



Applicazioni Industriali

Stampaggio a freddo - Imbutitura

Marco Raimondi

e-mail: mramondi@liuc.it

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 in settori analoghi
- 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 INOX

Schema di imbutitura

- 1. Disporre la lamiera piana su una matrice**
- 2. Bloccare la lamiera mediante l'applicazione di un premilamiera**
- 3. La parte mobile dello stampo provvede a deformare il materiale e farlo scorrere entro il gioco previsto tra matrice e punzone**
- 4. Il materiale si deforma ed assume una sagoma data normalmente dalla parte inferiore (fissa) dello stampo**
- 5. La parte mobile ritorna nella posizione di partenza. Il pezzo rimane deformato plasticamente e viene estratto dalla parte fissa (matrice) dello stampo**

Schema di imbutitura

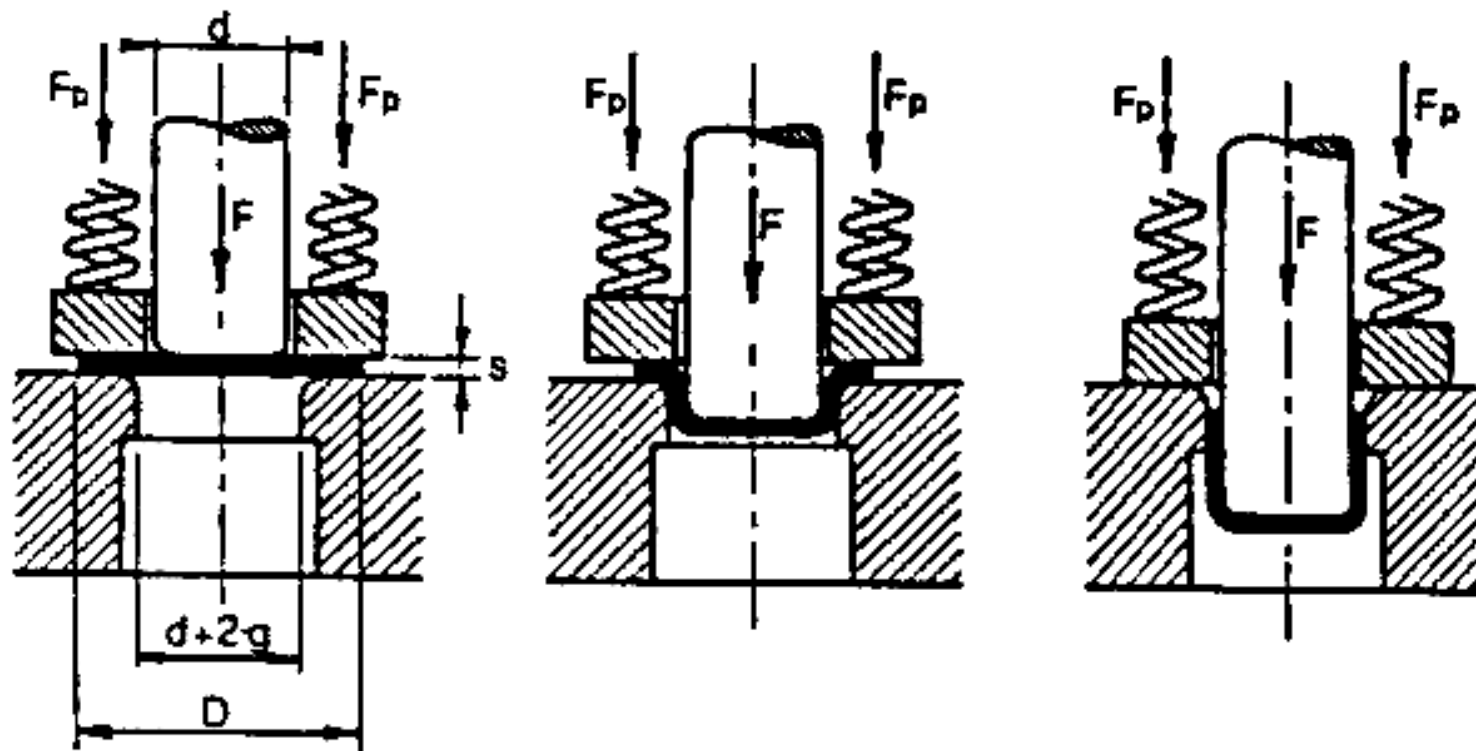
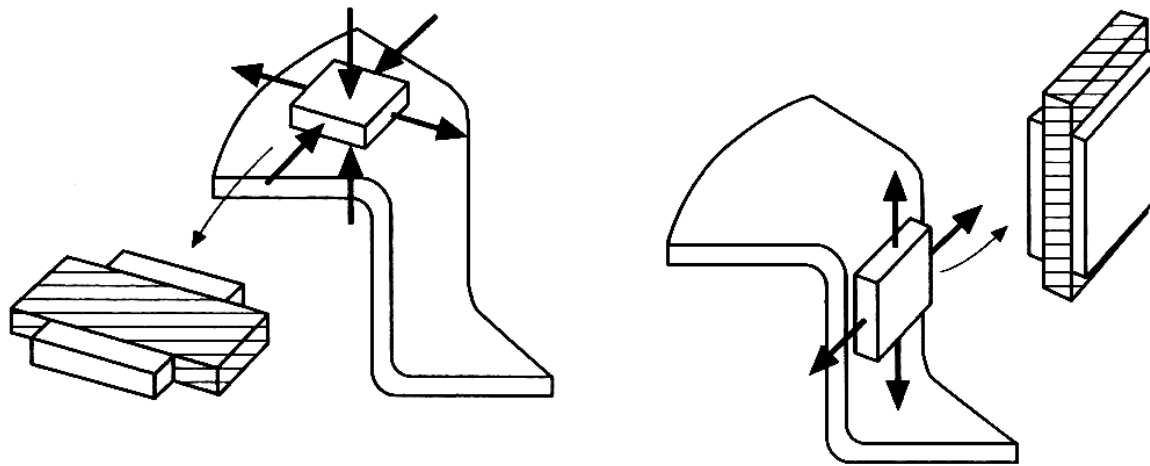


Fig. 9.27 - Schema di un'operazione di imbutitura.

Particolari imbutiti



Tensioni



Stato di tensione e deformazione della lamiera nel processo di imbutitura.

- **Lo stato tensionale che viene a crearsi è molto complesso e la massima deformazione ottenibile è limitata dal massimo rapporto di imbutitura dato dal valore D/d ove d = diametro del pezzo imbutito e D = diametro dello sviluppo di partenza**

Stato di sollecitazione

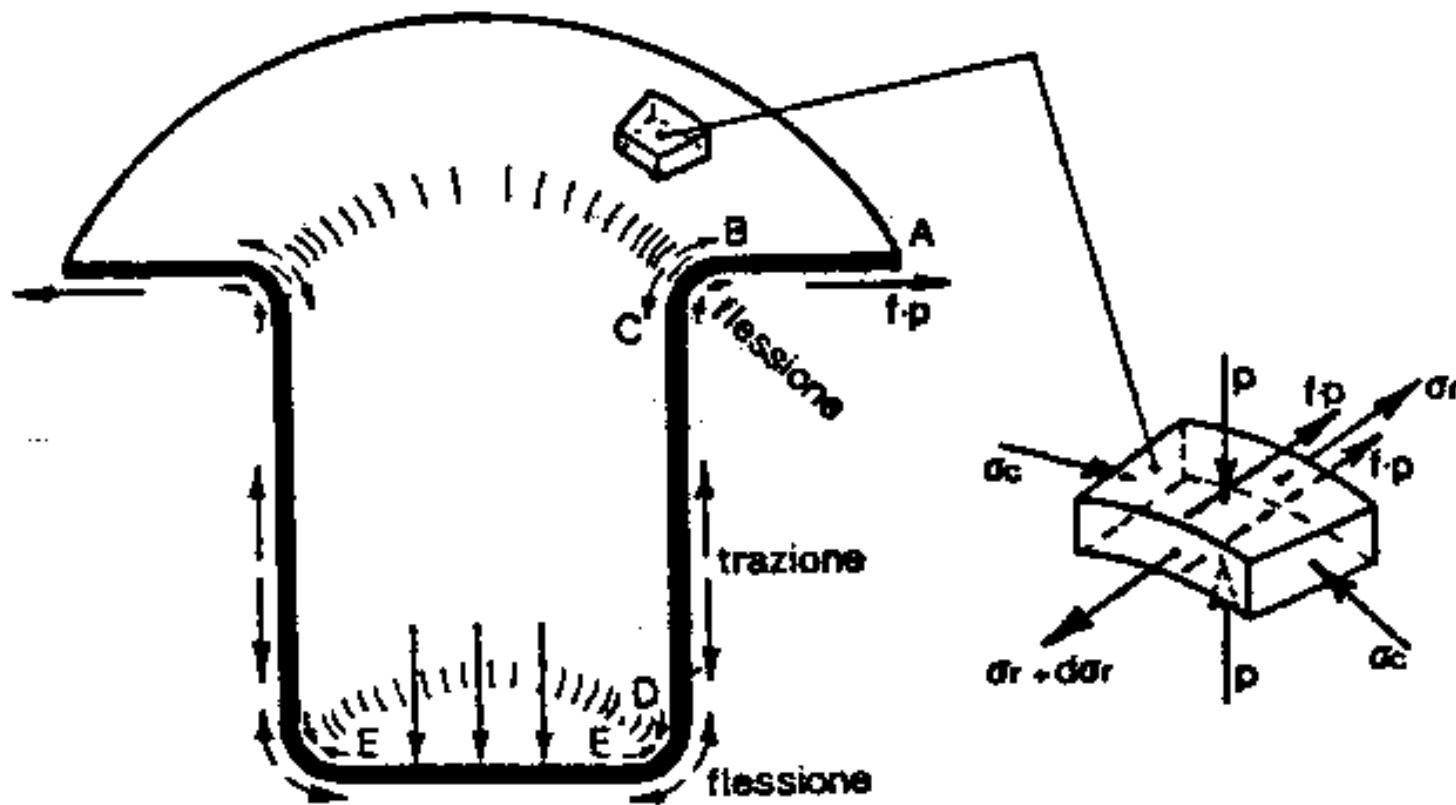
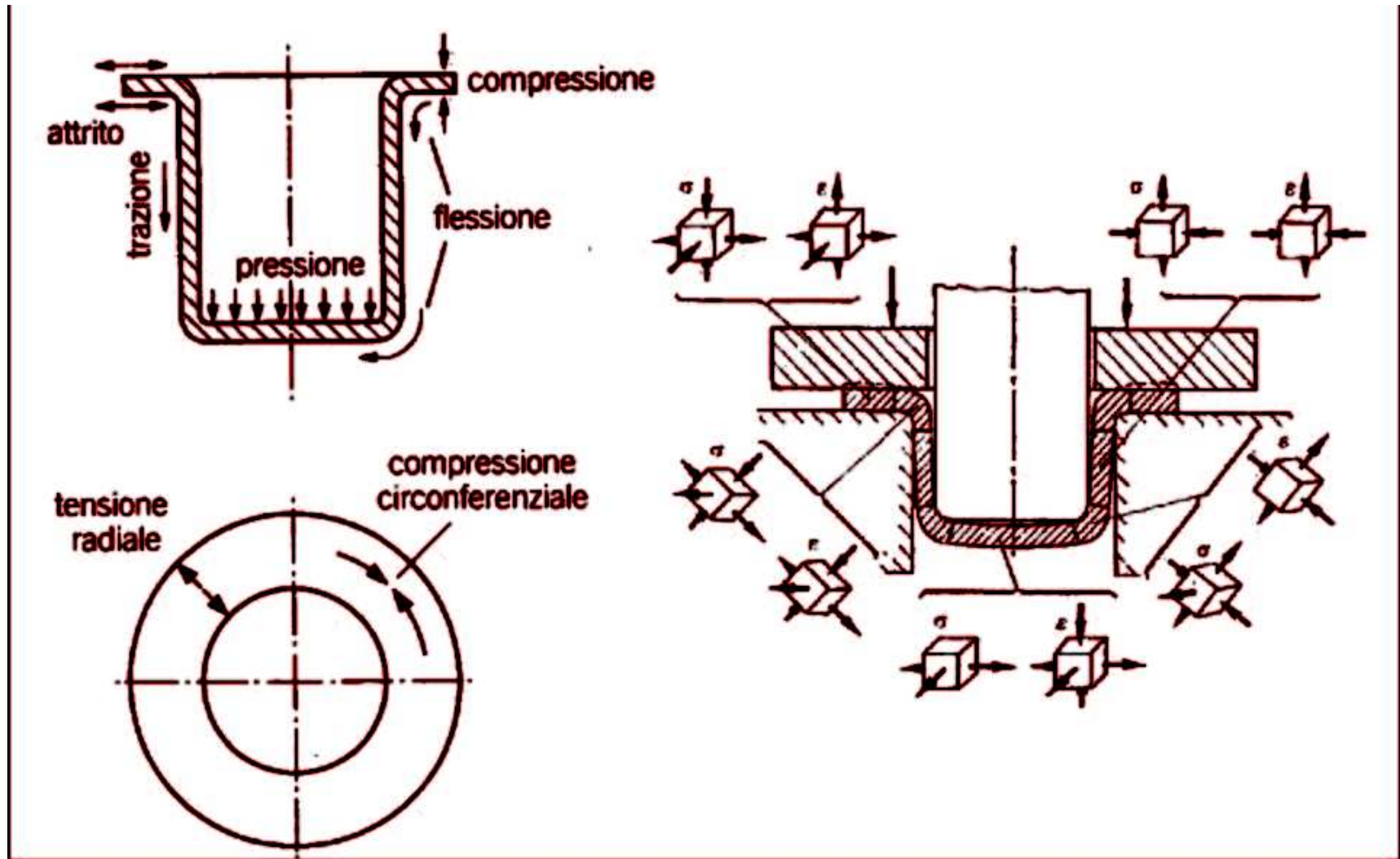
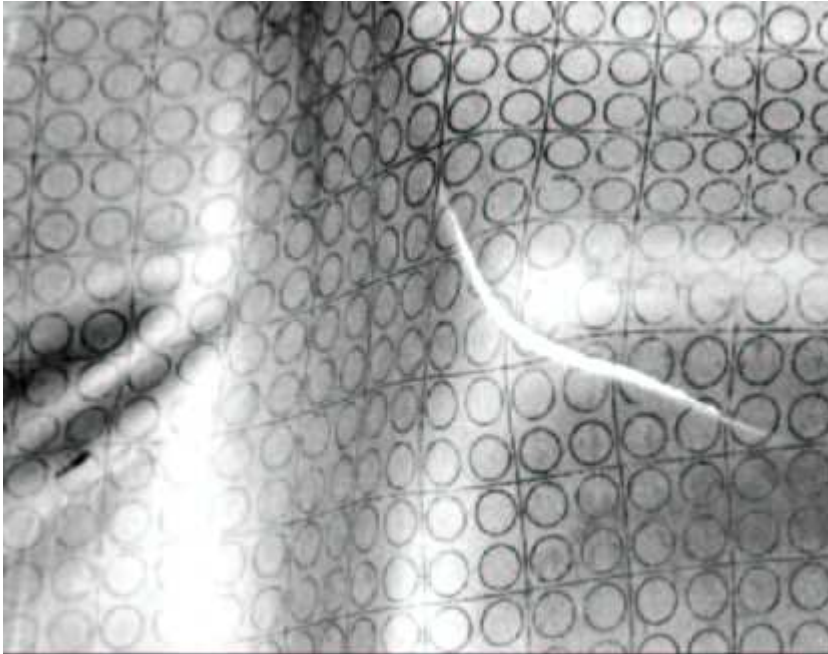


