



Lavorazioni per deformazione plastica

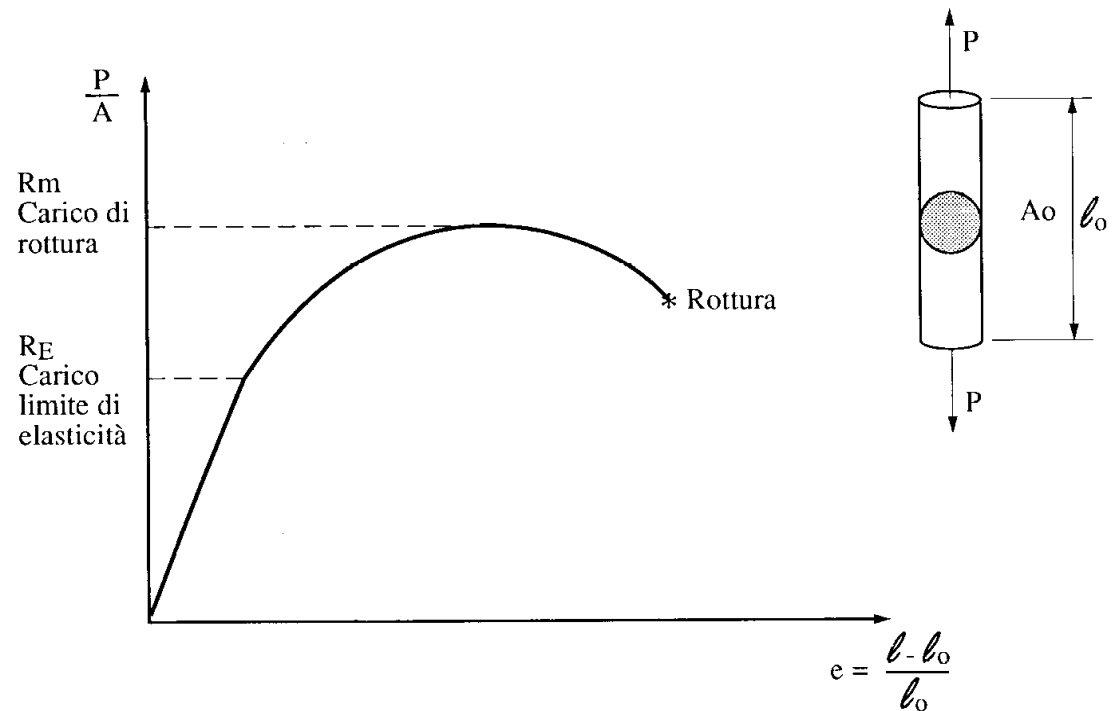
I materiali metallici subiscono variazioni permanenti di forma quando assoggettati a sollecitazioni superiori al limite elastico.

Nel caso monossiale, tale valore è immediatamente evidente, mentre in caso di sollecitazioni composte si deve adottare un criterio di resistenza.

Nel caso monoassiale, il comportamento del materiale è descritto da:

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

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad e = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0}$$

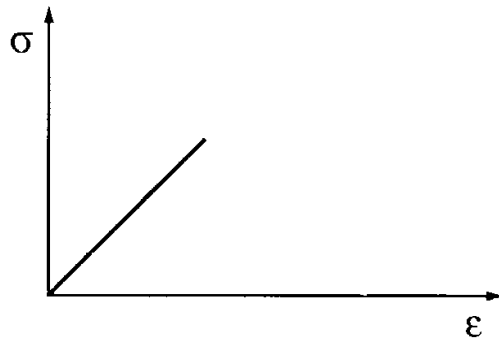




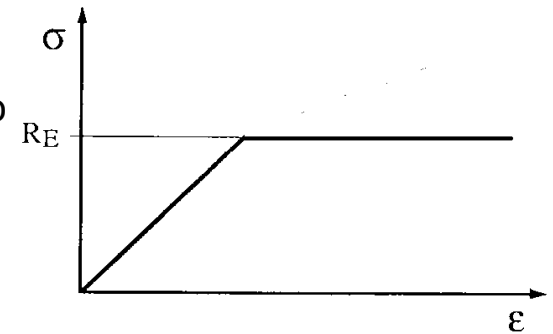
Si possono avere diversi andamenti

in funzione del materiale

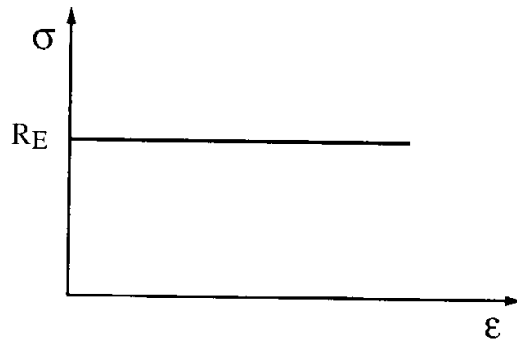
Elastico perfetto



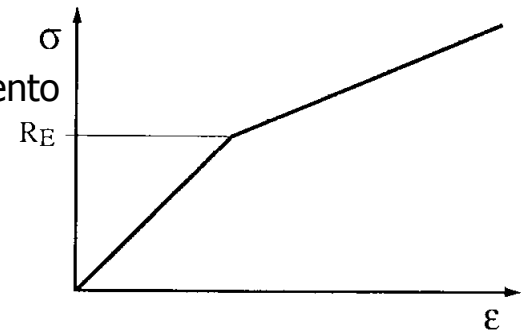
Elasto-plastico perfetto



Plastico perfetto

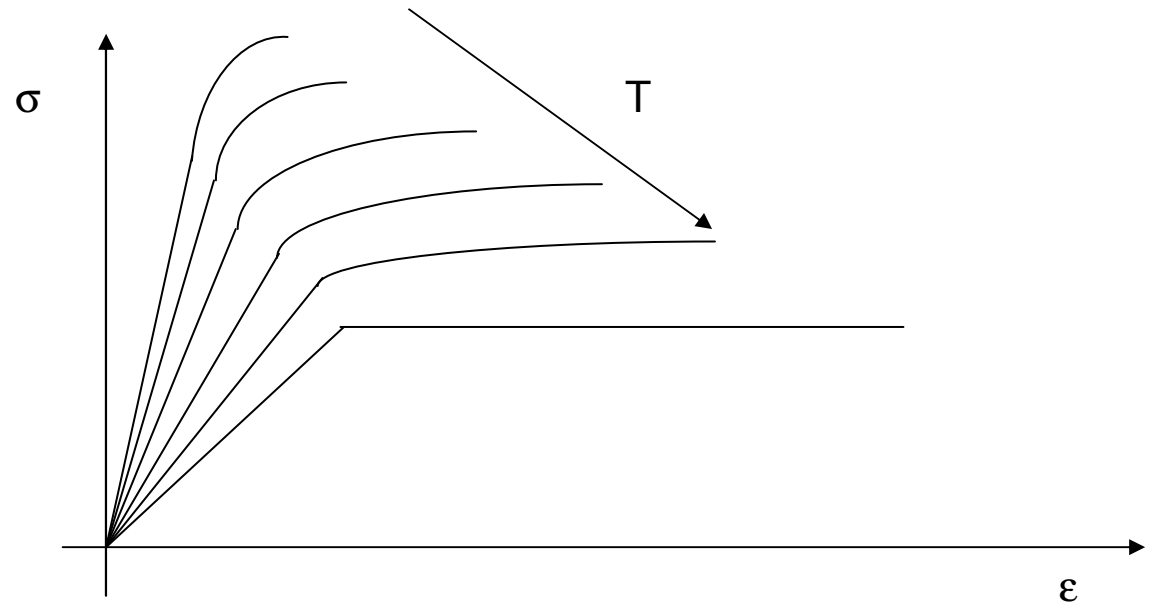


Elasto-plastico con incrudimento





in funzione della temperatura



Il differente comportamento indica
diversi meccanismi di deformazione:

- al di sotto della temperatura di ricristallizzazione
la velocità di incrudimento è superiore
alla velocità di riassetto
- al di sopra della temperatura di ricristallizzazione
il fenomeno è opposto

regola empirica: $T_{ricr} = \frac{2}{3}T_f$

Ovvero: $\theta = \frac{2}{3}$

Dal punto di vista della tecnologia: lavorazioni a caldo
lavorazioni a freddo

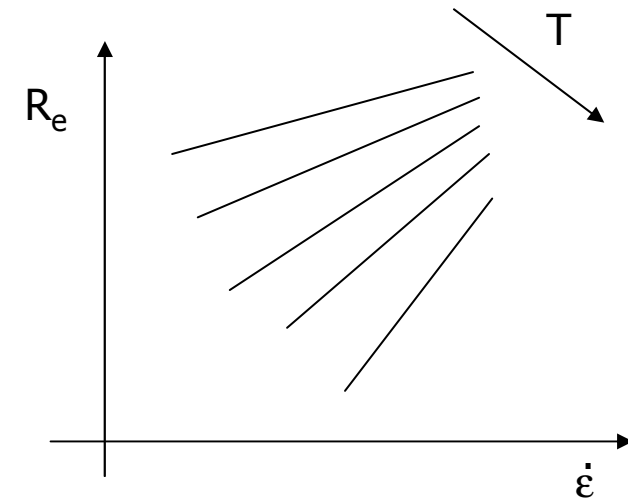


in funzione della velocità di deformazione

Meccanismo: velocità di incrudimento
 velocità di ricristallizzazione

A basse temperature : - alta resistenza meccanica
 - poco sensibile a $\dot{\epsilon}$

Ad alte temperature : - bassa resistenza
 - molto sensibile

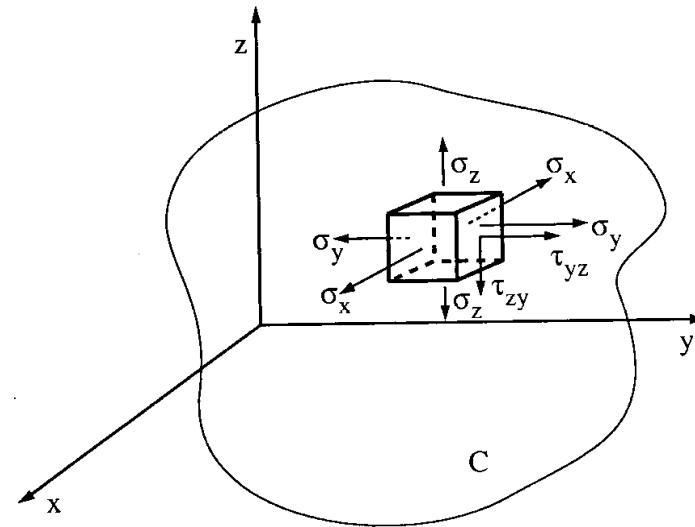


Criteri di resistenza

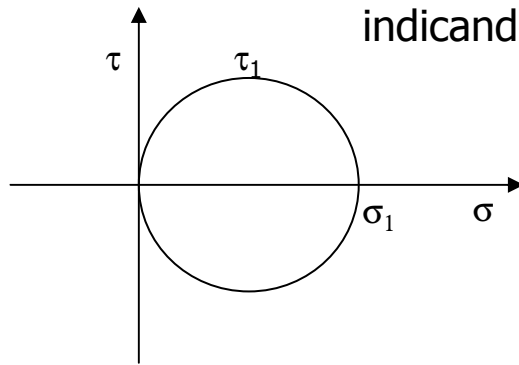
Nel caso di sollecitazioni composte è necessario individuare una semplice relazione che rappresenti il comportamento del materiale al fine di individuare il valore delle forze esterne applicate necessarie per avere deformazione plastica: ciò è possibile analizzando le tensioni principali che portano ai seguenti criteri di plasticità

Criterio di Tresca
massima tensione tangenziale
 $\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$

Criterio di Von Mises
energia di deformazione
 $E = 1 / 12 G [(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$



