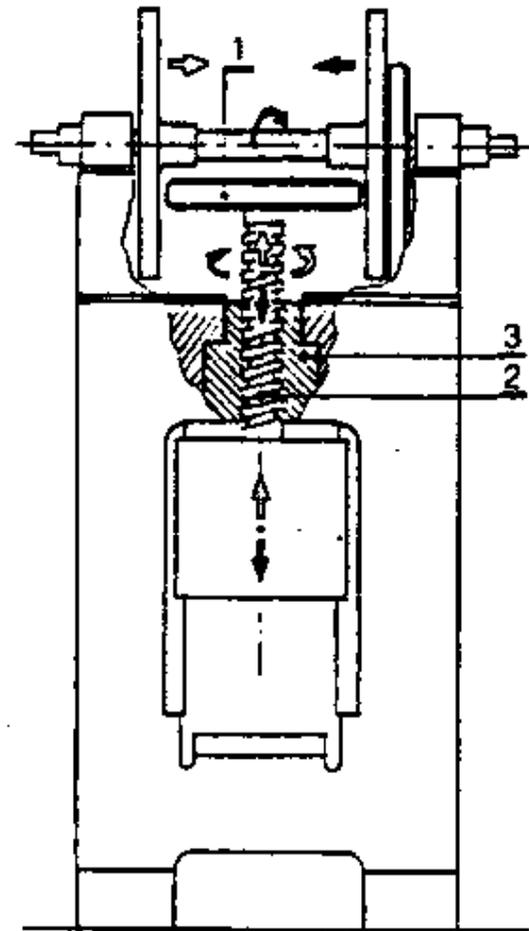
# Presse a vite traslante

- La mazza è solidale ad una vite senza fine collegata a un volano e impegnata in una madre vite solidale con l'incastellatura.
- Il volano viene alternativamente in contatto con due dischi rotanti che gli trasmettono due moti controrotanti che provocano i moti di salita e discesa della vite
- Tali moti risultano accelerati in discesa ed rallentati in salita a causa delle diverse velocità tangenziali dei dischi ( $v = 6/9 \text{ m/s}$ )

# Schema di pressa a vite traslante

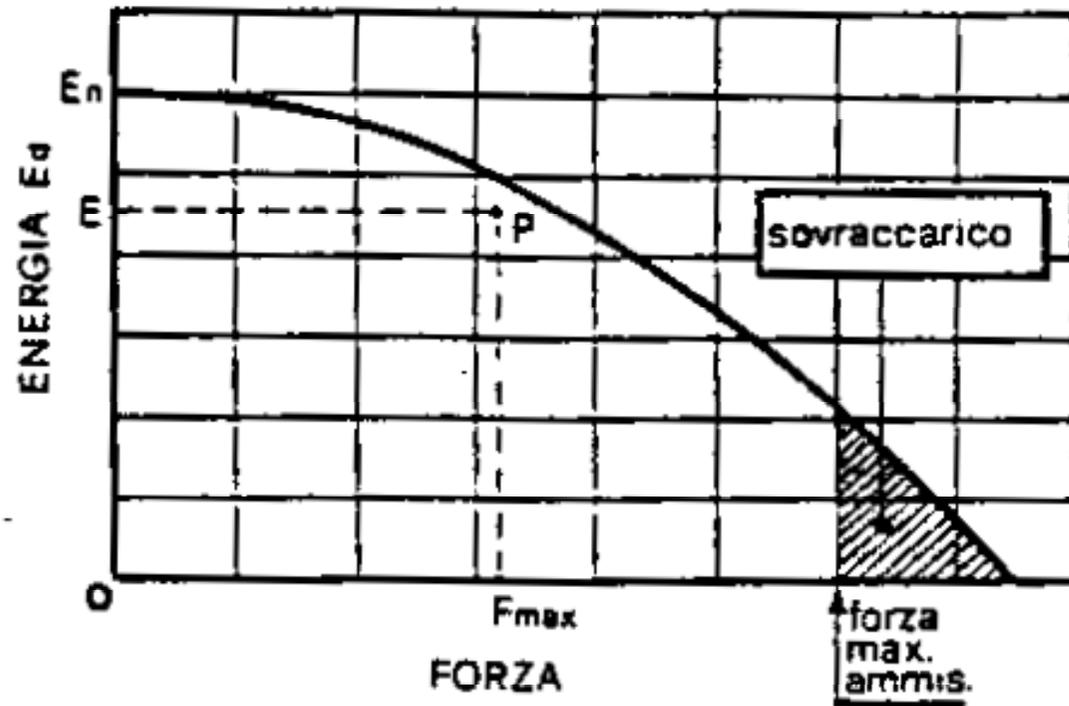
Pressa a vite traslante.

- 1) volano,
- 2) vite,
- 3) madrevite.



# Curva caratteristica

Curva caratteristica  
di una pressa a vite.

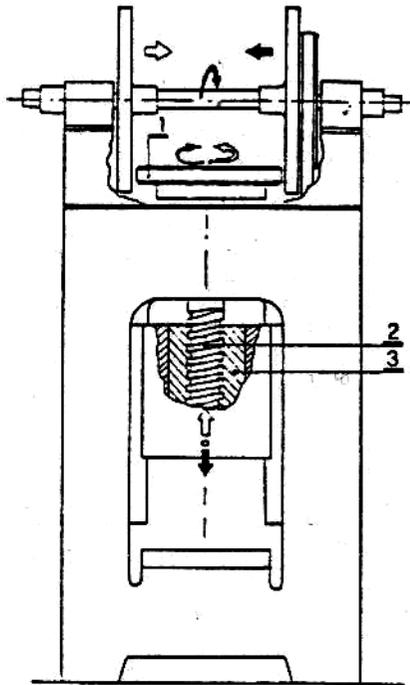




# Pressa a vite rotante

- È basta sul principio già visto con la variante che è la madre vite solidale con la mazza mentre il sistema vite/volano in contatto con i dischi all'estremità di questi ultimi possiedono il solo moto di rotazione
- Vantaggi:
  - Disponibilità della massima energia già a metà corsa
  - Maggiore produttività
- Svantaggi:
  - Slittamento del contatto volano/dischi nella fase iniziale

# Schema e curva caratteristica

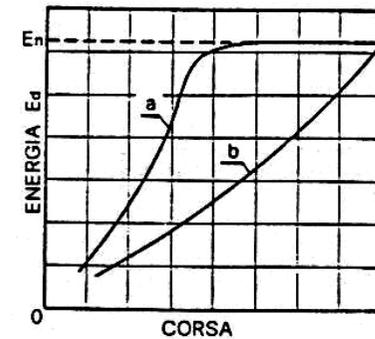


Pressa a vite rotante.

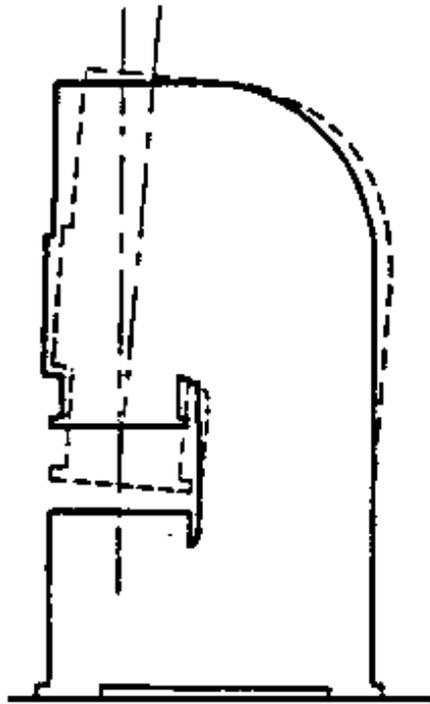
- 1) volano;
- 2) vite,
- 3) madrevite.

Andamento dell'energia disponibile  $E_d$  in funzione della corsa della mazza.

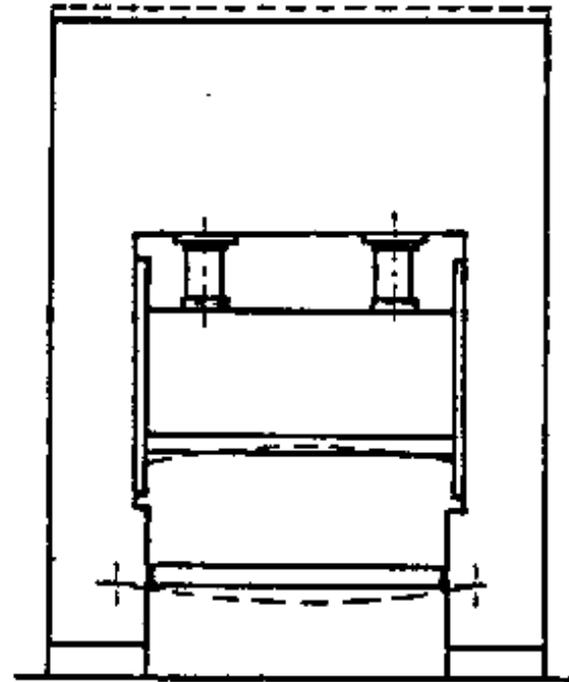
- a) pressa a vite rotante,
- b) pressa a vite traslante.



# Struttura aperta e chiusa



Pressa a struttura  
aperta.



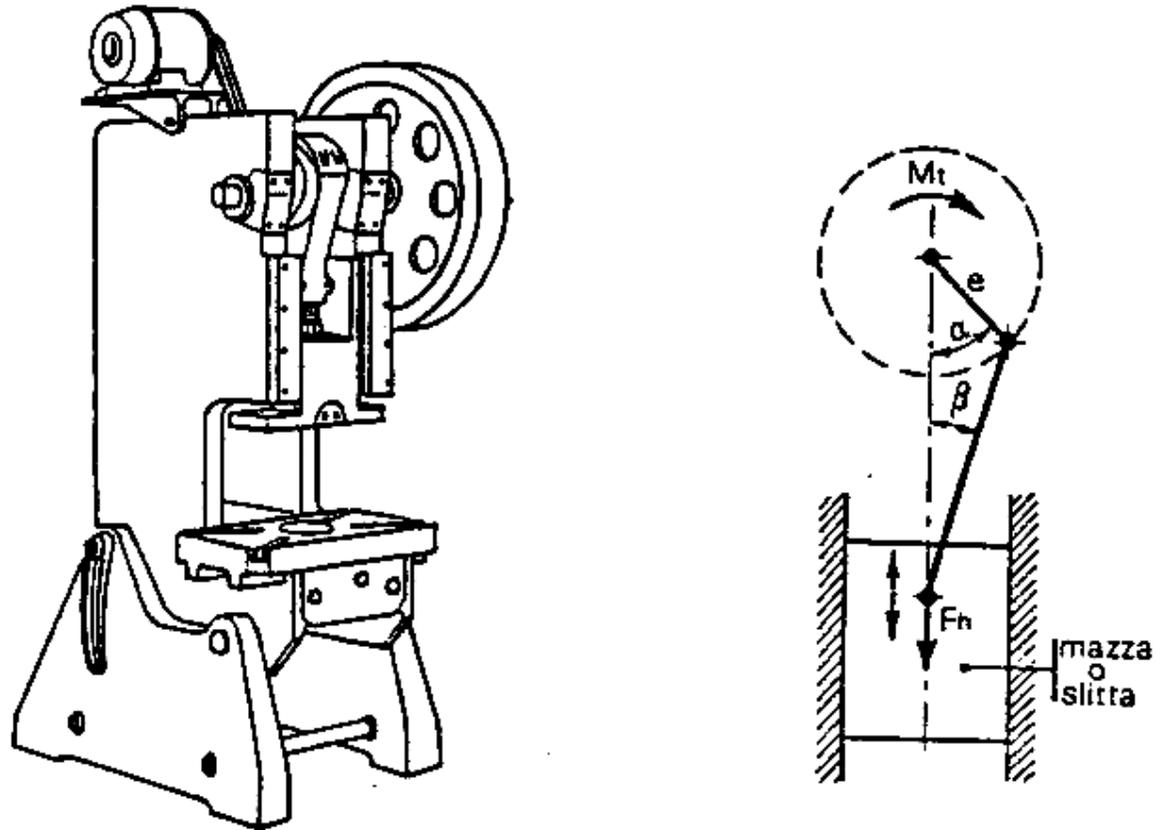
Pressa a struttura  
chiusa.



# Presse ad eccentrico

- Il movimento è realizzato da un cinematismo biella-manovella mosso da un albero eccentrico
- Una frizione mette in contatto l'albero ad eccentrico con un volano messo in moto da un motore elettrico
- Un freno stacca il movimento e blocca la slitta
- La forza aumenta all'avvicinarsi ai punti morti
- Il ciclo punto morto superiore-punto morto inferiore è completato solo se l'energia disponibile della pressa è superiore a quella necessaria per compiere la deformazione

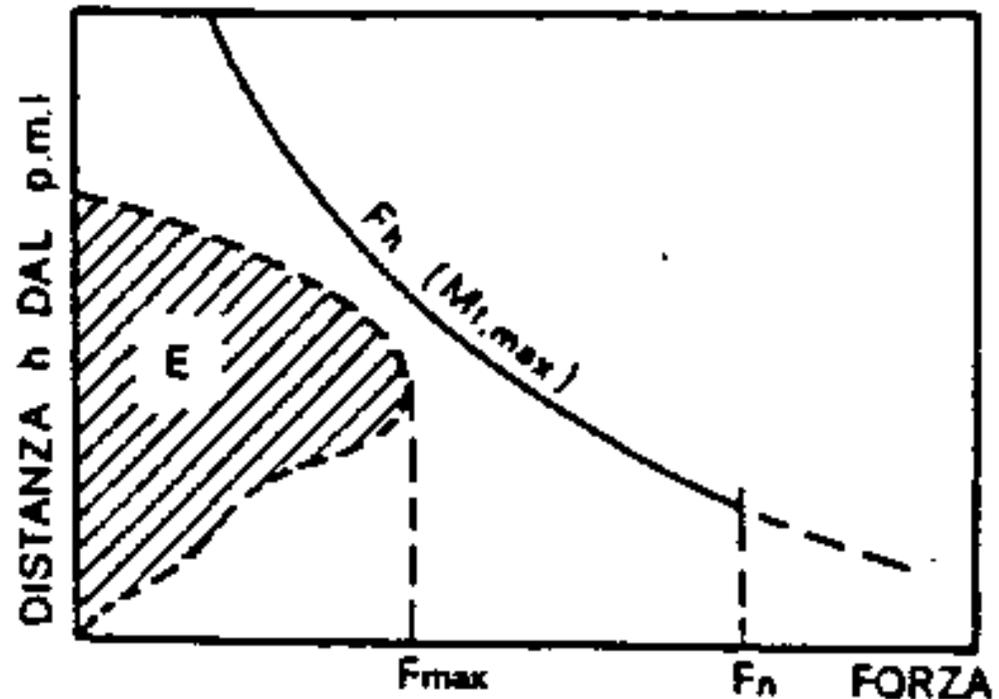
# Schema di funzionamento



Pressa meccanica ad eccentrico e sistema biella-manovella.

# Curve di prestazione

Curva di prestazione di una  
pressa ad eccentrico e anda-  
mento (curva a tratti) della  
forza richiesta dalla lavora-  
zione.





# Presse idrauliche

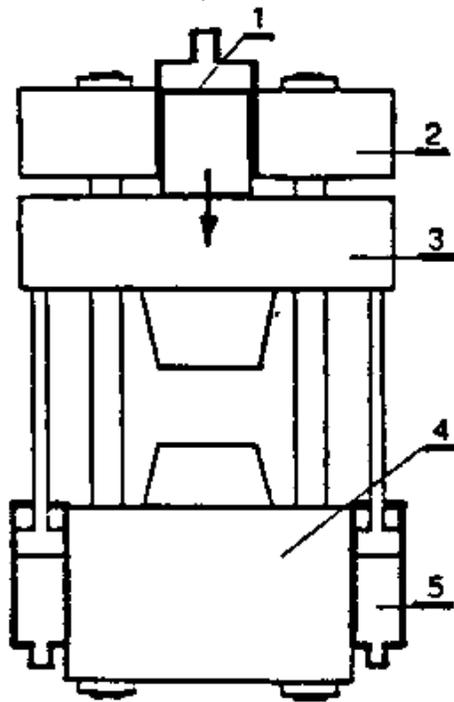
- Dell'olio in pressione muove dei pistoni idraulici
- La forza disponibile è uguale in qualunque punto del ciclo
- Delle valvole di limitazione regolano la forza erogata
- Anche la velocità di lavoro è facilmente regolabile
- Possono erogare forze molto elevate ed eseguire deformazioni profonde e difficili grazie alla possibilità di regolare la velocità di lavoro



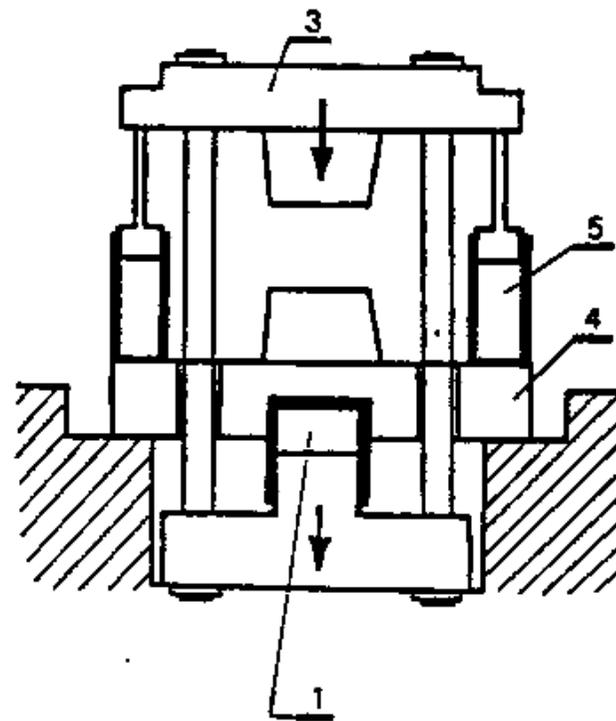
# Presse idrauliche

- Il punzone è fissato sulla parte inferiore
- Il premilamiera blocca la lamiera ed evita lo scorrimento di quest'ultima al momento dell'azione della matrice
- Le presse a doppio effetto prevedono in luogo del premilamiera il movimento anche della traversa inferiore ma richiedono fondazioni molto più impegnative

# Schema di funzionamento



Pressa idraulica con azione di spinta.



Pressa idraulica con azione di tiro.

- 1) cilindro di comando, 2) traversa fissa, 3) traversa mobile,  
4) basamento, 5) cilindri di risalita.

# Linea di stampaggio

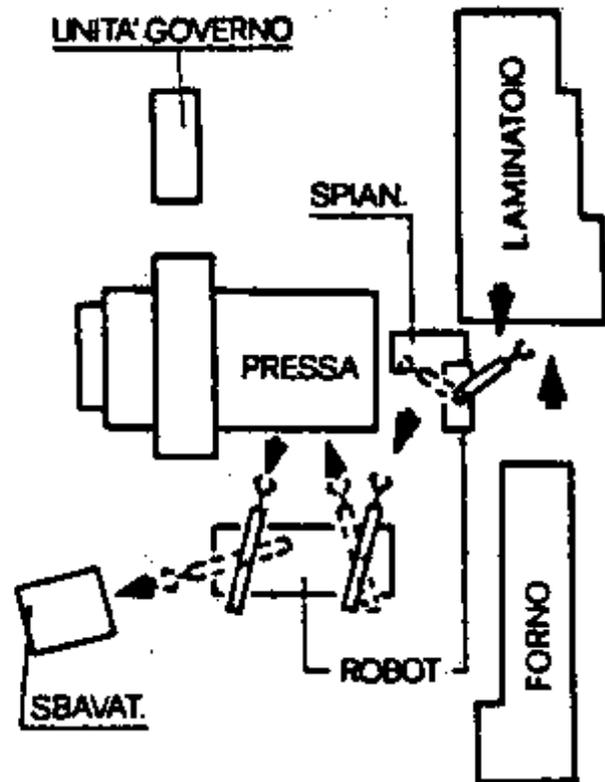


Fig. 8.29 - Esempio di linea di stampaggio automatica.

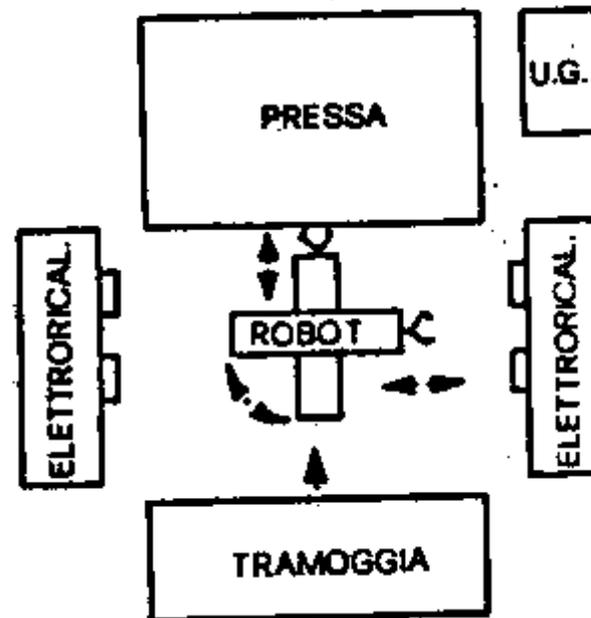
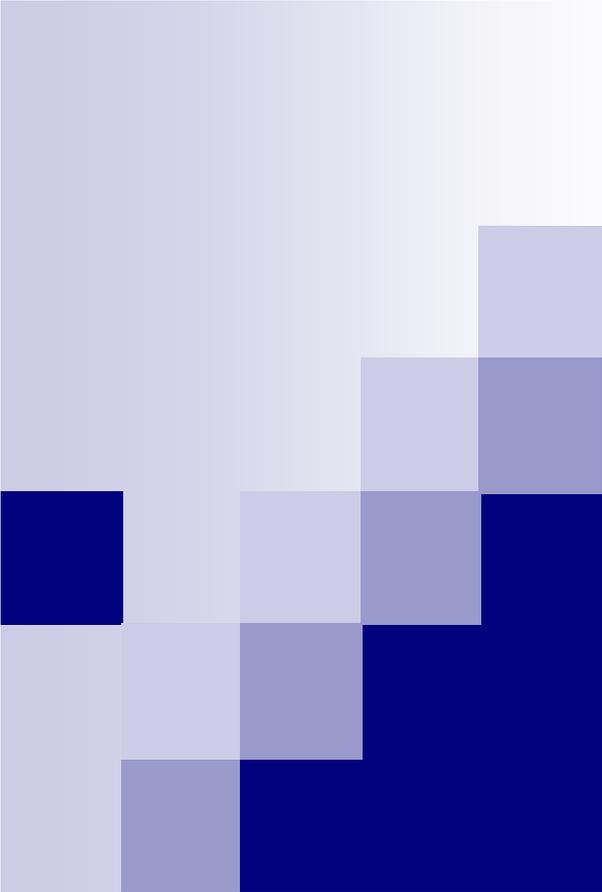


Fig. 8.30 - Altro esempio di linea di stampaggio automatica.



# Progettazione stampi



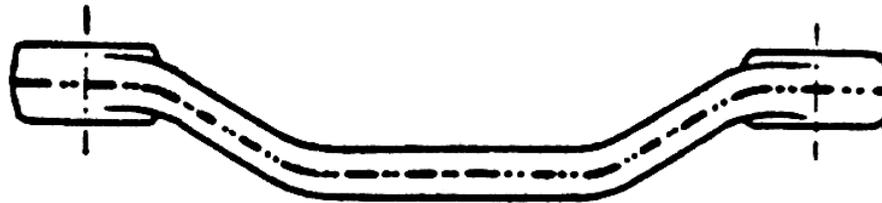
# Progettazione degli stampi: piano di divisione

- Scelta del piano di divisione che può coincidere con:
  - Un'asse di simmetria del pezzo
  - La normale all'asse di rotazione nel caso di solidi di rivoluzione
  - Un piano ove non sussistano sottosquadri che possono essere risolti altrimenti con costosi movimenti di tasselli
  - Il piano di bava considerando la natura fibrosa del reticolo cristallino

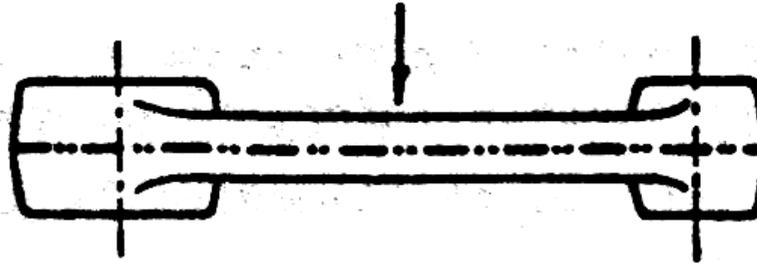
# Esempi di piani di divisione

Esempio di un pezzo con  
linea di bava su piu'  
piani.

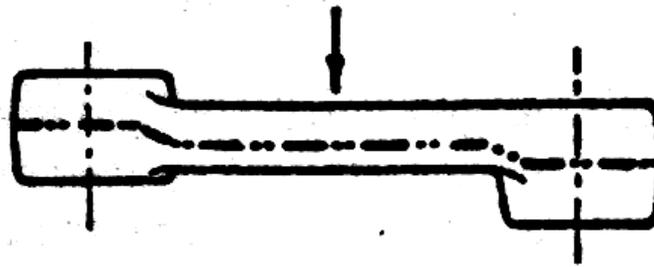
— .. — linea bave



a)



b)



c)



· Esempi di scelta della linea delle bave nel caso di bielle.