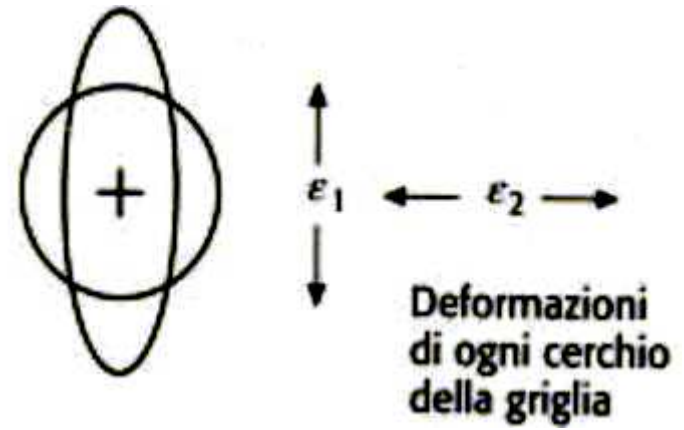
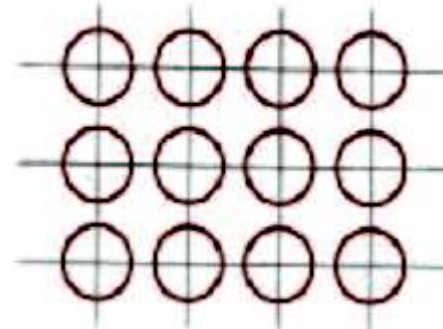
Fig. 9.28 - Stato di sollecitazione.

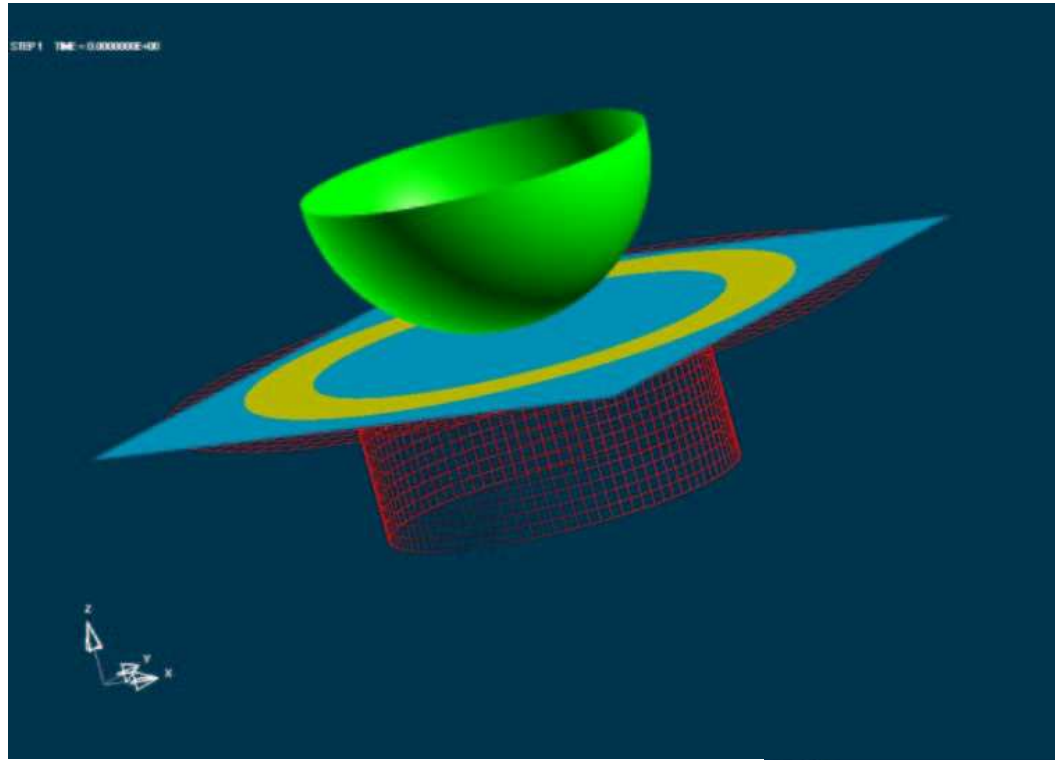


Visioplasticità

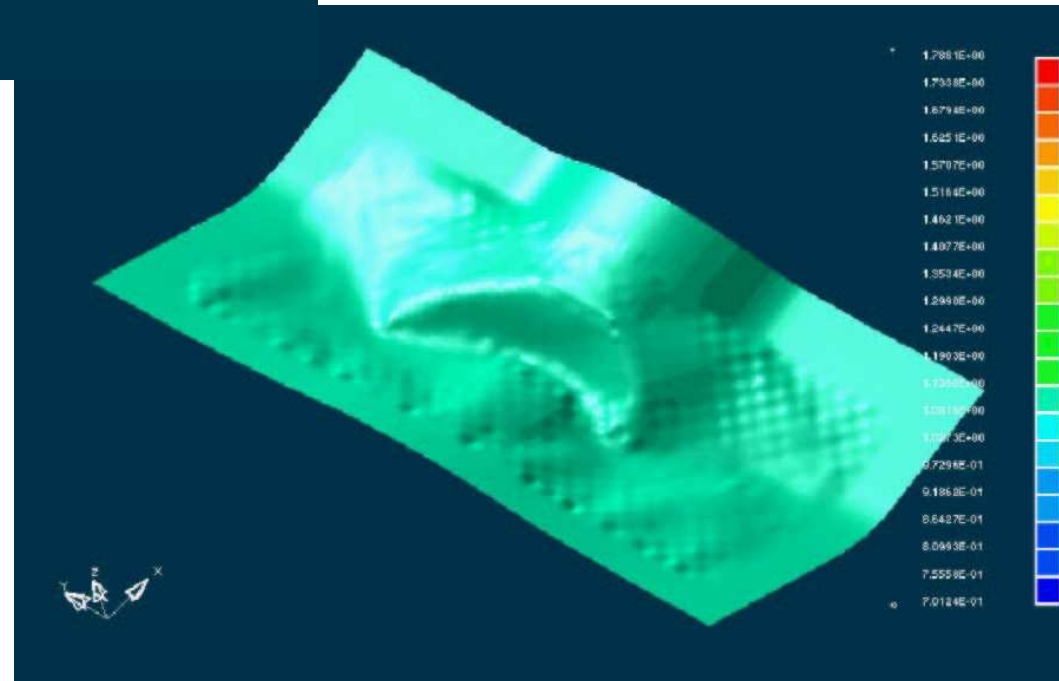


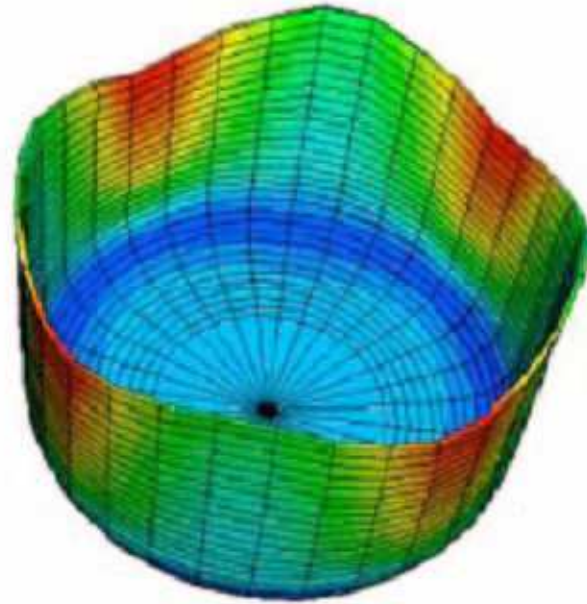
Griglia prima della deformazione





Simulazione dello stato tensionale con l'ausilio di software dedicati



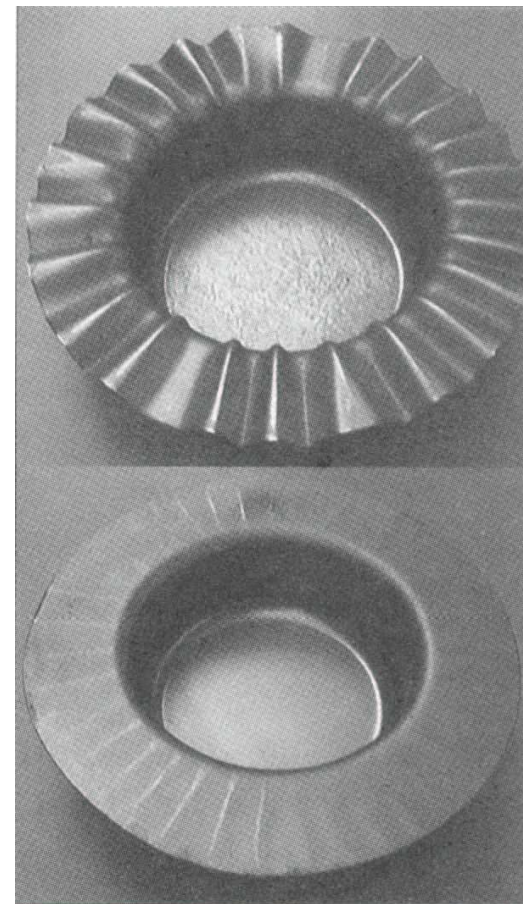
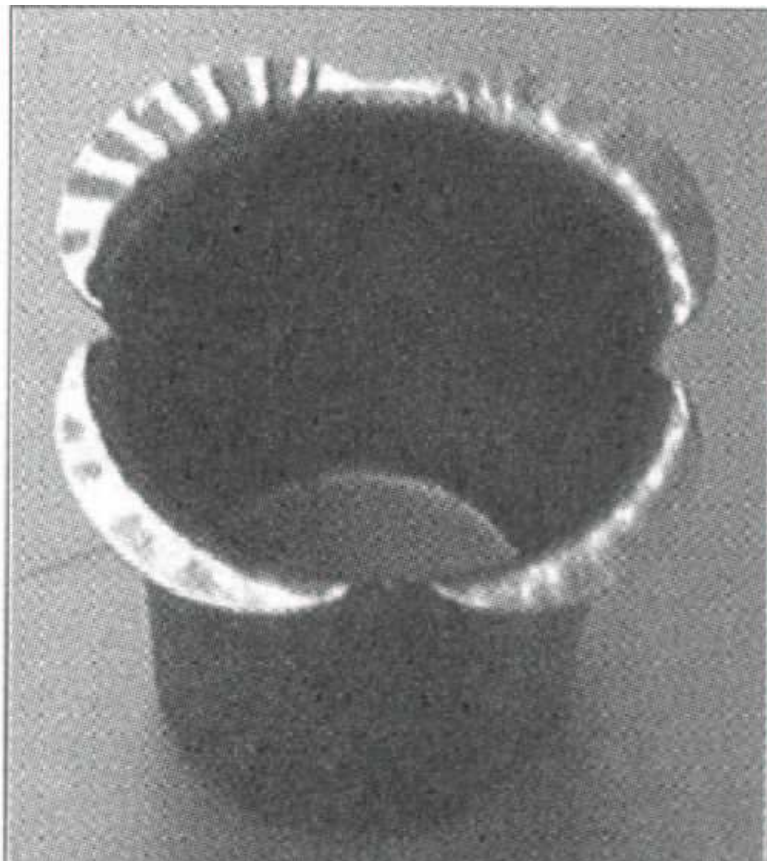


Tessitura ottimizzata



Laminato standard

Il prelamiera



Stato di sollecitazione

- **Zona AB**
 - Sollecitazione radiale di trazione
 - Sollecitazione circonferenziale di compressione
 - Sollecitazione di compressione del premilamiera
 - Sollecitazione di attrito
- **Zona BC**
 - Sollecitazione di flessione
- **Zona CD**
 - Sollecitazione di trazione assiale
- **Zona DE**
 - Sollecitazione di flessione
- **Zona EE**
 - Sollecitazione di trazione radiale

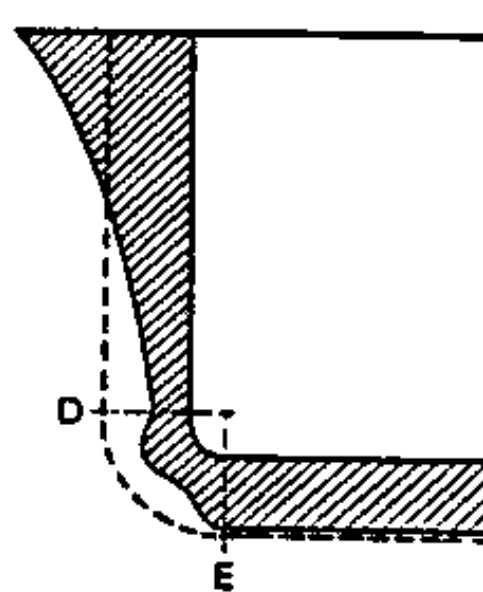
Variazione di spessore

- 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 e' stata "esaltata" per meglio evidenziarla.