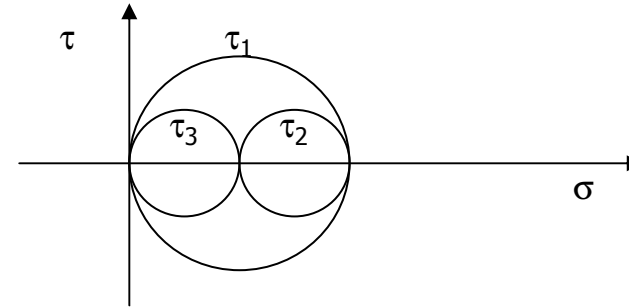
Caso monoassiale



Tresca / Guest $k = R_e / 2$

+ semplice
non a favore della sicurezza

Nel cerchio di Mohr
indicando con k la τ_{\max}



$$1/12 G 2 R_e^2 = 1/12 G (4 \tau_1^2 + 4 \tau_2^2 + 4 \tau_3^2)$$

$$\text{ma } \tau_2 = \tau_3 = \tau_1 / 2$$

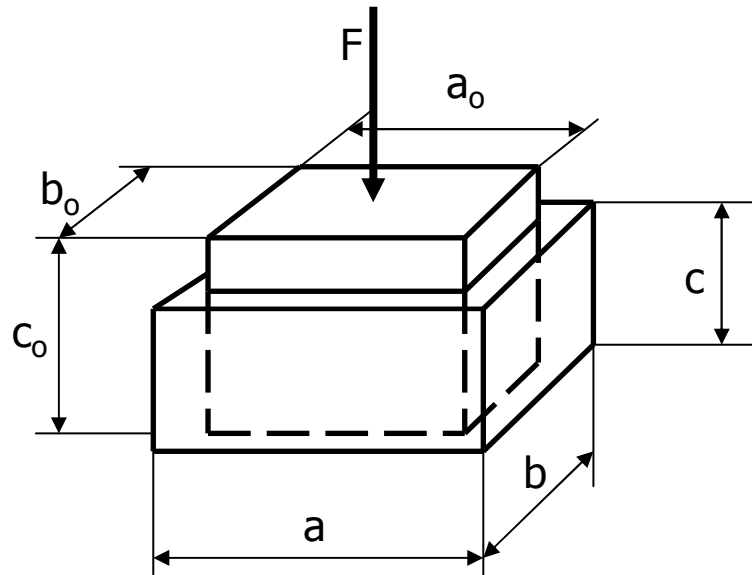
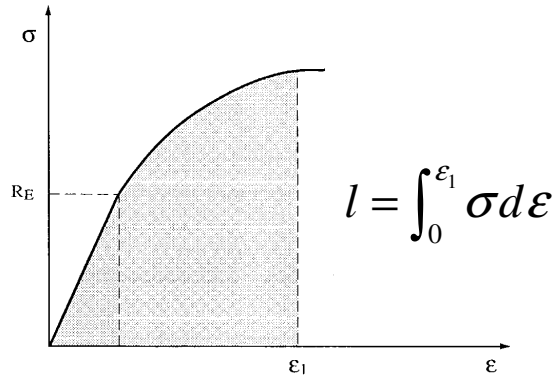
e quindi

$$2 R_e^2 = 6 \tau_1^2$$

Von Mises: $k = \frac{R_e}{\sqrt{3}}$

più complicato
alcune grandezze non sono ben conosciute

Lavoro di deformazione



Lavoro di deformazione parallelepipedo

$$L_{dp} = F \Delta c = pab\Delta c = pabc \frac{\Delta c}{c} \quad dL_{dp} = pV \frac{dc}{c}$$

$$L_{dp} = \int_c^{c_0} pV \frac{dc}{c} = pV \int_c^{c_0} \frac{dc}{c} = pV \ln \frac{c_0}{c} = R_E V \ln \frac{c_0}{c}$$

rendimento della lavorazione $\rho_{lav} = \frac{L_{dp}}{L_{fornito}}$

poiché sono da considerare anche i lavori connessi con le forze di attrito e con la distorsione delle sezioni risulta:

	estrusione	laminazione	trafilatura
rendimento	30%	85%	50%

Metodo dell'elemento sottile

Ipotesi

stato di deformazione piano: $\sigma_x - \sigma_y = 2k$

geometria $h \ll b$

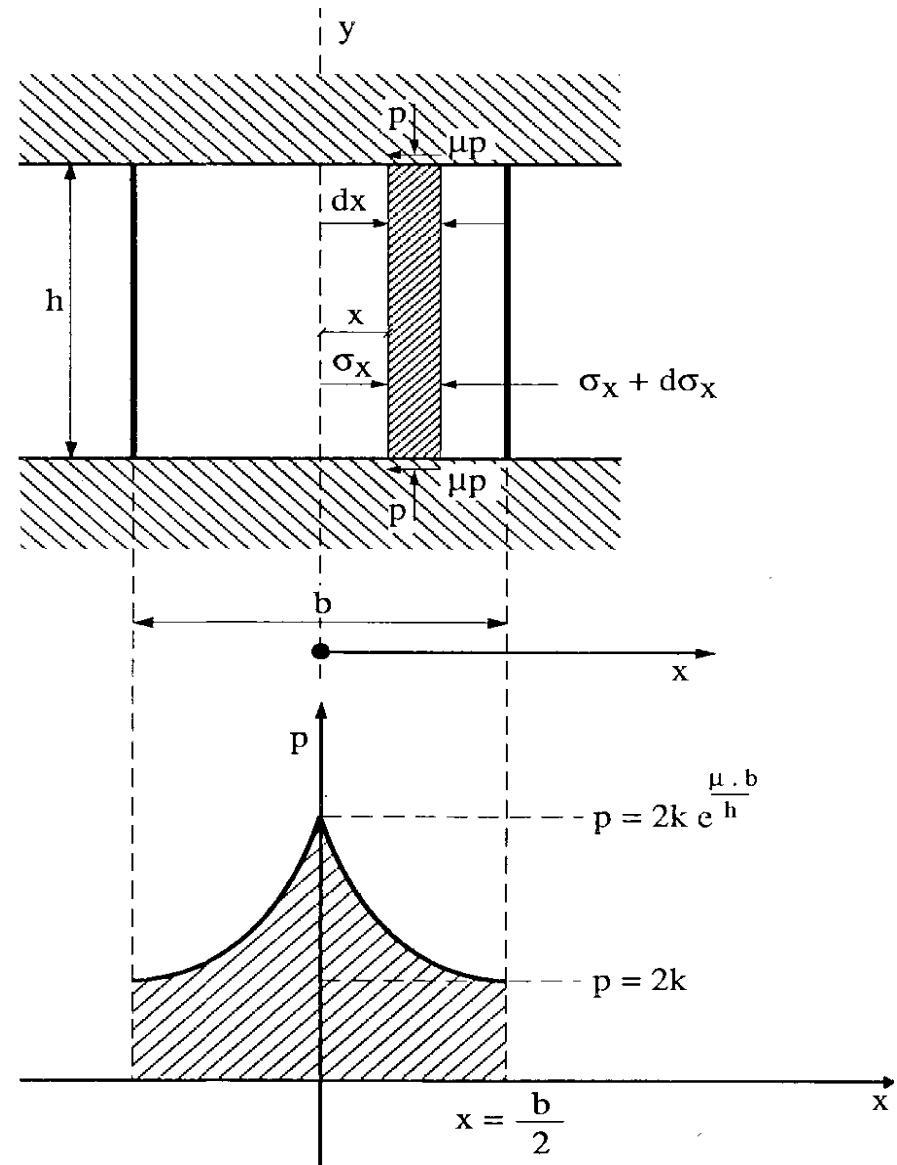
coefficiente di attrito μ costante

$$\sigma_x h - (\sigma_x + d\sigma_x) h + 2\mu p dx = 0$$

$$2\mu p dx = hd\sigma_x$$

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

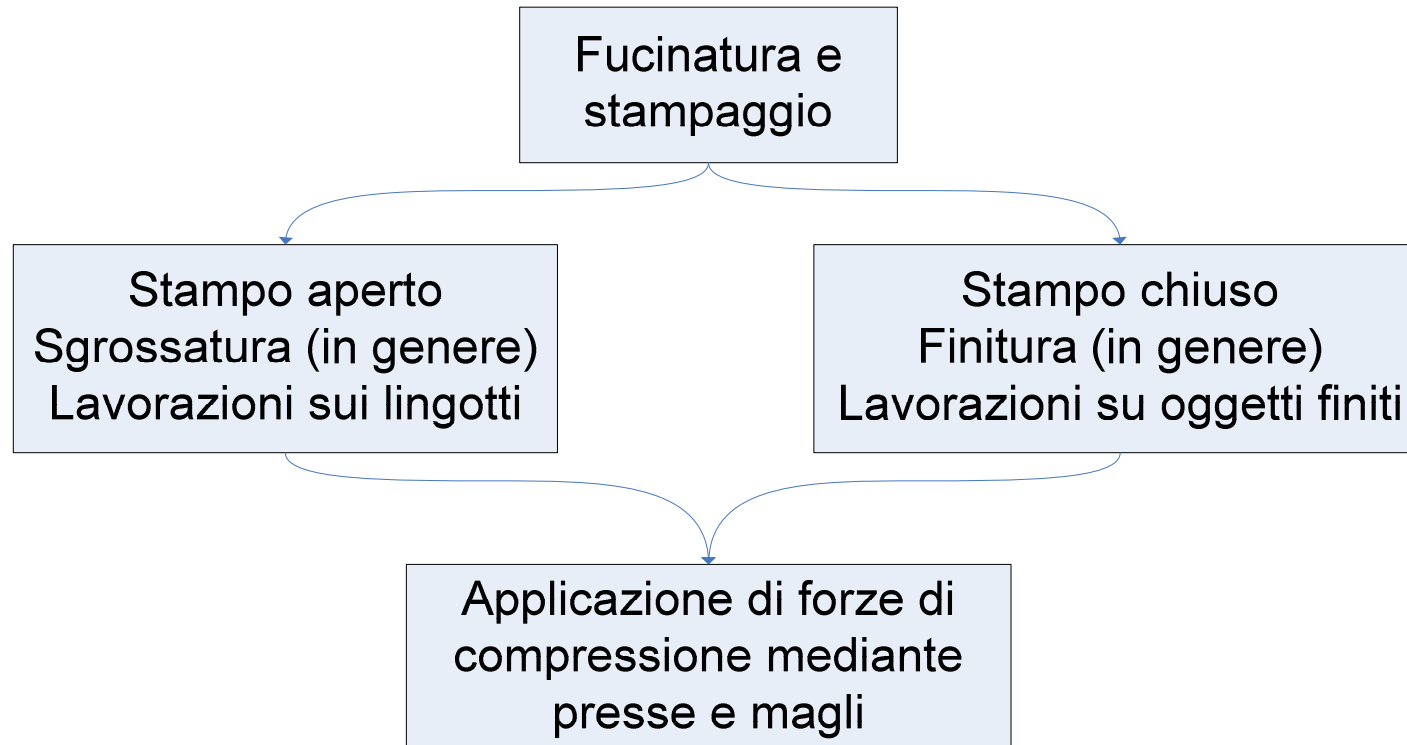
$$2\mu p dx = -hdp \quad \frac{p}{2k} = e^{\frac{2\mu}{h}\left(\frac{b}{2}-x\right)}$$