— .. — linea delle bave



# Progettazione degli stampi: forma del grezzo di partenza

- Una scelta corretta del grezzo di partenza consente di risolvere parecchi problemi in stampaggio
- Esistono 2 casi di base:
  - Billetta con asse parallelo alla direzione di stampaggio
  - Billetta con asse perpendicolare alla direzione di stampaggio

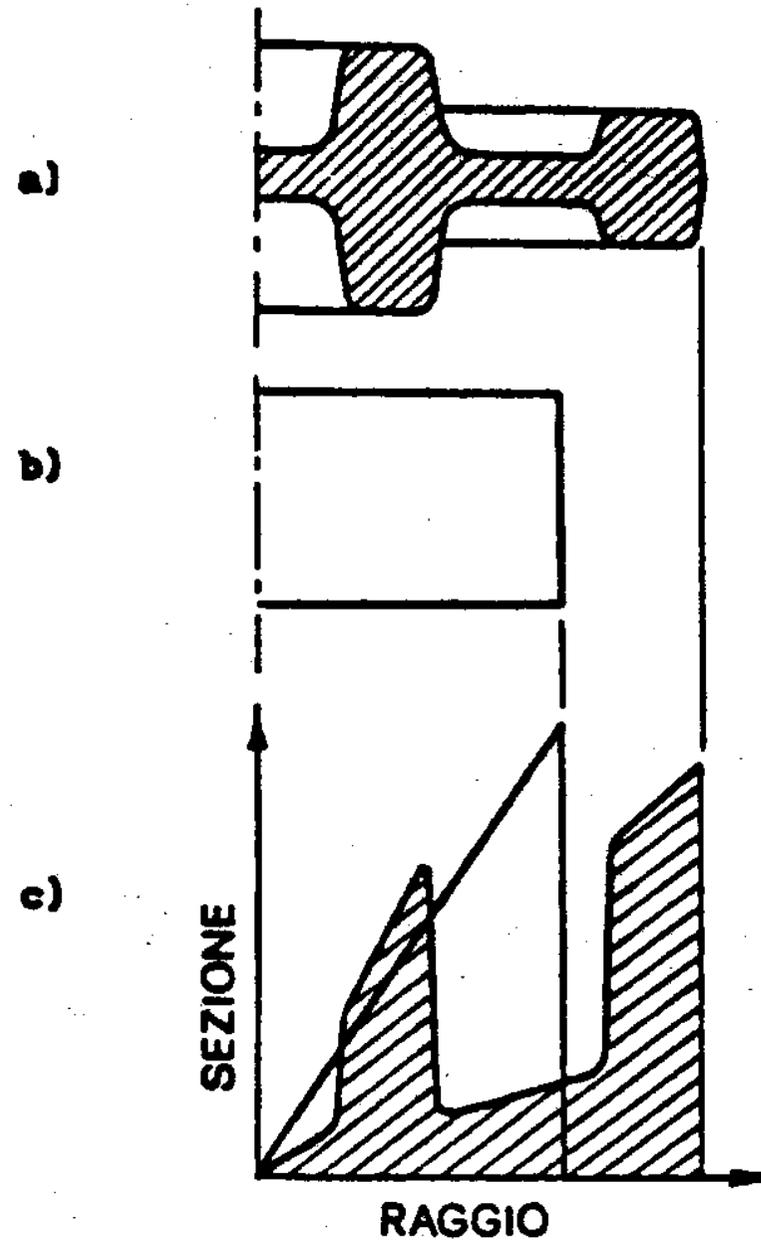


# Asse parallelo alla direzione di stampaggio

1. Disegnare la sezione del pezzo
2. Tracciare il diagramma polare
  - Ascissa = raggio generico
  - Ordinata = valore della sezione cilindrica di raggio  $r$  del pezzo da ottenere
3. Confrontarlo con il diagramma polare del grezzo di partenza
4. Valutare le deformazioni richieste

**Studio del flusso del materiale  
con metodo grafico.**

- a) sezione del pezzo stampato,**
- b) billetta,**
- c) diagramma polare del pezzo e  
della billetta.**





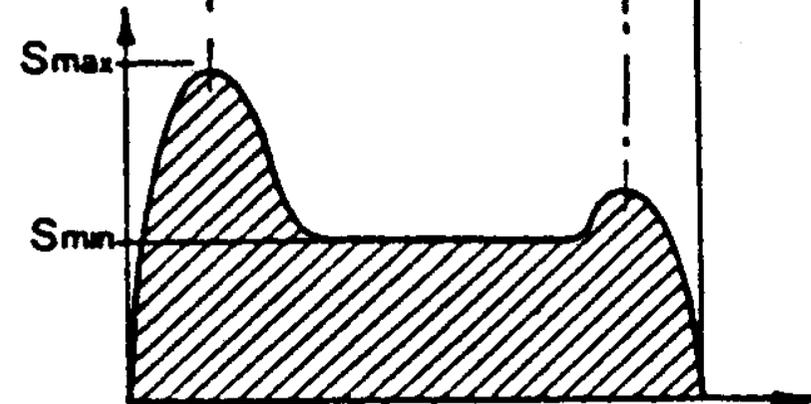
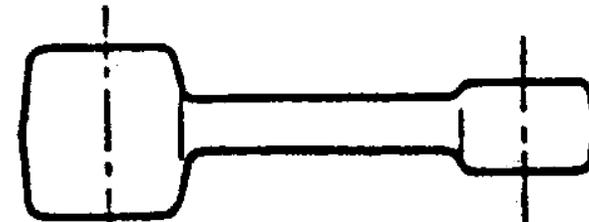
# Asse perpendicolare alla direzione di stampaggio

1. Disegnare la sezione longitudinale del pezzo
  2. Tracciare il diagramma delle sezioni
  3. Disegnare il grezzo ideale con sezioni circolari equivalenti a quelle del pezzo
- Individuare la forma iniziale del grezzo migliore o ricorrere ad operazioni di sbazzatura

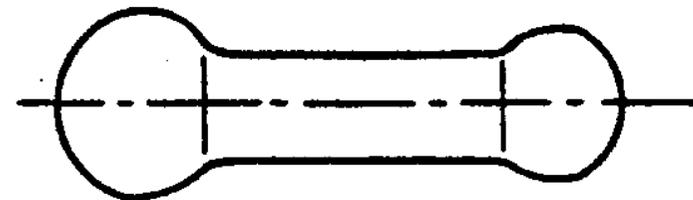
Metodo grafico per definire  
la forma del "grezzo ideale".

- a) pezzo stampato (biella),
- b) diagramma sezioni,
- c) grezzo "ideale".

a)



c)





# Progettazione degli stampi: sovrametalli

- Dimensionamento dei sovrametalli nel caso di successiva lavorazione su macchine utensili
- Lo spessore è da valutarsi in funzione di:
  - Dimensioni del pezzo
  - Ossidazione del materiale con la temperatura
  - Potenziali difetti superficiali
  - Eventuale irregolarità di riempimento
  - Tolleranze dimensionali
  - Problemi di ritiro
  - Tipo di macchina utilizzata per lo stampaggio
  - Tipo di lavorazioni successive (fresatura, tornitura, ...)

# Valori di sovrametallo

Tabella 8.2 - Valori indicativi del sovrametallo

Dimensione (mm)	Sovrametallo (mm)
< 40	0,5 + 1,5
40 + 80	1,0 + 2,0
80 + 150	1,5 + 2,5
150 + 250	2,0 + 3,0
250 + 500	2,5 + 4,0



# Progettazione degli stampi: angoli di sformo

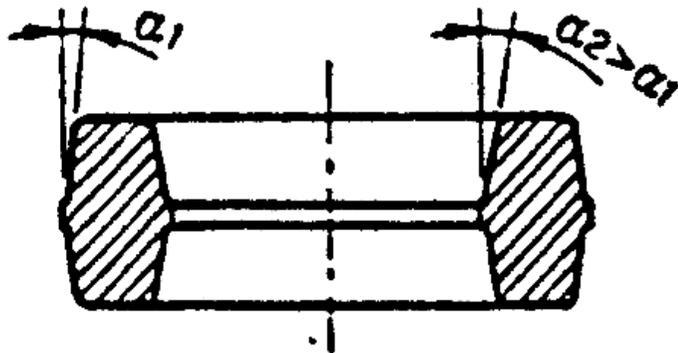
- Occorre evitare pareti di sformo perpendicolari al piano di bava mediante opportuni angoli di sformo:
  - 7-9 gradi nei casi più normali
  - 10-12 gradi nel caso di nervature con elevato rapporto altezza/spessore
- Le difficoltà maggiori esistono sulle superfici interne che sono oggetto di ritiro che, a differenza di quelle esterne, tendono ad “aggrapparsi” allo stampo



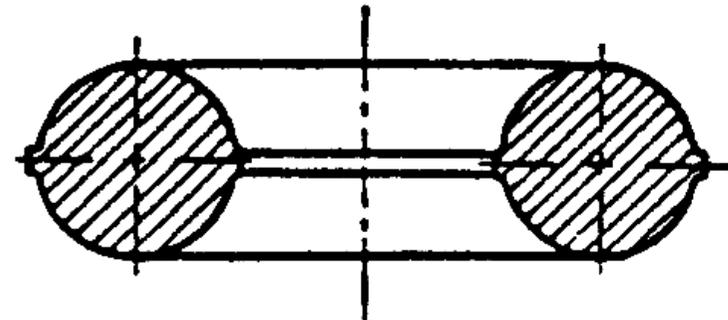
# Progettazione degli stampi: angoli di sformo

- Elementi influenzanti il dimensionamento:
  - Materiale da stampare
  - Rapporti dimensionali delle cavità da riempire
  - Tipo di estrazione prevista (manuale od automatica) e dunque tempo di permanenza del pezzo nello stampo

# Angoli di sforno



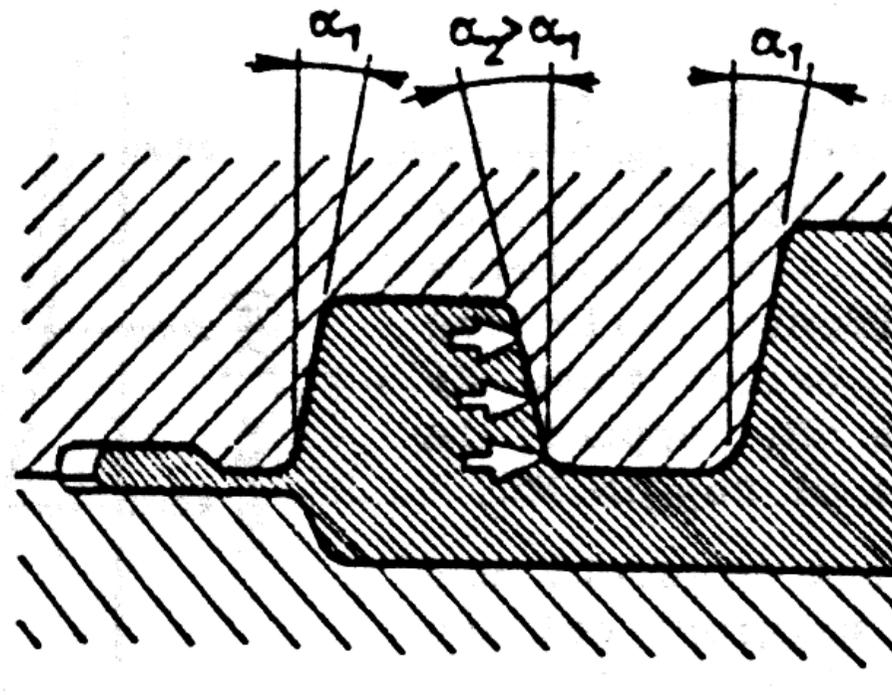
a)



b)

a) Pezzo con angoli di spoglia, b) pezzo con sforno naturale.

# Angoli di sforno



Angoli di spoglia esterni  $\alpha_1$   
ed interni  $\alpha_2$ .



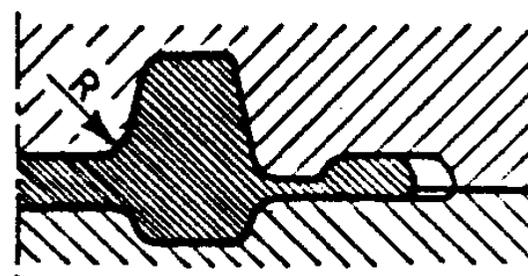
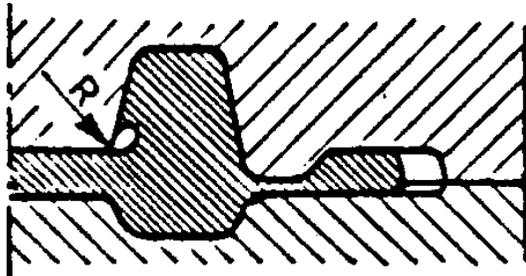
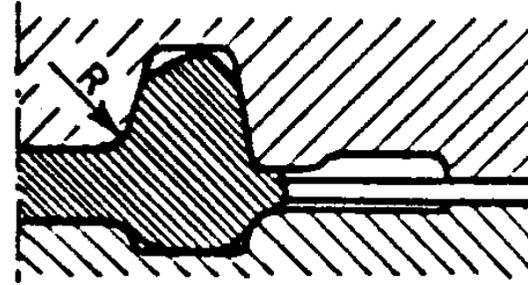
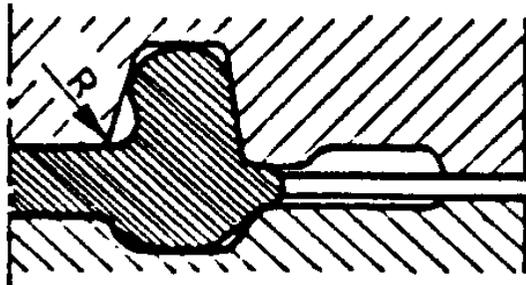
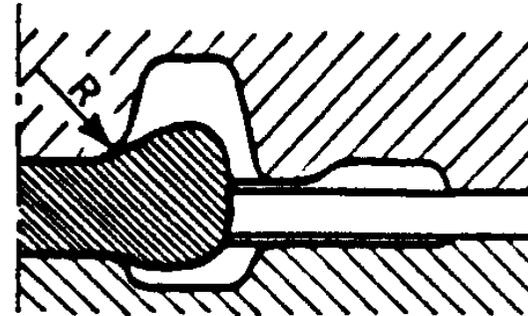
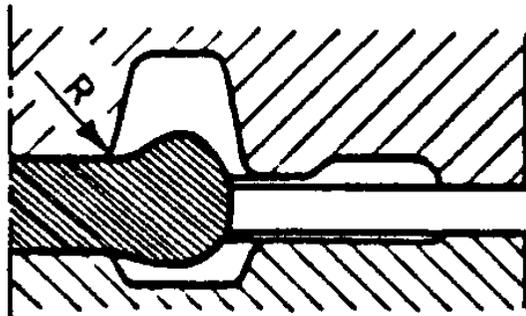
# Progettazione degli stampi: raggi di raccordo

- Occorre evitare spigoli vivi ed introdurre ampi raggi di raccordo per più ragioni:
  - Diminuire i punti di concentrazione di tensioni con il rischio di cricche specie in concomitanza a fenomeni di raffreddamento
  - Facilitare il riempimento delle cavità dello stampo riducendo dunque la forza necessaria
  - Evitare distacchi del materiale dalle pareti dello stampo che possono dar luogo a difetti
  - Uno spigolo vivo nello stampo è sempre soggetto a fenomeni di usura sia meccanica sia termica



# Progettazione degli stampi: raggi di raccordo

- Il dimensionamento dei raggi di raccordo dipende anche dalla forma del grezzo di partenza
- Se il materiale aggiunto per accrescere i raggi di raccordo si traduce in sovrametallo che deve essere in parte asportato durante le lavorazioni successive, occorrerà scegliere un compromesso tra sovrametallo e raggi di raccordo



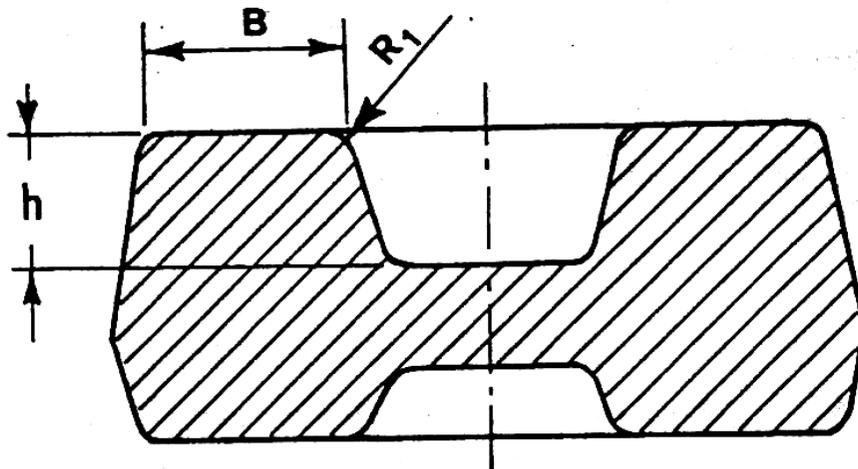
**Raggio R piccolo**

**Raggio R corretto**

**Difetto causato da un raggio di raccordo troppo piccolo.**

# Dimensionamento dei raggi di raccordo

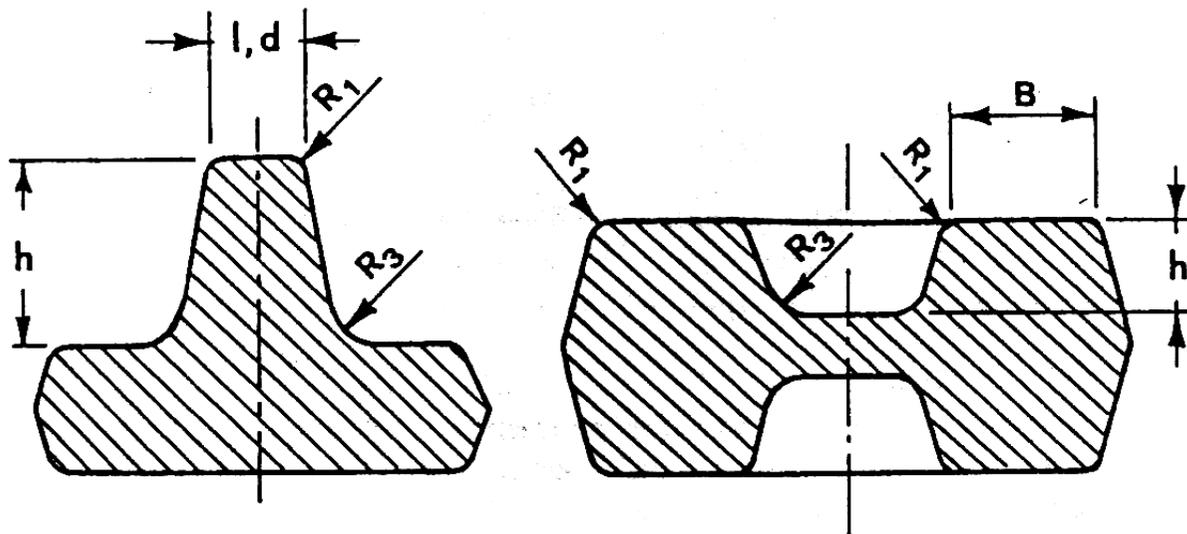
2) Raggi di raccordo degli spigoli per pezzi di cui alla Fig. 8.21 e 8.22.



$h/B$	$R_1$
$< 2$	$0,05 \cdot h + 0,5$
$2 \div 4$	$0,06 \cdot h + 0,5$
$> 4$	$0,07 \cdot h + 0,5$

Fig. 8.21 - Dimensionamento dei raggi di raccordo degli spigoli in funzione dei rapporti dimensionali del pezzo.

3) Raggi di raccordo degli angoli per pezzi di cui alla Fig. 8.22.



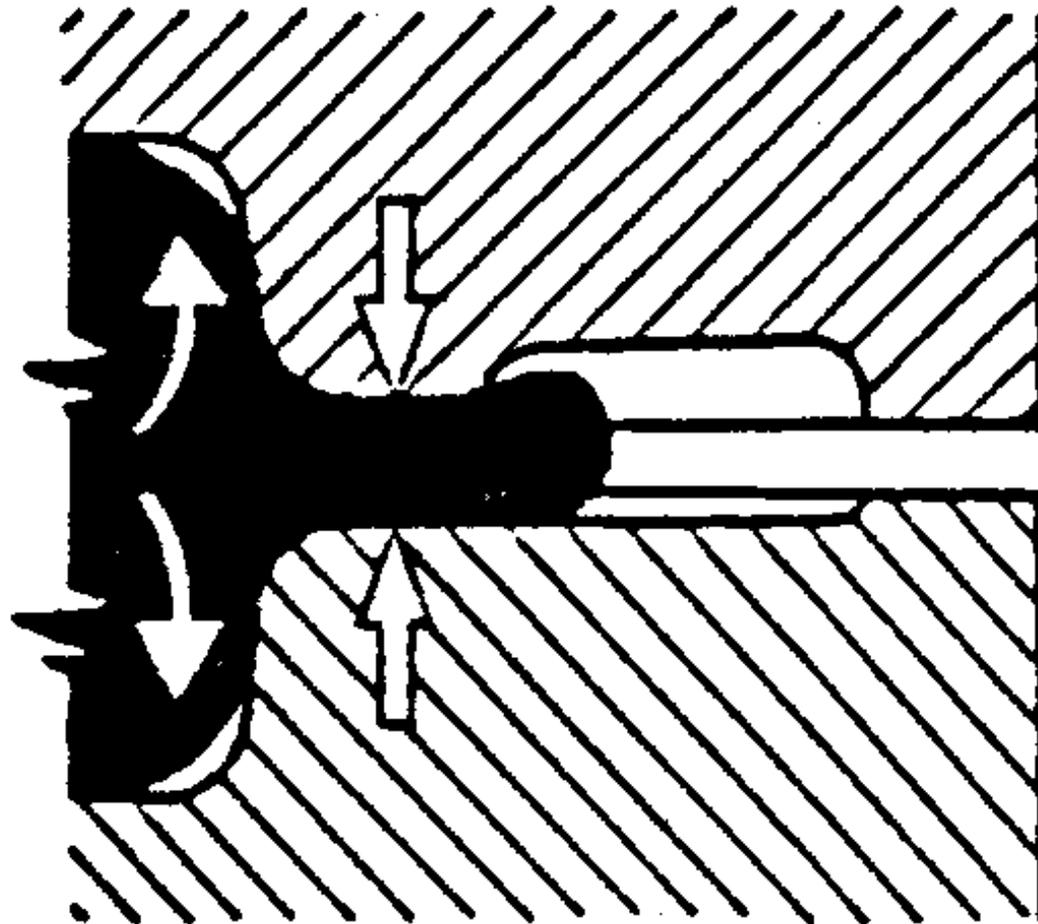
$h/d$ $h/l$ $h/B$	$R_3$
$< 2$	$2,5 \cdot R_1 + 0,5$
$2 \div 4$	$3,0 \cdot R_1 + 0,5$
$> 4$	$3,5 \cdot R_1 + 0,5$

Fig. 8.22 - Dimensionamento dei raggi di raccordo degli angoli in funzione dei rapporti dimensionali del pezzo.

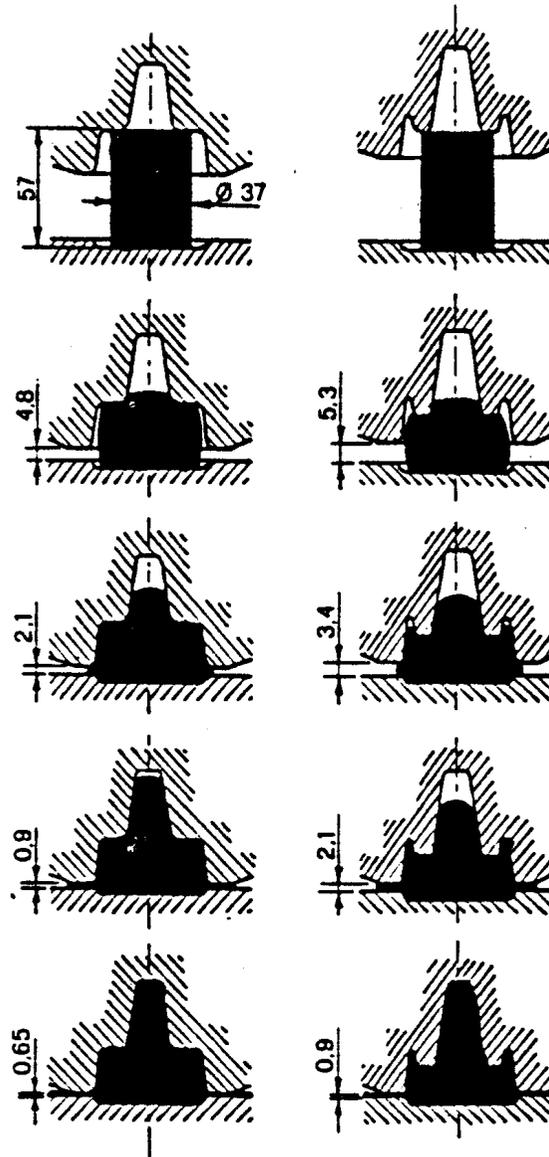
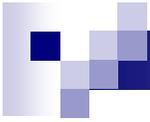


# Progettazione degli stampi: il canale di bava

- Il canale di bava è un'incisione di forma opportuna tra le due metà stampo atto a più funzioni:
  1. Raccogliere il materiale in eccedenza posizionato nello stampo per poter riempire con certezza tutta la forma
  2. Favorire il completo riempimento dello stampo ostruendo con materiale freddo le parti già completate
  3. Formare un cuscinetto di materiale che impedisce l'urto tra stampi durante la chiusura

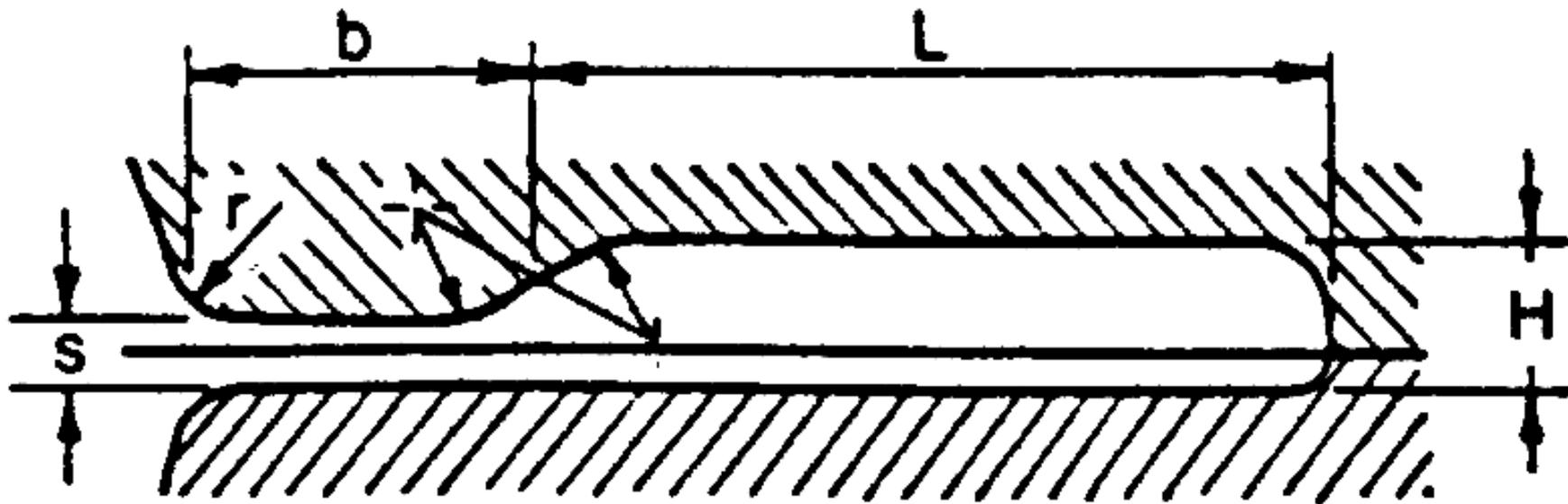


**Camera scartabava e sua  
funzione.**



Due esempi di riempimento di stampi dotati di camera scartabava.