Studio di un'operazione di imbutitura

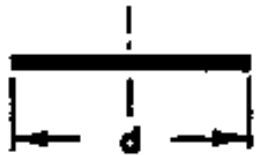
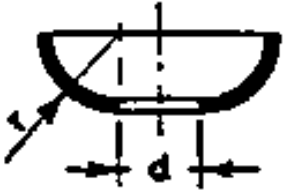
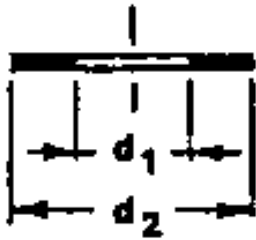
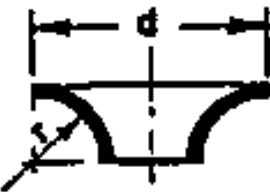
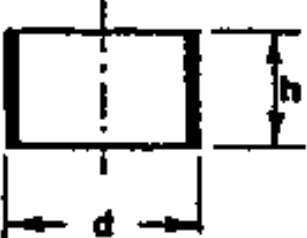
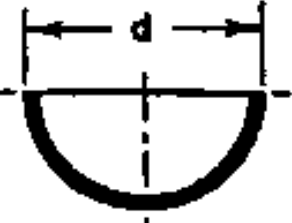
- **Forma e dimensioni della lamiera**
- **Dimensionamento dello stampo (matrice e punzone)**
- **Rapporto di imbutitura (numero di passaggi)**
- **Pressione e forza del premilamiera**
- **Forza di imbutitura**
- **Energia di imbutitura**

Lamiera di partenza

- Occorre scomporre il pezzo in una serie di parti elementari di superficie $S(i)$
- Si supponga di avere un a costante nello spessore dell'imbutito
- Si prevede di utilizzare un quadretto con diametro inscritto pari a

$$D = 1,13 \cdot \sqrt{\sum S_i}$$

Dimensioni della lamiera di partenza

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

Dimensionamento dello stampo

- Prevedere i giochi tra matrice e punzone secondo le formule in seguito evidenziate
- Per i raggi di raccordo, tenere conto delle seguenti indicazioni:

per il 1^o passaggio

$$r_p = (5 \div 6) s$$

$$r_m = 4 s$$

per passaggi successivi

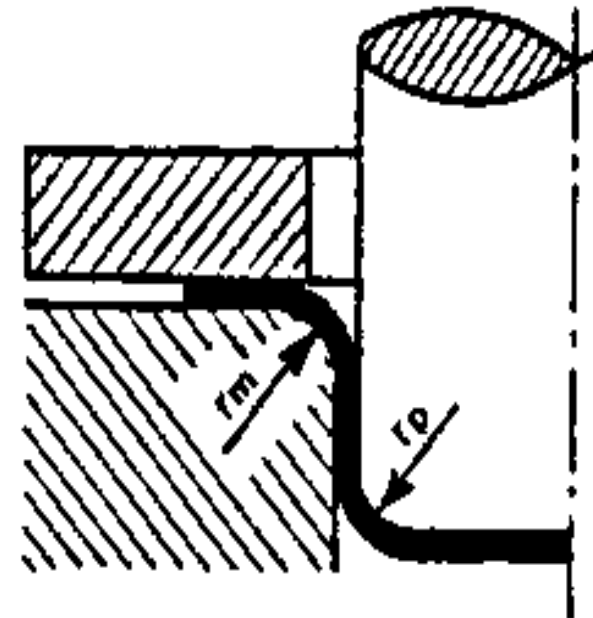
r_p come sopra

$$r_m = (3 \div 4) s$$

Raggi di piegatura

Fig. 9.30

Raggi di raccordo del punzone (r_p)
e della matrice (r_m).



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

Rapporto di imbutitura

- In generale: $\beta_{\max} = \beta_i C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 C_6$

Ove

- β_i è il rapporto ideale e dipende dal tipo di materiale: da 2,20 (P02) a 2,40 (P06)
- C_1 dipende dalla lubrificazione: da 0,85 (a secco) a 1,00 (lubrificato)
- C_2 dipende dal raggio del punzone rispetto allo spessore: da 0,90 ($r_p/s=1$) a 1,00 ($r_p/s=10$)
- C_3 dipende dal raggio della matrice rispetto allo spessore: da 0,87 ($r_m/s=1$) a 1,00 ($r_m/s=10$)
- C_4 dipende dal diametro di partenza rispetto allo spessore: da 0,90 ($D/s=500$) a 1,00 ($D/s=50$)
- C_5 dipende dall'isolamento del diametro di partenza, ovvero dall'appartenenza ad un nastro o meno: da 0,80 (vincolato) a 1,00 (libero)
- C_6 dipende dal numero del passaggio e dunque dall'incrudimento: da 0,60 (4 passaggio) a 1,00 (1 passaggio)

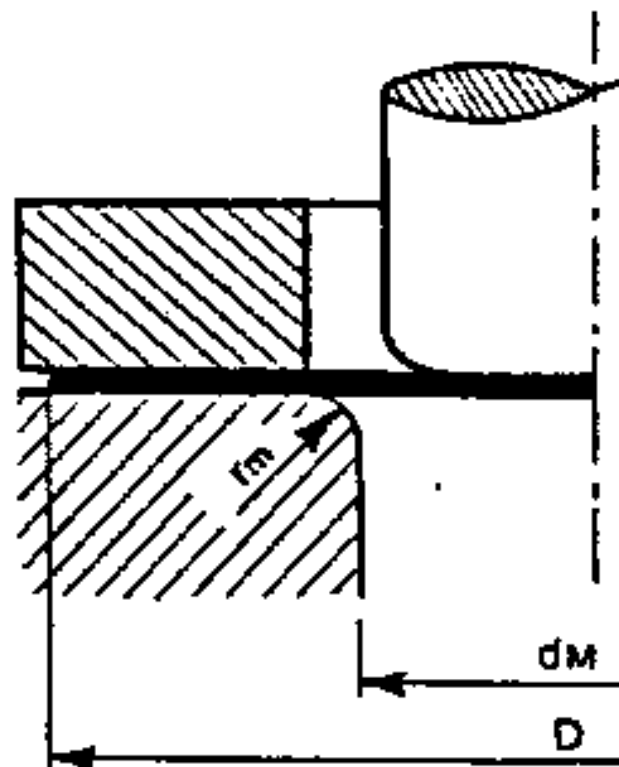
Numero di passaggi

- Noto $\beta_{\text{tot}}=D_i/d_f$ si calcola β_{max} per il 1° passaggio,
- Se $\beta_{\text{tot}}=D_i/d_f > \beta_{\text{max}}$ allora sono richiesti più passaggi
- Si determina allora sulla base di $\beta_{\text{max}}=D_i/d_1$ il massimo diametro d_1 ottenibile al 1° passaggio
- Si riprende dunque la stessa procedura per il 2° passaggio o e così via fino a che $\beta_{\text{tot}}=D_i/d_n < \beta_{\text{max}}$

Dimensione matrice-disco

Fig. 9.31

Dimensioni della matrice e del disco.



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

Pressione del premilamiera

- **Tale pressione deve essere valutata con cura per bloccare la lamiera senza deformarla e deve rimanere dell'ordine di 1,0-2,5 N/mm²**
- **La pressione e la forza minima possono essere determinate con la seguenti formule**

$$p_{\min} = R_m \frac{\left[(\beta - 1)^2 + 0,005 \cdot \frac{d}{s} \right]}{400}$$

ove

R_m è il carico di rottura a trazione

β è il rapporto di imbutitura

d è il diametro dell'imbutito

s è lo spessore della lamiera

$$F_p = p_{\min} \cdot S$$

ove

S è la superficie di azione del premilamiera

$$S = \pi \cdot \left[D^2 - (d_m + 2r_m)^2 \right] / 4$$

ove

D è il diametro del quadrotto

d_m è il diametro interno della matrice

r_m è il raggio di raccordo della matrice

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
- Una valutazione approssimativa al 1° passaggio è:

$$F_{1 \max} = \lambda \cdot \pi \cdot d_1 \cdot s \cdot R_m$$

ove

$$\lambda = 1,1 \frac{(\beta_1 - 1)}{(\beta_{1 \max} - 1)}$$

d_1 è il diametro dell'imbutito

s è lo spessore

R_m è il carico di rottura a trazione del materiale

Andamento della forza di imbutitura

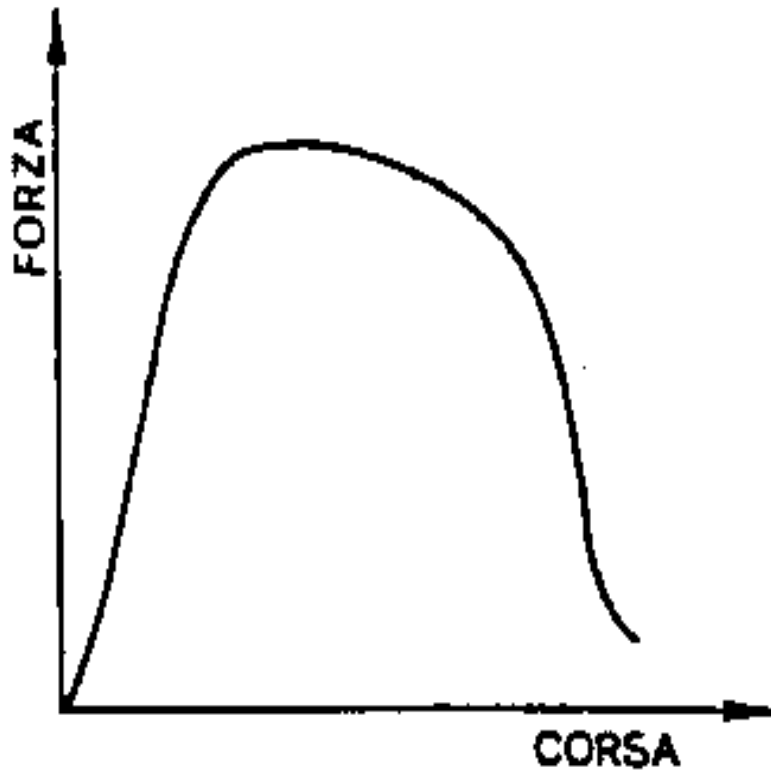


Fig. 9.32

Andamento della forza in funzione della corsa del punzone.

Energia di imbutitura

- Occorre tenere conto anche dell'energia spesa per il prelamiera:

$$E = E_{imb} + E_{prem} = \lambda \cdot F_{max} \cdot H + F_p \cdot H$$

ove

H è l'altezza dell'imbutito

λ è il rapporto tra forza media e forza massima

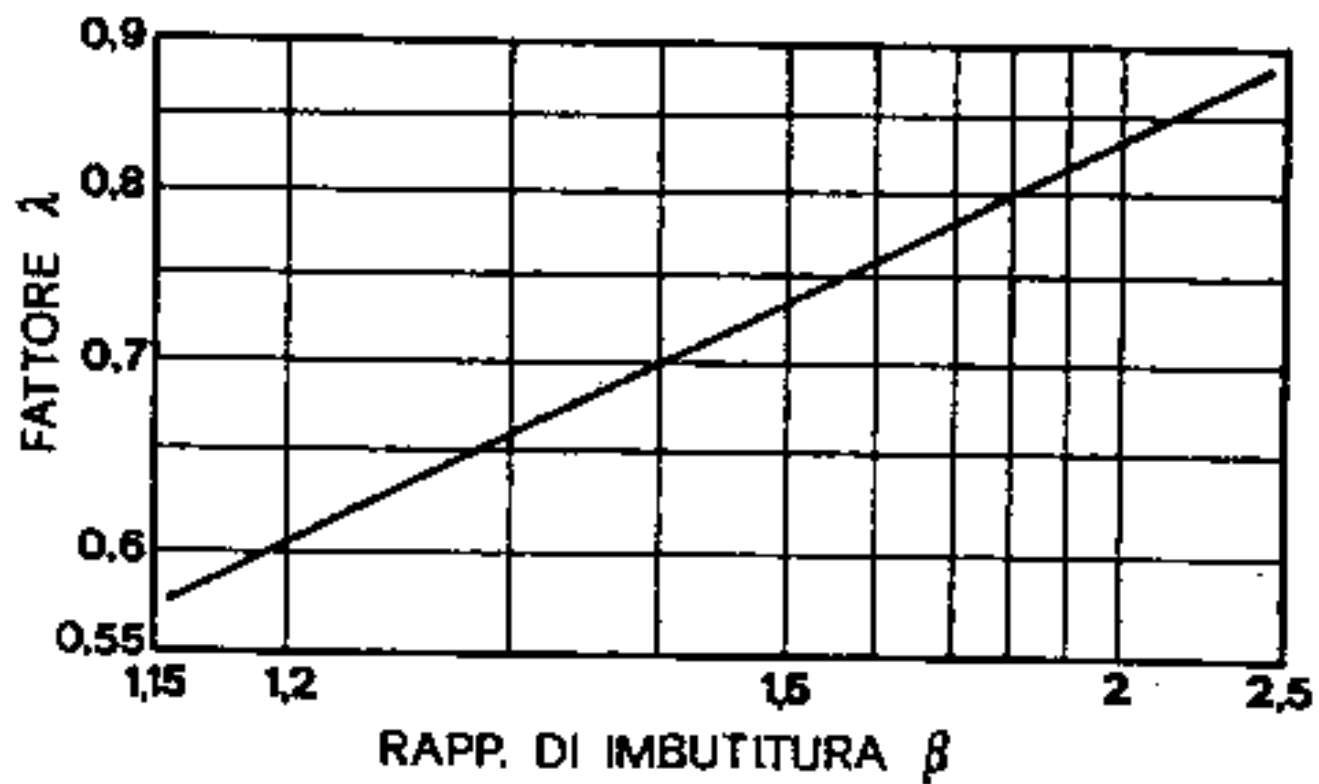


Fig. 9.33 - Valori del fattore λ in funzione del rapporto di imbutitura β .