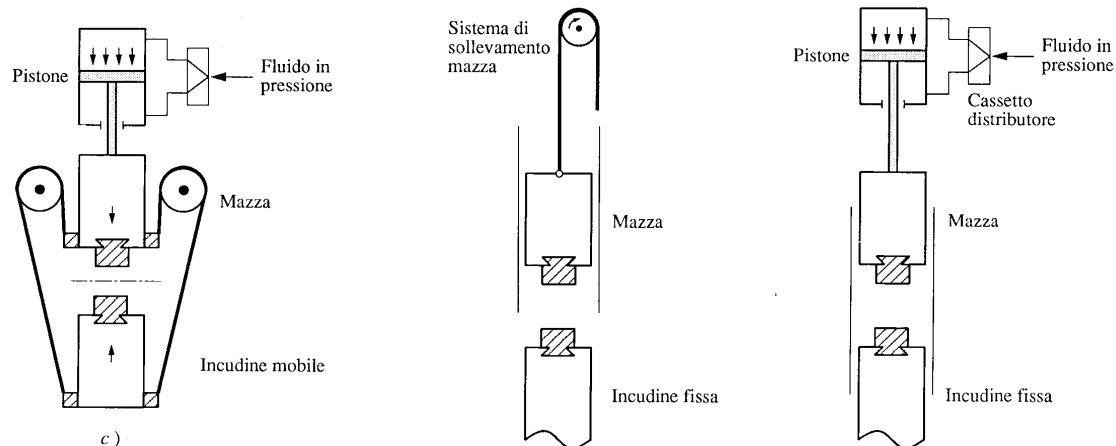
Altri metodi di calcolo delle forze

FEM	(elementi finiti)	approssimato, adatto per l'uso con calcolatori
Upper bound	(limite superiore)	fornisce valore della forza che da sicuramente deformazione
Slip line field	(linee di scorrimento)	blocchi di materiale che scorrono l'uno rispetto all'altro lungo linee con tensione tangenziale massima

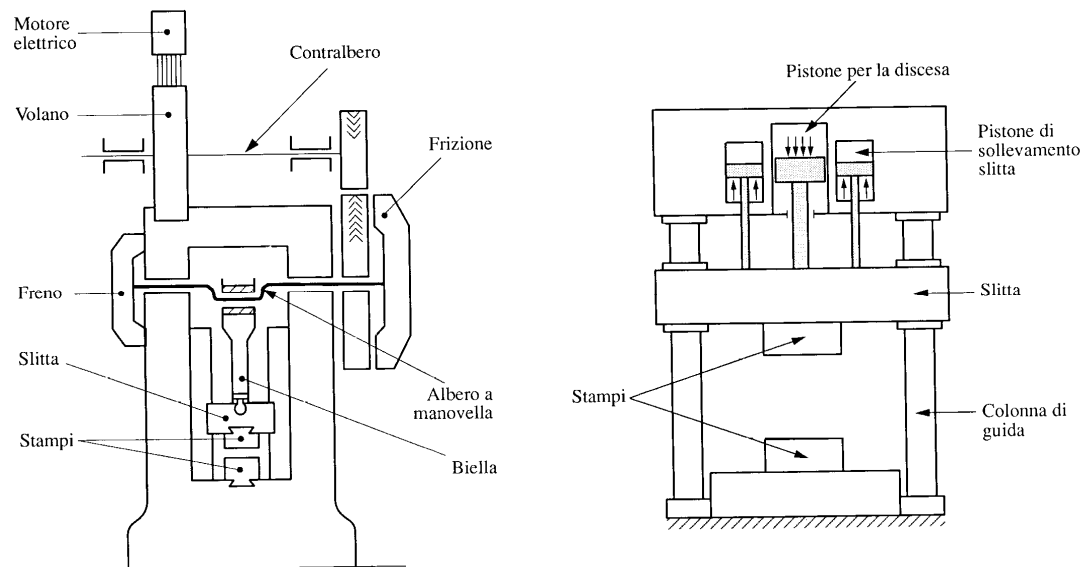




Magli

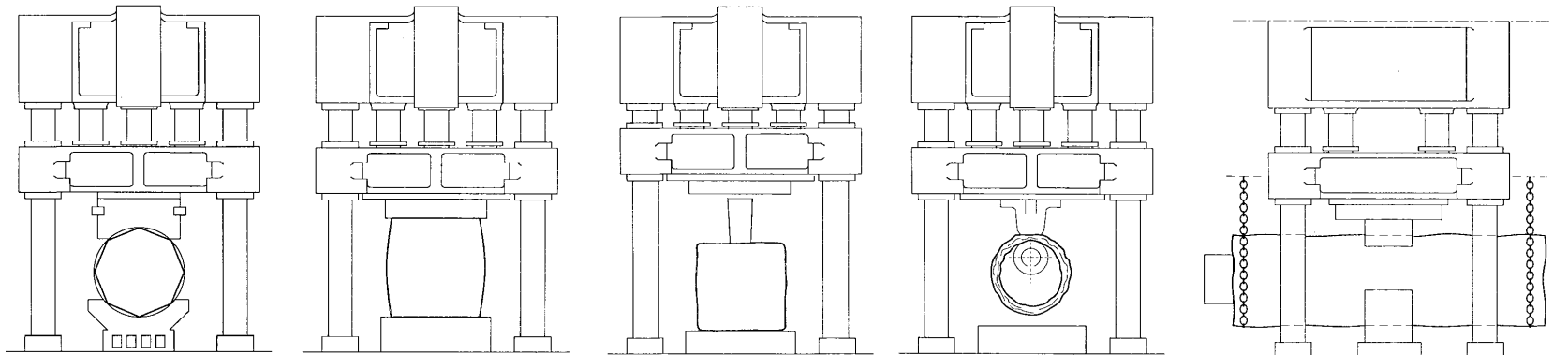


Presse

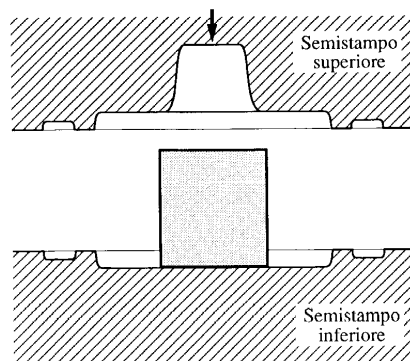




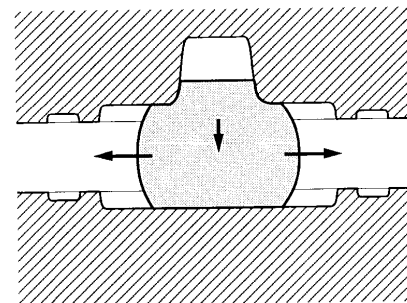
Fucinatura



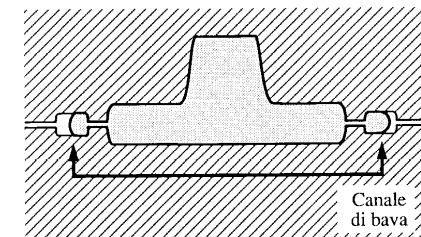
Stampaggio



Inizio operazione



Schiacciamento del materiale



Riempimento dello stampo e fuoriuscita nel canale di bava



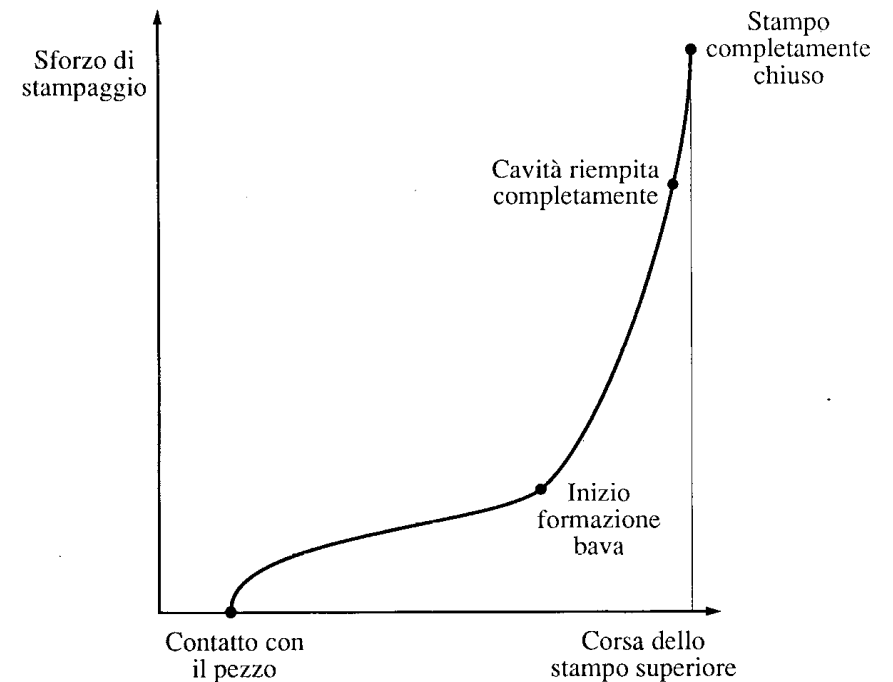
Forze di stampaggio

Nel caso dello stampaggio sono disponibili modelli empirici oppure è possibile applicare il FEM, ove possibile modellare la forma del corpo con adeguata approssimazione

$$F = k R_e A$$

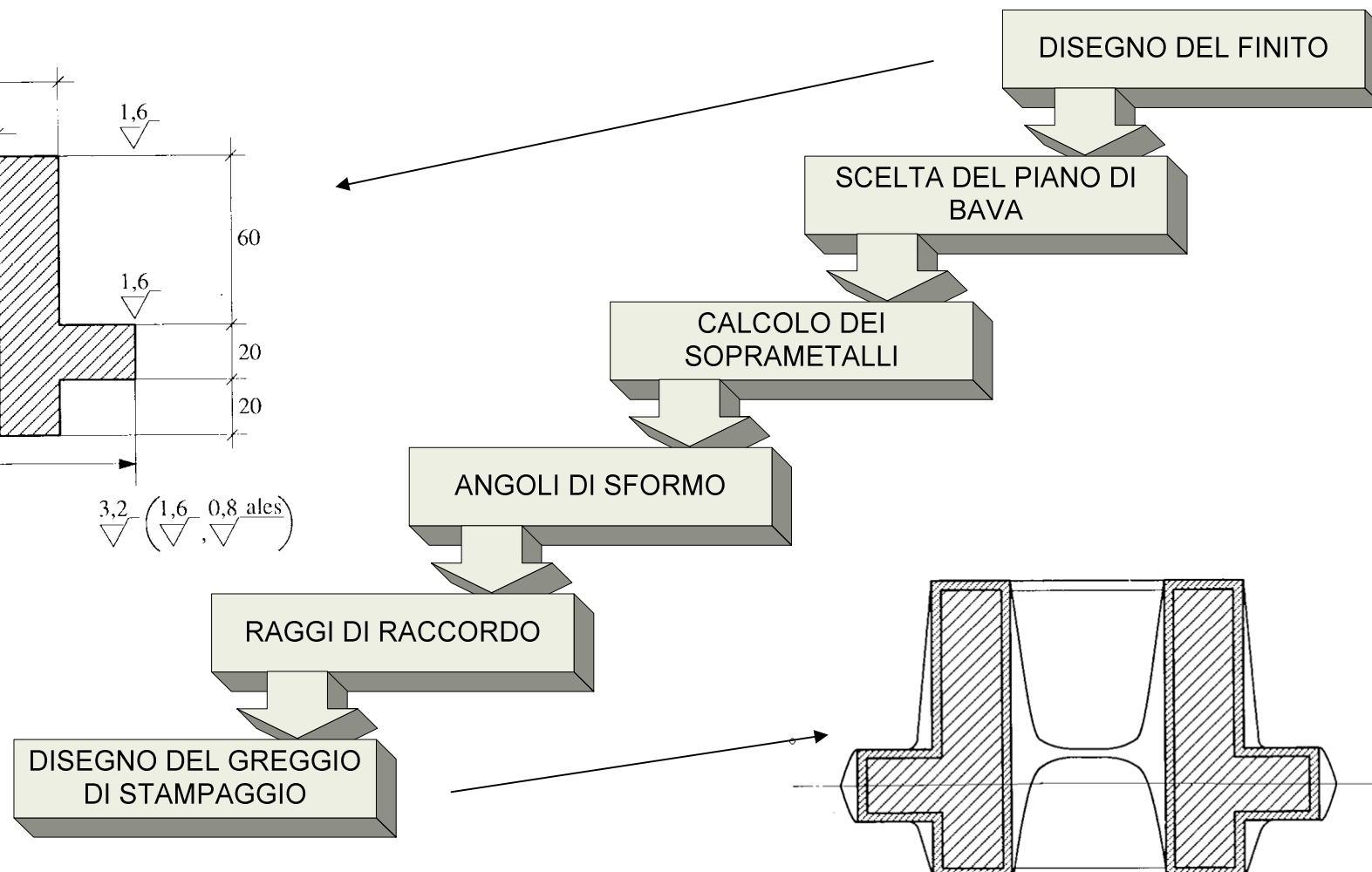
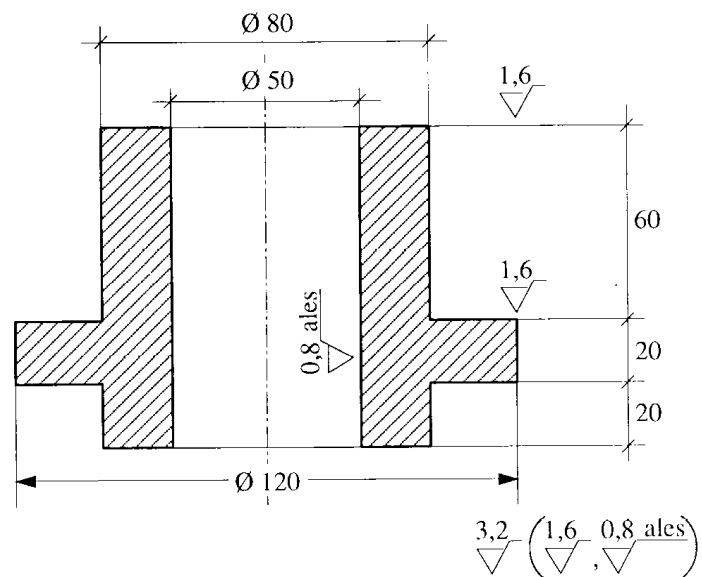
- R_e resistenza del materiale
- A impronta del pezzo sul piano di bava, compresa la camera scartabava
- k costante
3-5 pezzi semplici
5-8 con scartabava
8-12 forme complesse