Dimensioni principali della  
camera scartabava.





# Determinazione del canale di bava

$$s = 0,07 \cdot S / p$$

ove

$S$  è la sezione del pezzo sul piano di divisione

$p$  è il perimetro della sezione

**Dimensioni della camera  
scartabava (mm).**

<b>s</b>	<b>b</b>	<b>r</b>	<b>H</b>	<b>L</b>
0,6	6	1,0	3,3	18
0,8	6	1,0	3,4	20
1,0	7	1,0	3,5	22
1,6	8	1,0	4,3	22
2,0	9	1,5	5,0	25
3,0	10	1,5	6,5	28
4,0	11	2,0	8,0	30
5,0	12	2,0	9,5	32
6,0	13	2,5	11,0	35
8,0	14	3,0	14,0	38
10,0	15	3,0	17,0	40

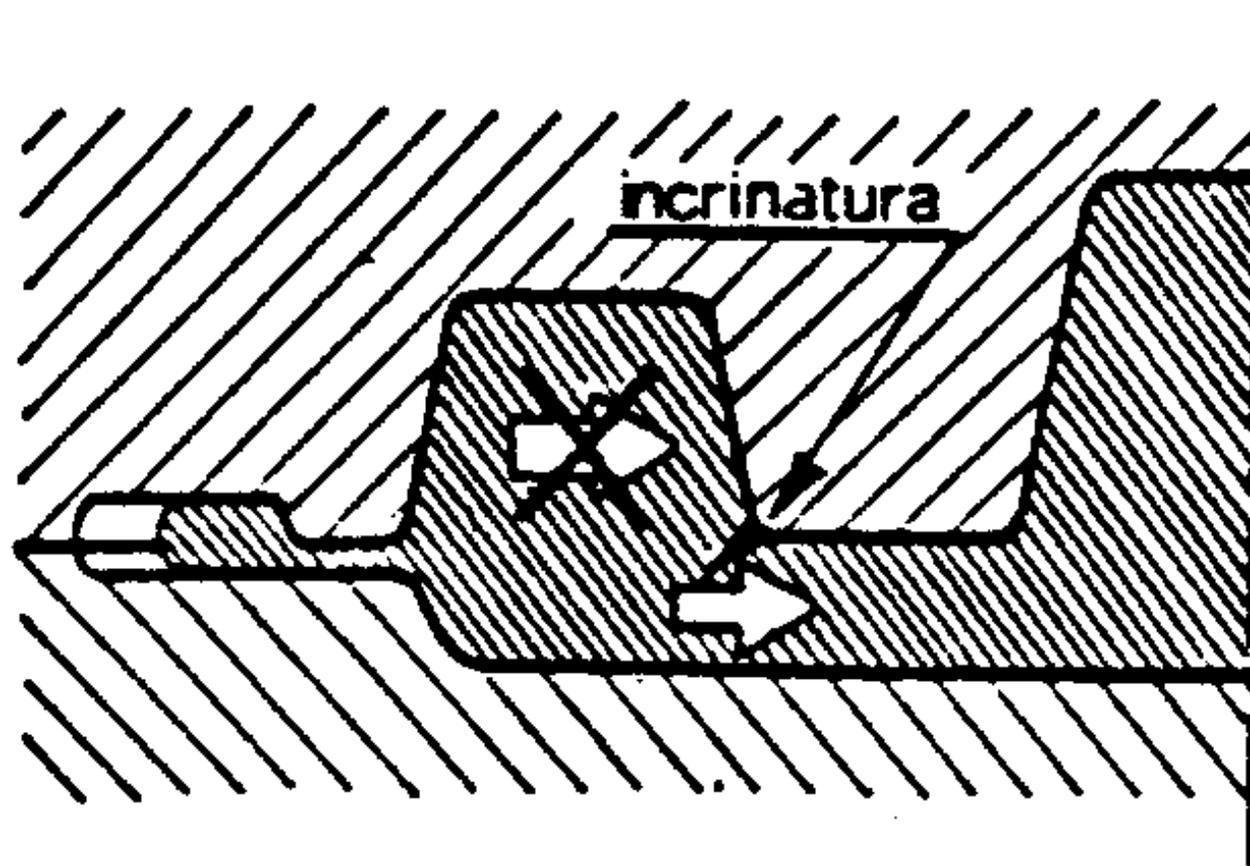
# Progettazione degli stampi: il ritiro

- È necessario maggiorare le dimensioni dell'impronta per tenere conto del ritiro del pezzo a causa del progressivo raffreddamento

**Tabella 8.3 - Valori del ritiro.**

<b>Materiale</b>	<b>ritiro (%)</b>
Acciai	1,0
Rame e bronzi	0,8
Ottoni e leghe legg.	0,9

# Dimensionamento tenuto conto dei ritiri



**Formazione di incrinature  
a causa di un ritiro non  
omogeneo.**



# Progettazione degli stampi: cavità

- Cavità e fori devono essere sempre a fondo cieco, per ottenere fori passanti occorre prevedere una fase successiva di tranciatura, di fatto già necessaria per l'eliminazione delle bave
- Occorre valutare attentamente i rapporti tra diametro e profondità delle cavità onde evitare possibili rotture
- Prevedere punzoni a testa semisferica

# Sbavatura

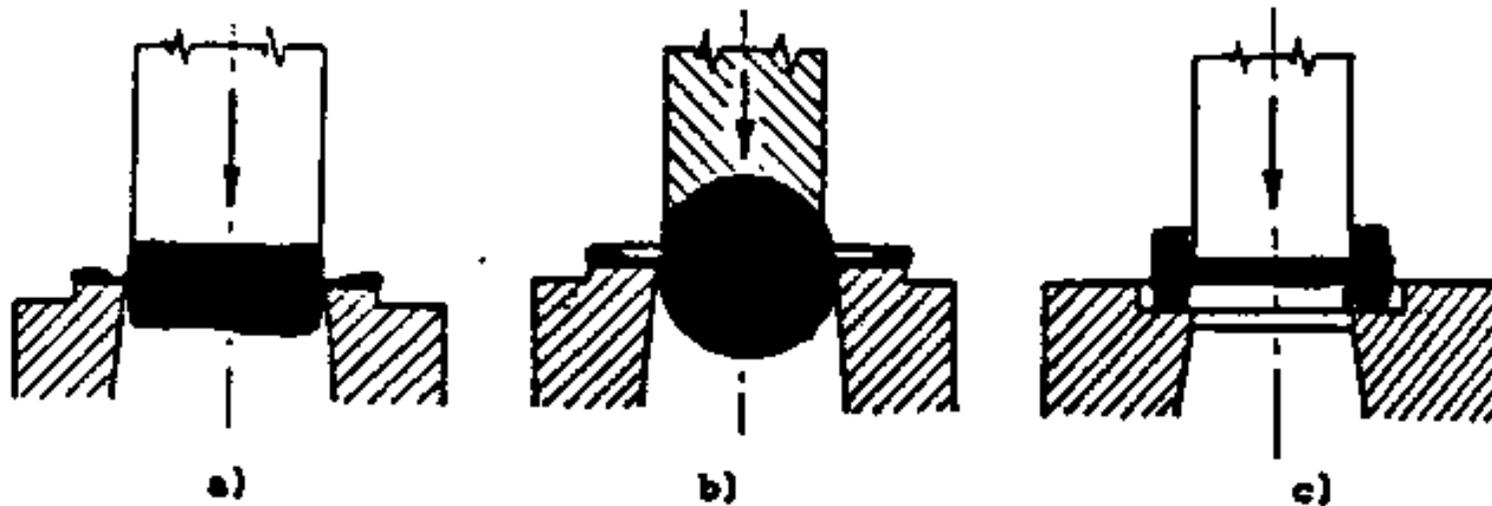


Fig. 8.28 - Esempi di tranciatura di bave esterne ed interne.



# Progettazione degli stampi: dimensionamento

- Altri elementi da considerare nella progettazione:
  - Le dimensioni delle impronte sono ricavate da quelle del pezzo apportando i necessari correttivi per tener conto dei ritiri. A queste occorre aggiungere i canali di bava
  - Gli stampi sono realizzati in blocchi di acciaio speciale nel quale sono state realizzate le cavità per asportazione di truciolo o per elettroerosione
  - I blocchi sono dimensionati in funzione dell'impronta tenendo conto di opportune maggiorazioni per ovvie ragioni di resistenza meccanica
  - Dette  $l$ ,  $b$ ,  $h$  le dimensioni delle impronte, la dimensione dello stampo è data da  $L$ ,  $B$ ,  $H$  ove

$$L = f_x l ; B = f_y b ; H = f_z h$$

Ove i valori  $f$  sono sperimentali e ricavabili da tabella



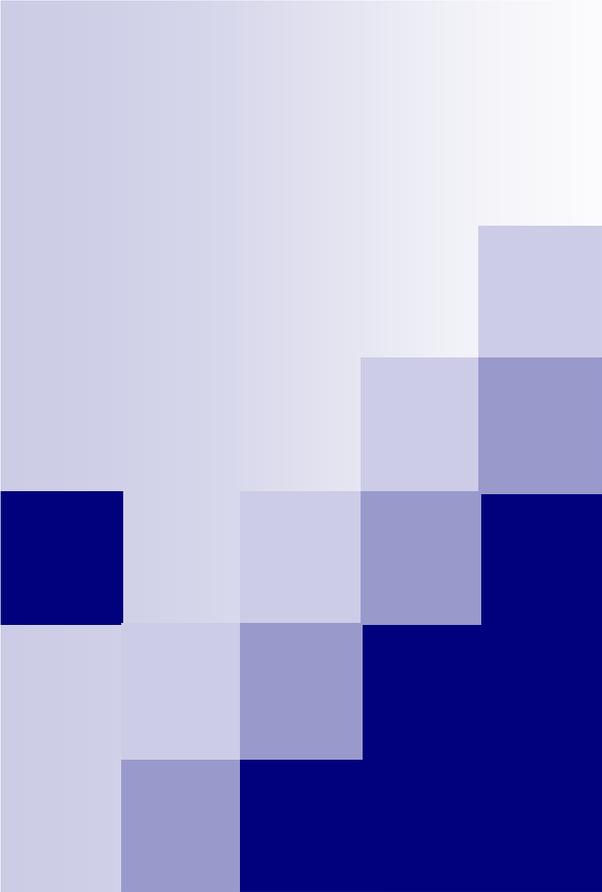
# Progettazione degli stampi: altri elementi

- È necessario prevedere dei sistemi di centraggio tra le due metà stampo così da evitare che possano esserci problemi di allineamento dovuti a sollecitazioni di tipo tangenziale. Generalmente si utilizzano delle colonne agli angoli dello stampo fissate sulla parte fissa (punzone) passanti attraverso asole sulla parte mobile (matrice)
- Occorre prevedere anche dei sistemi di fissaggio delle metà stampo sulle basi fissa e mobile della pressa, Generalmente vengono create degli inserti a coda si rondine nella base su cui fissare dei tiranti di fissaggio
- Nel caso di stampaggio lamiera, è necessaria la presenza di un “premilamiera” mosso da colonne presenti nella pressa, mentre il pezzo è generalmente spinto fuori dal punzone con molle, cilindri ad azoto o con lo stesso premilamiera
- È possibile, nel caso di stampi di elevate dimensioni, realizzare solo le figure in acciaio speciale e tutto il resto dello stampo in acciaio normale da costruzione, più economico: si parla in tal caso di stampi a matrice riportata



# Progettazione degli stampi: passaggi intermedi

- Raramente è possibile realizzare un pezzo finito partendo dal materiale grezzo in una sola operazione; molto più spesso è necessario operare con passaggi successivi
- Ciò comporta studiare le operazioni che è necessario compiere in successione per arrivare al prodotto desiderato



# Tranciatura



# Lavorazione a freddo delle lamiere

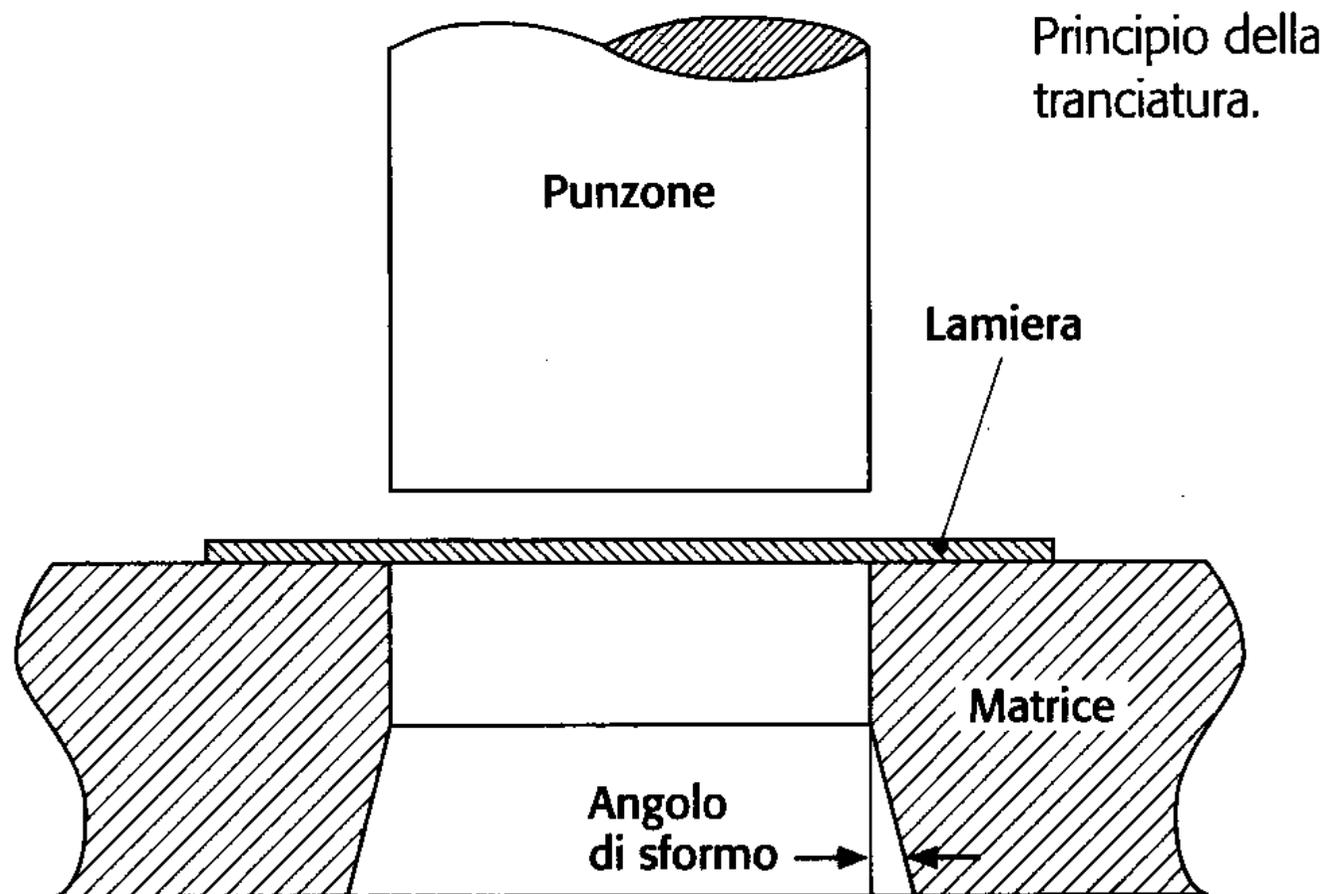
- È il processo più diffuso per la produzione di grande serie di componentistica metallica tipica del settore automobilistico, degli elettrodomestici e delle attrezzature in generale.
- Si compone di più lavorazioni quali:
  - Tranciatura o punzonatura
  - Piegatura
  - Imbutitura
  - Curvatura o calandratura
  - Profilatura



# Tranciatura

- È un'operazione in grado di tagliare sezioni piane prefissate di lamiera in quadrotti o nastri
- Viene eseguita su una pressa grazie ad uno stampo composto da due parti:
  - Matrice vincolata alla parte fissa della pressa
  - Punzone solidale con la slitta
- Il punzone penetra nella lamiera e la attraversa asportando un profilo di materiale di sagoma pari alla sezione del punzone
- La parte asportata, attraverso un foro nella parte fissa della pressa viene raccolta come sfrido nella parte bassa della pressa per essere evacuato
- Il gioco tra punzone e foro della matrice deve avere un certo gioco che deve essere tanto più grande quanto più:
  - La lamiera è di spessore elevato
  - La resistenza a trazione del materiale è elevata

# Tranciatura





# Tranciatura e punzonatura

- Si parla di tranciatura quando il pezzo tagliato è il prodotto e la parte rimanente è lo sfrido
- Si parla invece di punzonatura quando la lamiera forata è il prodotto e lo sfrido è invece la parte asportata

# Punzonatura e tranciatura

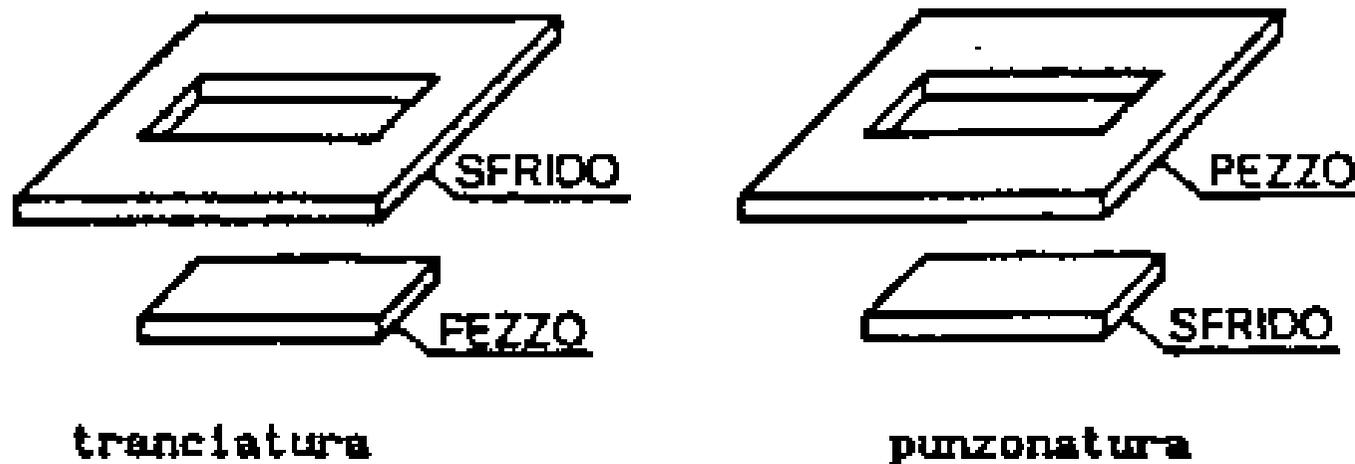
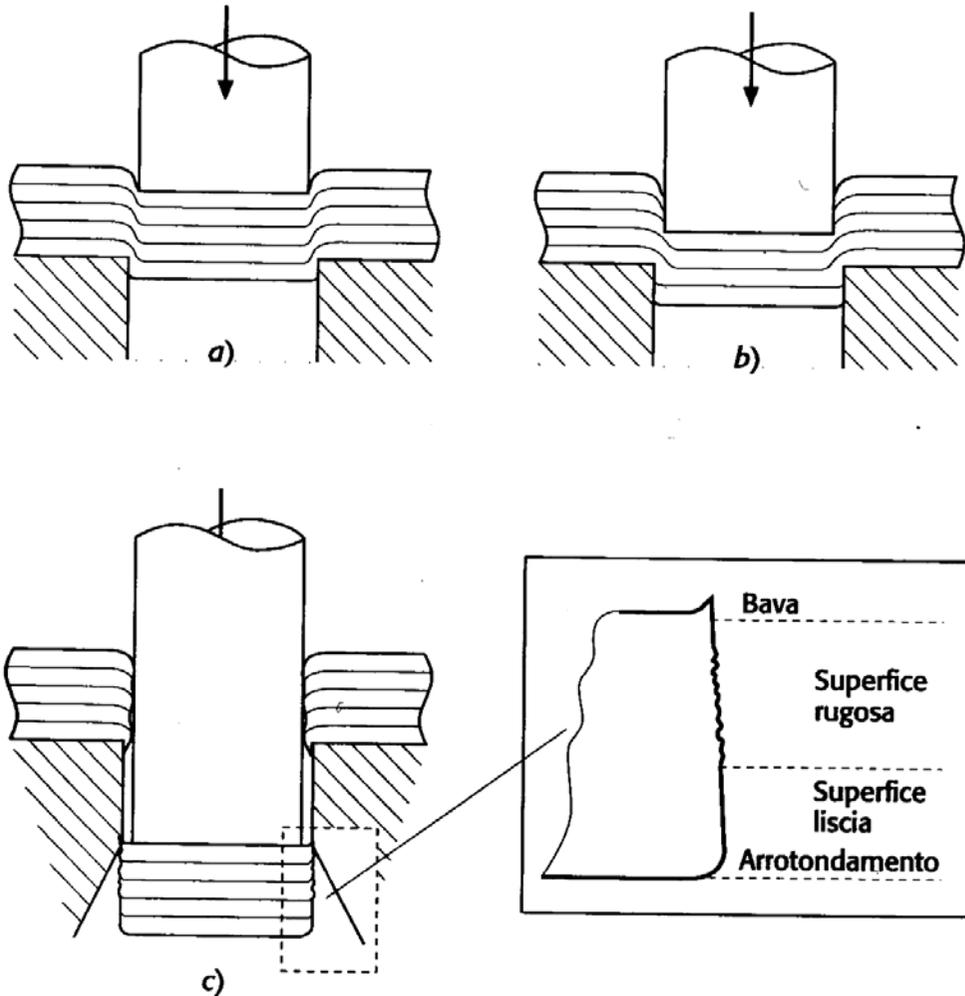


Fig. 9.14 - Differenza fra tranciatura e punzonatura.

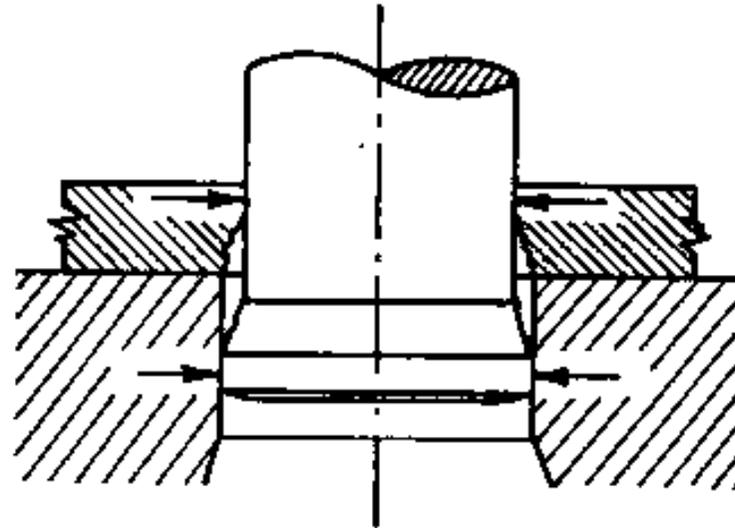
# Fasi di tranciatura



Fasi del processo di tranciatura.  
*a)* compressione;  
*b)* formazione della linea di frattura;  
*c)* distacco del tranciato.

# Ritorno elastico del materiale

La Fig. 9.19 mostra la possibilità del bordo tranciato di aderire al punzone a causa del recupero elastico del materiale stesso, nonché la stessa possibilità per il disco tranciato alla cavità della matrice.





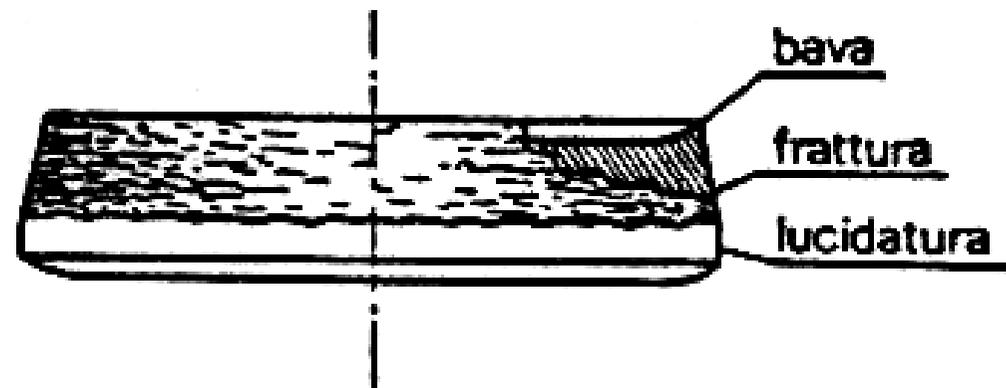
# Tranciatura

- La sezione del tondello tranciato presenta una morfologia tipica caratterizzata da:
  - Uno spigolo arrotondato caratteristico della superficie opposta a quella ove interviene il punzone
  - Una zona liscia nel tratto opposto a quello del punzone che ha strisciato sulla matrice al momento del distacco
  - Una zona rugosa esemplificativa del fenomeno di frattura
  - Uno spigolo rivolto verso il punzone presentante bave

# Forma del profilo tranciato

Fig. 9.17

Forma del disco tranciato.





# Gioco punzone-matrice

- Il dimensionamento del gioco tra punzone e matrice è fondamentale per una buona tranciatura. Esso dipende da:
  - Tipo di materiale utilizzato
  - Spessore della lamiera

per spessori  $s < 3\text{mm}$      $g = 0,007 \cdot s \cdot \sqrt{k_t}$

per spessori  $s > 3\text{mm}$      $g = (0,007 \cdot s - 0,005) \cdot \sqrt{k_t}$

ove  $k_t$  è la resistenza al taglio della lamiera

# Valore di $K_t$ in funzione del materiale

Tabella B.5 - Valori di  $k_t$  per diversi tipi di acciai. Il campo di variabilità dipende dallo stato di incrudimento.