Imbutitura in più passaggi

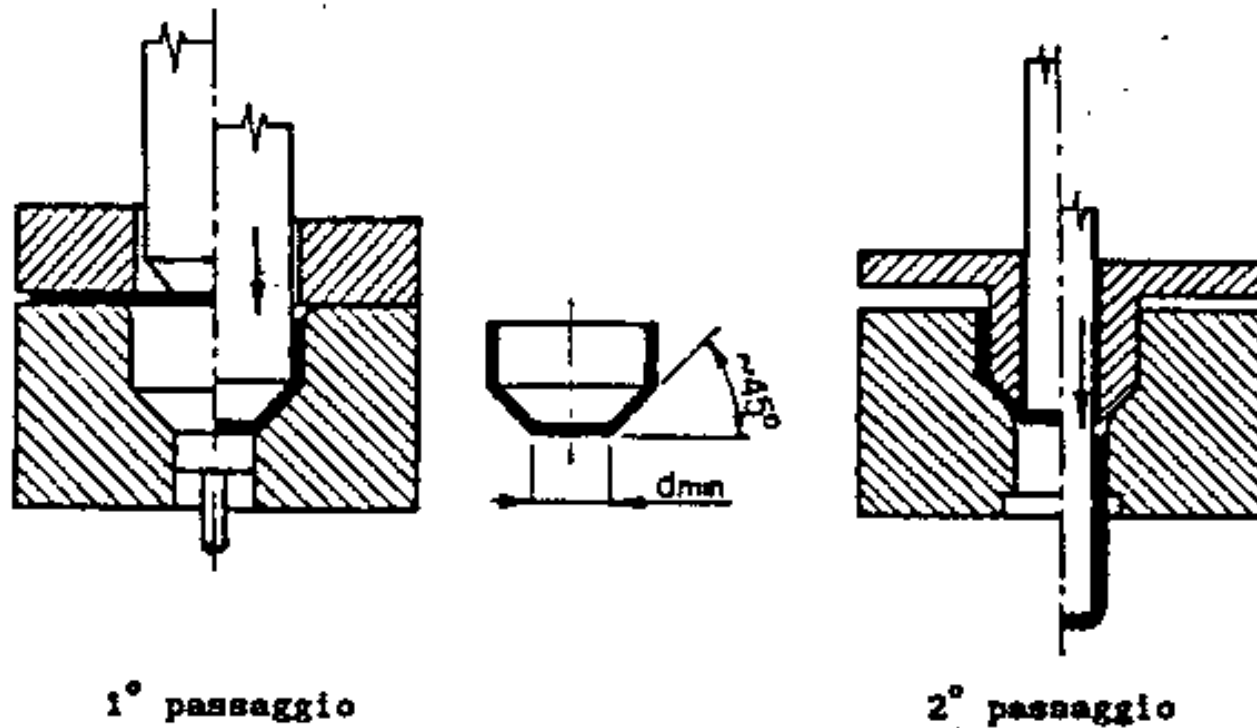
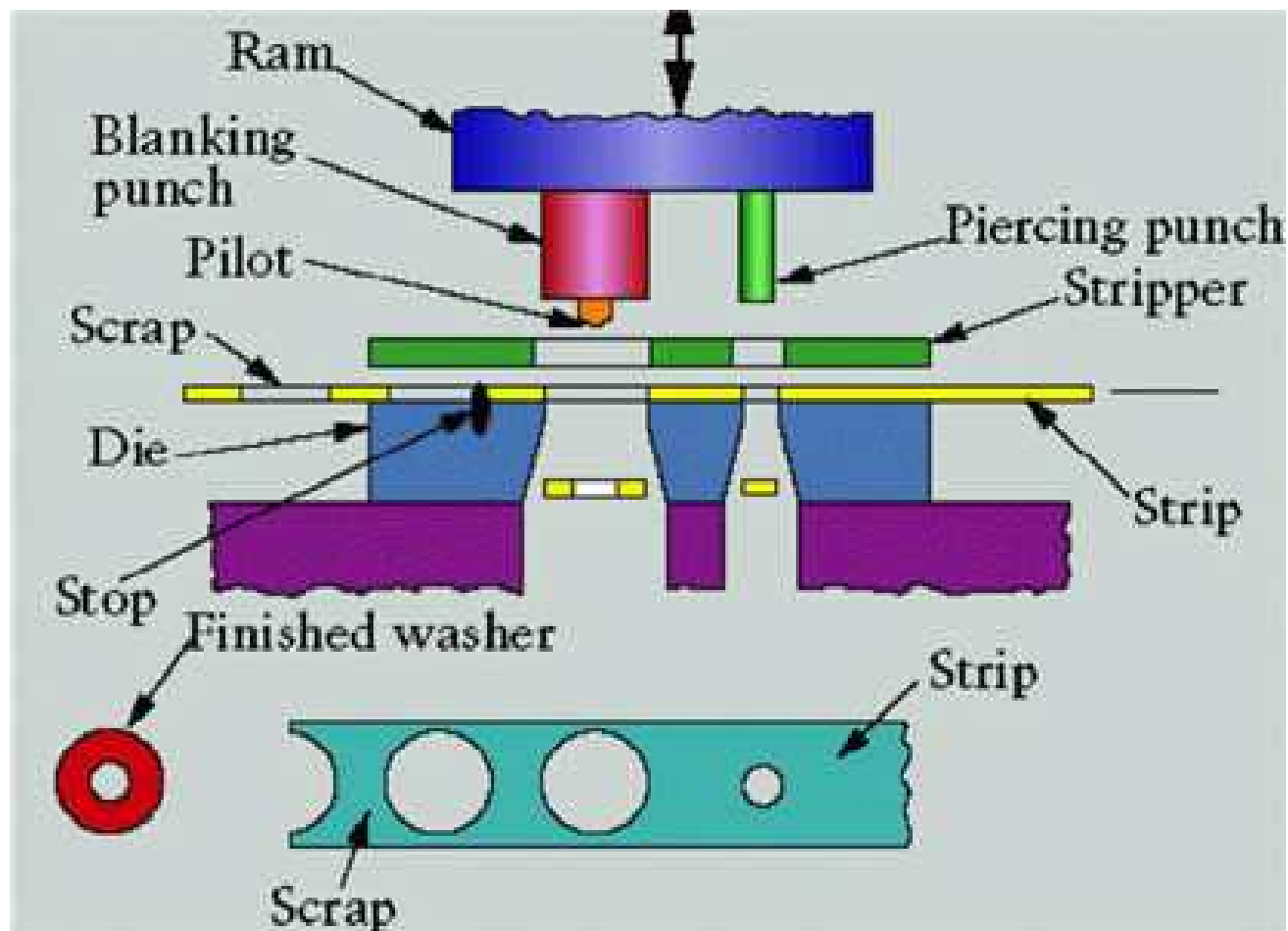


Fig. 9.34 - Imbutitura in due passaggi. Si noti l'estremità conica del punzone e della matrice al primo passaggio e quella del prelamiera (al secondo passaggio) la cui conicità è uguale a quella della matrice e del pezzo dopo il primo passaggio.

Stampi progressivi



Esempio: produzione di una lattina

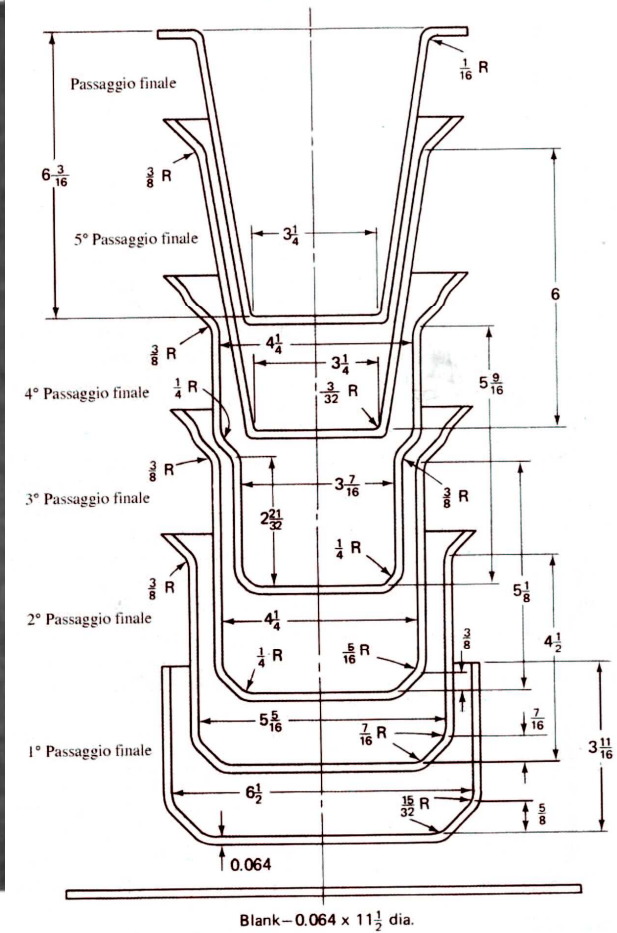
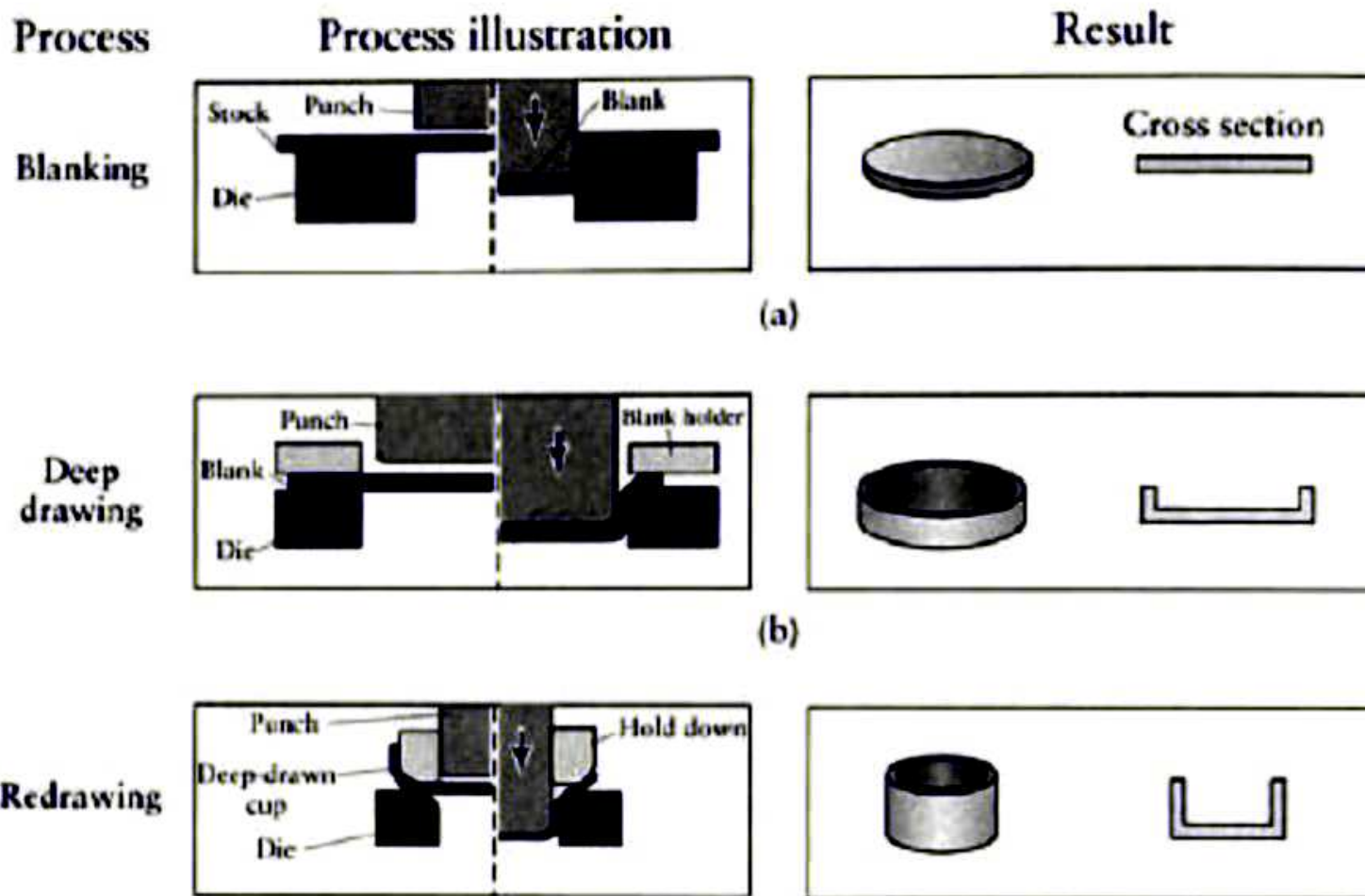


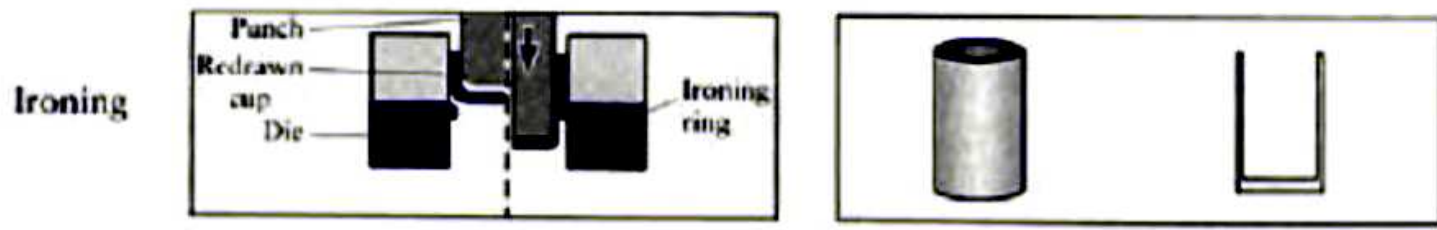
Fig. 4.28 - Esempi di imbutitura in più passaggi

fasi di stampaggio



(a)

(b)



(d)



(e)



(f)