Nella fucinatura si può senz'altro applicare il lavoro parallelepipedo o l'elemento sottile



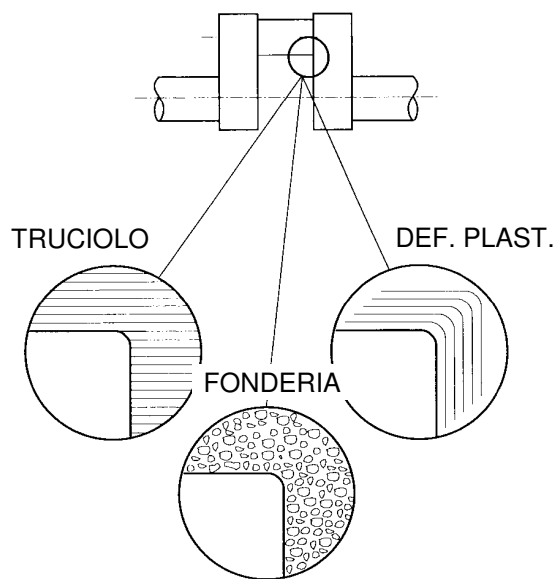


Esempio: progettazione del ciclo di stampaggio di una boccola

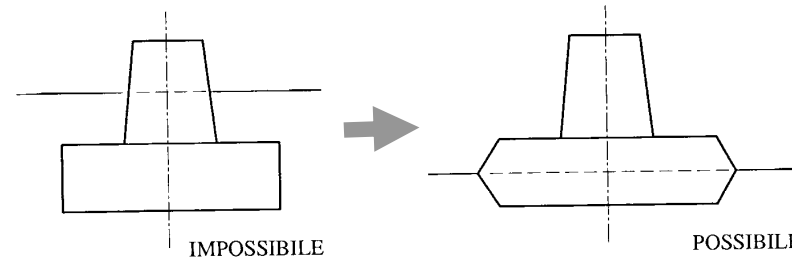




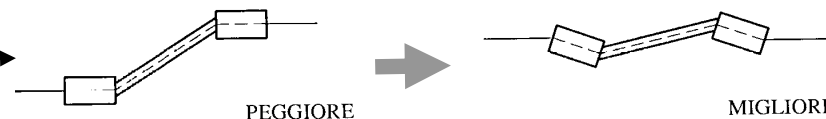
Scelta del piano di bava



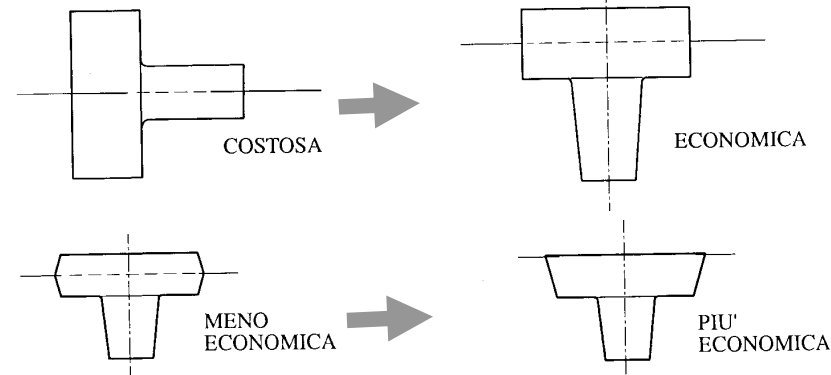
sottosquadri



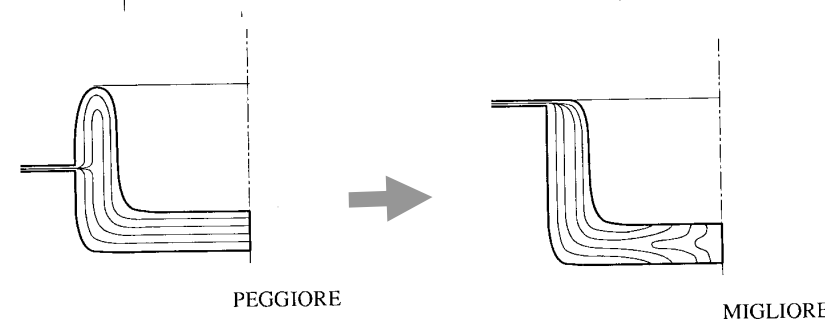
riduzione della
altezza del pezzo



lavorazione
impronte



fibrosità della struttura





Sovrametalli

dimensioni del pezzo
ossidazione alta temperatura
difetti superficiali
incompleto riempimento
ritiro

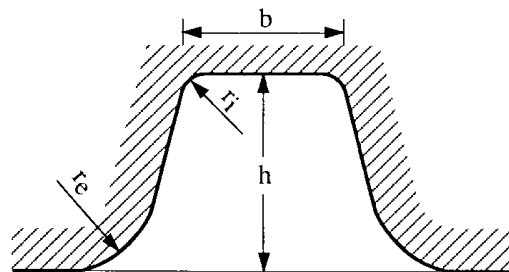
Valori medi indicativi (in mm) dei sovrametalli di lavorazione sui greggi di stampaggio a caldo.

DIMENSIONI NOMINALI (mm)	LUNGHEZZA DEL PEZZO (mm)			
	≤ 100	100 ÷ 300	300 ÷ 500	500 ÷ 1000
≤ 50	1,8 ÷ 2,3	1,8 ÷ 2,3	2,3 ÷ 3,1	3 ÷ 3,4
50 ÷ 75	2 ÷ 3	2 ÷ 3	2,5 ÷ 3	3,5 ÷ 4
75 ÷ 100	2 ÷ 3,5	2 ÷ 3,5	3 ÷ 3,5	3,5 ÷ 4,5
100 ÷ 400	3 ÷ 3,5	3 ÷ 4	3,5 ÷ 4,5	4,5 ÷ 5
400 ÷ 800	4 ÷ 4,5	4 ÷ 5	4,5 ÷ 5	5 ÷ 5,5
800 ÷ 1000	4 ÷ 5	4,5 ÷ 5,5	5,5 ÷ 6	5 ÷ 6,5

Angoli di sformo (7-8°) pezzi normali
(10-12°) pezzi alti
per facilitare il riempimento
per evitare usura durante l'estrazione

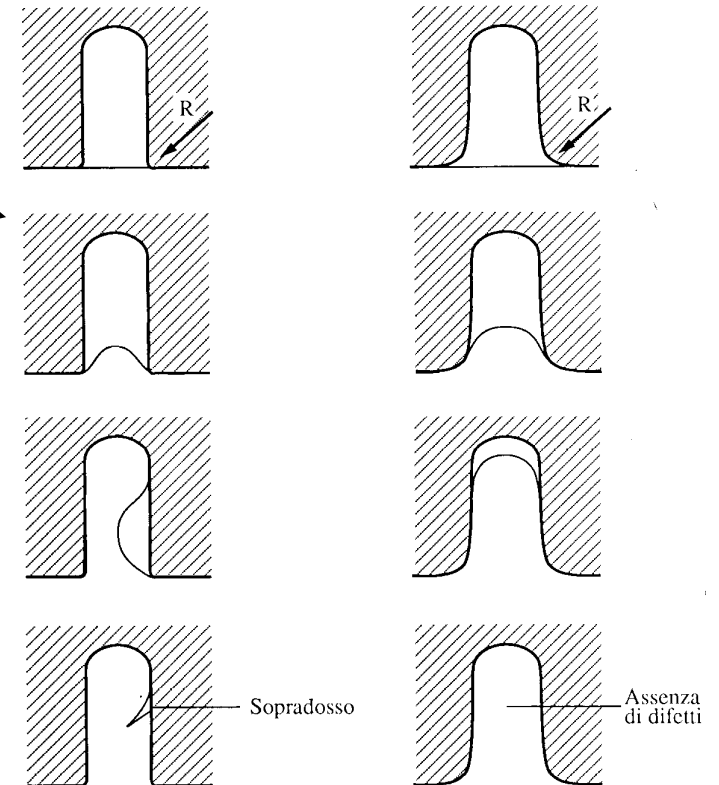
Raggi di raccordo

per evitare - concentrazioni di tensioni
- distacco del materiale durante
il riempimento



Valori tipici

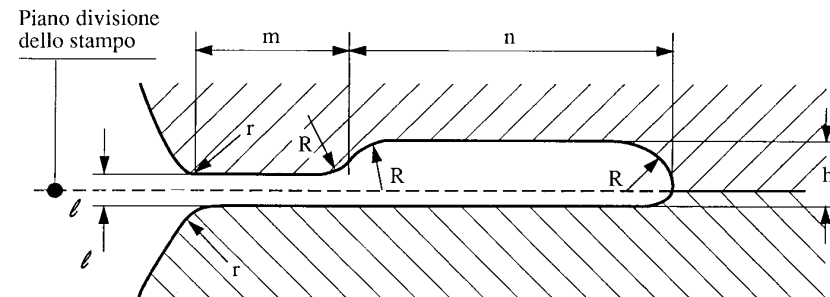
h/b	r_i (mm)	r_e (mm)
≤ 2	$0,06h + 0,5$	$2,5r_i + 0,75$
$2 \div 4$	$0,07h + 0,6$	$3r_i + 0,75$
> 4	$0,08h + 0,75$	$3,5r_i + 0,75$



Dimensionamento del canale di bava

Accoglie il materiale in più necessario per l'impossibilità di conoscere esattamente il volume richiesto

favorisce il riempimento della forma: il materiale si raffredda molto e viene trattenuto cosicchè fluisce anche in zone difficili da riempire



$l_{[mm]}$	$h_{[mm]}$	$r_{[mm]}$	$m_{[mm]}$	$n_{[mm]}$
0,6	3,3	1	6	18
0,8	3,4	1	6	20
1	3,5	1	7	22
1,6	4,3	1	8	22
2	5	1,5	9	25
3	6,5	1,5	10	28
3	6,5	1,5	10	28
4	8	2	11	30
5	9,5	2	12	32
6	11	2,5	13	35
8	14	3	14	38
10	17	3	15	40

$$R \cong (2,5 + 3)r + 0,5 \quad l = 0,0175\sqrt{A} \quad A = \text{area dell'impronta del pezzo nello stampo}$$



Determinazione del volume di materiale da stampare:

Valori indicativi delle variazioni dimensionali causate dal ritiro del materiale degli elementi stampi.