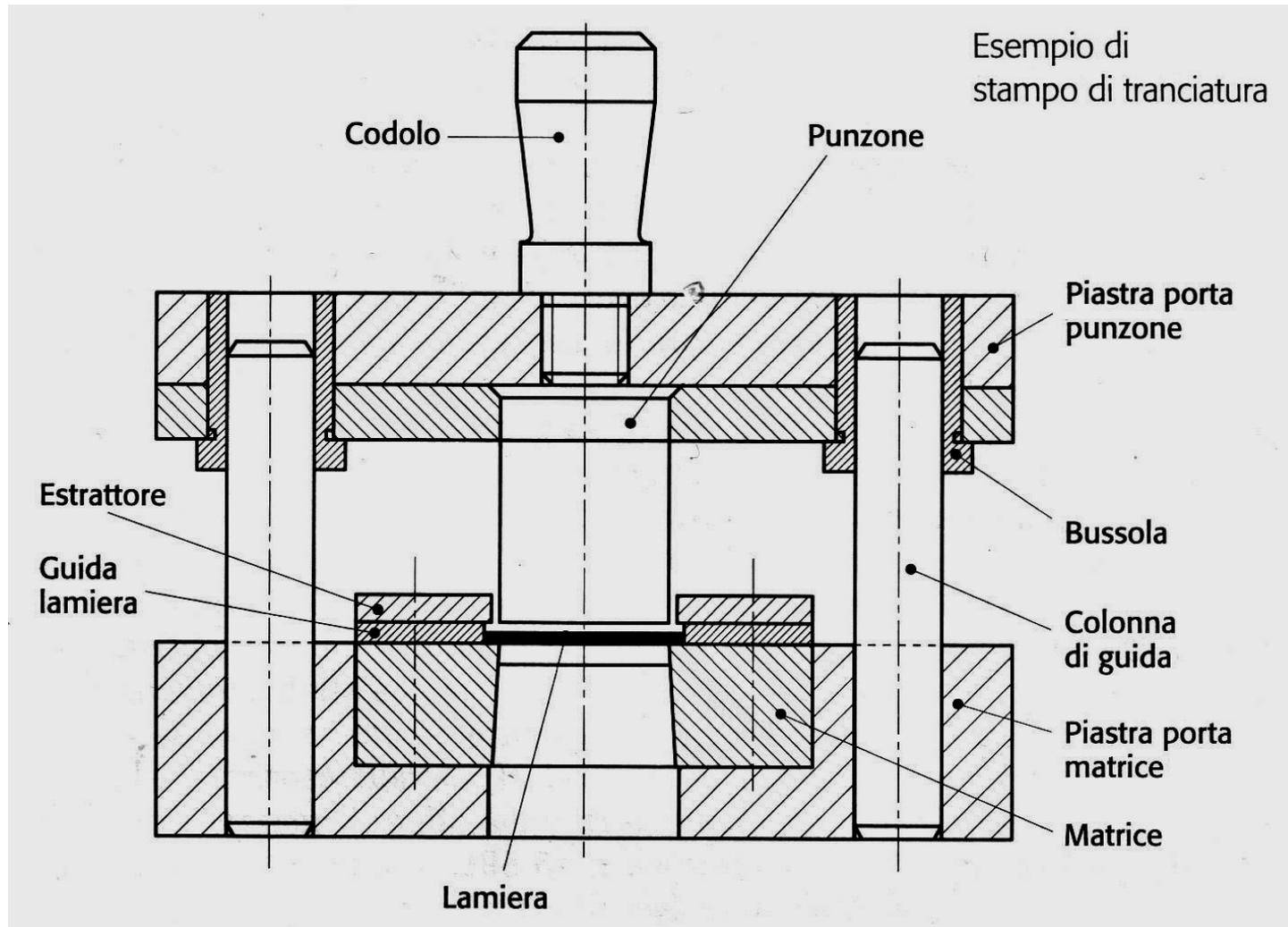
MATERIALE	$k_t$ (N/mm <sup>2</sup> )
Fe P00	280 + 350
Fe P01 e Fe P02	240 + 300
Fe P03 e Fe P04	250 + 320
C 10	280 + 340
C 30	400 + 500
C 50	550 + 650
C 70	700 + 900
Inossidabile ferrit.	350 + 550
Inossidabile austen.	400 + 600



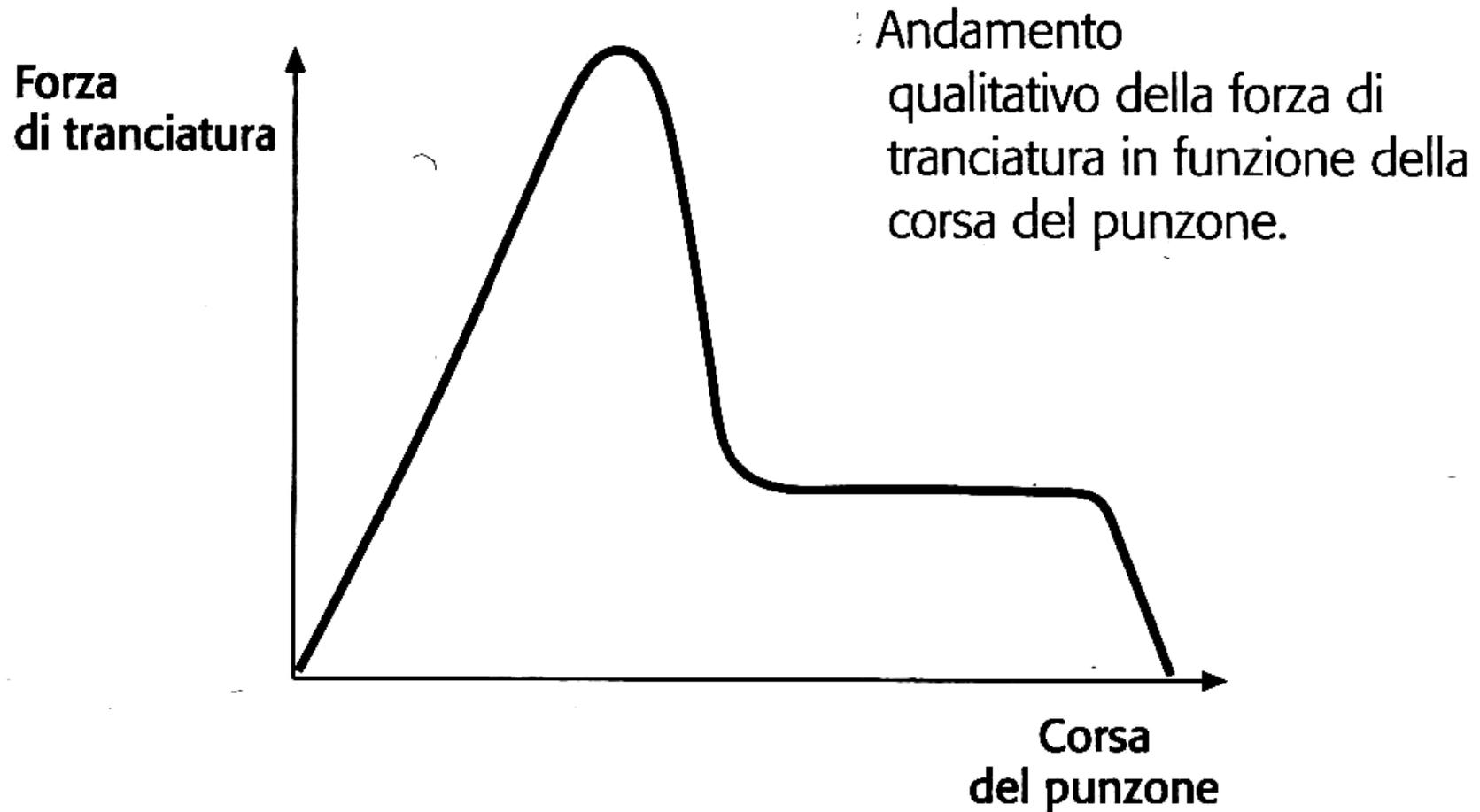
# Stampi di tranciatura

- Dimensionamento:
  - Nella punzonatura il diametro del foro è stabilito dal punzone e la matrice deve essere maggiorata di  $2g$
  - Nella tranciatura le dimensioni del pezzo sono quelle dalla matrice ed il punzone dovrà essere ridotto di  $2g$
- L'usura dello stampo può comportare:
  - Aumento giochi matrice-punzone
  - Arrotondamento degli spigoli taglienti
  - Scheggiature
- La deriva di tali fenomeni può portare progressivamente allo scarto dei pezzi tranciati

# Stampo di tranciatura



# Forza di tranciatura





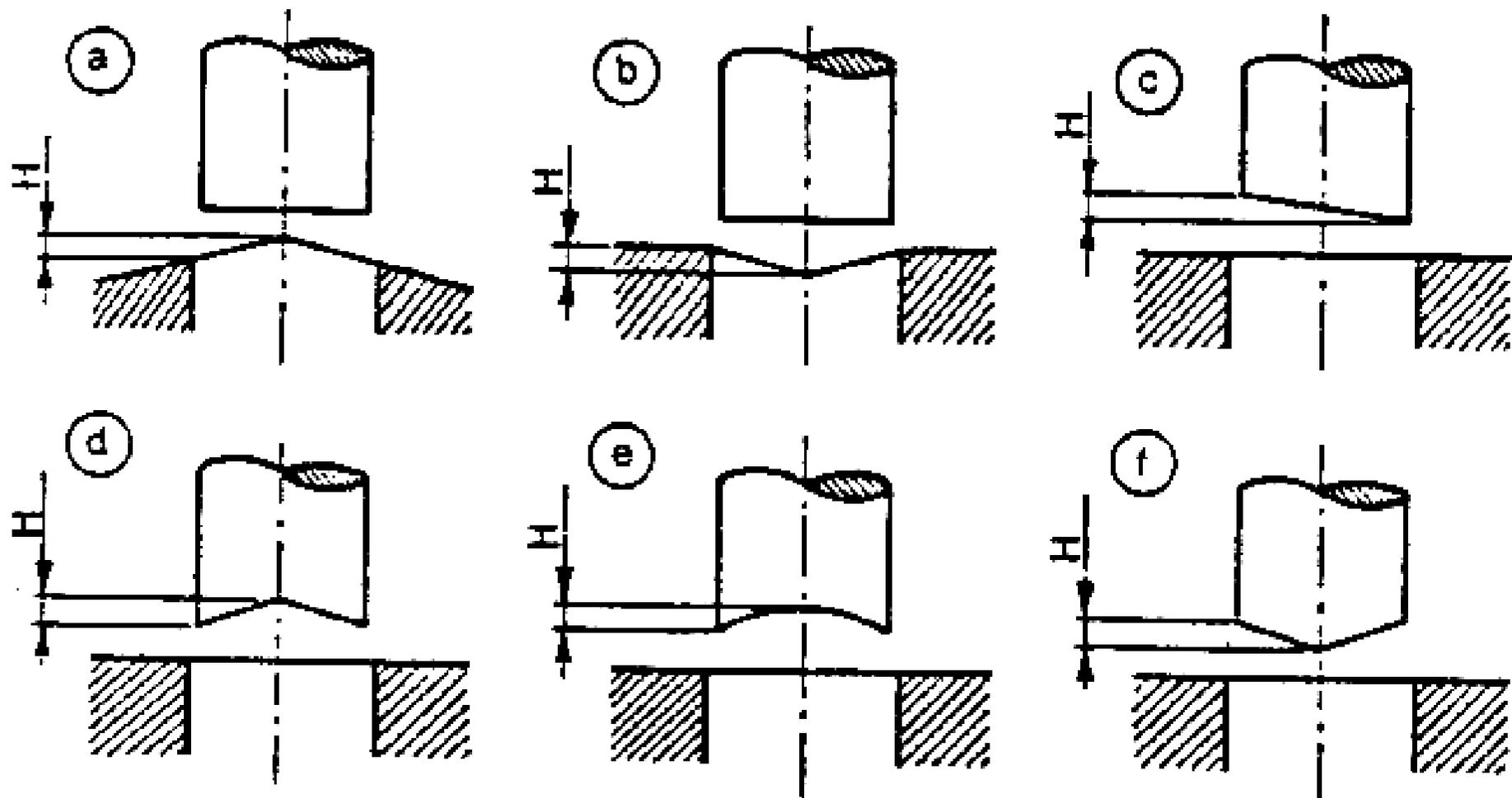
# Punzone e matrice piani

- I piani taglienti di punzone e matrice sono paralleli
- Il valore della forza è massimo a circa il 30% dello spessore della lamiera
- La frattura si propaga immediatamente su tutto il perimetro e la forza cala poi bruscamente (non si annulla a causa dei fenomeni di strisciamento)
- Nel caso di gioco non corretto aumenta la forza necessaria



# Punzone e matrice inclinati

- Il punzone o la matrice presentano piani taglienti inclinati
- Caratteristiche:
  - Forza massima generalmente minore (in funzione dell'extra corsa del punzone)
  - Energia richiesta invariata
  - Evitare angoli di inclinazione eccessivi al fine di evitare rapida usura dei punzoni



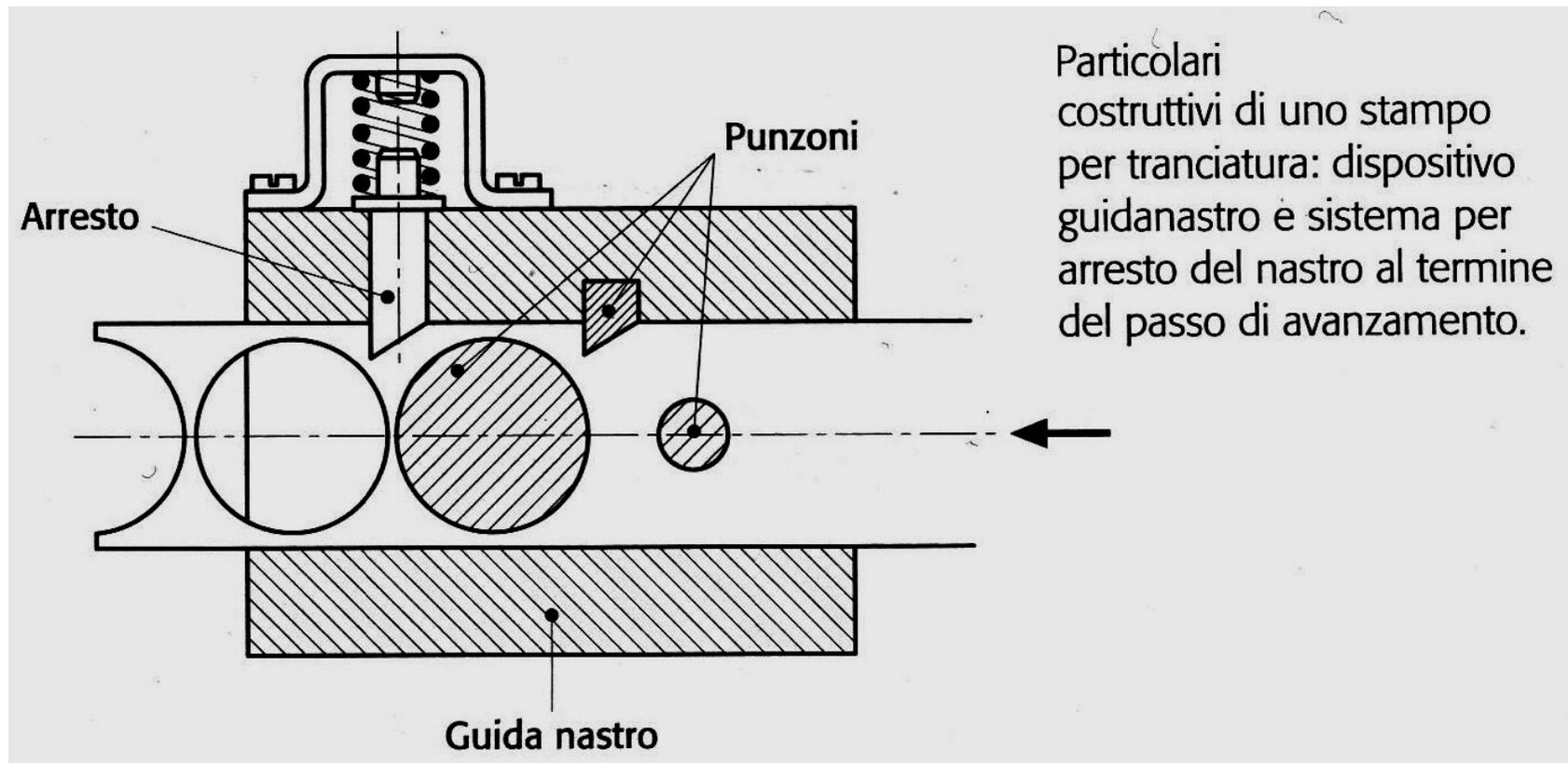
9.21 - Tipi di punzoni e di matrici ad angolo per tranciatura (a, b) e per punzonatura (c, d, e, f).



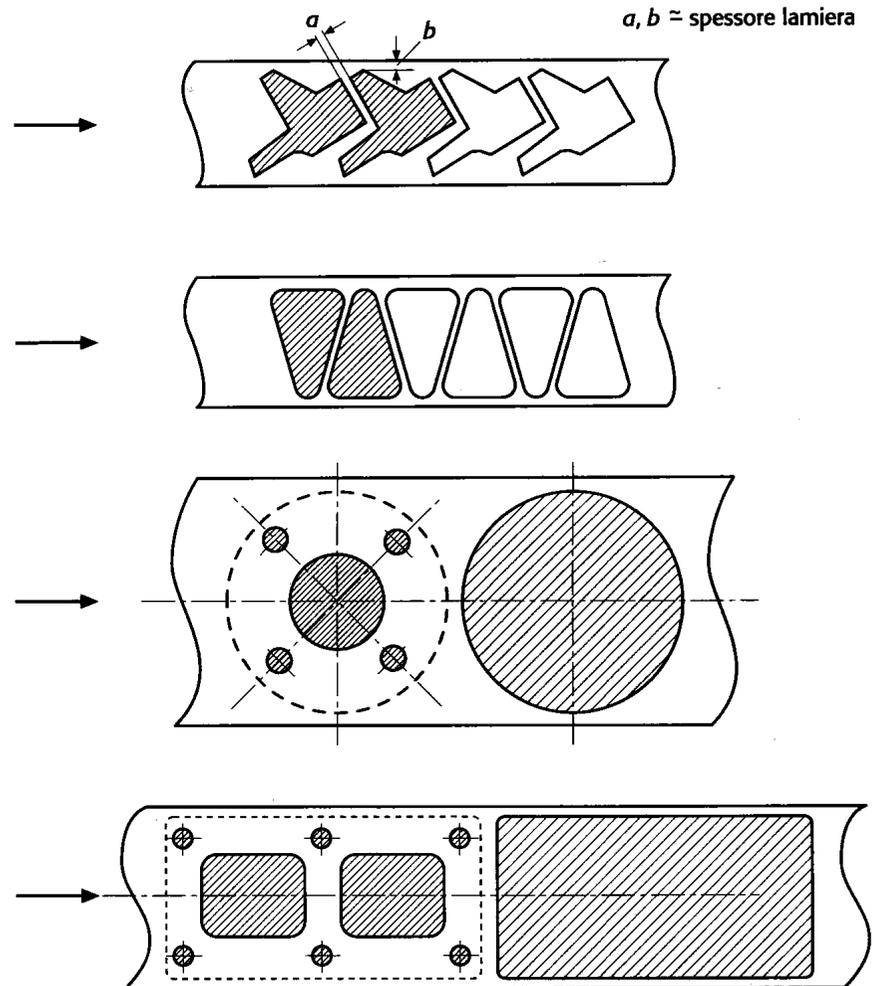
# Tranciatura con stampi

- **Caratteristiche dello stampo:**
  - Matrice e punzone prodotti con acciai per utensili ad alto contenuto di carbonio e trattati termicamente e spigoli a raggio nullo
  - Piastre di sostegno in acciaio standard
  - Presenza di premilamiera per evitare deformazioni non volute
  - Disposizione dei pezzi a minimizzare lo sfrido
  - Codoli di riferimento per il passo da tenere nel caso di nastri
  - Guide per tenere il nastro aderente alla matrice e evitare fuoriuscite dalla sede
  - Presse generalmente meccaniche
  - Produzione garantita anche per più di 100.000 pezzi previa riaffilatura ogni 10.000 – 20.000 battute

# Stampo “progressivo”



# Stampo “progressivo”



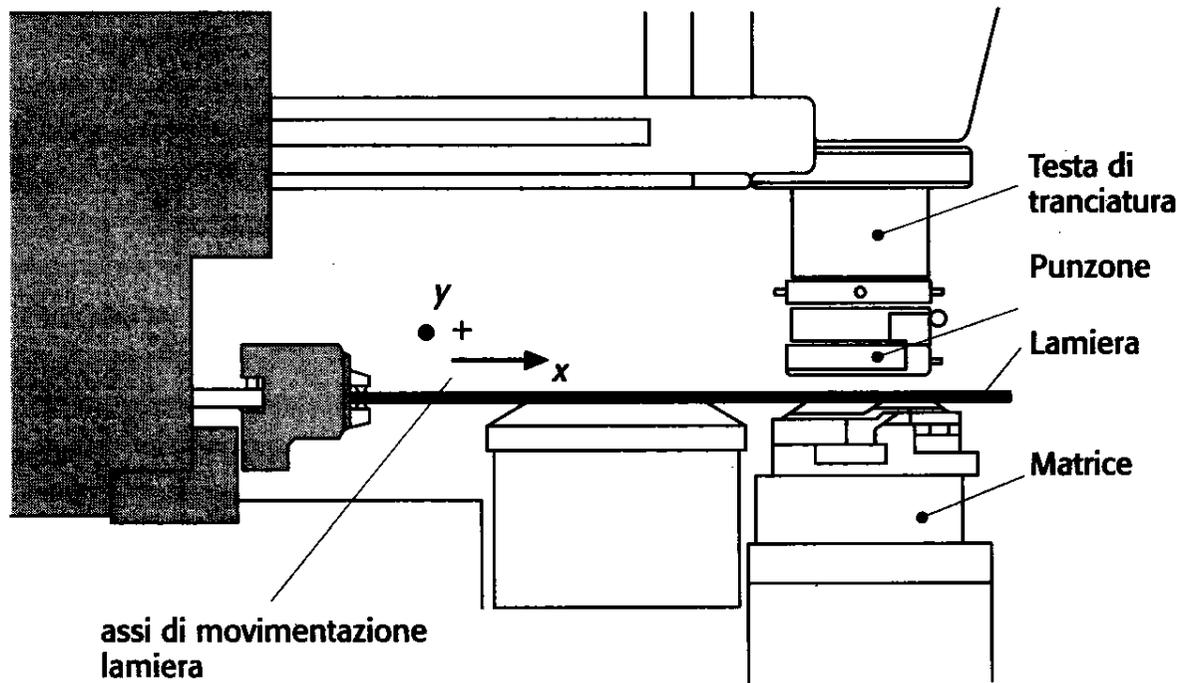
Esempi di  
tranciatura progressiva.



# Tranciatura su centri di lavorazione lamiera

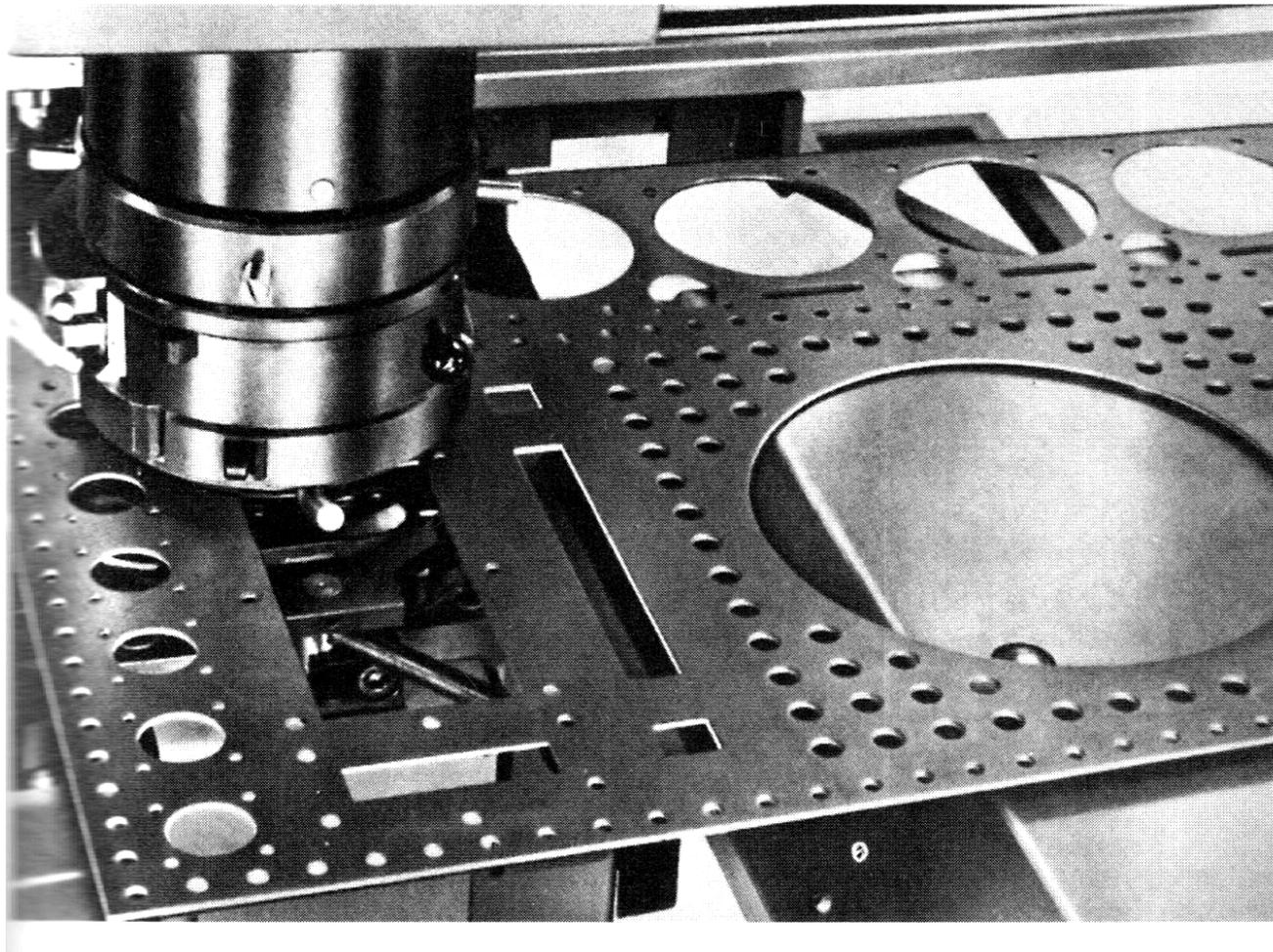
- I centri di lavoro a controllo numerico possono essere utilizzati ove non risulta conveniente un grande investimento in stampi
- Il magazzino di punzoni e matrici del centro di lavoro consente di ottenere con una traiettoria definita punto-punto su un piano x-y una grande varietà di sagome anche complesse di tranciatura.
- Esistono anche teste di taglio laser per sagome molto complesse

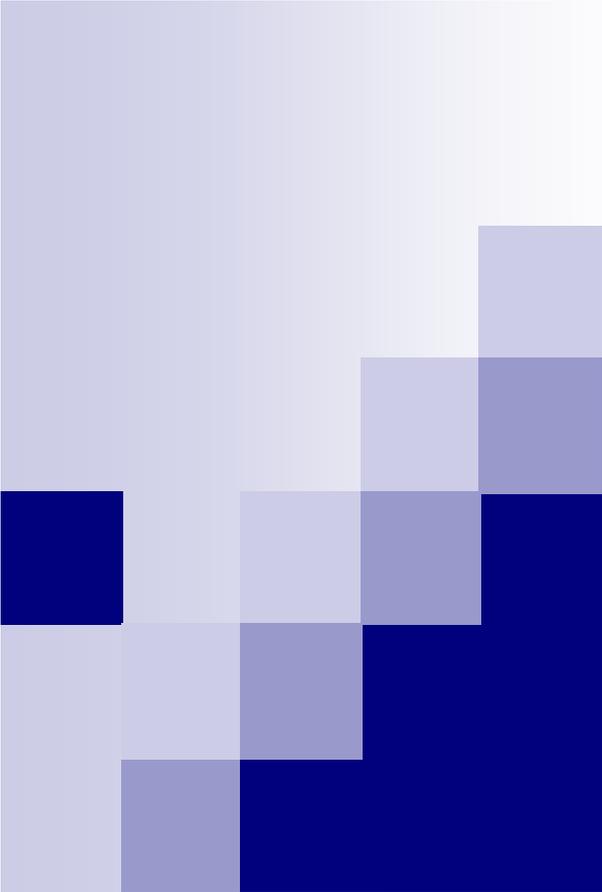
# Centro di lavorazione lamiera



Schema semplificato di un centro di lavorazione della lamiera a controllo numerico, in fase di tranciatura.