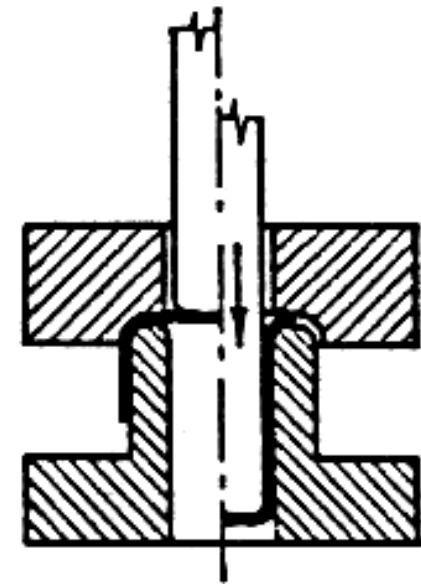
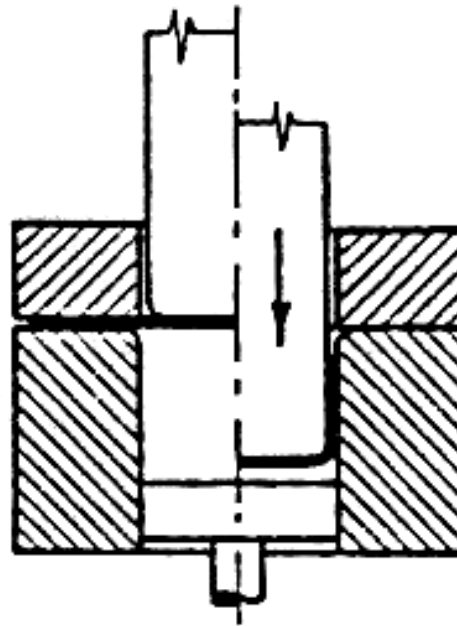


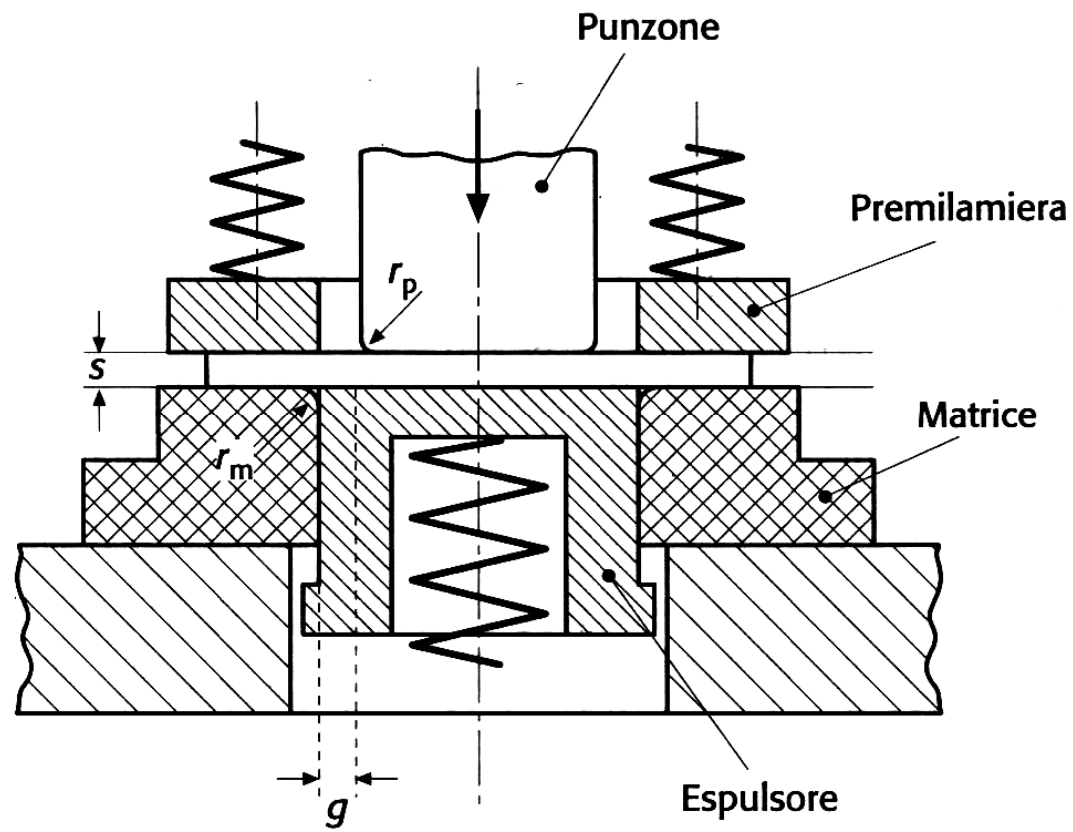
(g)

Imbutitura inversa

Fig. 9.35

Imbutitura normale (primo passaggio) seguita da una imbutitura inversa (secondo passaggio).





Principio del processo di imbutitura.

a) Schema di uno stampo per imbutitura.

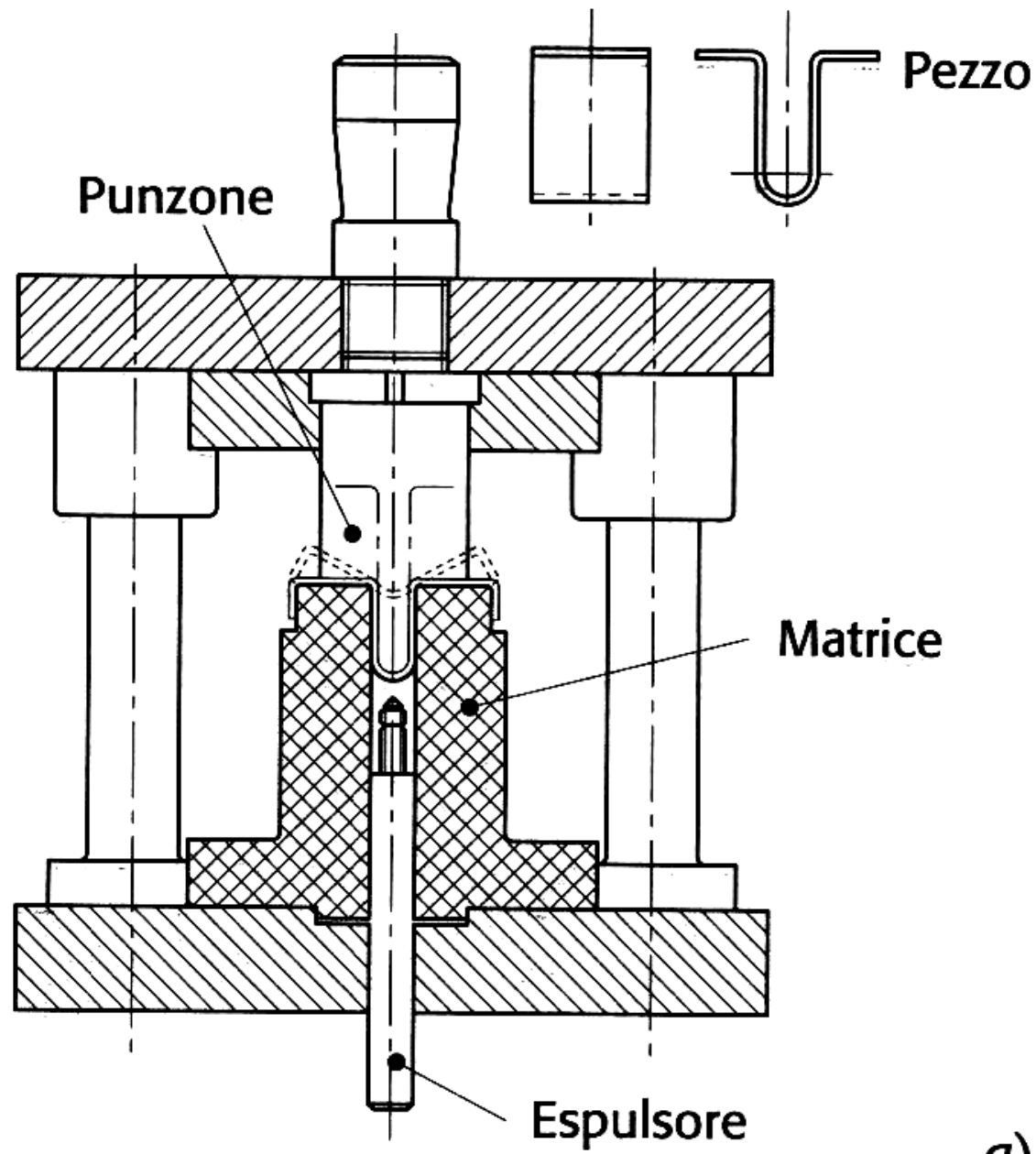
Progettazione dello stampo di imbutitura

- **Raggio di arrotondamento della matrice**
 - **Il raggio non deve essere troppo piccolo per evitare possibili rotture ma nemmeno troppo grande per evitare grinze**
 - **Un valore medio può essere stimato dalla relazione di Kaczmarek:**

$$r = K \cdot \sqrt{(D-d)s}$$

ove

- » **D è il diametro di sviluppo**
- » **d è il diametro del punzone**
- » **K è una costante adimensionale che vale 0,8-0,9**



a)

Progettazione dello stampo di imbutitura

- **Raggio di arrotondamento del punzone**
 - **Il raggio non deve essere troppo piccolo per evitare possibili tranciature**
 - **Un valore medio può essere stimato dalla relazione di Wassilief:**

$$5s < r < 0,3 d$$

ove

- » **s è lo spessore della lamiera**
- » **d è il diametro del punzone**

Progettazione dello stampo di imbutitura

- **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**
 - **I valori standard di pressione p sono i seguenti:**
 - **1,2 Mpa per leghe di alluminio**
 - **2,0 Mpa per ottone**
 - **2,5 Mpa per acciaio**

Progettazione dello stampo di imbutitura

- **Forza di imbutitura**
 - La forza di imbutitura dipende da molti fattori, tra cui:
 - Geometria del pezzo
 - Lubrificazione
 - Tipo di materiale
 - Pressione del premilamiera
 - Velocità di imbutitura
 - Una formula pratica è la seguente:

$$P = \pi \cdot d \cdot s \cdot m \cdot R$$

Ove

R è la resistenza a trazione del materiale

M è un coefficiente che dipende dal rapporto di riduzione dei diametri

Progettazione dello stampo di imbutitura

- **Ulteriori considerazioni:**
 - **È fondamentale determinare lo sviluppo del materiale, operazione che può essere realizzata mediante software appositi oppure sperimentalmente dopo la realizzazione dello stampo**
 - **Occorre verificare il numero dei passaggi di imbutitura necessari in funzione di :**
 - **Complessità del pezzo**
 - **Rapporti di riduzione massimi consentiti dai diversi materiali**

Progettazione dello stampo di imbutitura

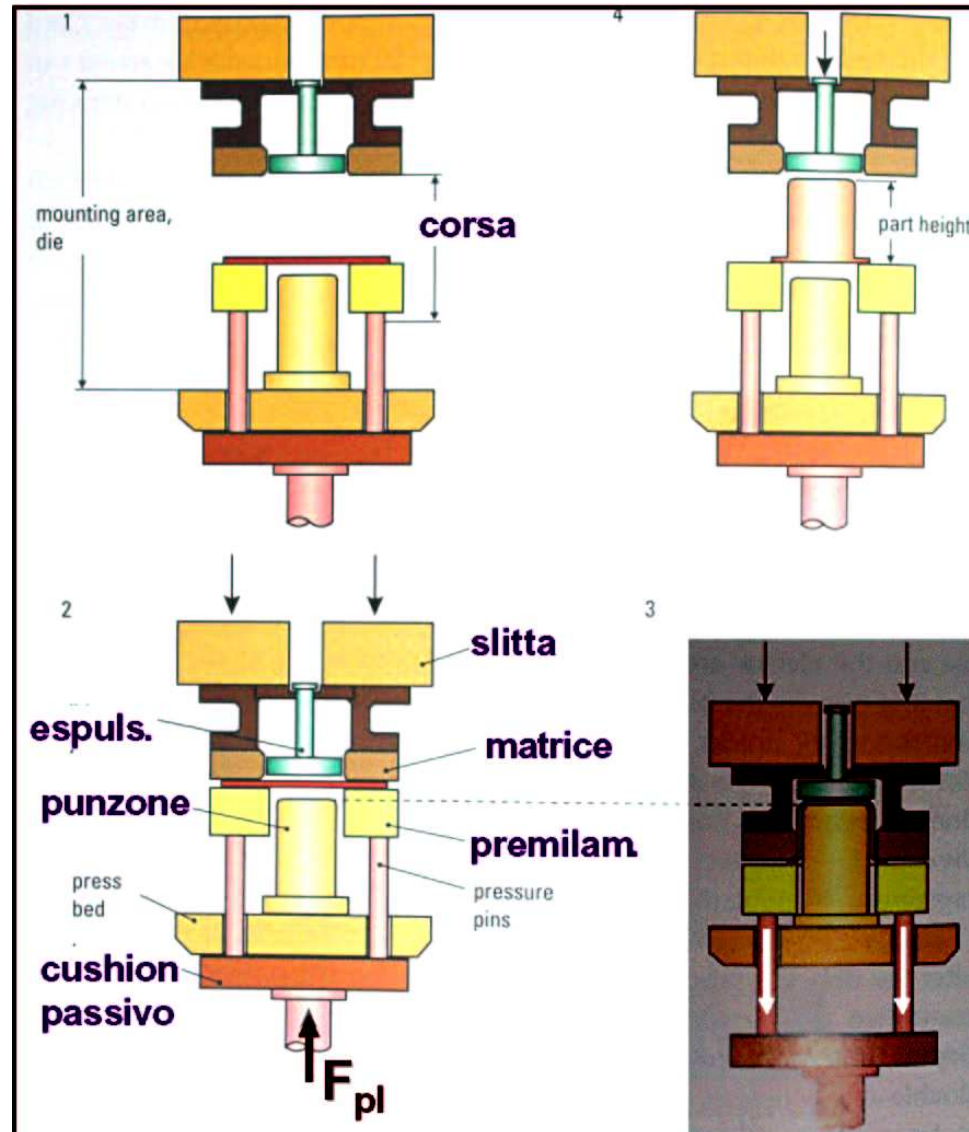
- Una progettazione completa a tavolino non è possibile
- È necessaria una grande esperienza insieme all'utilizzo di metodi sperimentali
- Molto utilizzato per verificare lo stato di tensione delle lamiere è il metodo basato sulla tracciatura sulla lamiera di un reticolo di cerchi di diametro 5 mm distanziati 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 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