MATERIALI	SALTO TERMICO (°C)	RITIRO MEDIO %
ACCIAIO	1000° - 20°	1,1
BRONZO	500° - 20°	0,85
OTTONE	500° - 20°	0,95
RAME	500° - 20°	0,85
LEGHE LEGGERE	400° - 20°	0,95

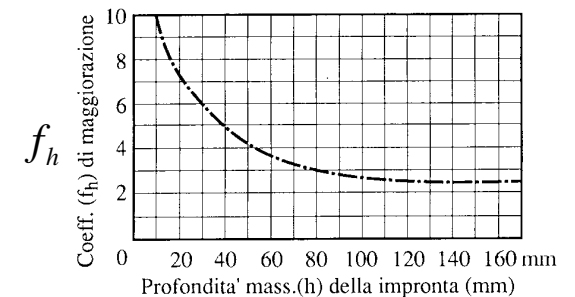
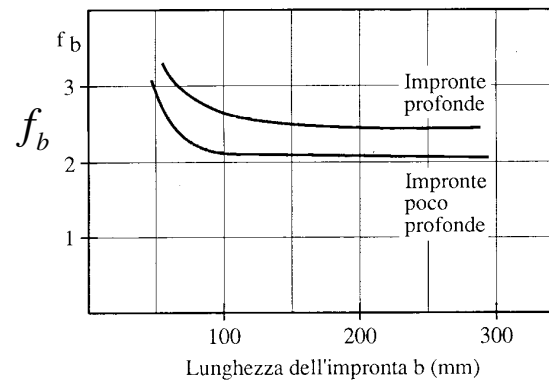
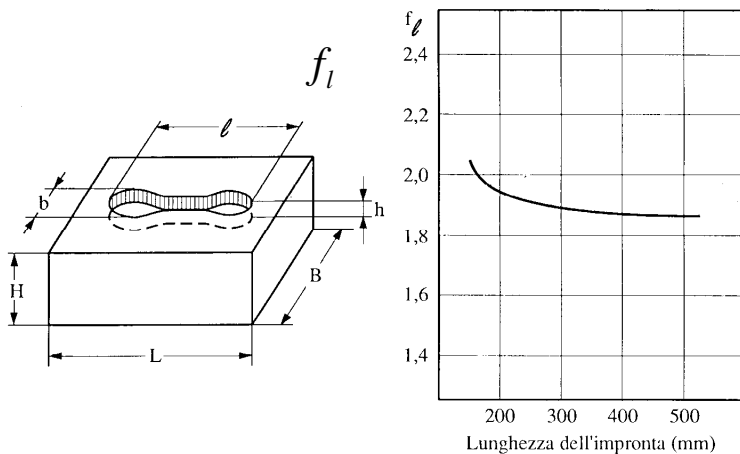
Determinazione delle dimensioni dello stampo:

$$L = l \cdot f_l$$

$$H = h \cdot f_h$$

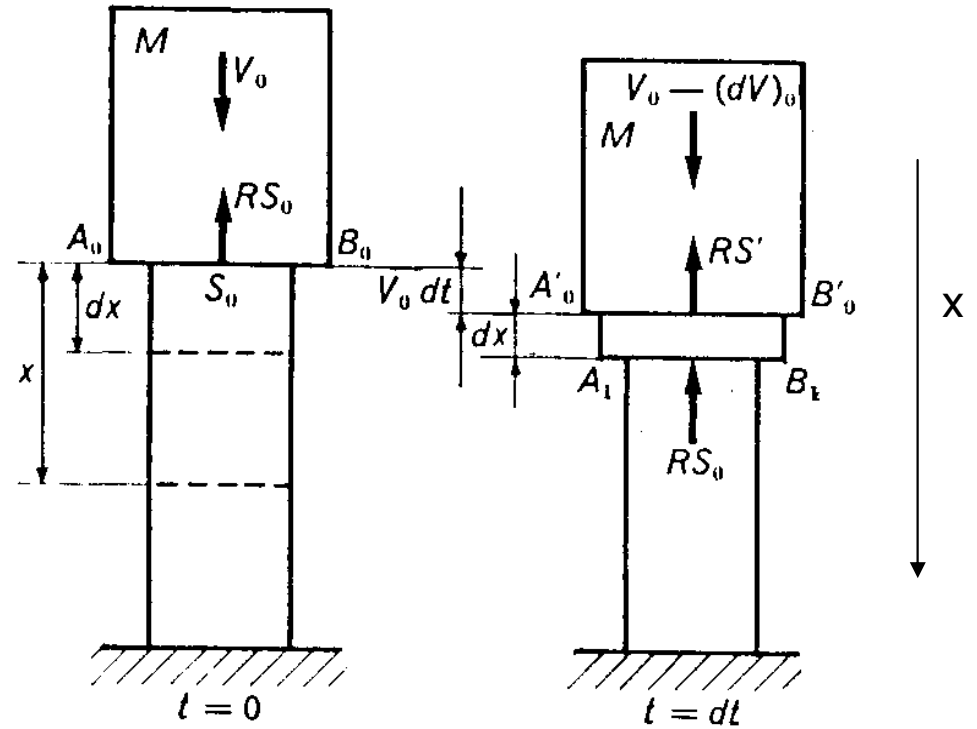
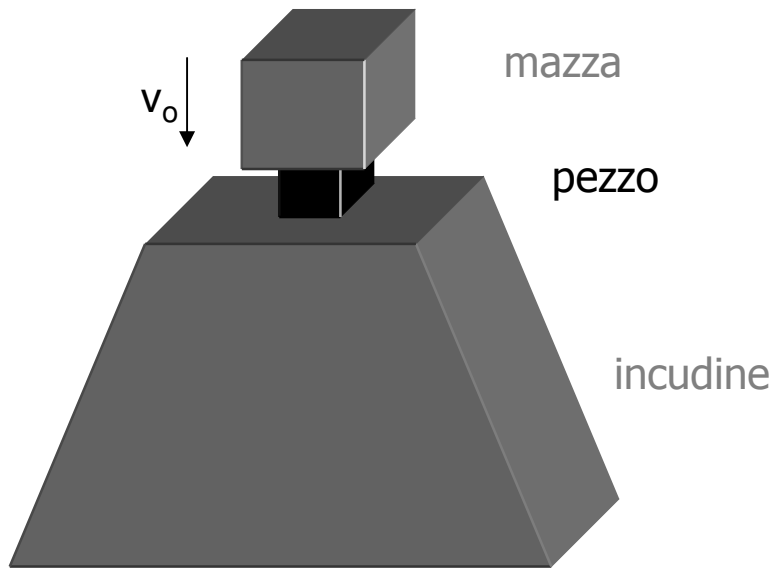
$$B = b \cdot f_b$$

dependono da: materiale stampo
lavorazioni meccaniche
resistenza alle forze
di stampaggio



Lavorazioni al maglio

Applicazione di - forza elevata
- in breve tempo



per la costanza del volume: $S_0 dx = S' dx'$
 $dx' = dx - v_0 dt$

e quindi

$$S' = S_0 \frac{\left(\frac{dx}{dt}\right)_0}{\left(\frac{dx}{dt}\right)_0 - v_0}$$

lo strato assume nel tempo dt la velocità del maglio

variazione di q.d.m.
del maglio

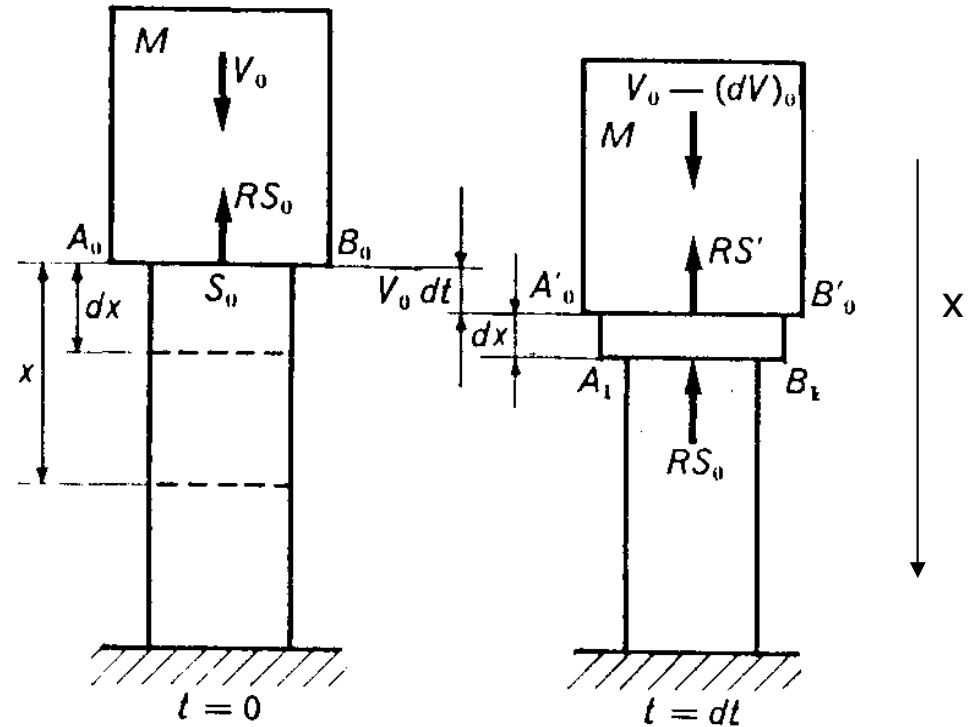
$$R_e S_0 dt = M (dv)_0 + \rho S_0 v_0 dx$$

impulso di forza

variazione di q.d.m. dello
strato di materiale

$$M \left(\frac{dv}{dt}\right)_0 = -R_e S'$$

forza sulla faccia inferiore





Sostituendo:
$$R_e S_0 \frac{\left(\frac{dx}{dt}\right)_0}{\left(\frac{dx}{dt}\right)_0 - v_0} = R_e S_0 + \rho S_0 v_0 \left(\frac{dx}{dt}\right)_0$$

da cui:
$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_0^2 - v_0 \left(\frac{dx}{dt}\right)_0 - \frac{R}{\rho} = 0$$

propagazione della deformazione

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_0 = \frac{v_0}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{4R}{\rho v_0^2}} + 1 \right)$$

variazioni della sezione

$$S' = S_0 \frac{\sqrt{1 + \frac{4R}{\rho v_0^2}} + 1}{\sqrt{1 + \frac{4R}{\rho v_0^2}} - 1}$$

decelerazione del maglio

$$\left(\frac{dv}{dt}\right)_0 = -\frac{RS_0}{M} \frac{\sqrt{1 + \frac{4R}{\rho v_0^2}} + 1}{\sqrt{1 + \frac{4R}{\rho v_0^2}} - 1}$$



Successivamente il fenomeno si ripete ma con una massa 'apparente' aumentata dello strato di materiale deformato che si muove con la 'nuova' velocità del maglio

$$M' = M + \rho S_0 \left(\frac{dx}{dt} \right)_0 dt$$

$$v = v_0 + \left(\frac{dv}{dt} \right)_0 dt$$

Ripetendo il ragionamento indefinitamente:

$$\left(\frac{dx}{dt} \right)_0 = \frac{v_0}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{4R}{\rho v_0^2}} + 1 \right) \quad \left(\frac{dv}{dt} \right)_0 = - \frac{RS_0}{M + \rho S_0 x} \frac{\sqrt{1 + \frac{4R}{\rho v_0^2}} + 1}{\sqrt{1 + \frac{4R}{\rho v_0^2}} - 1} \quad S' = S_0 \frac{\sqrt{1 + \frac{4R}{\rho v_0^2}} + 1}{\sqrt{1 + \frac{4R}{\rho v_0^2}} - 1}$$

S' è la sezione alla quale si ha la deformazione plastica nell'istante in cui il maglio ha velocità V con la sua massa M alla distanza x dalla superficie originaria.