# Centro di lavorazione lamiera





# Piegatura

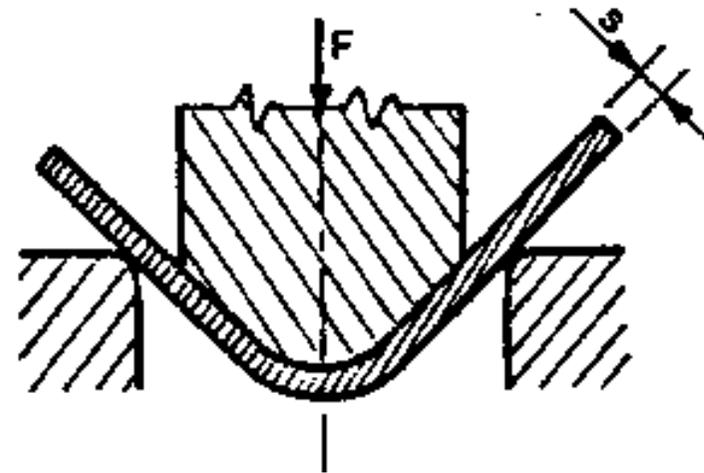


# Piegatura

- Consiste nella deformazione plastica di una sezione di spessore  $s$  secondo un angolo  $\alpha$  per l'azione di un punzone di raggio  $R_p$
- È normalmente l'operazione che segue la tranciatura quando il pezzo preveda una sagoma non piana
- Esistono due tipi di piegatura:
  - Libera ovvero senza l'uso di uno stampo specifico, bensì solo mediante l'appoggio della lamiera su dei supporti e l'azione deformante di un punzone
  - In stampo quando la sagoma non è banale e necessita di uno stampo vero e proprio composto da matrice e punzone

# Piegatura libera

Fig. 9.2  
Esempio di piegatura libera.



# Piegatura ad U

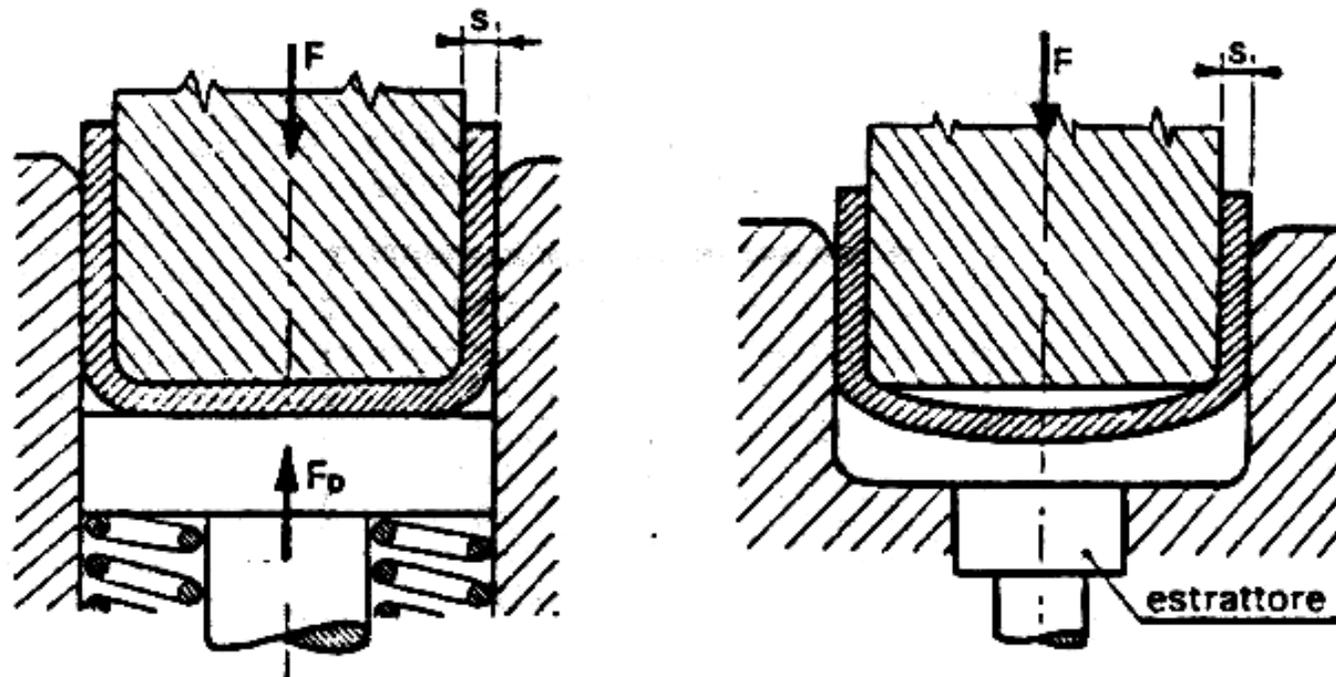
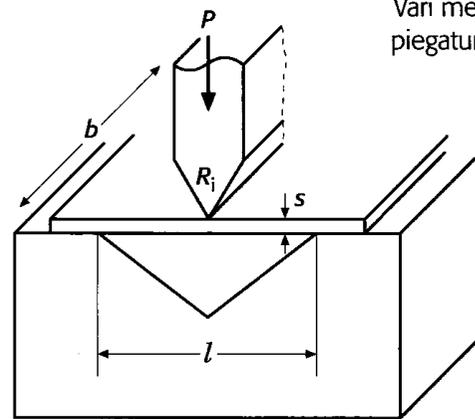


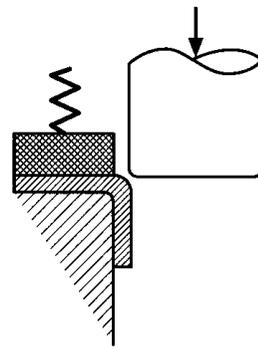
Fig. 9.3 - Esempio di piegatura ad U con e senza prelamiera sottostante.

# Piegatura lamiera

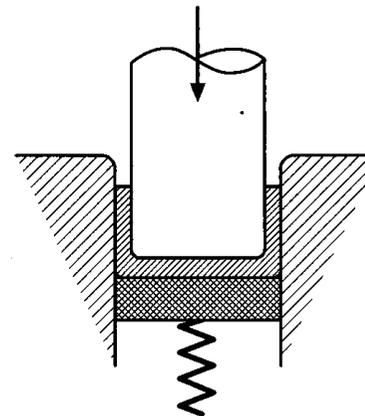
Vari metodi di piegatura delle lamiera.



a)



b)



c)

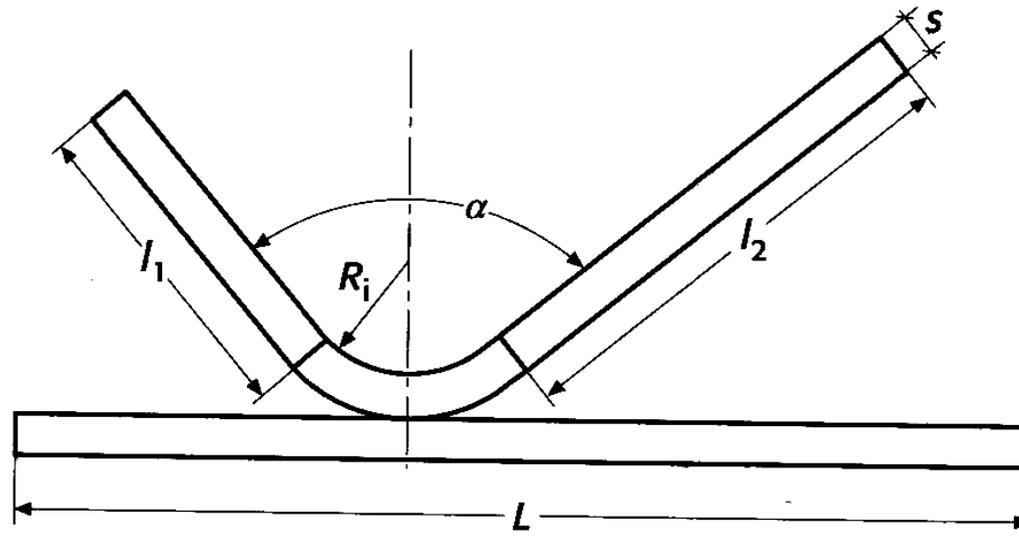


# Piegatura

Nella progettazione di un pezzo piegato occorre valutare:

- lo sviluppo della lamiera necessaria a produrlo
- Il ritorno elastico del materiale che una volta cessata l'azione del punzone dipende da molteplici fattori quali:
  - Tipo di materiale e suo stato di lavorazione
  - Tipo di piegatura attuata
  - Pressione esercitata
  - Raggio di piegatura  $R_p$
  - Velocità di deformazione

# Calcolo dello sviluppo



Calcolo dello sviluppo di un pezzo piegato.

$$e = f(R_i/s)$$

$R_i/s$	5,0	3,0	2,0	1,2	0,8	0,5
$e$	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5

# Piegatura e ritorno elastico

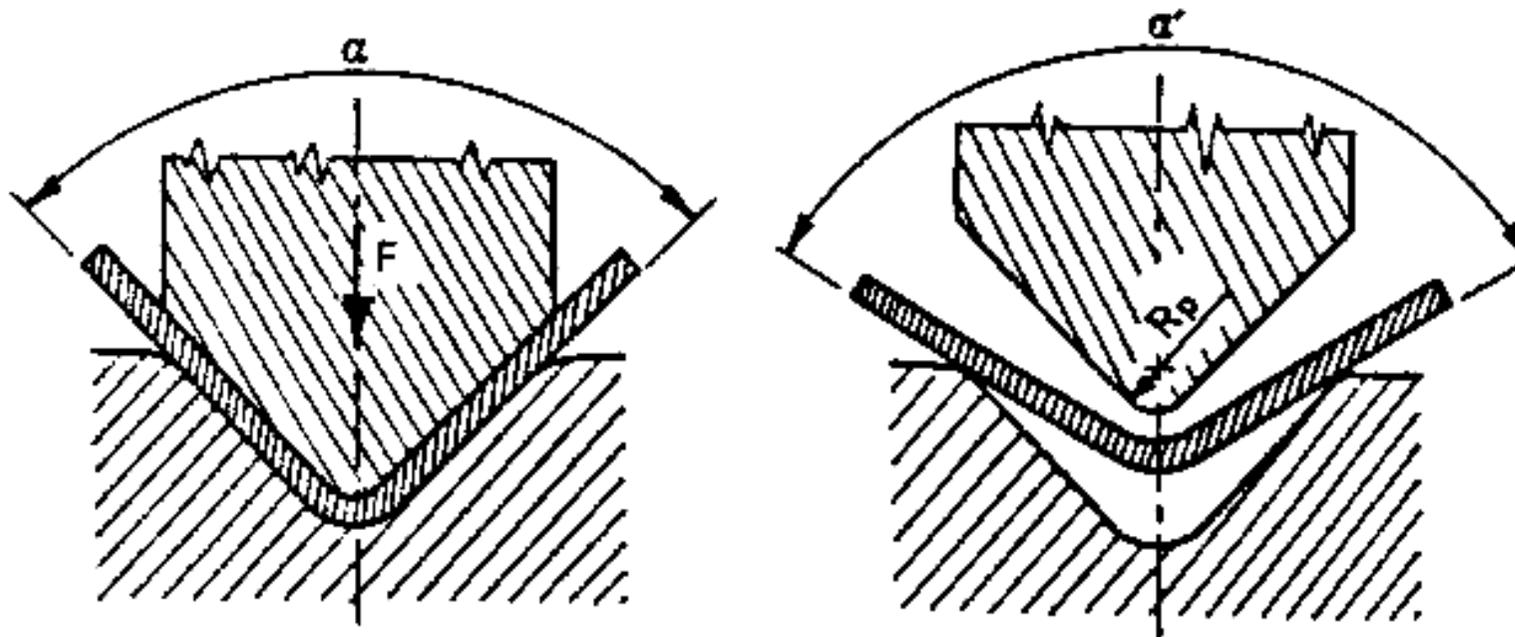


Fig. 9.1 - Piegatura a V e recupero elastico della lamiera.



# Progettazione dello stampo

- Il materiale ha un ritorno elastico. Gli angoli di piega dello stampo dovranno pertanto prevedere una maggiorazione rispetto agli angoli di piega del pezzo
- Esistono dei raggi minimi di curvatura al di sotto dei quali non è possibile scendere senza rompere o fessurare la lamiera
- Calcolo del raggio minimo di piegatura:

$$R_{\min} = 50s/A - s/2$$

Ove

- $s$  = spessore della lamiera
- $A$  = allungamento massimo percentuale del materiale
- Conviene prevedere una maggiorazione del 40% al fine di mantenere un certo margine di sicurezza

# Bordatura ed arricciatura

Fig. 9.8  
Operazione di bordatura  
(di bordi circolari).

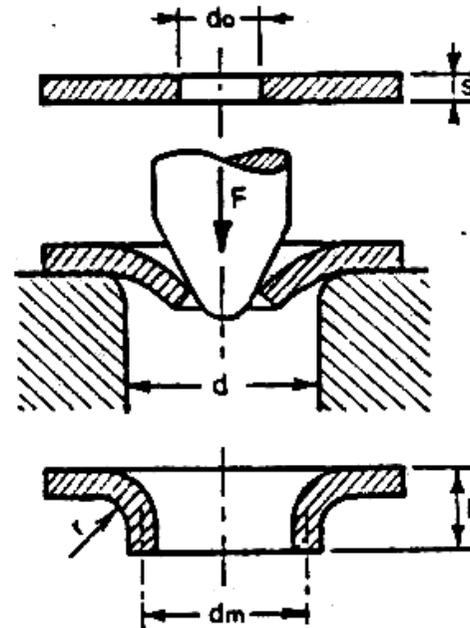
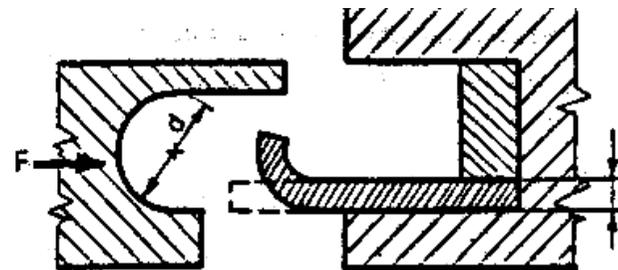
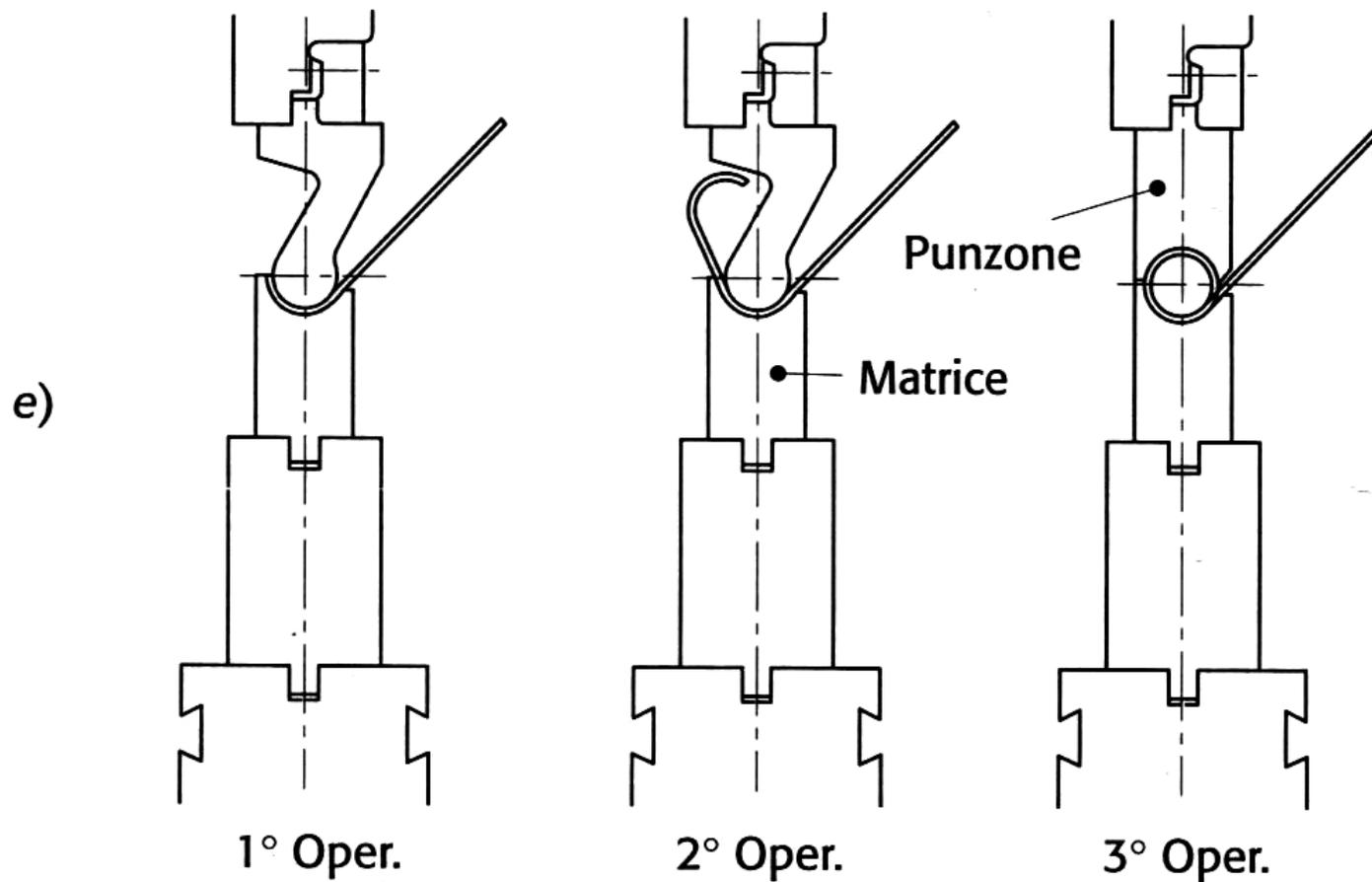
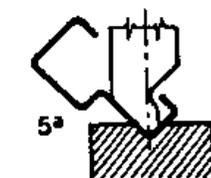
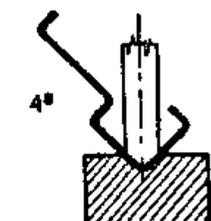
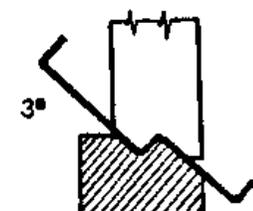
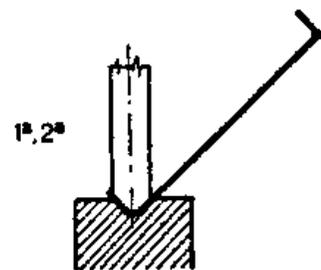


Fig. 9.7  
Operazione di arricciatura  
(di bordi rettilinei).

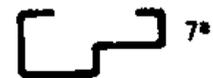


# Piegatura in più passaggi





piegatura alla pressa

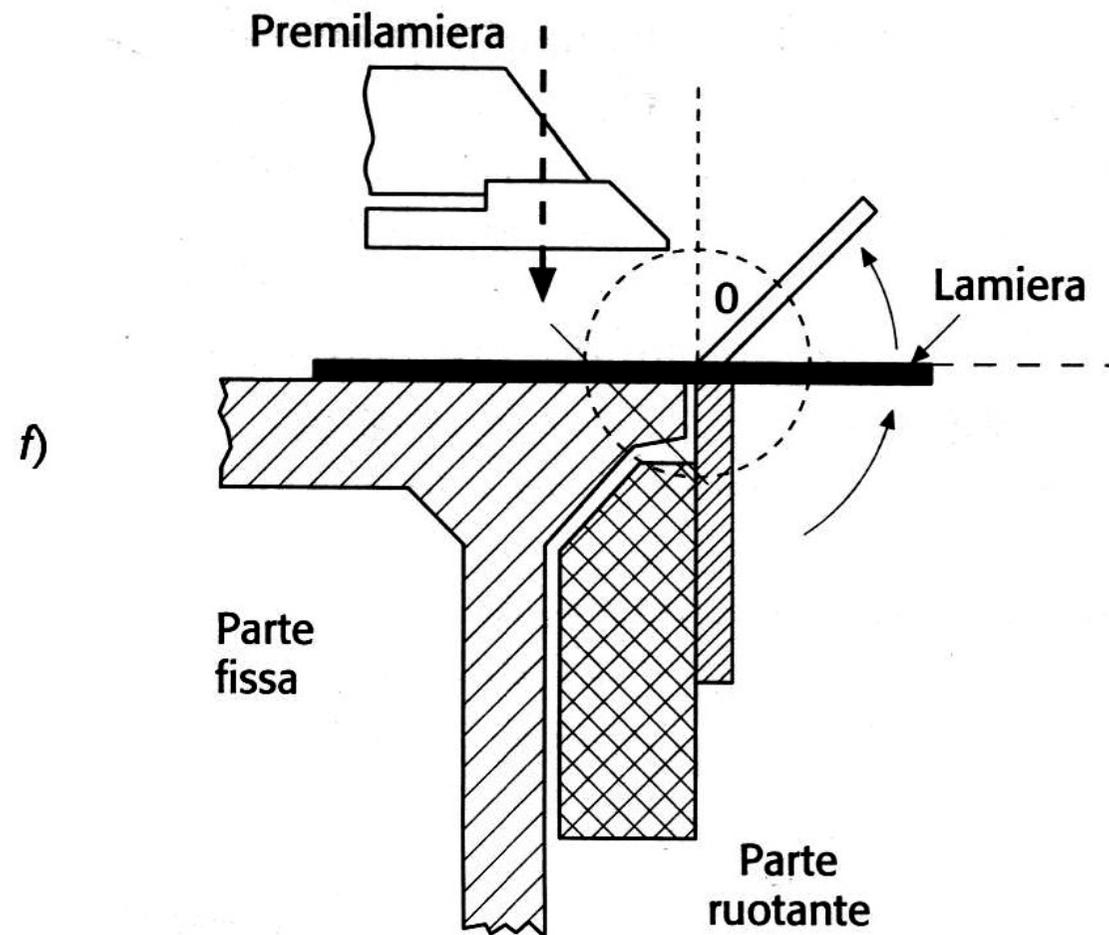


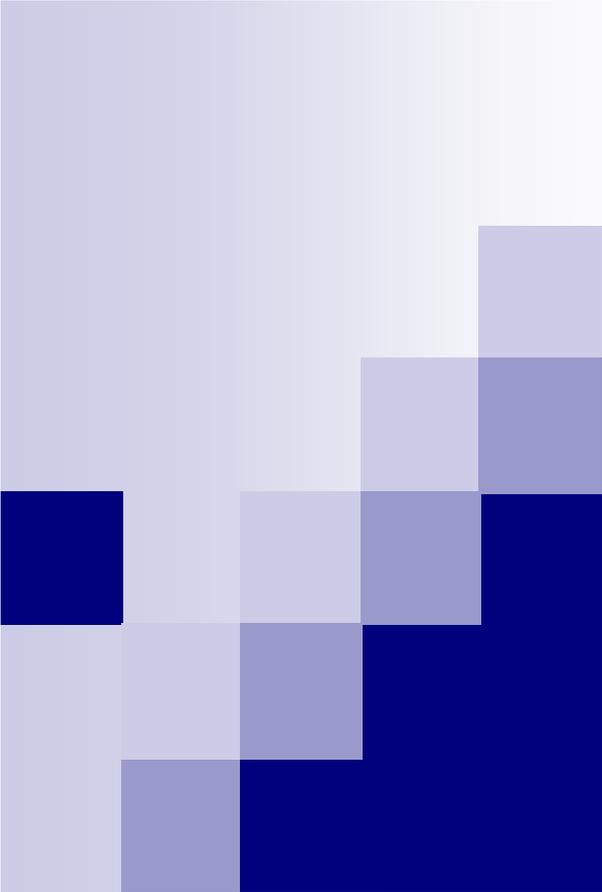
profilatura a rulli

Fig. 9.12 - Sequenza delle fasi nella piegatura alla pressa e nella profilatura a rulli.