Varianti di imbutitura

- **A effetto singolo con smorzamento passivo**
- **A effetto singolo con smorzamento attivo**
- **A effetto doppio**

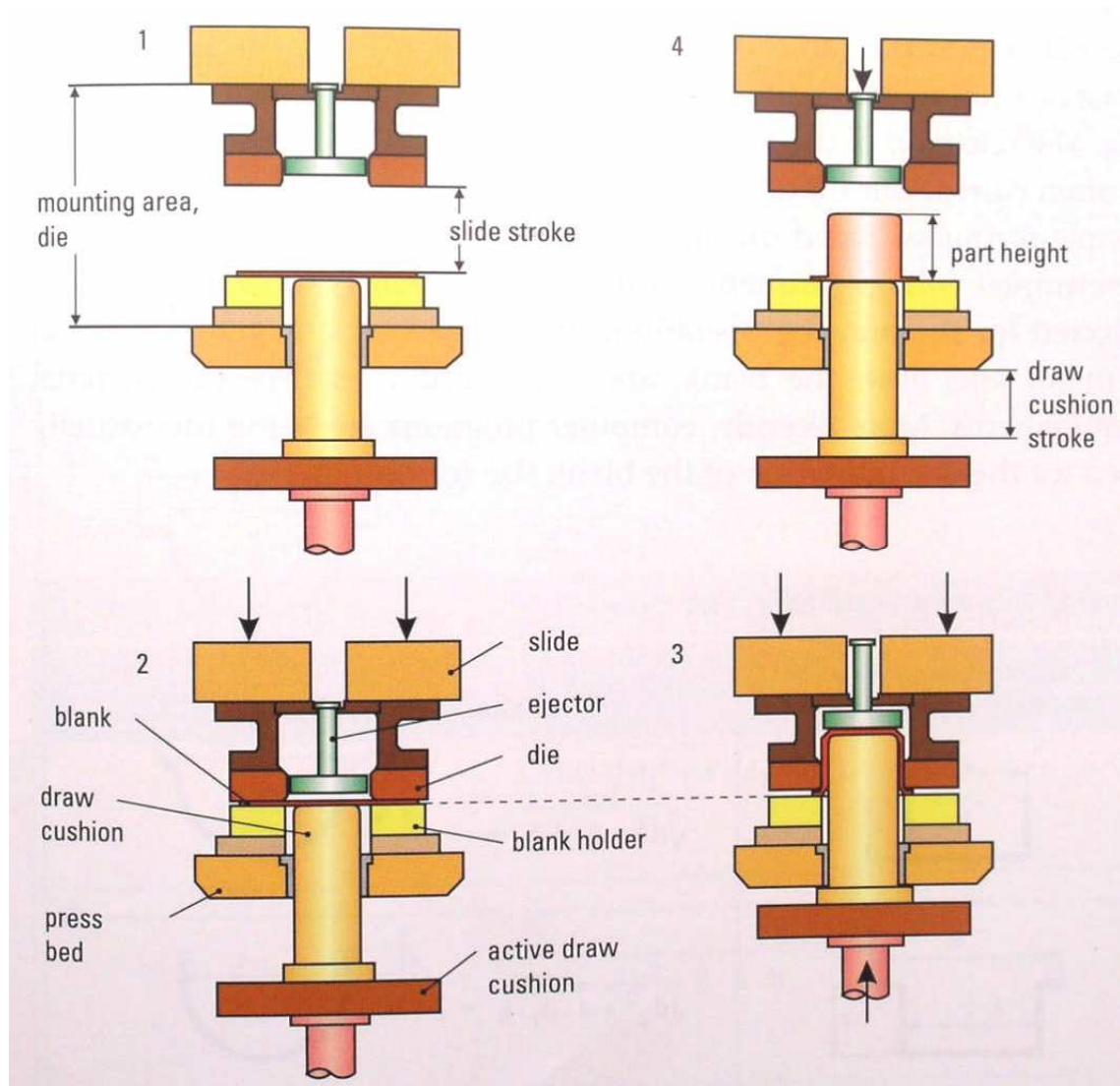
A effetto singolo con smorzamento passivo

- Quando la mazza raggiunge il premilamiera entrambi si muovono di moto solidale
- Il punzone è stazionario e la sua azione si esplica “dal basso”
- La forza del premilamiera dipende dalla forza di imbutitura



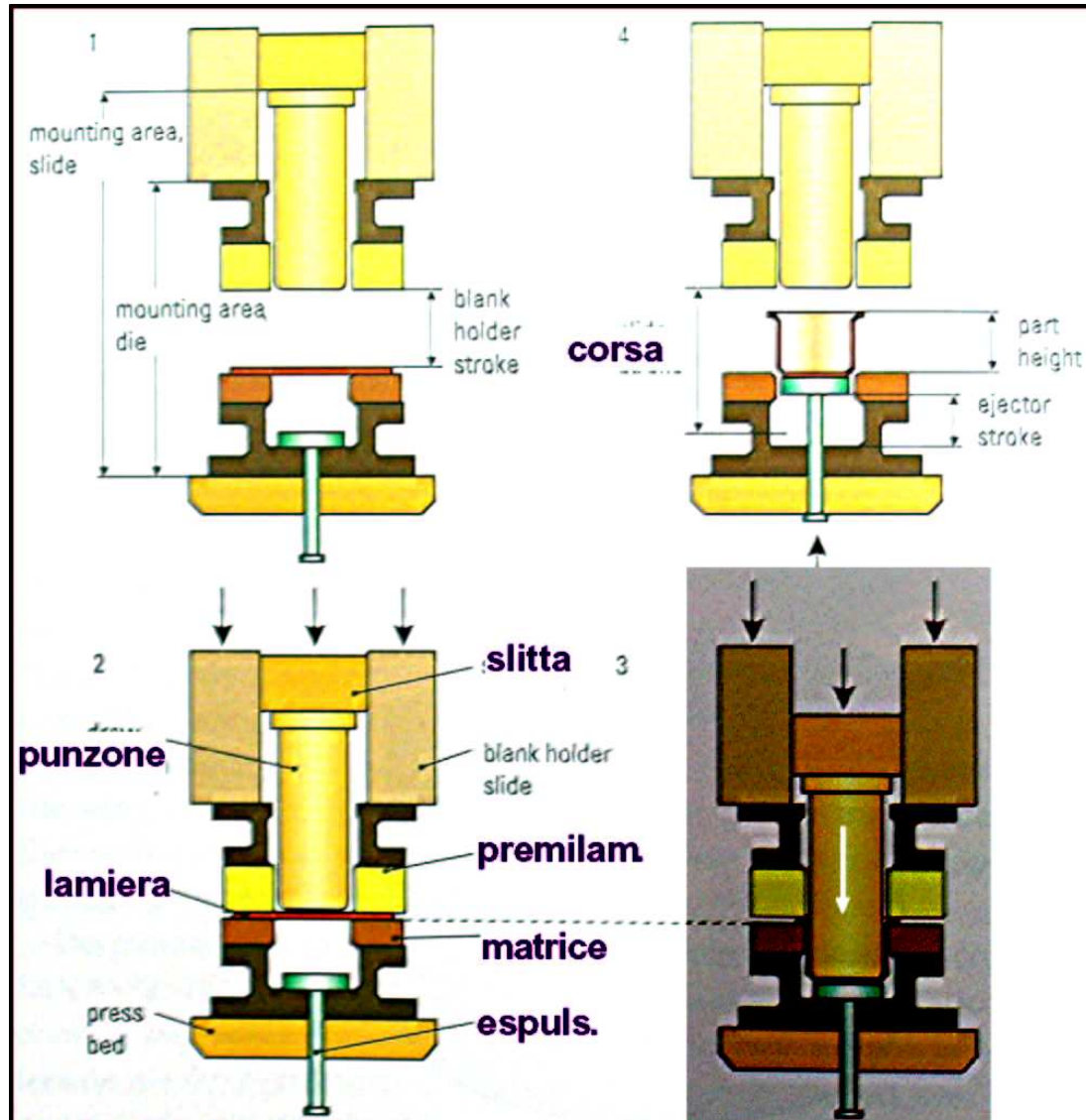
A effetto singolo con smorzamento attivo

- Il premilamiera è stazionario
- Le forze di imbutitura e del premilamiera sono indipendenti
- Il punzone si muove dal basso

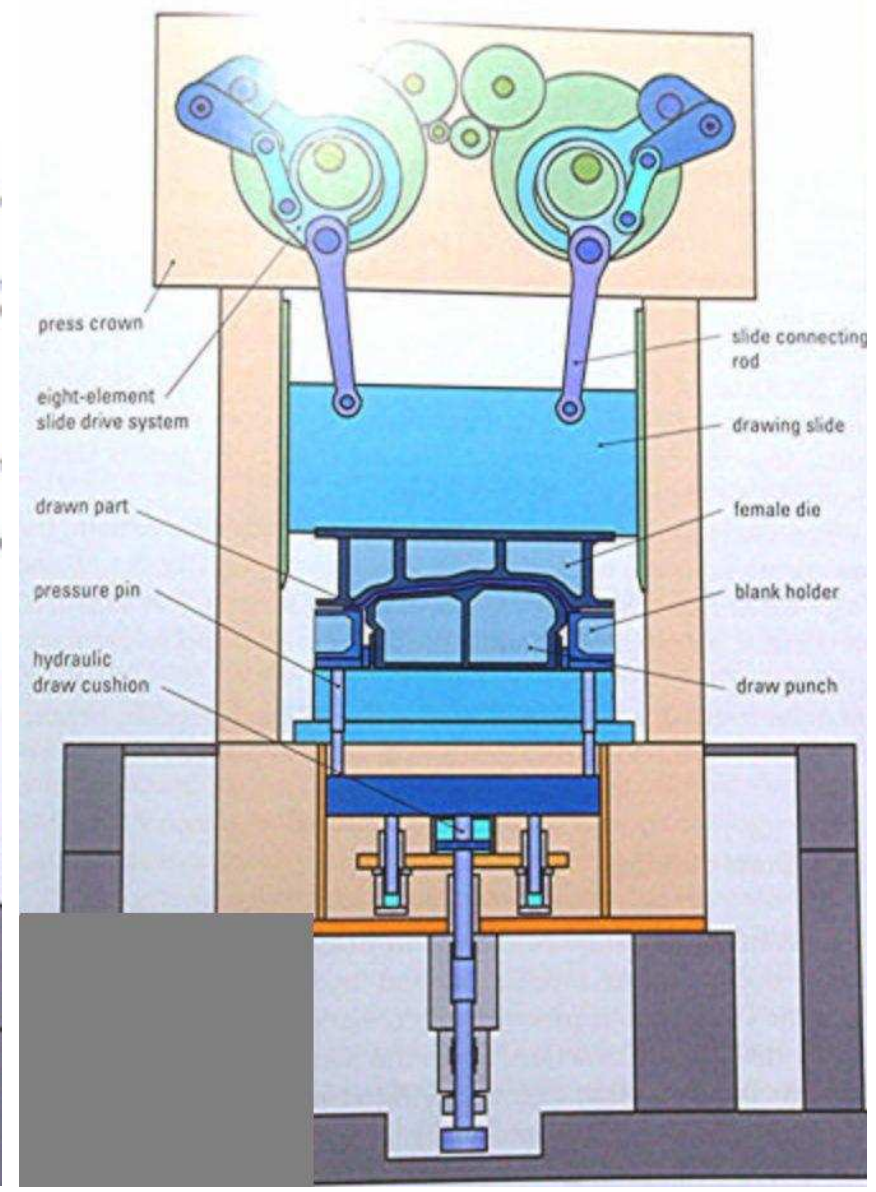
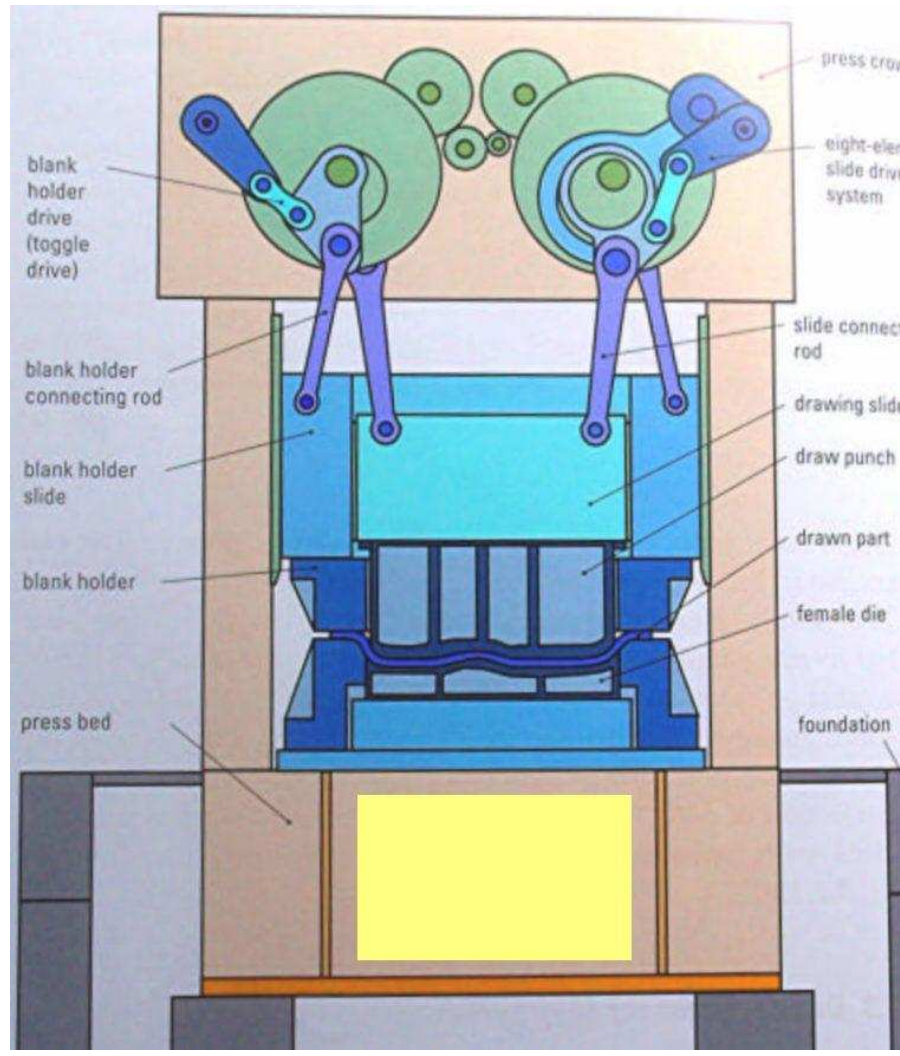