Questa sezione è preceduta da quelle già deformate che non si deformano più perché la F decresce con la V che decresce nel tempo e quindi $F < R_e$

→ carattere propagatorio della deformazione



$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_0 = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{R}{\rho}} \left(\sqrt{4+y^2} + y \right) \right)$$

Introducendo la variabile ausiliaria: $y^2 = \frac{\rho v^2}{R_e}$

$$\sqrt{\frac{R}{\rho}} \frac{dy}{dt} = - \frac{RS_0}{M \rho S_0 x} \frac{\sqrt{4+y^2} + y}{\sqrt{4+y^2} - y}$$

$$S' = S_0 \frac{\sqrt{4+y^2} + y}{\sqrt{4+y^2} - y}$$

Ed essendo: $R_{e \min} = 4 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$
 $\rho_{\max} = 8 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

si ha che $y_{\max} = 0.21$ e quindi $y^2 < 0.05$ cioè trascurabile

Quindi si può approssimare e determinare la celerità di propagazione (per $v = 0$): $\frac{dx}{dt} = \sqrt{\frac{R}{\rho}}$



Dalle precedenti, ponendo $v = 0$ si ricava la massima profondità cui arriva la deformazione ed il corrispondente valore della sezione

$$x_{\max} = \frac{My_0}{\rho S_0}$$

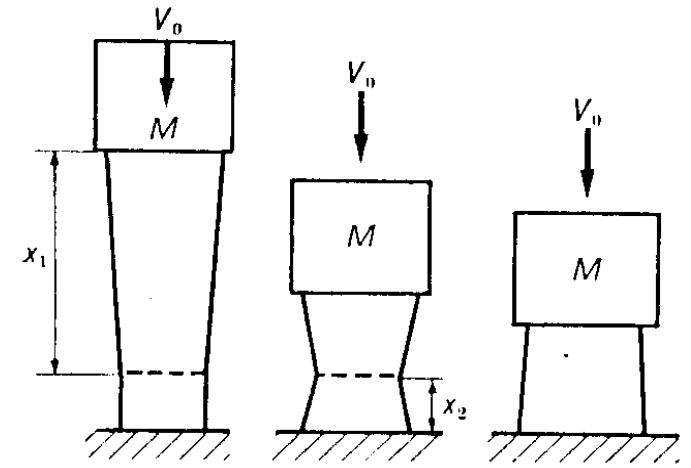
$$S_{\max} = S_0 \left(\frac{2 + y_0}{2} \right)^2 \quad (\text{la sezione superiore !!})$$

ed infine eliminando y fra le precedenti, si ottiene la relazione $S' = S'(x)$ (profilo delle sezioni deformate)

Conclusioni

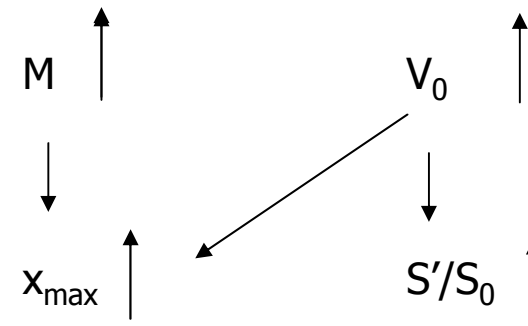
la deformazione avviene istante per istante, su strati infinitesimi

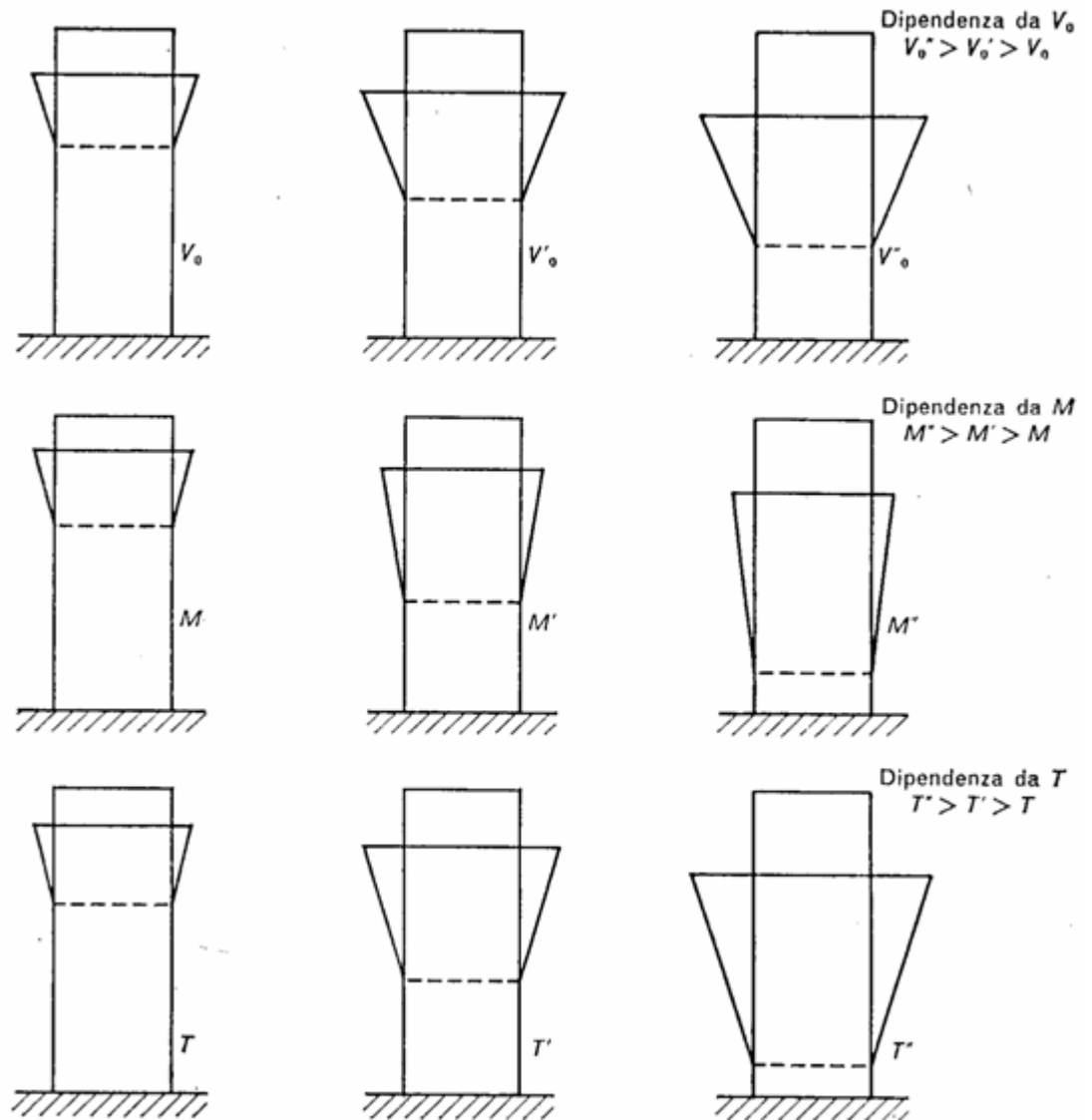
se $H_{\text{tot}} < x_{\text{max}}$, allora la deformazione si riflette perché l'incudine ha massa e rigidità teoricamente infinita
quindi, se abbiamo massa M molto grande, la deformazione del lingotto tende ad essere omogenea



la S_{max} dipende dalla V_0 , non dipende dalla massa

la x_{max} dipende da ambedue



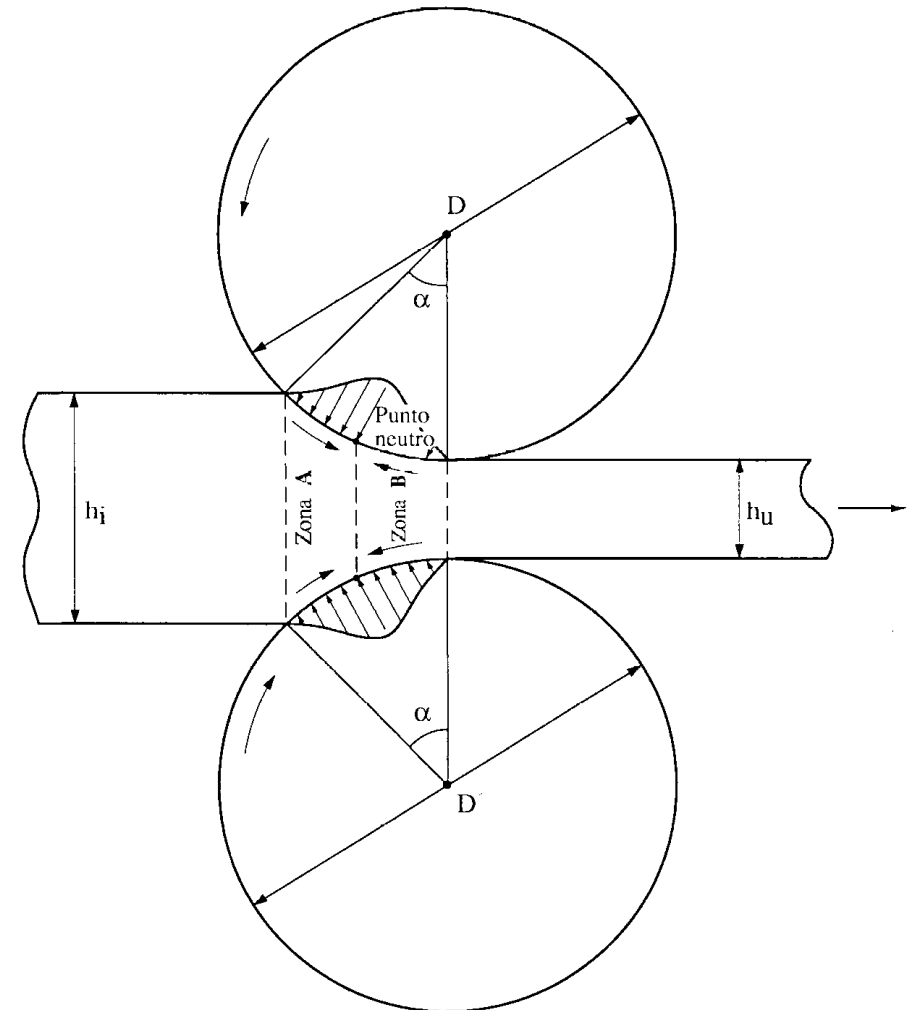


L'effetto della temperatura si spiega tenendo conto che R_e decresce con la temperatura

Laminazione

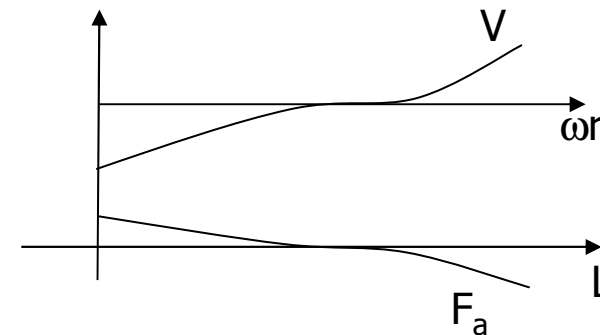
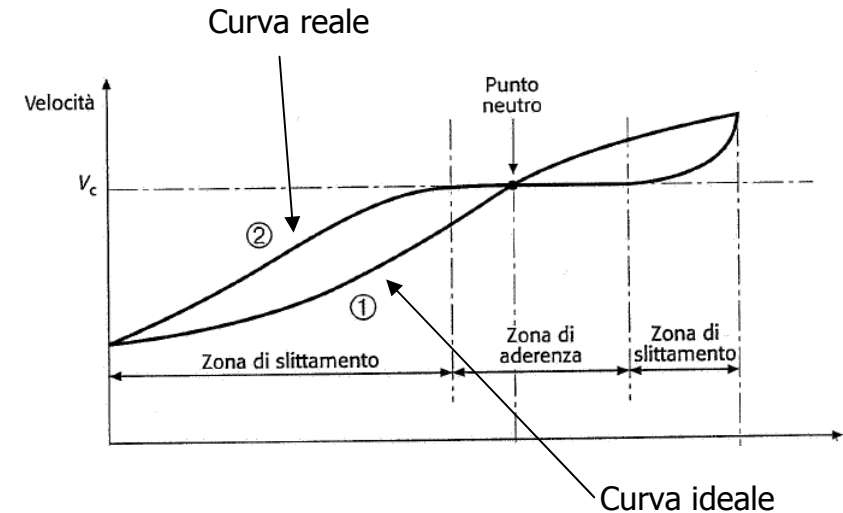
Riduzione di sezione di un componente
(generalmente prismatico) nel passaggio
attraverso la luce fra due cilindri contro-rotanti