(La 3ª operazione di piegatura puo' essere fatta in due passi con punzoni analoghi a quelli della 1ª e 2ª operazione).

# Piegatura tangenziale





# Imbutitura



# Imbutitura

- È il processo mediante il quale una lamiera piana viene sagomata secondo rilievi tridimensionali anche complessi
- È un processo utilizzato in gran parte nell'industria automobilistica, degli elettrodomestici e dei contenitori
- Gli stampi prevedono la presenza di un premilamiera ad evitare possibili grinze in corrispondenza di imbutiture profonde
- La qualità del materiale deve essere tanto migliore quanto più l'imbutitura è profonda
- Vengono generalmente utilizzate presse oleodinamiche
- Una parte essenziale ad evitare rotture e limitare le pressioni è svolta dalla lubrificazione:
  - Miscela di olio e grafite per acciaio
  - Petrolio grafitato per ottone e rame
  - Vaselina per leghe di alluminio
  - Acqua grafitata per acciai inossidabili



# Schema di imbutitura

- Disporre la lamiera piana su una matrice
- Bloccaggio della lamiera mediante l'applicazione di un prelamiera
- Un punzone mobile provvede a deformare il materiale e farlo scorrere entro il gioco previsto tra matrice e punzone
- Gli spigoli devono essere sufficientemente arrotondati

# Schema di imbutitura

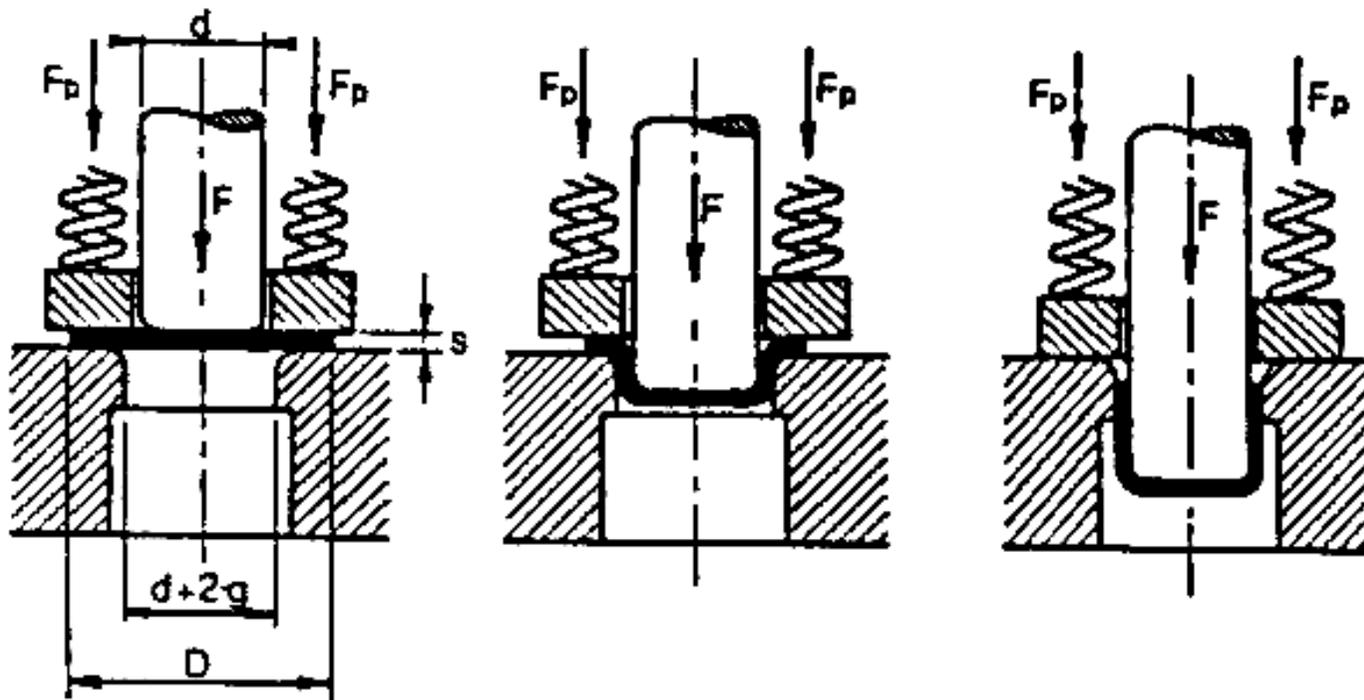


Fig. 9.27 - Schema di un'operazione di imbutitura.

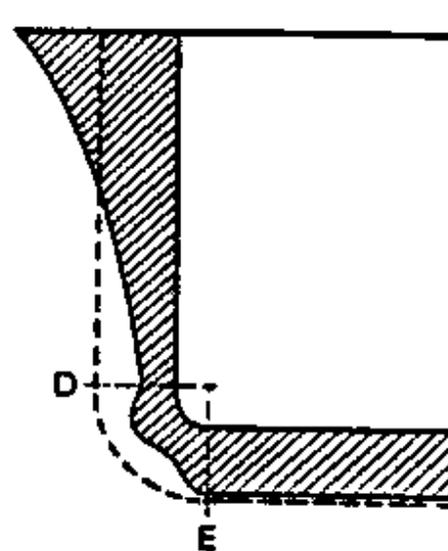
# Variazione di spessore

- La diminuzione di spessore sul fondo dell'imbutito ed in particolare sui raggi di flessione può provocare rotture nel caso di errata progettazione del pezzo o dello stampo, nonché per uso di materiale non adatto per profondo stampaggio

Fig. 9.29

Variazione di spessore in un imbutito.

Nel disegno la variazione di spessore è stata "esaltata" per meglio evidenziarla.





# Studio di un'operazione di imbutitura

- Forma e dimensioni della lamiera
- Dimensionamento dello stampo (matrice e punzone)
- Rapporto di imbutitura (numero di passaggi)
- Pressione e forza del premilamiera
- Forza di imbutitura
- Energia di imbutitura



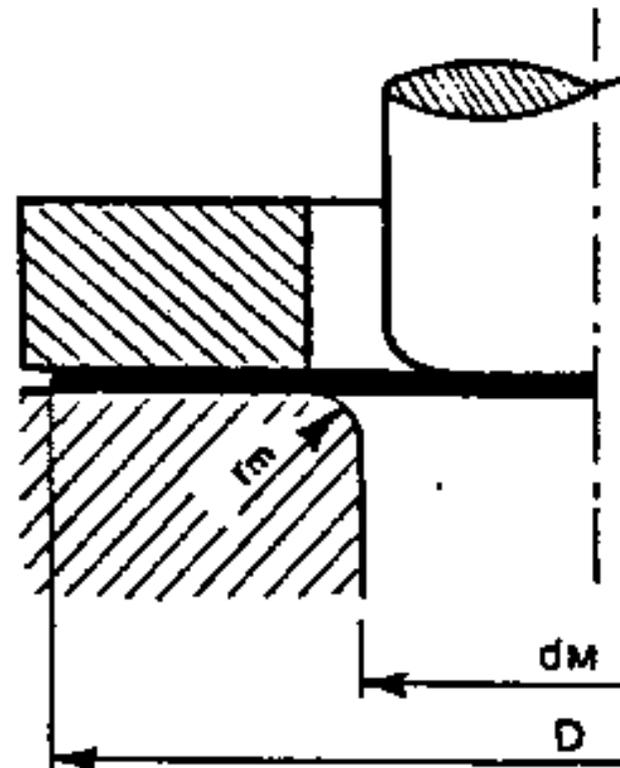
# Rapporto di imbutitura

- È stato definito come  $\beta_{tot} = D_i/d_f$
- Se tale valore è superiore a 1,70 - 2,0, allora, anche utilizzando acciai molto duttili a bassissimo tenore di carbonio, sarà necessario prevedere più passaggi.
- Nei passaggi successivi tale valore non potrà tuttavia essere maggiore di 1,15 - 1,30

# Dimensione matrice-disco

Fig. 9.31

Dimensioni della matrice e del disco.





# Pressione del prelamiera

- Tale pressione deve essere valutata con cura per bloccare la lamiera senza deformarla e deve rimanere dell'ordine di 1,0-2,5 N/mm<sup>2</sup>.



# Forza di imbutitura

- La forza massima si è verificato sperimentalmente presentarsi in concomitanza dello snervamento iniziale, quando il diametro di partenza si è ridotto a 0,8 del diametro iniziale

# Andamento della forza di imbutitura

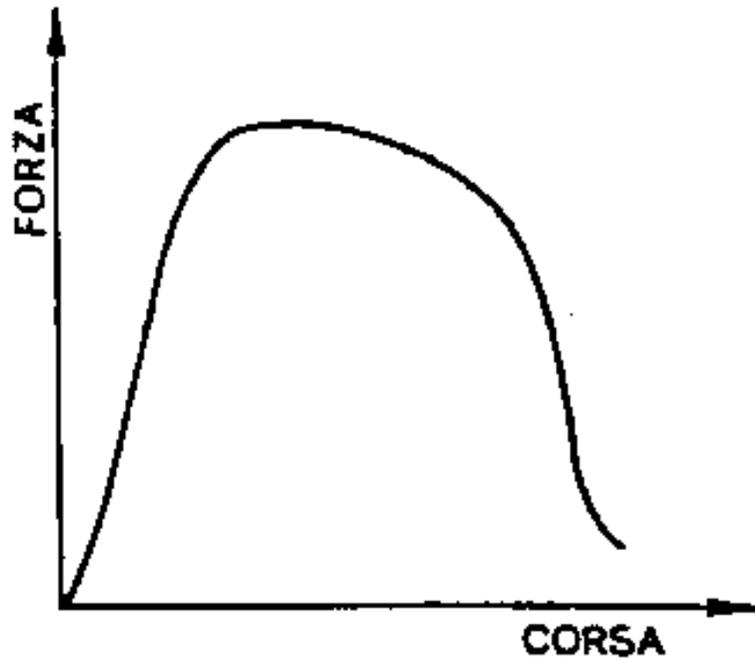


Fig. 9.32

Andamento della forza in funzione della corsa del punzone.

# Imbutitura in più passaggi

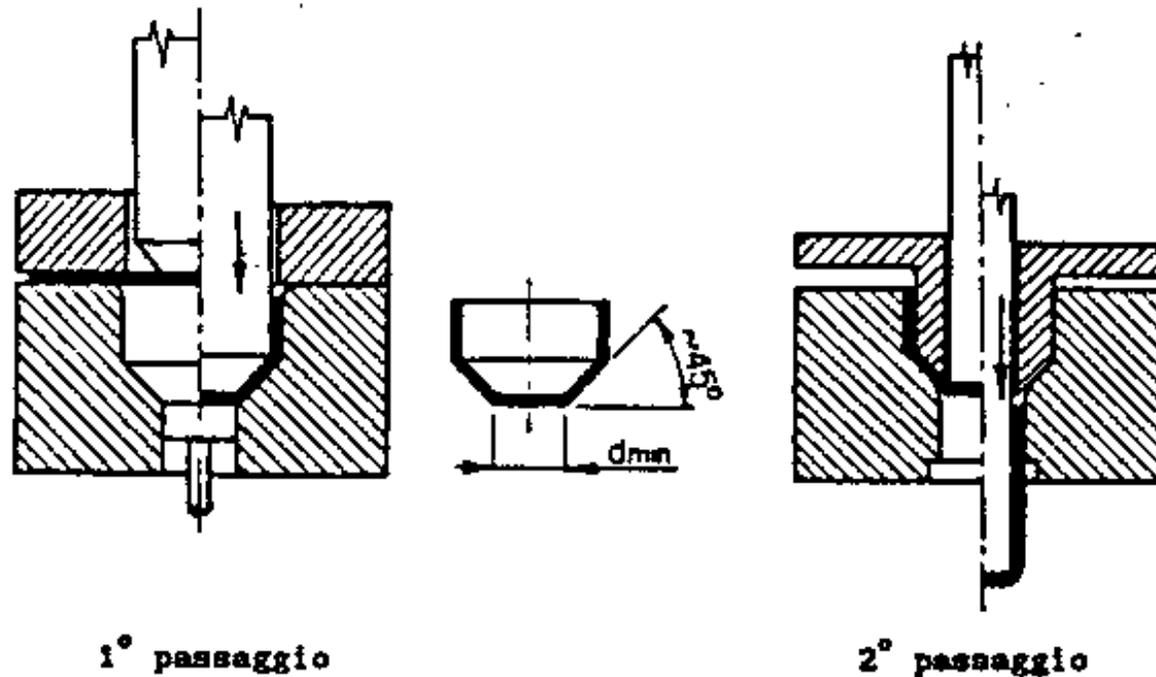


Fig. 9.34 - Imbutitura in due passaggi. Si noti l'estremità conica del punzone e della matrice al primo passaggio e quella del prelamiera (al secondo passaggio) la cui conicità è uguale a quella della matrice e del pezzo dopo il primo passaggio.



# Progettazione dello stampo di imbutitura

- Gioco tra matrice e punzone

- Il gioco deve essere sempre maggiore dello spessore  $s$  della lamiera
- Deve essere un compromesso per non consentire deformazioni non desiderate della lamiera ed evitare eccessivo assottigliamento del materiale
- Può essere approssimato con la seguente formula:

$$g = s + C\sqrt{s}$$

ove:

$C = 0,22$  per acciaio

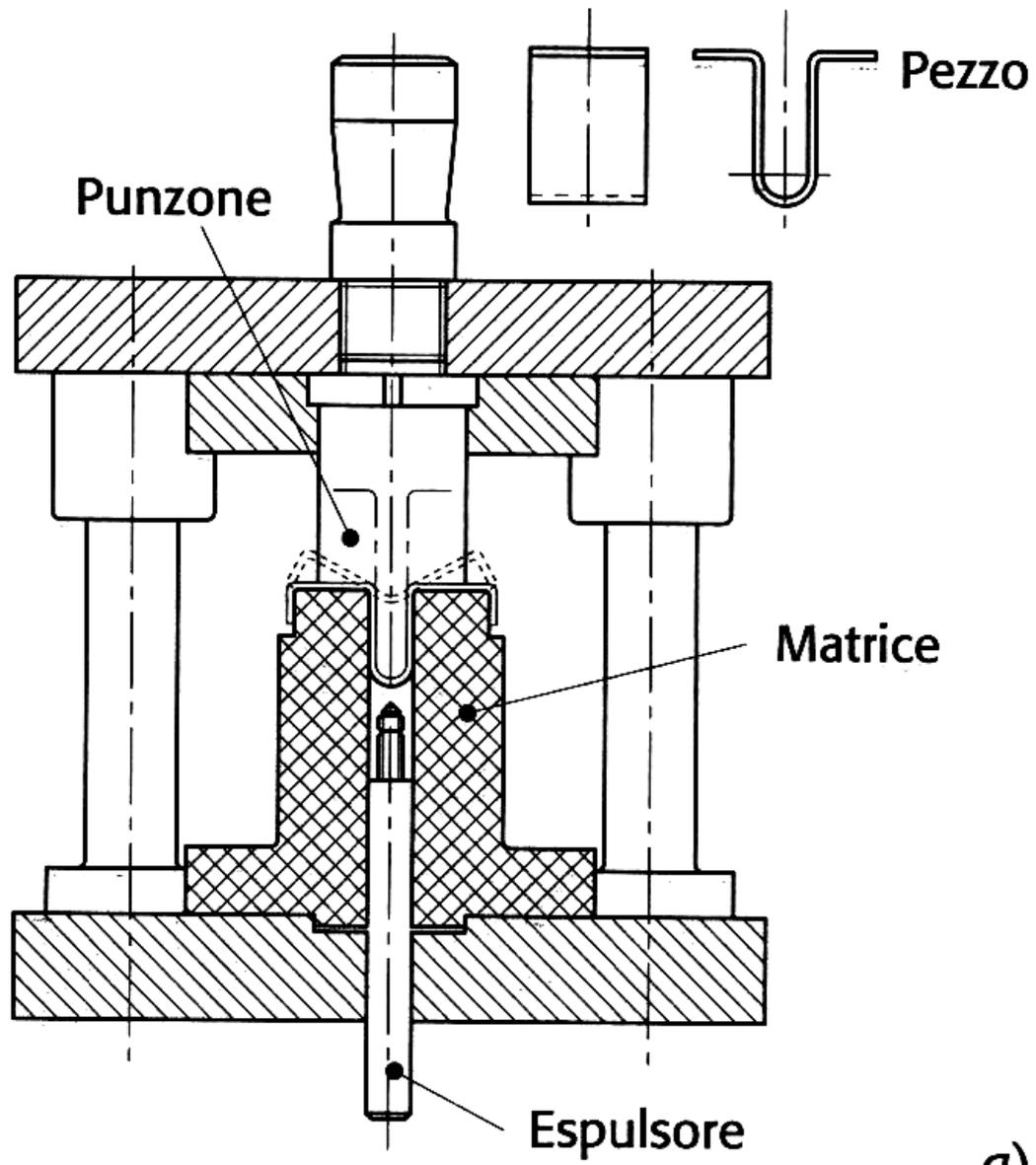
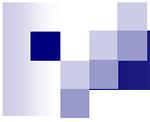
$C = 0,06$  per alluminio

$C = 0,12$  per materiali non ferrosi



# Progettazione dello stampo di imbutitura

- Raggio di arrotondamento della matrice
  - Il raggio non deve essere troppo piccolo per evitare possibili rotture ma nemmeno troppo grande per evitare grinze
- Raggio di arrotondamento del punzone
  - Il raggio non deve essere troppo piccolo per evitare possibili tranciature
- Pressione del premilamiera
  - La pressione del premilamiera deve essere tale da evitare eccessivo assottigliamento del materiale nelle zone critiche ed evitare nel contempo possibili grinze



a)



# Progettazione dello stampo di imbutitura

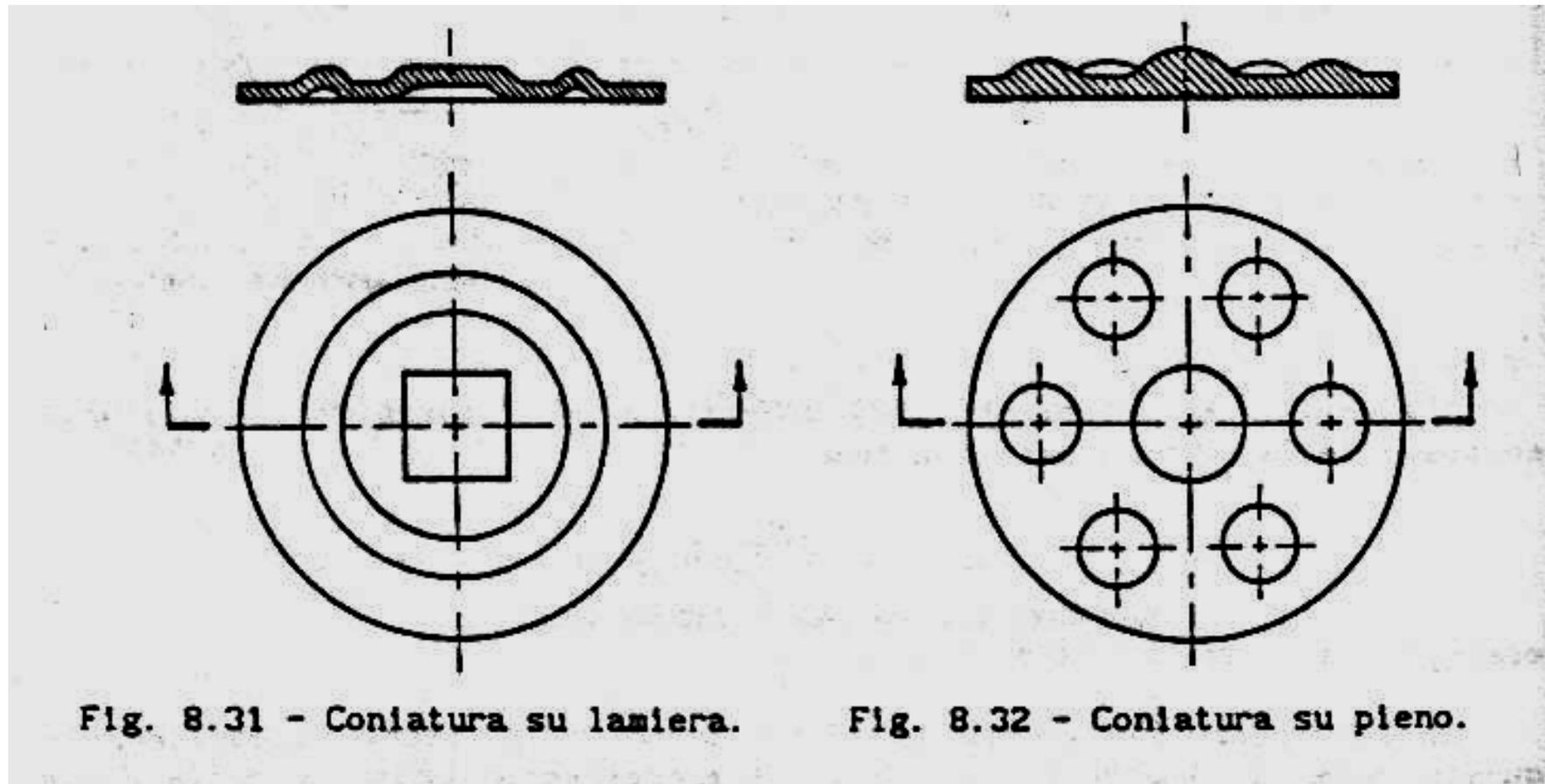
- Progettazione di stampi complessi:
  - una progettazione completa a tavolino non è possibile
  - È necessaria una grande esperienza insieme all'utilizzo di metodi sperimentali
  - Molto utilizzato per verificare lo stato di tensione delle lamiere è il metodo basato sulla tracciatura sulla lamiera di un reticolo di cerchi di diametro 5 mm distanziati di circa 3 mm. Dopo l'imbutitura si rilevano gli assi degli ellissi creati dalla deformazione dei cerchi valutando in tal modo il grado di tensione e quindi l'assottigliamento della lamiera in ogni punto.
  - Possibili interventi risolutivi:
    - Arrotondamento dei raggi di curvatura
    - Utilizzo di materiali più duttili
    - Posizionamento di rompigrinza nello stampo
    - Modifica della velocità di imbutitura
    - Modifica della pressione del premilamiera

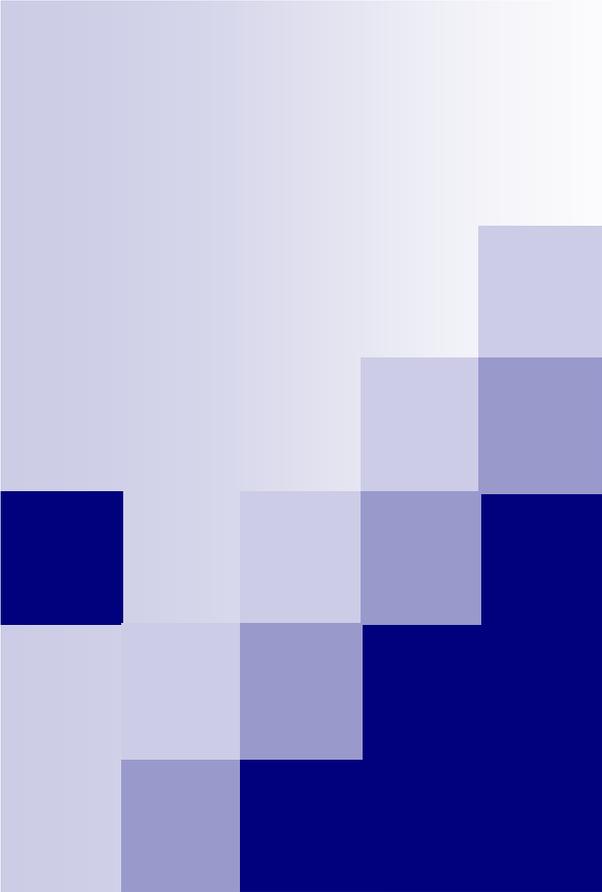


# Coniatura

- processo di imbutitura caratterizzato da:
  - Minima profondità di deformazione
  - Costanza dello spessore
- Consente anche di effettuare un'operazione di calibratura, ovvero migliorare la qualità dimensionale del pezzo
- Non sono ammessi giochi per evitare qualunque ritorno elastico del materiale
- Occorre valutare attentamente i possibili cedimenti elastici degli stampi

# Esempi di coniatura





# Curvatura o Calandratura



# Schema della lavorazione

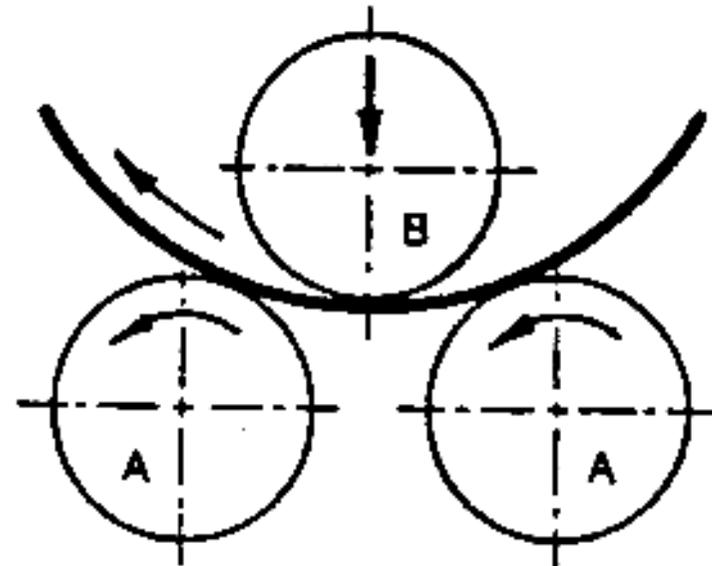
- Consiste nel curvare una superficie piana al fine di ottenere un cilindro
- L'apparecchio è definito da due cilindri motori fissi ed uno mobile regolabile che determina il raggio di curvatura

# Calandratura

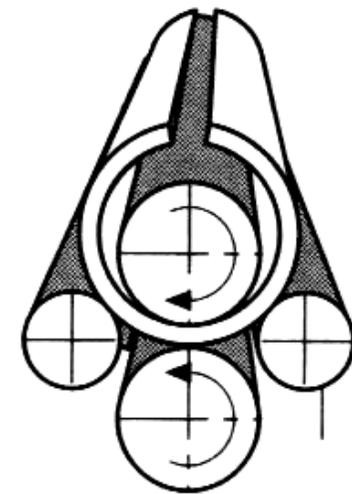
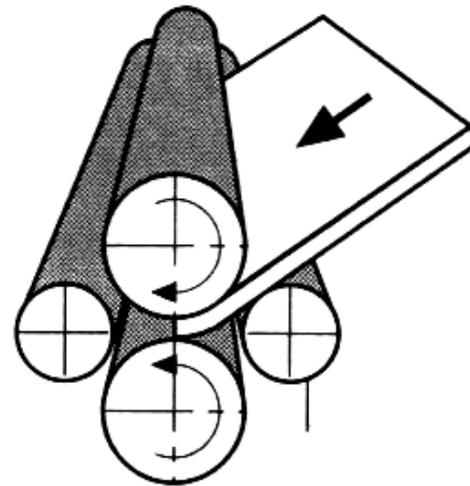
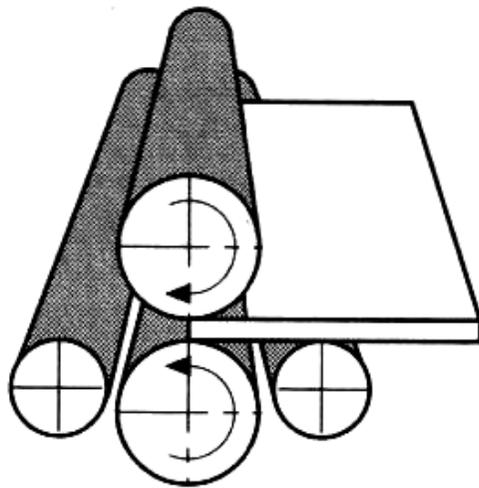
Fig. 9.13

Schema della curvatura.