A effetto doppio

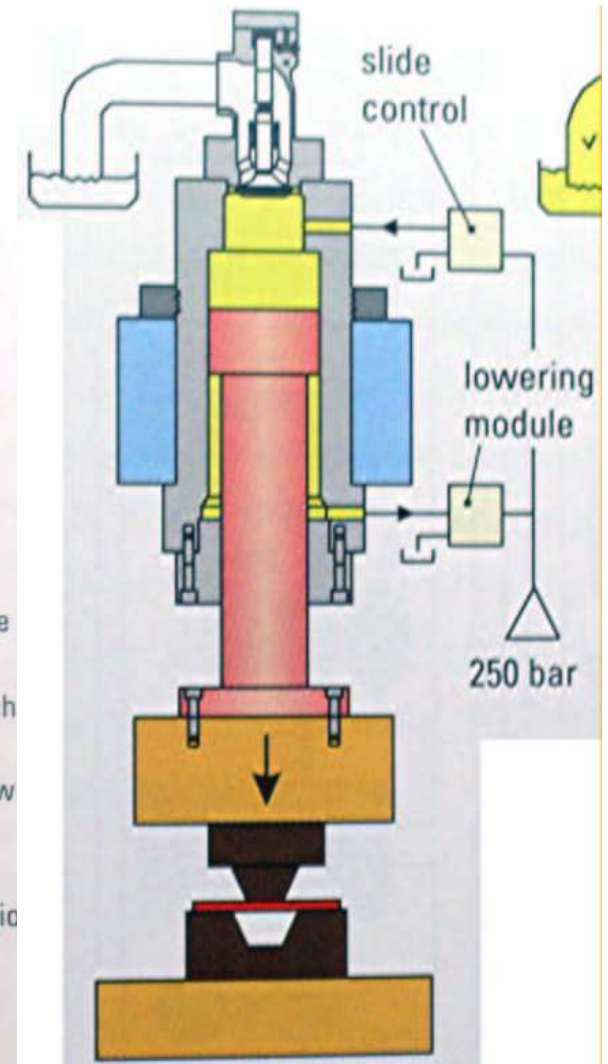
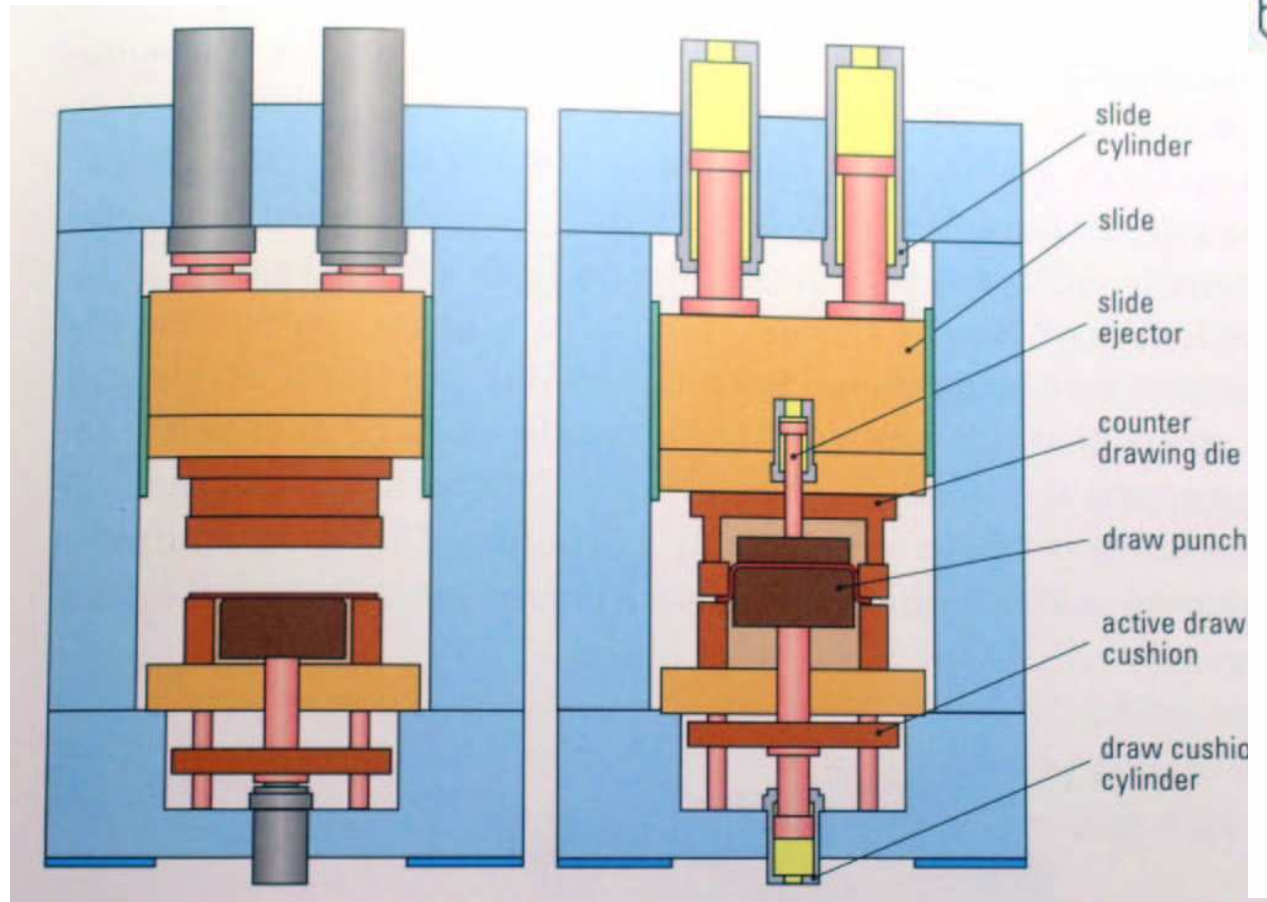
- Il prelamiera è stazionario
- Le forze del prelamiera e di imbutitura sono indipendenti
- Il punzone è in moto dall'alto



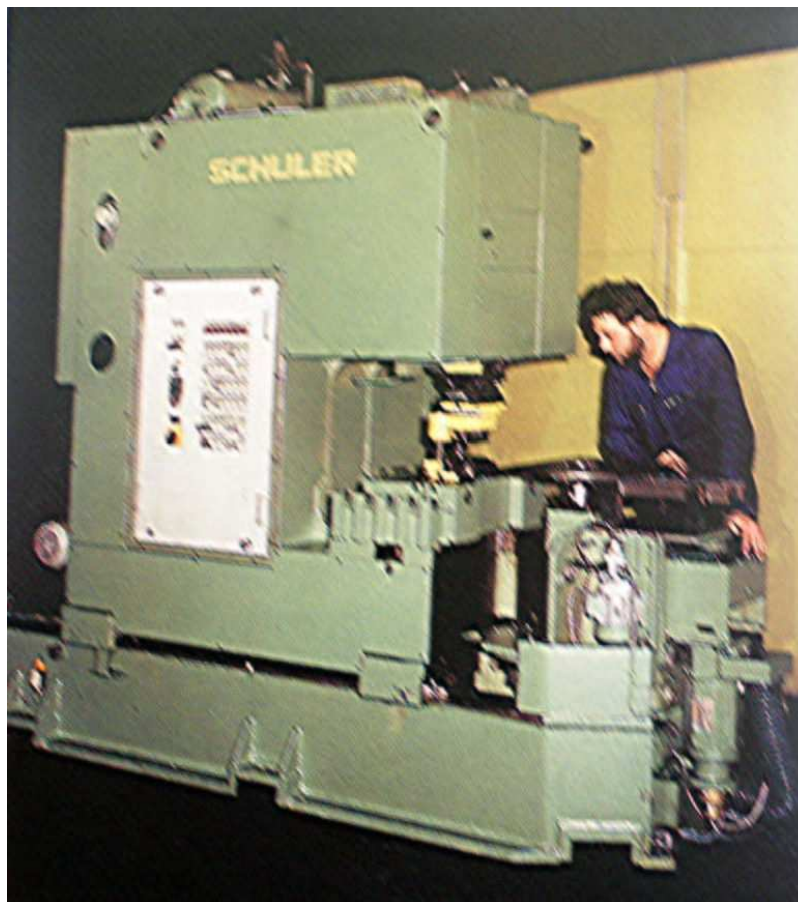
Presse Meccaniche



Pressa idrauliche



Pressa a “collo di cigno”



Presse a portale



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

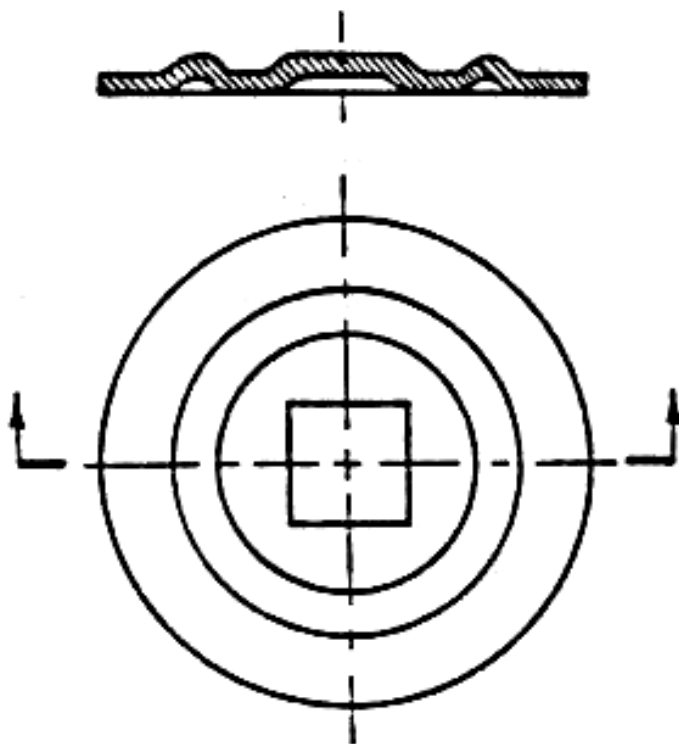


Fig. 8.31 - Coniatura su lamiera.

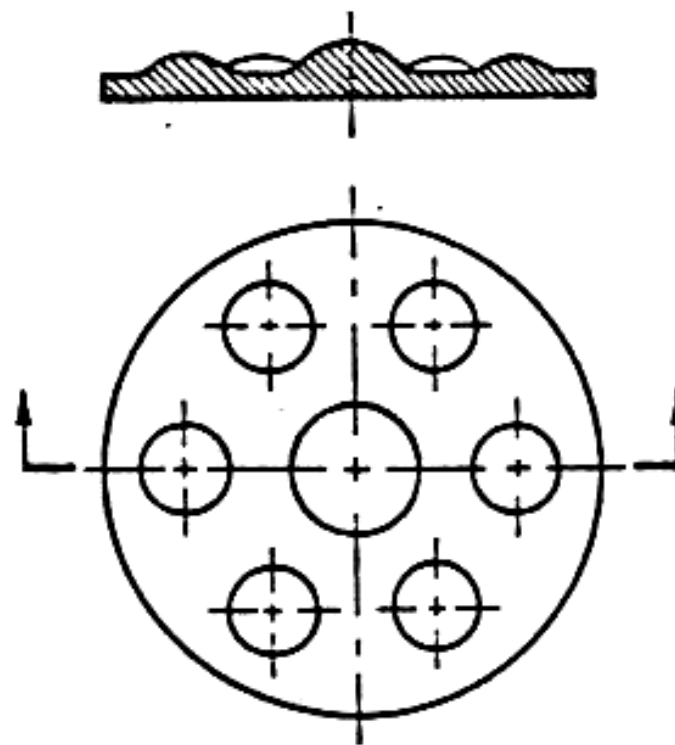


Fig. 8.32 - Coniatura su pieno.

Giochi e ritorni elastici

Fig. 8.33

Dimensionamento del punzone e della matrice nella conatura su lamiera.

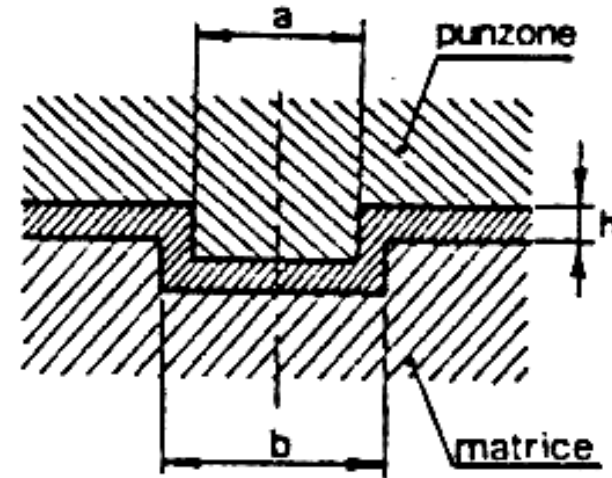
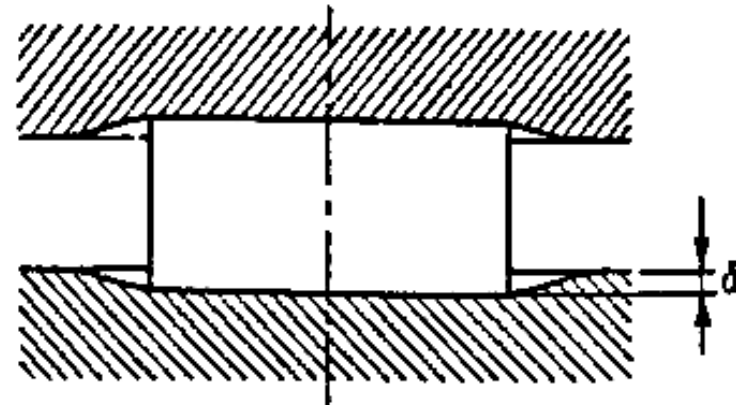


Fig. 8.34

Cedimento elastico δ degli stampi in una operazione di calibratura.