Allargamento trascurabile
Andamento delle forze d'attrito
Andamento delle velocità
Andamento delle pressioni
Raggio dei cilindri
Rapporto di riduzione
Arco di contatto



Andamento delle forze di attrito

A sinistra la velocità del laminando è minore della velocità del laminato a destra (altezza minore ma portata costante) quindi si ha un'accelerazione ed in un solo punto la velocità periferica dei cilindri è uguale alla velocità del laminato ciò accade sulla sezione di inversione quindi a sinistra le forze di attrito hanno componenti dirette verso destra, a destra accade l'opposto



Metodo elemento sottile

equilibrio lungo asse x:

$$hd\sigma_x + \sigma_x dh + 2pdx \tan \alpha \pm 2\mu p dx = 0$$

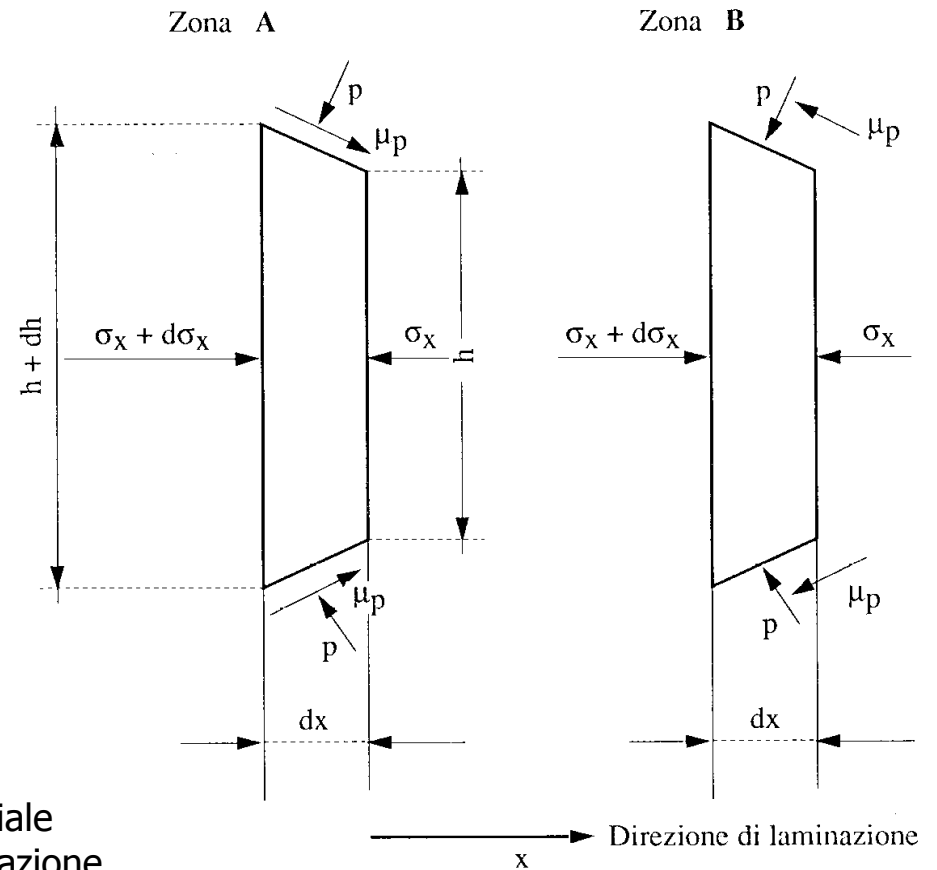
integrata dà:

$$p = c \frac{h}{h_i} e^{\mu(H_0 - H)} \quad \text{zona di entrata}$$

$$p = c \frac{h}{h_u} e^{\mu H} \quad \text{zona di uscita}$$

$$H = 2 \sqrt{\frac{R}{h_u}} \arctan \left(\sqrt{\frac{R}{h_u}} \phi \right)$$

c costante del materiale
 H_0 costante di integrazione
 ϕ posizione angolare $0 < \phi < \alpha$

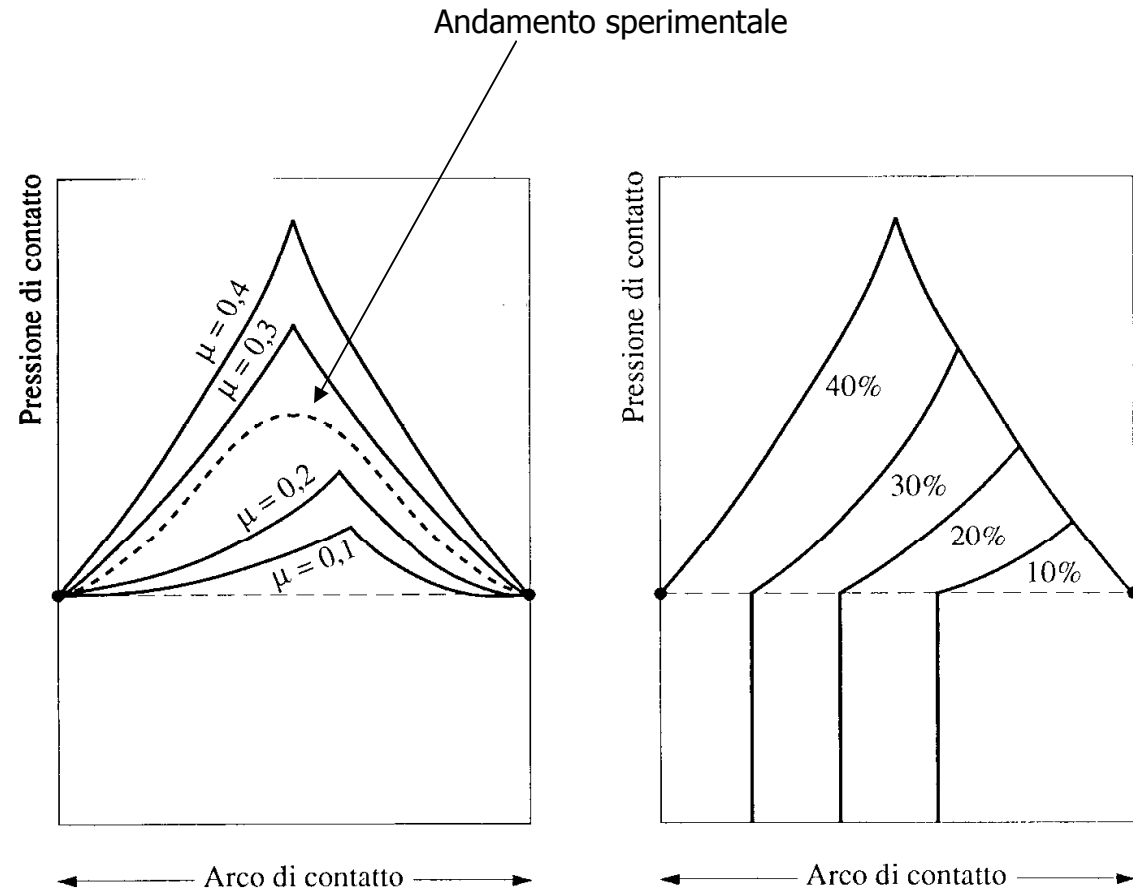


Influenza dei parametri di lavoro

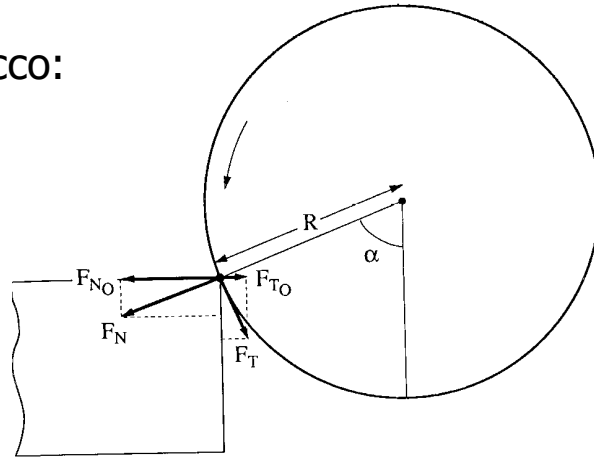
Il punto neutro è il punto in corrispondenza del quale si ha pressione massima

Il punto neutro si sposta verso la sezione di uscita al diminuire della riduzione di spessore

Il valore massimo della pressione aumenta all'aumentare del coefficiente di attrito e della riduzione di spessore



Condizioni di imbocco:



$$F_{T_0} > F_{N_0}$$

$$F_{N_0} = F_N \sin \alpha$$

$$F_{T_0} = F_T \cos \alpha$$

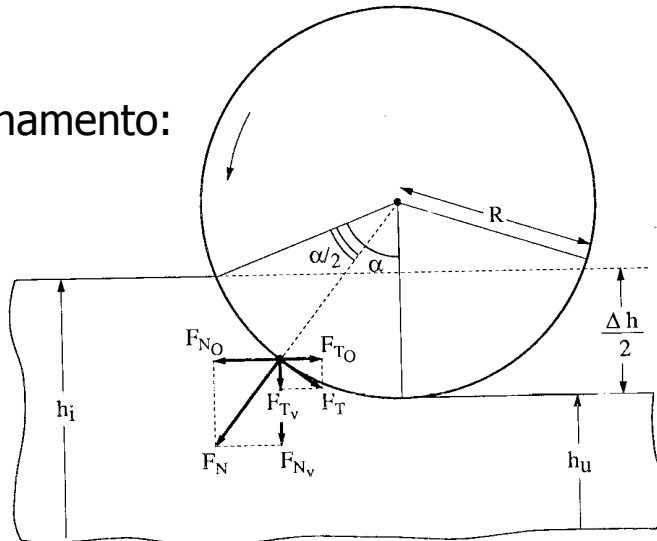
$$F_T = \mu F_N$$

$$\mu = \tan \theta$$

$$\mu > \tan \alpha \quad \theta > \alpha$$

L'angolo di attrito deve essere maggiore dell'angolo di imbocco

Condizioni di trascinamento:



Analogamente a prima: $\theta > \frac{\alpha}{2}$

la condizione di imbocco è più restrittiva di quella di trascinamento

Soluzione approssimata:

$$\tan \alpha \approx \alpha \approx \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$$

$$\mu > \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \Rightarrow \Delta h < \mu^2 R$$



Forza di laminazione:
Metodo empirico

$$l = \sqrt{R\Delta h}$$

arco di contatto

b larghezza del laminato

$$F = l \cdot b \cdot p_m$$

$$p_m = \left(1 + \frac{1.6\mu l 1.2\Delta h}{h_i + h_u} \right) \left(R_e + 2k_1 k_2 v \sqrt{\frac{\frac{\Delta h}{R}}{h_i + h_u}} \right)$$

pressione media di contatto
(formula di Ekelund)