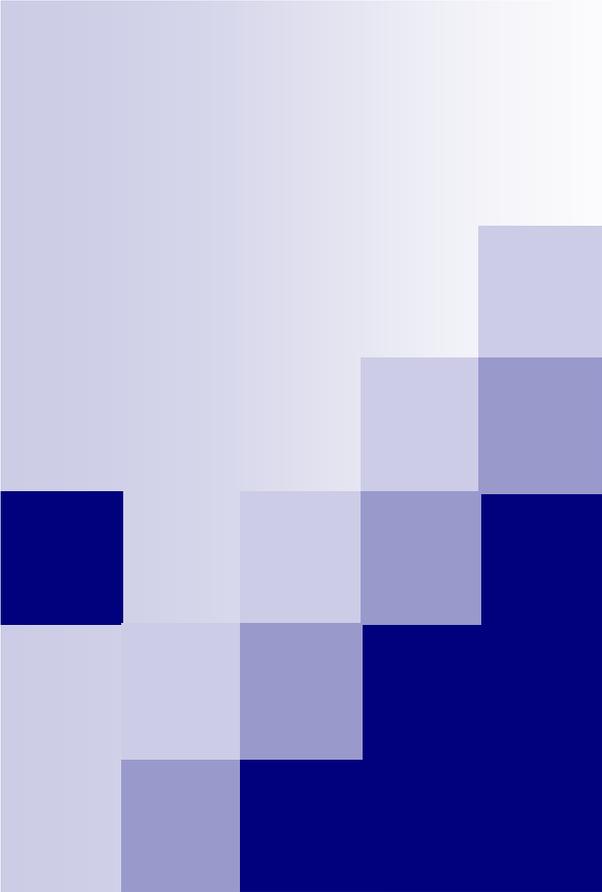
- A) cilindri motori,
- B) cilindro con moto verticale.



# Calandratura



d)



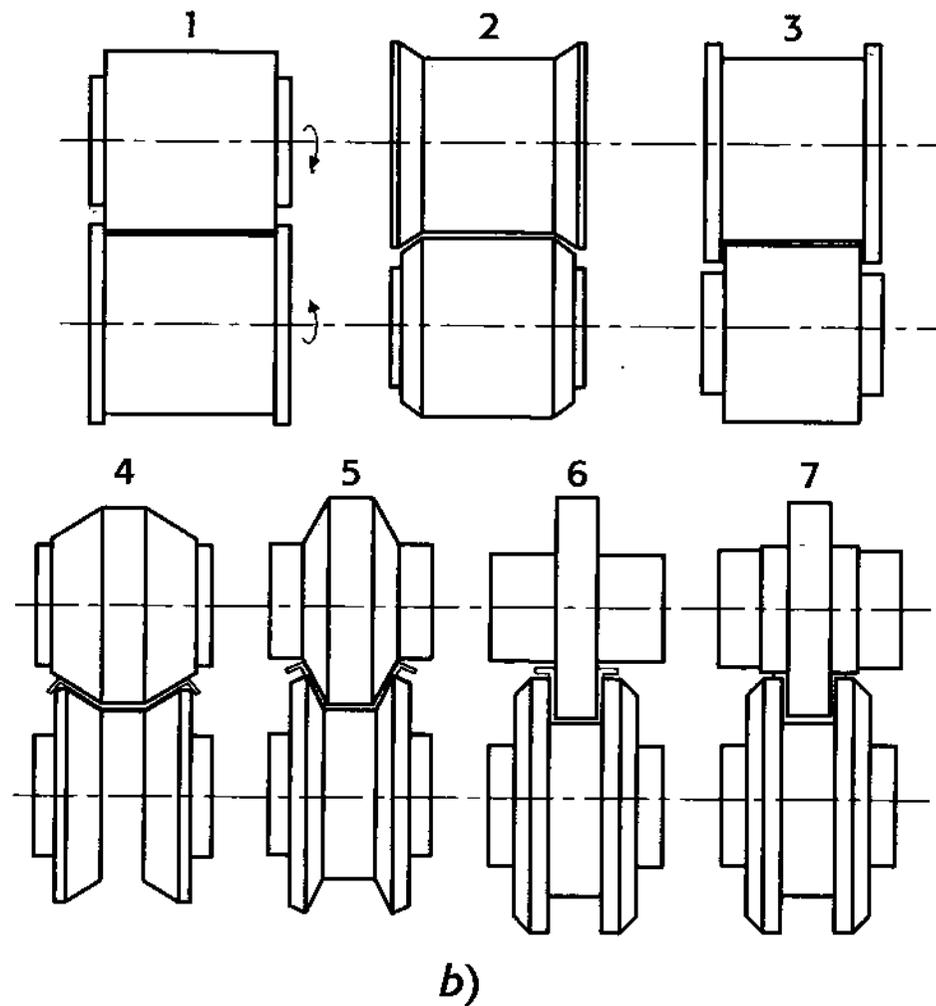
# Profilatura con rulli

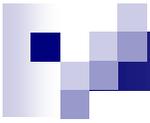


# Profilatura con rulli

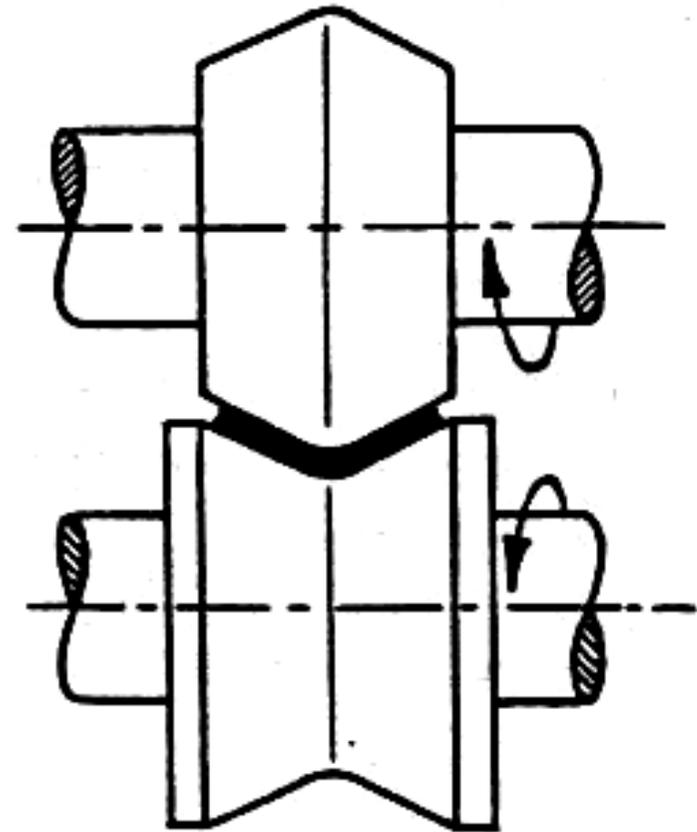
- È un processo che obbliga il nastro di lamiera a passare tra coppie di rulli che, appositamente sagomati, lo deformano secondo la piega voluta
- In funzione del profilo da realizzare occorre determinare il numero di passaggi (coppie di rulli)
- Il vantaggio della profilatura a rulli in luogo della piegatura tradizionale sta nel non avere limiti alla lunghezza del profilo in lavorazione

# Piega da nastro





**Fig. 9.9**  
**Schema della profilatura con rulli.**



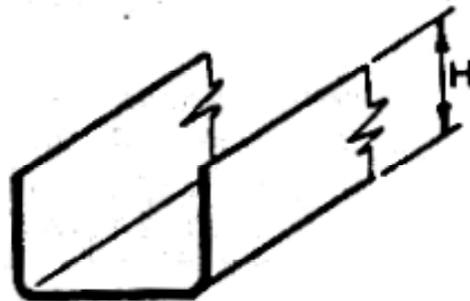
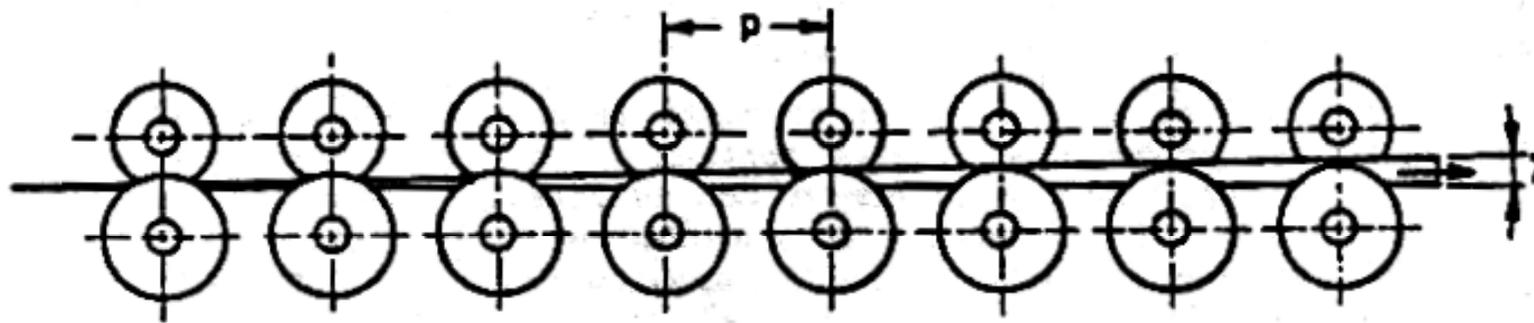
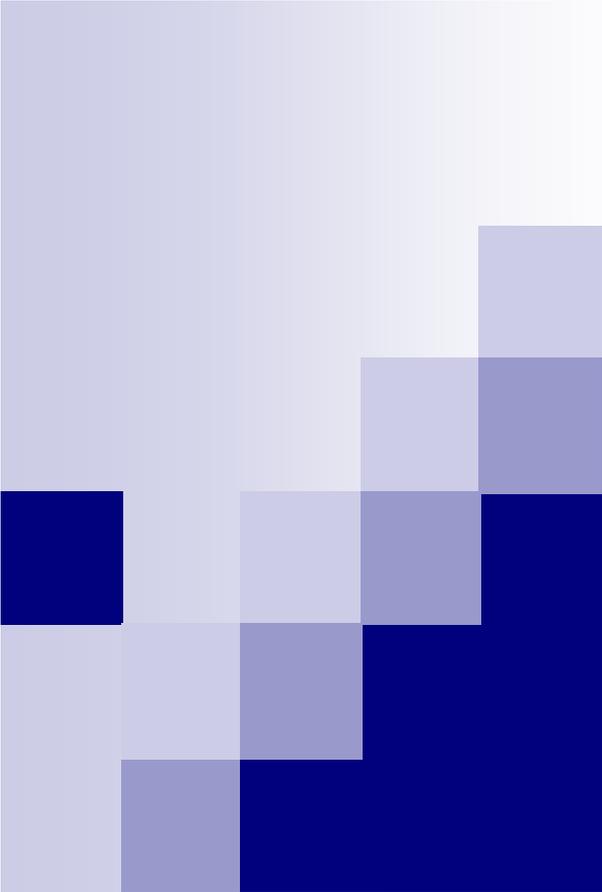


Fig. 9.10 - Linea di profilatura a rulli ( $\gamma$  = angolo di formatura).



# Esercitazione stampaggio a caldo

# Stampaggio a caldo

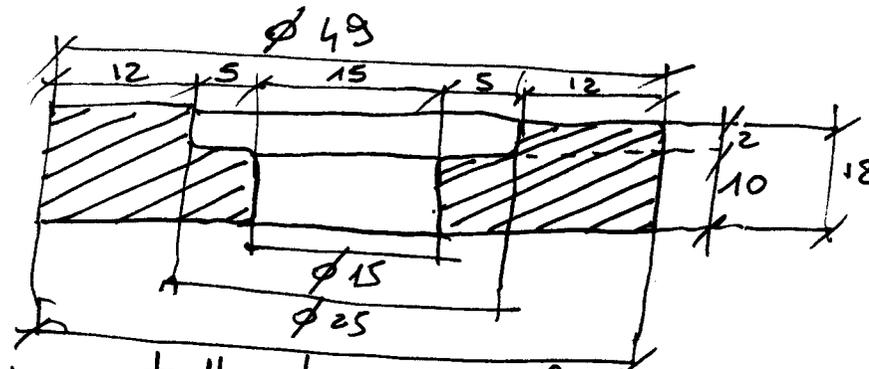
- Pezzo finito :

- Mat: C40

- Lavorazioni successive: tutte le superfici

- Progettazione :

- 1) Dimensionamento cavità dello stampo
- 2) Dimensionamento della camera scartabov
- 3) Determinazione del volume del pezzo
- 4) Determinazione della camera scartabov
- 5) Dimensionamento del semilavorato di partenza
- 6) Determinazione di forza ed energia

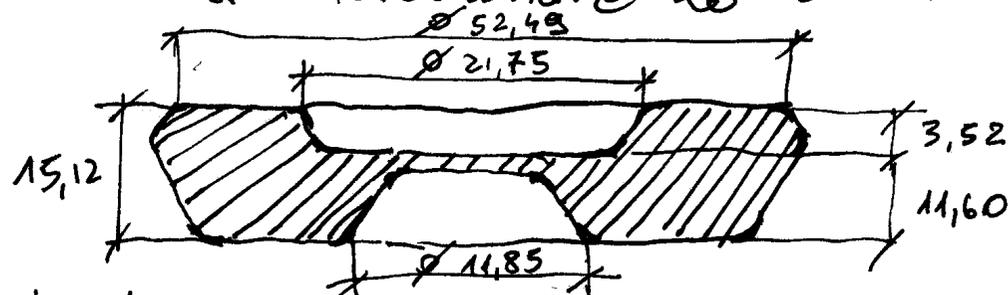


# 1) Dimensionamento cavità dello stampo

dalla Tab. 8.2 → sovrametallo 1,5 mm

dalla Tab. 8.3 → ritiro 1,0%

si può allora determinare lo sborzato:



quota	ritiro	sovrametallo	dim. sborzato
∅ 15	<del>14,85</del>	- 3	11,85
∅ 25	24,75	- 3	21,75
∅ 49	49,49	+ 3	52,49
2	2,02	+ 1,5	3,52
10	10,1	+ 1,5	11,60
12	12,12	+ 3	15,12

**Tabella 8.2 - Valori indicativi del sovrametallo**

<b>Dimensione (mm)</b>	<b>Sovrametallo (mm)</b>
< 40	0,5 + 1,5
40 + 80	1,0 + 2,0
80 + 150	1,5 + 2,5
150 + 250	2,0 + 3,0
250 + 500	2,5 + 4,0

**Tabella 8.3 - Valori del ritiro.**

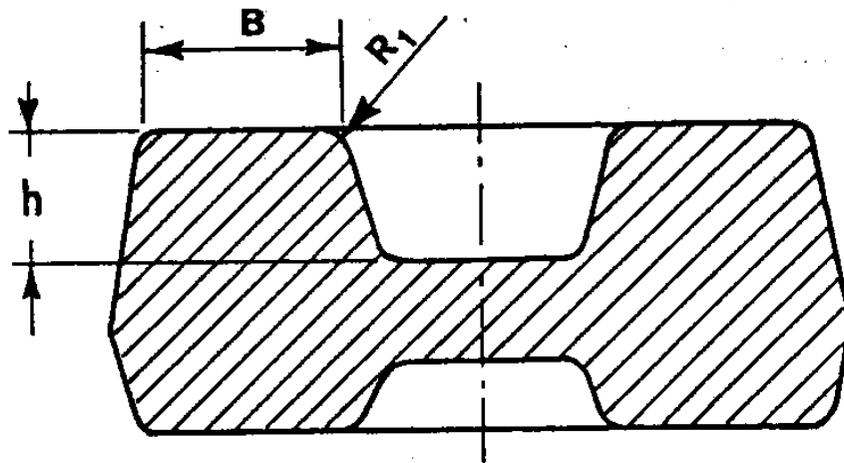
<b>Materiale</b>	<b>ritiro (%)</b>
<b>Acciai</b>	<b>1,0</b>
<b>Rame e bronzi</b>	<b>0,8</b>
<b>Ottoni e leghe legg.</b>	<b>0,9</b>

determinazione dei raggi di raccordo:

$\rightarrow$ dalla fig. 8.21:	$h/B$	$R$ spigoli
$h = [52,49 - 21,75/2]$	$\Rightarrow 15,37/3,52 = 4,37$	$\Rightarrow R = 0,07h + 0,5 = 0,81$
$h = [52,49 - 11,85/2]$	$\Rightarrow 20,32/11,60 = 1,75$	$\Rightarrow R = 0,05h + 0,5 = 0,59$

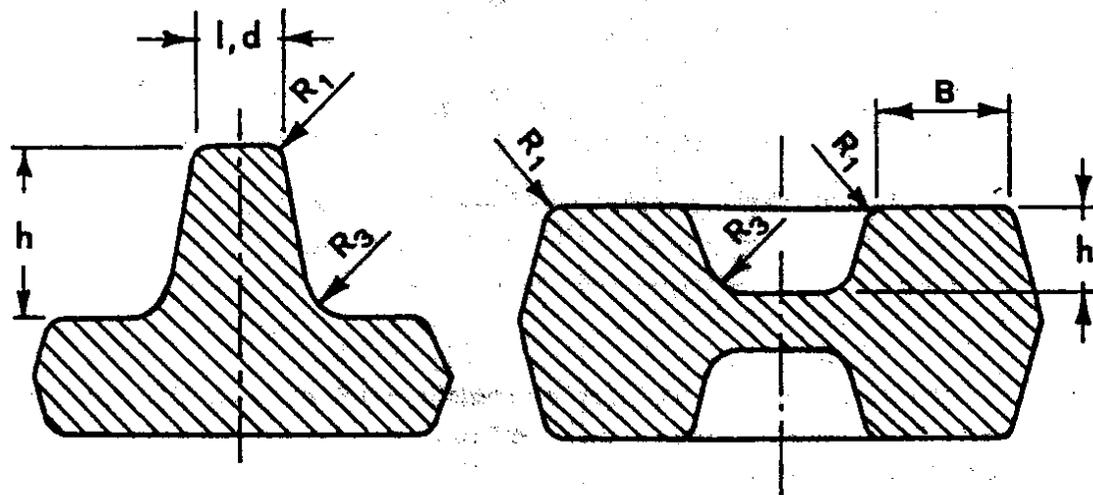
dato che il sovrametallo è pari a 1,5  $\Rightarrow R = 1,5$

$\rightarrow$ dalla fig. 8.22	$h/B$	$R$ angoli
	4,37	$0,5 + 3,5 \cdot (0,81) = 3,34$
	1,75	$0,5 + 2,5 \cdot (0,59) = 2,00$



$h/B$	$R_1$
$< 2$	$0,05 \cdot h + 0,5$
$2 \div 4$	$0,06 \cdot h + 0,5$
$> 4$	$0,07 \cdot h + 0,5$

Fig. 8.21 - Dimensionamento dei raggi di raccordo degli spigoli in funzione dei rapporti dimensionali del pezzo.



$\frac{h}{d}$ $\frac{h}{l}$ $\frac{h}{B}$	$R_3$
< 2	$2,5 \cdot R_1 + 0,5$
2 + 4	$3,0 \cdot R_1 + 0,5$
> 4	$3,5 \cdot R_1 + 0,5$

Fig. 8.22 - Dimensionamento dei raggi di raccordo degli angoli in funzione dei rapporti dimensionali del pezzo.

## 2) Dimensionamento della camera scutabava

$$s = 0,07 \frac{S}{P} \quad \text{ove: } \begin{cases} s = \text{spessore della bava} \\ S = \text{sezione del pezzo sul} \\ \text{piano di divisione} \\ P = \text{perimetro della sezione} \end{cases}$$

da cui

$$S = \pi r^2 = \pi \frac{52,49^2}{4} = \frac{\pi 2735,20}{4} = 2162,83$$

$$P = 2r\pi = 52,49 \cdot 3,14 = 164,82$$

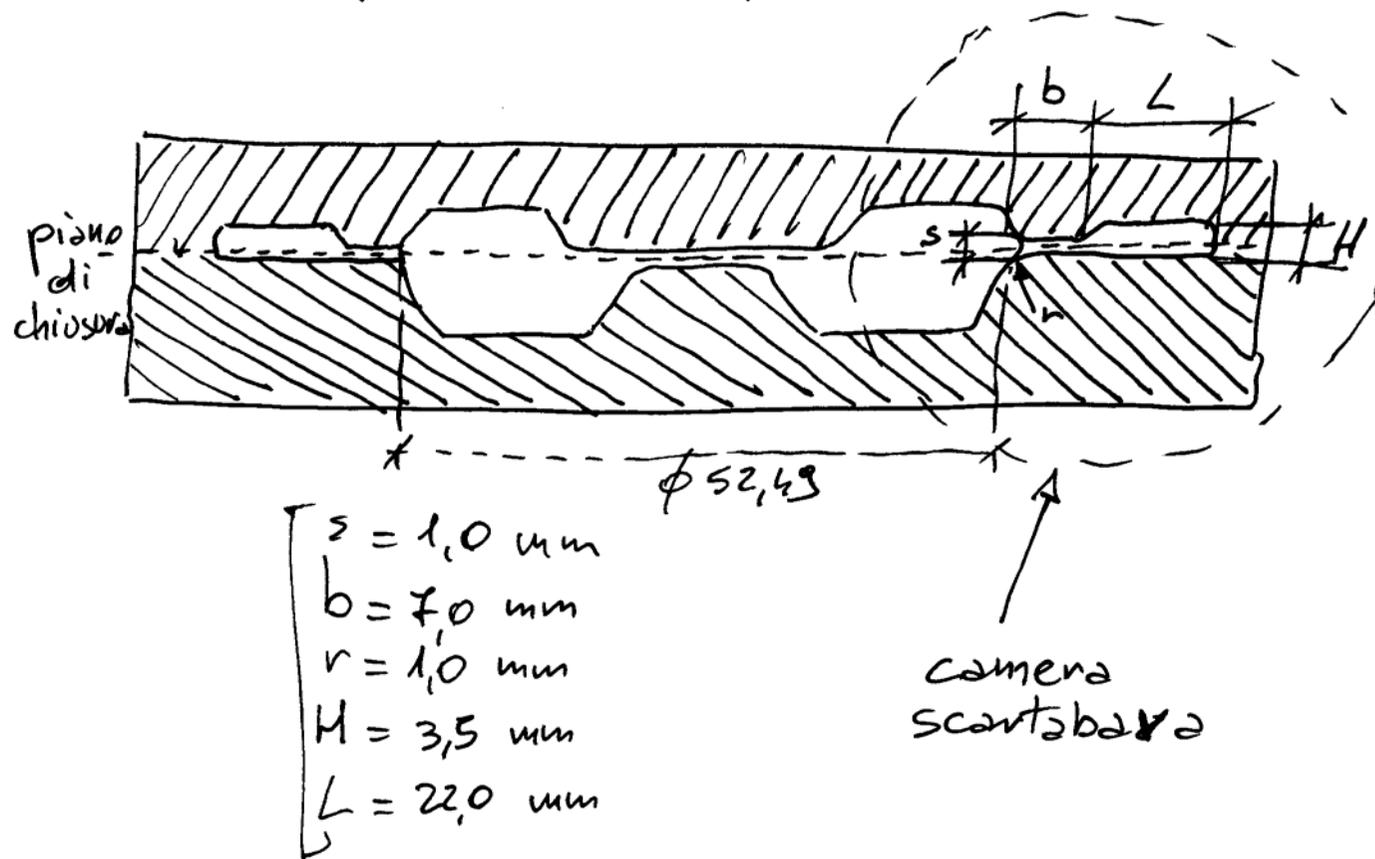
$$\rightarrow s = 0,07 \cdot \frac{2162,83}{164,82} \approx 0,92 \quad \rightarrow \boxed{s = 1 \text{ mm}}$$

$$\text{da cui, dalla tab. 8.1} \rightarrow \begin{cases} b = 7 \text{ mm} \\ r = 1,0 \text{ mm} \\ H = 3,5 \text{ mm} \\ L = 22 \text{ mm} \end{cases}$$

**Tabella 8.1 - Dimensioni della camera scartabava (mm).**

<b>s</b>	<b>b</b>	<b>r</b>	<b>H</b>	<b>L</b>
0,6	6	1,0	3,3	18
0,8	6	1,0	3,4	20
1,0	7	1,0	3,5	22
1,6	8	1,0	4,3	22
2,0	9	1,5	5,0	25
3,0	10	1,5	6,5	28
4,0	11	2,0	8,0	30
5,0	12	2,0	9,5	32
6,0	13	2,5	11,0	35
8,0	14	3,0	14,0	38
10,0	15	3,0	17,0	40

Il disegno dello stampo sarà allora:



### 3) Determinazione del volume del pezzo

Nel calcolo del volume  $v_p$  non si tiene conto degli angoli di spoglia e dei raggi di raccordo -

Un sovradimensionamento del materiale utilizzato assicura comunque il riempimento dello stampo fluendo nella camera scartabava -

$$\begin{aligned} v_p &= \frac{\pi}{4} 52,43^2 \cdot 15,12 - \frac{\pi}{4} 21,75^2 \cdot 3,52 - \frac{\pi}{4} 11,85^2 \cdot 11,60 = \\ &= 32702 - 1307 - 1279 = 30116 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

#### 4) Determinazione del volume della camera scartabera

- con riferimento al disegno dello stampo la camera scartabera risulta costituita da 2 corone circolari:

	lungh.	spess.	superf.	vol.
corona 1	7	2	$\frac{\pi \cdot (59,49^2 - 52,49^2)}{4} = 615 \text{ mm}^2$	1230 $\text{mm}^3$
corona 2	22	3,5	$\frac{\pi \cdot (81,49^2 - 59,49^2)}{4} = 2435 \text{ mm}^2$	8523 $\text{mm}^3$

Volume camera scartabera  $V_b = 1230 + 8523 = 9753 \text{ mm}^3$

## 5) Dimensionamento del semilavorato di partenza

Supponendo di dover riempire la camera scartabava almeno al 50% si avrà:

$$V_{\text{semilav.}}(T^{\circ}\text{stamp}) = V_p + 0,5V_b = 30116 + 0,5 \cdot 9753 = \\ = 34993 \text{ mm}^3$$

Utilizzando una ballella con rapporto  $\frac{H_0}{D_0} = 1,35$  e considerando il vuoto lineare 1%.

$$V_{\text{semilav.}}(T^{\circ}\text{amb}) = 34993 \cdot 0,97 = 33943 \text{ mm}^3 \\ 33943 = \pi D_0^2 \cdot \frac{H_0}{4} = \pi \cdot 1,3 \frac{D_0^3}{4} \Rightarrow D_0 = \sqrt[3]{\frac{33943 \cdot 4}{1,3 \cdot \pi}}$$

da cui  $D_0 = \sqrt[3]{33261} = 32,16$  ;  $H_0 = 1,35 \cdot D_0 = 43,42$

## 6) Determinazione di forza ed energia di stampaggio

supponiamo :  $T_{pezzo} = 1200 \text{ } ^\circ\text{C}$  ; velocità pressa =  $800 \text{ mm/s}$   
 $T_{bava} = 1100 \text{ } ^\circ\text{C}$  ; coeff. attrito  $f = 0,25$

altezza media del pezzo  $h_m = \frac{V_{tot}}{S_{up}} = \frac{34333}{\frac{\pi 53,43^2}{4}} = \frac{34333}{2178} = 12,60$

velocità di deformazione  $\dot{\epsilon} = \frac{v}{h_m} = \frac{800}{12,6} = 66,67 \text{ s}^{-1}$

superficie del pezzo =  $\pi \frac{52,43^2}{4} - \pi \frac{11,85^2}{4} = 2163 - 110 = 2053$   
superficie della bava =  $\pi \frac{(53,43^2 - 52,43^2)}{4} = \frac{\pi (3539 - 2759)}{4} = 615$

La resistenza media alla deformazione, della tabella 8,6 diventa:

$$\sigma_{\text{perro}} (1200^\circ\text{C}) \rightarrow \sigma_p' = n' \cdot \epsilon^{1/n'} = 52 \cdot 66,67^{0,2} = 154,67 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{bava}} (1100^\circ\text{C}) \rightarrow \sigma_b' = n' \cdot \epsilon^{1/n'} = 80 \cdot 66,67^{0,17} = 163,20 \text{ N/mm}^2$$

da cui si può ricavare la resistenza media alla deformazione:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_p' S_p + \sigma_b' S_b}{S_p + S_b} = \frac{154,67 \cdot 2053 + 163,20 \cdot 615}{2053 + 615} = 156,64 \text{ N/mm}^2$$

La forza massima sarà allora:

$$F_{\text{max}} = \sigma_m \cdot (S_p + S_b) \cdot \left(1 + 2f \frac{b}{s}\right) \eta = 156,64 (2053 + 615) \cdot \left(1 + 2 \cdot 0,25 \cdot \frac{7}{1}\right) \cdot 1$$

assumendo  $\eta = 1$

Tabella 8.6 - Valori di  $K'$  e di  $n$  per alcuni acciai.