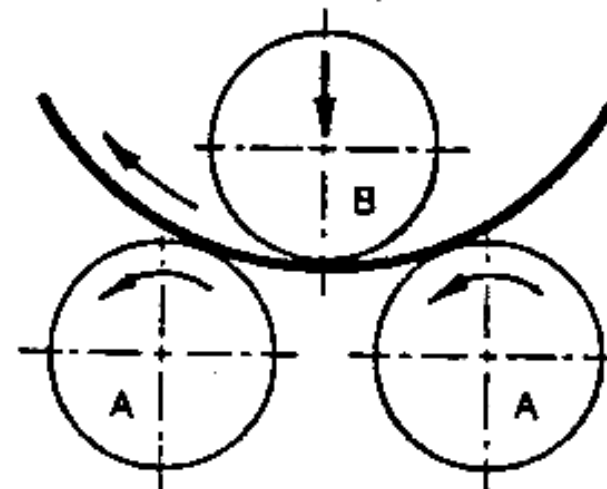
Schema della curvatura o calandratura

- 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 è preposto

Fig. 9.13

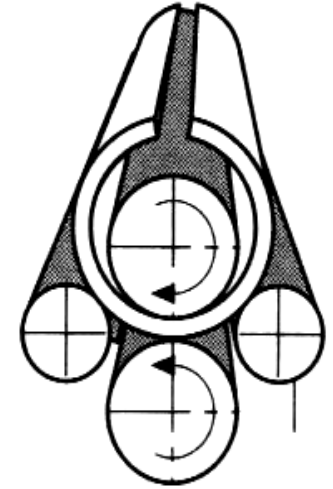
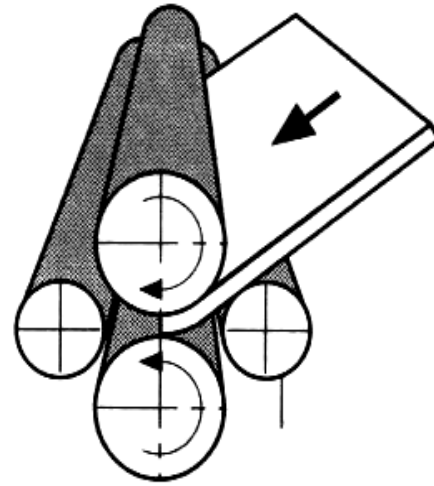
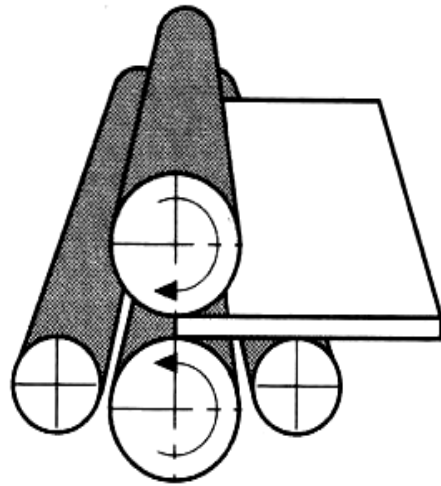
Schema della curvatura.

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



Calandratura

g)



Schema di funzionamento della profilatura mediante rulli

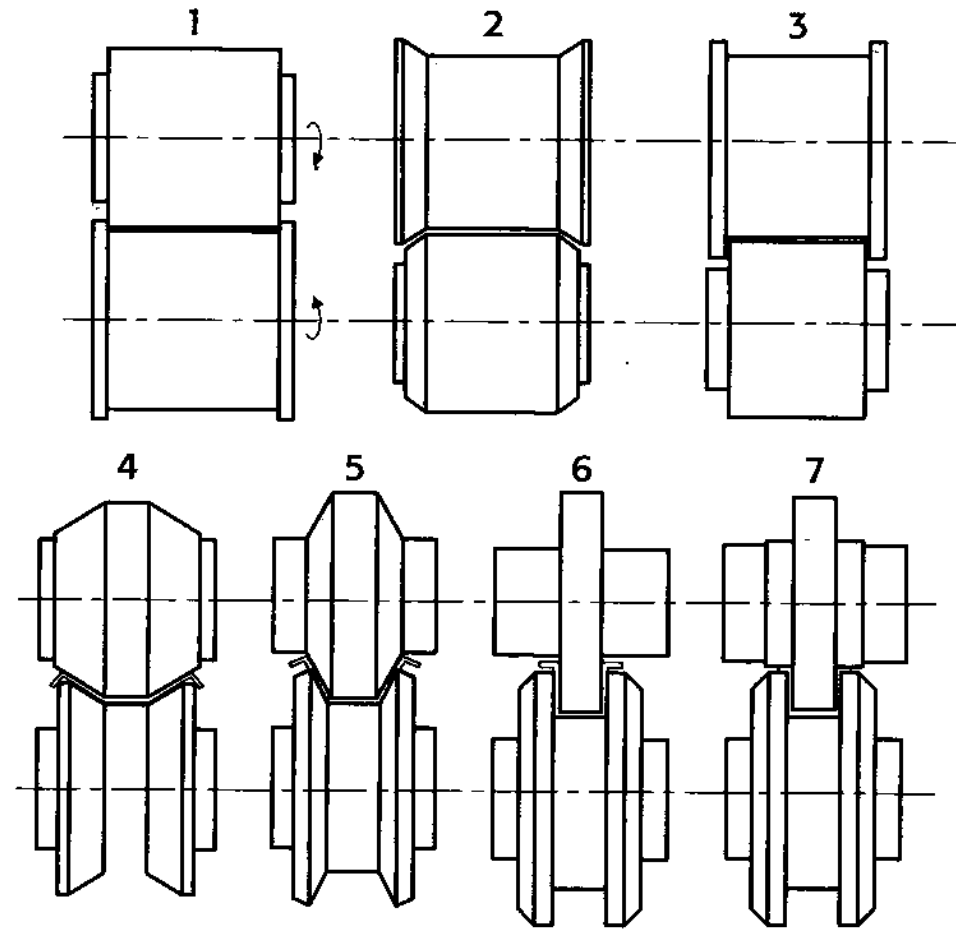
- È un processo che obbliga il nastro a passare tra coppie di rulli che, appositamente sagomati, lo deformano secondo la piega voluta
- Durante ciascun passaggio il massimo angolo ammissibile è

$\gamma = 1^{\circ}35'$ alluminio e leghe

$\gamma = 1^{\circ}25'$ acciai legati a basso tenore di C

$\gamma = 1^{\circ}15'$ acciai INOX ed ottoni

Piega da nastro



b)

Numero di passaggi

- Il numero di passaggi è valutabile con

$$N = \frac{H \cdot \cot g \gamma}{p} + n$$

ove

H è l'altezza del profilato

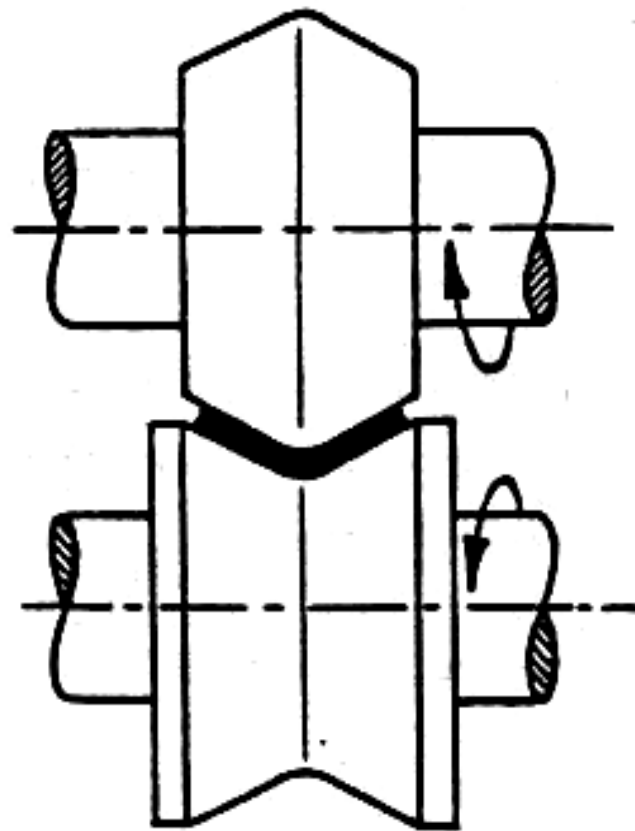
p è il passo tra coppie di rulli

γ è l'inclinazione della retta che congiunge i punti estremi del profilo

n è il numero di passaggio addizionali

Fig. 9.9

Schema della profilatura con rulli.



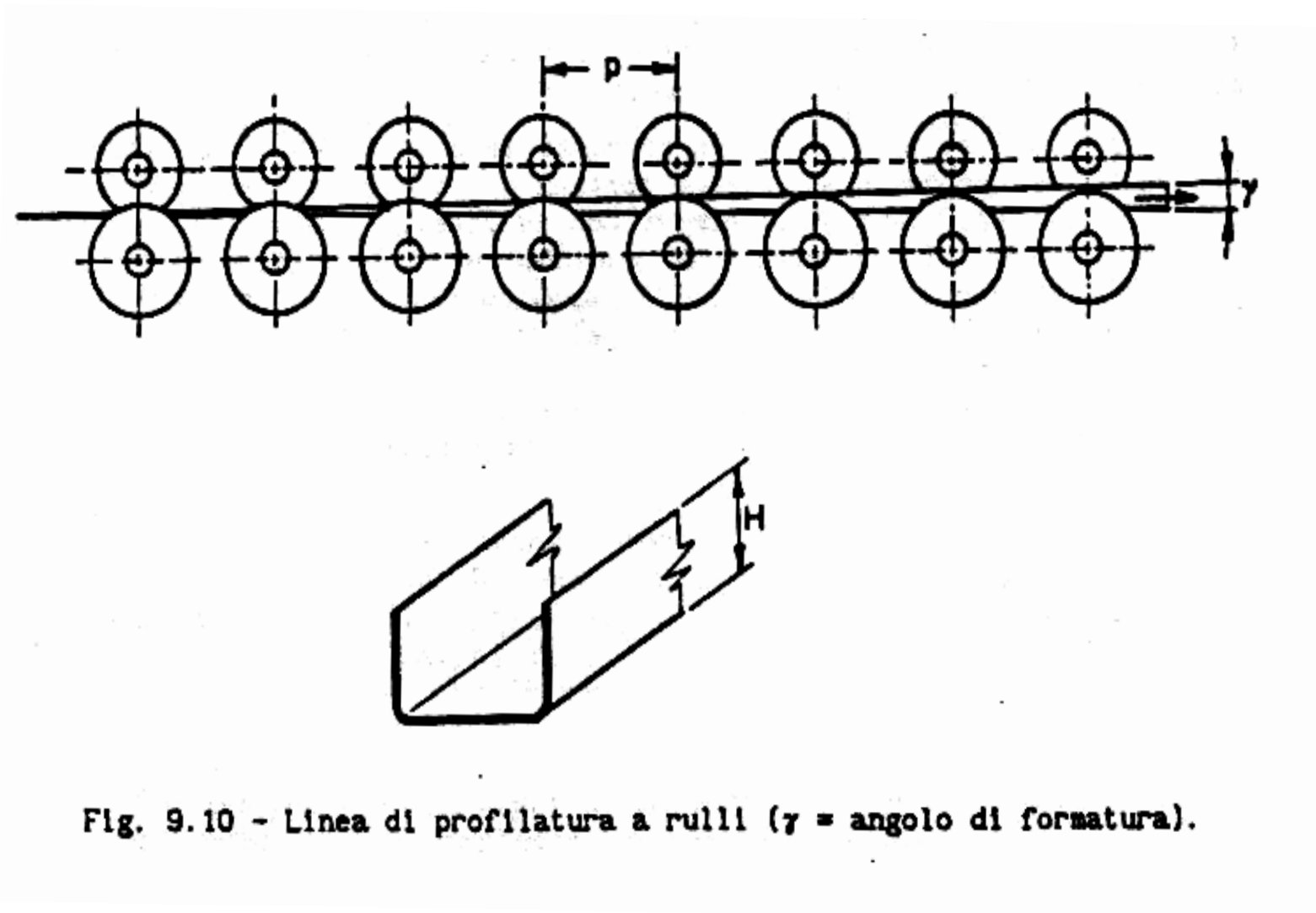
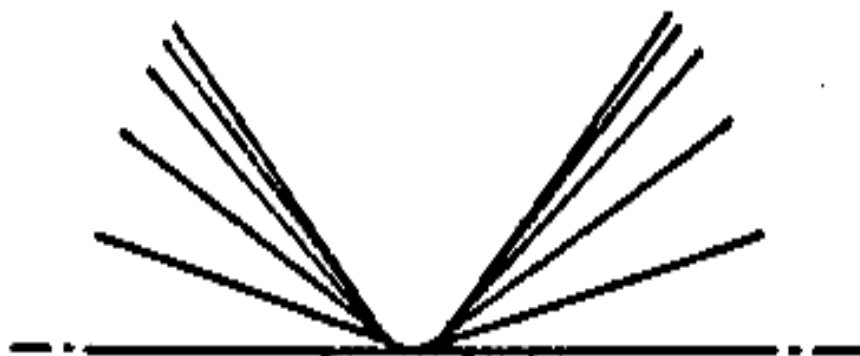


Fig. 9.10 - Linea di profilatura a rulli (γ = angolo di formatura).

Metodi

- **Metodo “linea base”**: considera quale asse neutro sul quale impostare la deformazione la parte inferiore del profilo
- **Metodo “centro base”**: considera quale asse neutro attorno alla quale si deforma il profilato, l’asse del minimo momento di inerzia della sezione del profilato

Metodi



metodo "linea base"



metodo "centro base"

Fig. 9.11 - Metodi di profilatura comunemente usati.

Considerazioni

- **Il 1° metodo necessita di rulli raddrizzatori per evitare bordi ondulati**
- **Il 2° metodo consente di avere la minimizzazione della forza necessaria per la deformazione**
- **Il vantaggio della profilatura a rulli in luogo della piegatura tradizionale sta nel non avere limiti alla lunghezza del profilo in lavorazione**