Materiale	Temperatura (°C)	$K'$	$n$
C 15	900	158	0,102
	1000	123	0,121
	1100	86	0,147
	1200	59	0,185
C 40	900	145	0,130
	1000	105	0,140
	1100	80	0,170
	1200	52	0,200
C 60	900	145	0,129
	1000	109	0,135
	1100	77	0,162
	1200	53	0,189
39 NiCrMo 3	900	158	0,085
	1000	130	0,100
	1100	80	0,140
	1150	51	0,160
X 5 CrNi 18 10	900	257	0,040
	1000	185	0,081
	1100	138	0,091
	1200	94	0,108
100 Cr 6	900	167	0,117
	1000	112	0,128
	1100	85	0,141
	1200	77	0,116

**Tabella 8.7 - Valori del coefficiente di attrito  $f$**

<b>Materiale</b>	<b><math>f</math></b>
acciai	0,20 + 0,25
ottoni	0,12 + 0,17
leghe Al	0,30 + 0,35

**Tabella 8.8 - Valori di  $\eta$**

$L_u/L_a$	$\eta$
1	1,00
2	1,08
5	1,20
10	1,35


$$F_{max} = 156,64(2668) \cdot 4,5 = 1880,6 \text{ kN}$$

La corsa di stampaggio del semilevato sarà

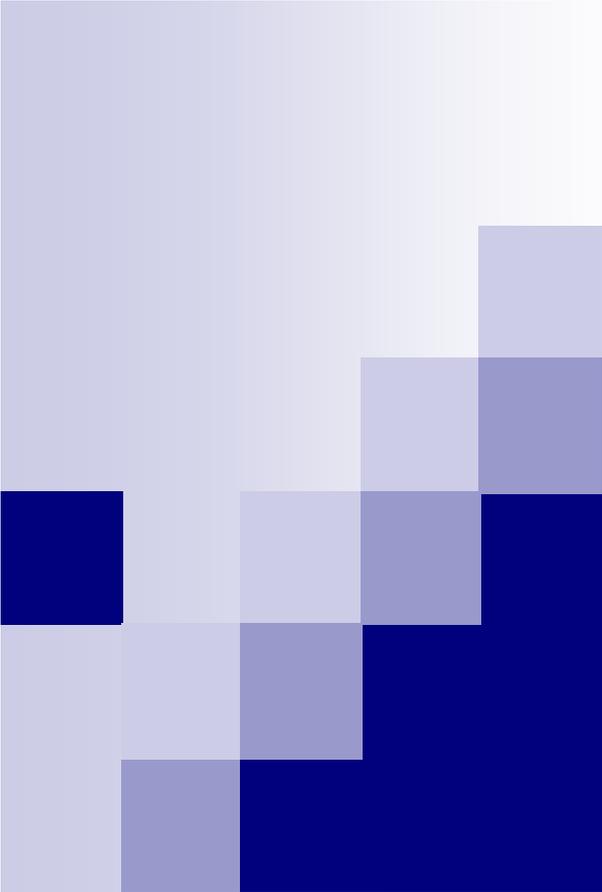
$$c = H_0 - H = 43,42 - 3,5 = 39,92 \text{ mm}$$

L'energia di deformazione sarà allora

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

$$= 0,2 \cdot 1880,6 \cdot 39,92 = 15015 \text{ kNm}$$

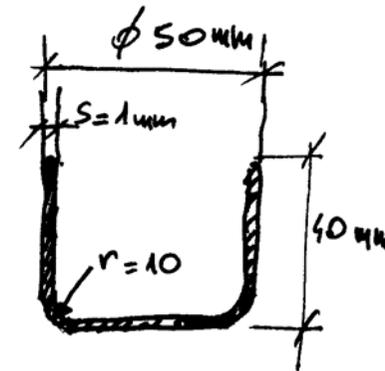
ricordando che  $\lambda = (0,15 ; 0,25)$



# Esercitazione di stampaggio a freddo

## Stampaggio a freddo

Si deve realizzare il pezzo in figura:



Caratteristiche: Mat. FePO4  
spessore  $s = 1\text{ mm}$

Operazioni: imbutitura + Tranciatura  
Hp: spessore costante durante le operazioni  
Fasi:

- 1) Definizione dello sviluppo dell'imbutito e dunque del cerchio di partenza
- 2) Determinare il rapporto di imbutitura e dunque il n° di passaggi necessari.
- 3) Calcolare Forza ed Energia necessarie.
- 4) Dimensionamento punzone e matrice.

## 1) Definizione dello sviluppo

Suddivisione del pezzo nelle forme elementari;

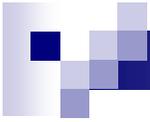
a) fondo:  $S_1 = \pi \frac{d^2}{4} = \pi \frac{30^2}{4} = 706,50 \text{ mm}^2$

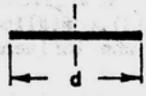
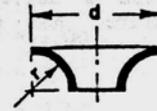
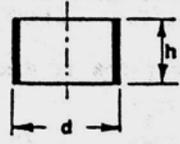
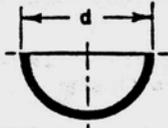
b) raccordi:  $S_2 = \frac{\pi (\pi \cdot d \cdot r + 4 r^2)}{2} = \frac{\pi (\pi \cdot 30 \cdot 10 + 4 \cdot 100)}{2} = 2106,94 \text{ mm}^2$

c) cilindro:  $S_3 = \pi \cdot d \cdot h = \pi \cdot 50 \cdot 40 = 6280 \text{ mm}^2$

Da cui il disco di partenza:

$$ES = \pi \frac{d^2}{4} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{4 \cdot ES}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 9053,44}{3,14}} = 107,63 \text{ mm}$$



 $\pi \cdot d^2 / 4$	 $\pi \cdot (\pi \cdot d \cdot r + 4 \cdot r^2) / 2$
 $\pi \cdot (d_2^2 - d_1^2) / 4$	 $\pi \cdot (\pi \cdot d \cdot r - 4 \cdot r^2) / 2$
 $\pi \cdot d \cdot h$	 $\pi \cdot d^2 / 2$

## 2) Rapporto di imbutitura e n° passaggi

$$B_{1max} = B_{id} \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5 \cdot C_6$$

Assunzioni : FePO<sub>4</sub> →  $B_{id} = 2,35$

lubrif. normale →  $C_1 = 0,95$

rapporto punzone 3 →  $C_2 = \left(\frac{r_p 3}{5 \cdot 1}\right) = 0,95$

rapporto matrice 5 →  $C_3 = 0,96$

diametro di partenza 107,63 →  $C_4 = 0,98$

tranciatura da nastro →  $C_5 = 0,80$

stadio (n° passaggio) →  $C_6 = 1,00$

da cui :

$$\begin{aligned} B_{1max} &= 2,35 \cdot 0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,96 \cdot 0,98 \cdot 0,80 \cdot 1,00 = \\ &= 1,60 \end{aligned}$$



**$\beta_{1d}$  dipende dal tipo di materiale e assume i seguenti valori:**

Fe P02	$\beta_{1d} = 2,20$
Fe P03	$\beta_{1d} = 2,30$
Fe P04	$\beta_{1d} = 2,35$
P-Cu Zn 37	$\beta_{1d} = 2,33$
P-Cu Zn 28	$\beta_{1d} = 2,38$
P-Al 99,5	$\beta_{1d} = 2,15$



**C<sub>1</sub>** tiene conto del tipo di lubrificazione. Al diminuire dell'efficacia della lubrificazione, aumentano le sollecitazioni di attrito e quindi la forza necessaria per imbutire. Aumenta di conseguenza il pericolo di rotture della parte già imbutita che, nella zona prossima al fondello, vede lo spessore minore di quello di partenza:

lubr. ottima	$C_1 = 1,00$
lubr. normale	$C_1 = 0,95$
a secco	$C_1 = 0,85$



**C<sub>2</sub> tiene conto del raggio del punzone  $r_p$  rispetto allo spessore  $s$  e quindi dello stato di sollecitazione per flessione:**

$$r_p/s = 10 \qquad C_2 = 1,00$$

$$r_p/s = 3 \qquad C_2 = 0,95$$

$$r_p/s = 1 \qquad C_2 = 0,90$$



**C3** tiene conto del raggio della matrice  $r_m$  rispetto allo spessore  $s$   
(fattore analogo a C2):

$$r_m/s = 10 \quad C3 = 1,00$$

$$r_m/s = 5 \quad C3 = 0,96$$

$$r_m/s = 1 \quad C3 = 0,87$$



**C<sub>4</sub>** tiene conto del diametro (del disco di partenza o dell'imbutito del passaggio precedente) rispetto allo spessore **s**. Infatti al diminuire dello spessore, a parità di diametro, aumenta la tendenza alla formazione di grinze, quindi e' necessario aumentare la pressione del premilamiera e di conseguenza usare rapporti di imbutitura minori:

$$D/s = 50 \qquad C_4 = 1,00$$

$$D/s = 100 \qquad C_4 = 0,98$$

$$D/s = 500 \qquad C_4 = 0,90$$



Cs tiene conto del tipo di isolamento, cioè se il disco di partenza è completamente isolato, oppure parzialmente vincolato al nastro (tale vincolo è necessario nelle lavorazioni automatiche dove il disco, parzialmente tranciato, rimane solidale al nastro e avanzando con questo passa sotto i vari punzoni di imbutitura e di tranciatura finale per il completo distacco dal nastro). È evidente che il vincolo del disco al nastro impedisce alla lamiera di scorrere liberamente nella matrice:

isolamento al 100 %	Cs = 1,00
isolamento al 95 %	Cs = 0,98
isolamento al 85 %	Cs = 0,95
senza isolamento	Cs = 0,80



Cs tiene conto del passaggio in esame, infatti all'aumentare del numero di passaggi il rapporto di imbutitura deve essere meno drastico a causa dell'incrudimento che il materiale subisce e dell'assottigliamento che l'imbutito presenta in corrispondenza del fondello:

primo passaggio	Cs = 1,00
secondo passaggio	Cs = 0,70
terzo passaggio	Cs = 0,65
quarto passaggio	Cs = 0,60

il diametro medio ottenibile senza  
allena:

$$d_{1m} = \frac{D}{B_{1max}} = \frac{107,63}{1,60} = 67,27 > 50$$

servono  
più passaggi!

verifichiamo altre possibilità:

- a) lubrificazione ottima  $\rightarrow C_1 = 0,95 \rightarrow 1,00$
- b) vespigio punzone 10  $\rightarrow C_2 = 0,95 \rightarrow 1,00$
- c) vespigio matrice 10  $\rightarrow C_3 = 0,95 \rightarrow 1,00$
- d) pre trancio  $\rightarrow C_5 = 0,80 \rightarrow 1,00$

$$B_{1max} = 2,35 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,98 \cdot 1 \cdot 1 = 2,3$$

da cui

$$d_{1m} = \frac{107,63}{2,3} = \underline{46,80 < 50}$$

diventa necessario  
fare valutazioni  
in merito a

- costo stampa
- tempo lavorazione
- lotto di produzione
- modifica ciclo
- .....

↳ dunque con un  
pre-trancio  
del disco è  
evitabile un  
2° passaggio  
di imbutitura

Ipotizziamo di prevedere tale soluzione.

### 3) Determinazione di Forza ed Energia

$$F_{max} = \lambda \cdot \pi \cdot d \cdot s \cdot R_m$$

$$\begin{aligned} \text{calcoliamo } \lambda &= 1,1 \cdot \frac{(B_1 - 1)}{(B_{max} - 1)} = 1,1 \cdot \frac{\left(\frac{107,63}{50} - 1\right)}{(2,3 - 1)} = \\ &= 1,1 \cdot \frac{1,15}{1,3} = 0,97 \end{aligned}$$

da cui :

$$F_{max} = 0,97 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1 \cdot 320 = 48,83 \text{ kN}$$

↑  
da tabella conichi ammissibili

**Tabella 9.5 - Valori di  $k_t$  per diversi tipi di acciai. Il campo di variabilita' dipende dallo stato di incrudimento.**

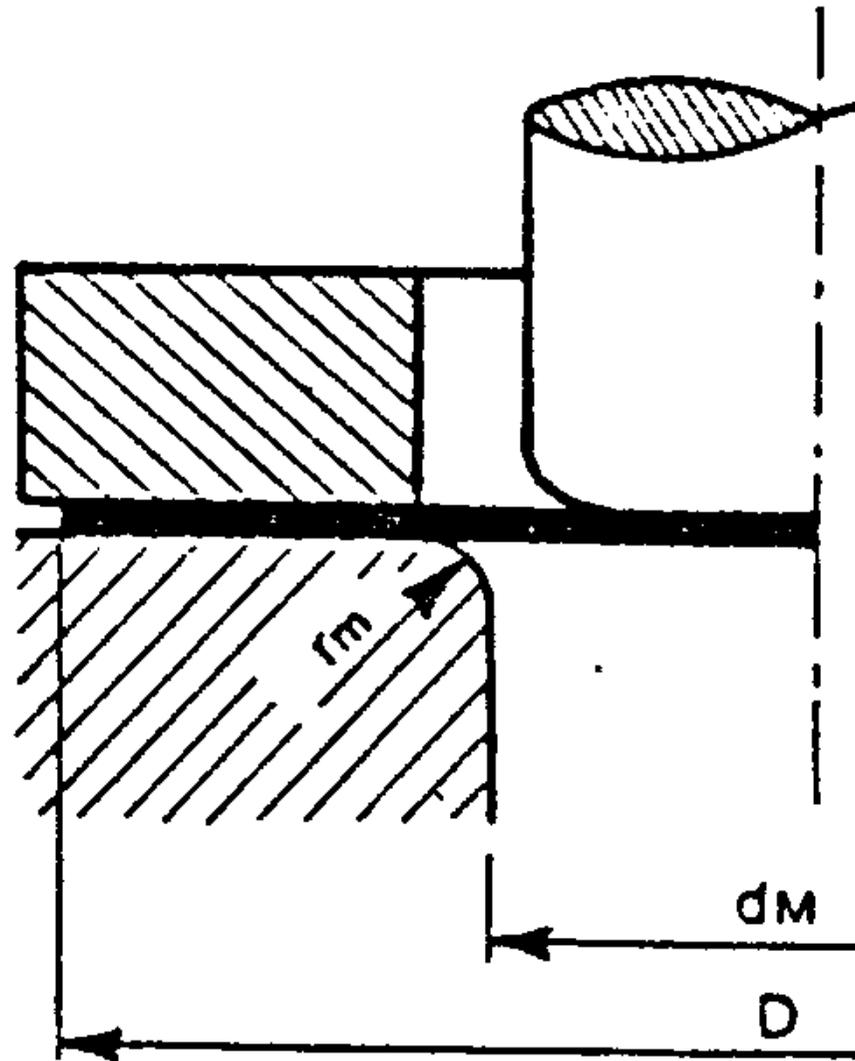
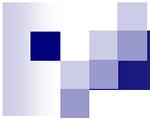
MATERIALE	$k_t$ (N/mm <sup>2</sup> )
Fe P00	280 + 350
Fe P01 e Fe P02	240 + 300
Fe P03 e Fe P04	250 + 320
C 10	280 + 340
C 30	400 + 500
C 50	550 + 650
C 70	700 + 900
Inossidabile ferrit.	350 + 550
Inossidabile austen.	400 + 600

Calcoliamo la forza da esercitare  
sul premilumiere:

$$\begin{aligned} p_{\min} &= \frac{R_m \left[ (\beta - 1)^2 + 0,005 \cdot d_{1m} / s \right]}{400} = \\ &= \frac{320 \left[ (2,15 - 1)^2 + 0,005 \cdot 50 \right]}{400} = \\ &= \frac{320 \left[ 1,32 + 0,25 \right]}{400} = 1,26 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

la forza sarà allora (vedi figura):

$$\begin{aligned} F_p &= p_{\min} \cdot S = 1,26 \cdot \pi \left[ D^2 - (d_{\text{str.}} + 2 \cdot r_{\text{str.}})^2 \right] / 4 = \\ &= 1,26 \cdot \pi \left[ 107,63^2 - (51,44 + 2 \cdot 10)^2 \right] / 4 = 6,41 \text{ kN} \end{aligned}$$



Calcoliamo allora l'energia necessaria.

→ la corsa di deformazione, trattandosi di 1 solo passaggio è pari all'altezza del pezzo:  $H_d = 40 \text{ mm}$

da cui:

$$E = \lambda \cdot F_{\max} \cdot H_d + F_p \cdot H_d =$$

estraindo dal nomogramma  $\lambda \approx 0,85$  si ha:

$$\begin{aligned} E &= 0,85 \cdot 48,89 \cdot 40 + 6,61 \cdot 40 = \\ &= 1662,26 + 264,40 = 1926,66 \text{ KNmm} = 1926,66 \text{ Nm} \end{aligned}$$

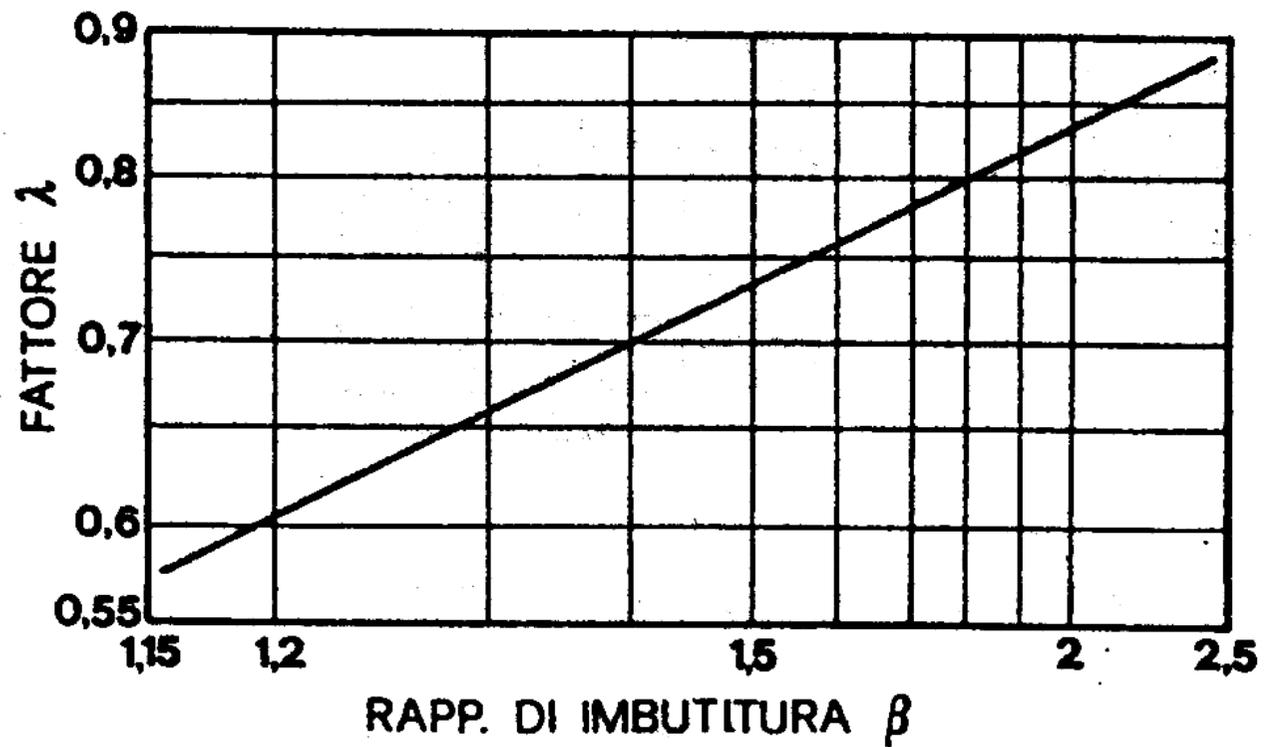


Fig. 9.33 - Valori del fattore  $\lambda$  in funzione del rapporto di imbutitura  $\beta$ .

#### 4) Dimensionamento punzone e matrice

A causa delle sollecitazioni di compressione, è necessario prevedere un gioco tra matrice e punzone dato da

$$q = s + c\sqrt{s}$$

$$\text{ove } c = \begin{cases} 0,22 & \text{acciaio} \\ 0,06 & \text{alluminio} \\ 0,12 & \text{altri metalli} \end{cases}$$

da cui  $q = 1 + 0,22 \cdot 1 = 1,22 \text{ mm}$

e quindi

$$d_{\text{punzone}} = 50 - s = 49 \text{ mm}$$

$$d_{\text{matrice}} = d_p + 2q = 49 + 2 \cdot 1,22 = 51,44 \text{ mm}$$

5) Analizziamo ora l'operazione di  
Trancitura che si rende necessaria:

\* il gioco tra matrice e punzone sarà

$$g = 0,007 \cdot s \cdot \sqrt{Kf} = 0,007 \cdot 1 \cdot \sqrt{320} = 0,125 \text{ mm}$$

\* il diametro del punzone e quello della  
matrice per lo stampo di trancitura  
saranno allora:

$$D_p = 107,63 - 2 \cdot 0,125 = 107,38$$

$$D_M = 107,63$$

\* Determinazione della forza di trascinamento

$$F = k_f \cdot A = k_f \cdot \pi \cdot D \cdot s \quad \text{ove } k_f = 0,75 \div 0,80 R_m =$$
$$F = 256 \cdot \pi \cdot 107,63 \cdot 1 = 86,52 \text{ kN} \quad = 0,80 \cdot 320 = 256$$

\* Determinazione della Energia di trascinamento

$$E = \lambda \cdot F \cdot s \quad \text{ove } \lambda \text{ è desumibile}$$

dalla tabella 3.6  $\rightarrow \lambda = 0,70$

$$E = 0,7 \cdot 86,52 \cdot 1 = 60,56 \text{ kNmm} = 60,56 \text{ Nm}$$

**Tabella 9.6 - Valori di  $\lambda$  per lamiere in acciaio di differente resistenza al taglio.**

$k_t = 250 + 350$ $(N/mm^2)^2$	$\left\{ \begin{array}{l} s < 1 \\ s = 1 + 2 \\ s = 2 + 4 \\ s > 4 \end{array} \right.$	mm	$\lambda = 0,75$
		mm	$\lambda = 0,70$
		mm	$\lambda = 0,65$
		mm	$\lambda = 0,50$
$k_t = 350 + 500$ $(N/mm^2)^2$	$\left\{ \begin{array}{l} s < 1 \\ s = 1 + 2 \\ s = 2 + 4 \\ s > 4 \end{array} \right.$	mm	$\lambda = 0,65$
		mm	$\lambda = 0,60$
		mm	$\lambda = 0,55$
		mm	$\lambda = 0,45$
$k_t = 500 + 750$ $(N/mm^2)^2$	$\left\{ \begin{array}{l} s < 1 \\ s = 1 + 2 \\ s = 2 + 4 \\ s > 4 \end{array} \right.$	mm	$\lambda = 0,50$
		mm	$\lambda = 0,45$
		mm	$\lambda = 0,40$
		mm	$\lambda = 0,35$