NB: R_e a caldo varia molto in funzione della temperatura di lavoro

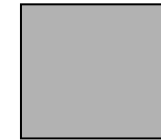
Potenza di laminazione:

$$P = C \cdot \omega = F \cdot \frac{l}{2} \cdot \omega$$



Prodotti della laminazione

lingotti



500x500

laminatoio sbozzatore , blooming

semilavorati

blumi
bramme
billette
bidoni

a caldo

blumi  140 - 400

bramme  80x1000

treni di laminazione

finiti

barre: tonde, quadre esagonali
piatti
profilati speciali
vergella
materiale ferroviario

billette  40 - 100

lamiere  3x1000

calibri

gabbie di laminazione

a freddo

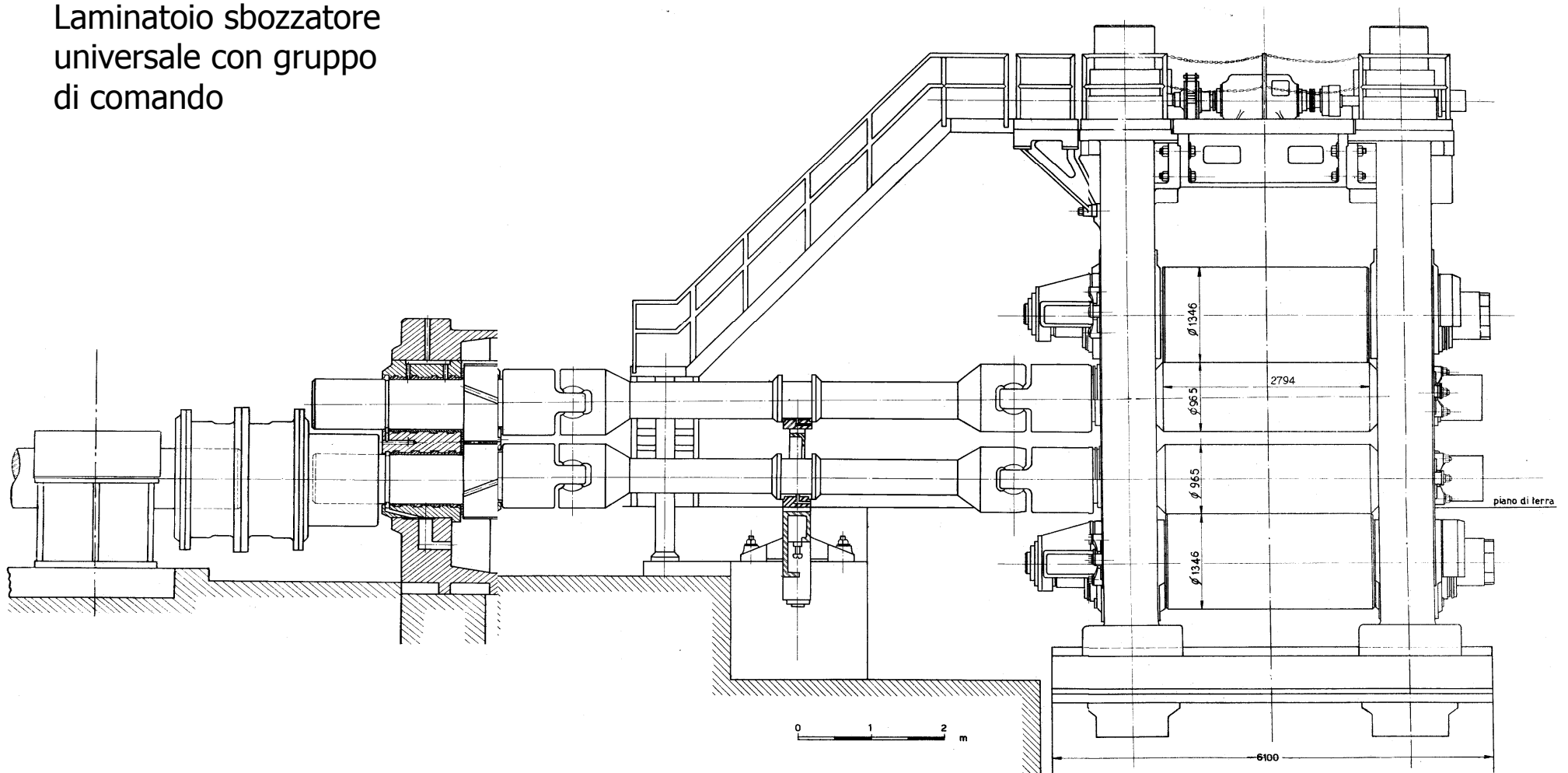
lamiere sottili
spesse
nastri avvolti in rotoli
tubi

profilati

fogli  0.01x1000

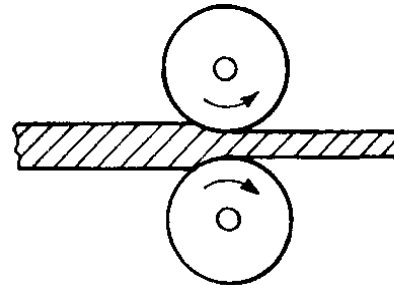


Laminatoio sbozzatore
universale con gruppo
di comando

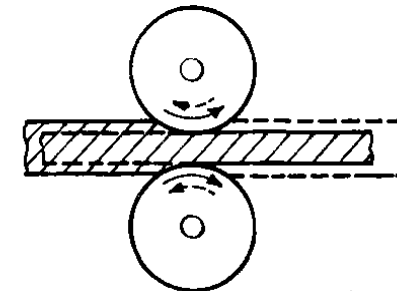




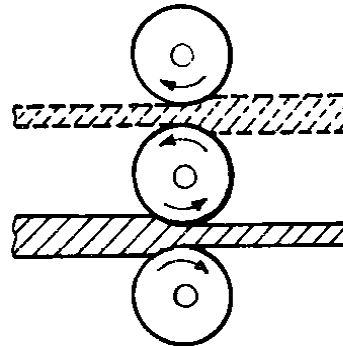
Disposizione dei cilindri
duo
trio
quarto
sio
multicilindro
planetario



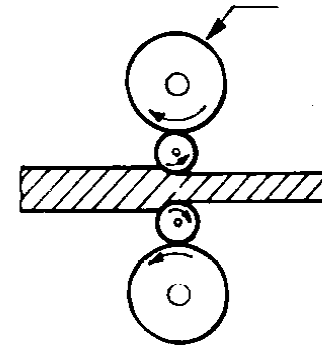
1 - Duo semplice



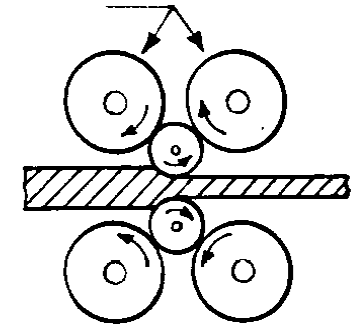
2 - Duo reversibile



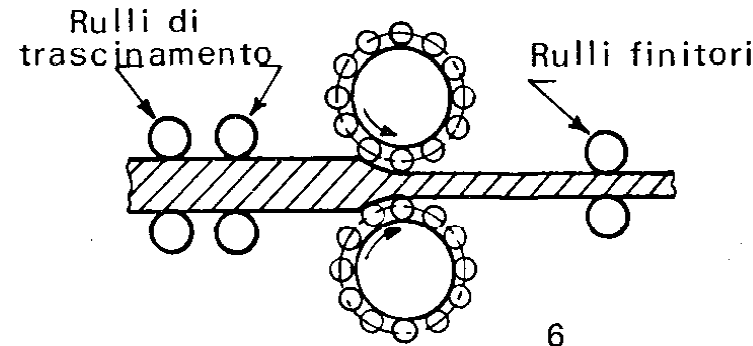
3 - Trio



4



5



6

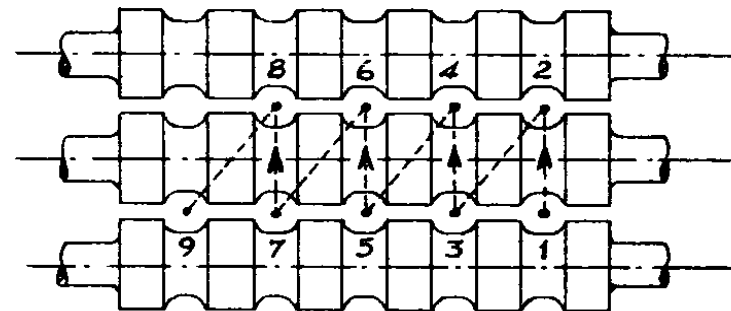
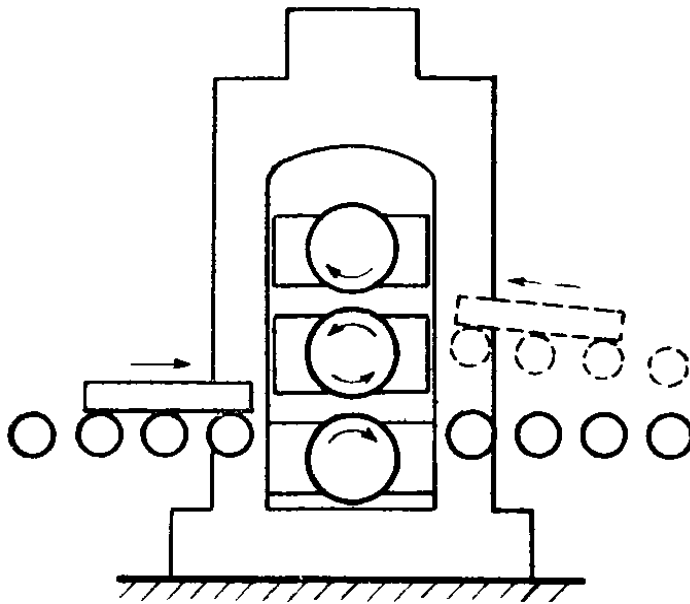
Movimentazione laminato
Inflessione cilindri
Usura e sostituzione

Calibratura

Realizzazione in diverse passate di
forme particolari con tolleranze
assegnate

Diverse velocità periferiche quindi

minima altezza radiale
angoli di spoglia
picole riduzioni
sequenza di passate
profili simmetrici

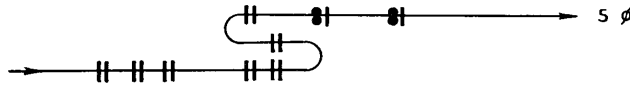


Realizzazione di tondino
per cemento armato

Alternativo alla colata continua

Sequenza di calibri

LAMINATOIO PER TONDINO (\varnothing 5 mm)

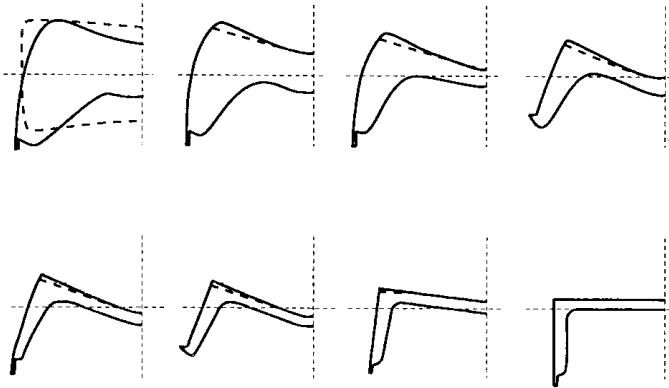


N. passaggi	N. gabb.	Forma	Dimens. prim.	Sezione mm ²	Allung. A %	Lungh. m.	Peso al m.	N. giri min. lamin.	Diametro cilind. mm	Veloc. m/sec.
1			50	2950		6,53	23			
2	3		33,5-65	1895	35,7	10,18	14,75	10,2	420	0,207
3	4		36,8	1320	30,4	14,58	10,3	14,75		0,297
4	5		22,6	855	35,3	22,5	6,66	23,95		0,458
5	6		24,2	572	33,1	33,7	4,45	36,1	385	0,685
6	7		14,8-40	371	35,2	52	2,89	54,4		1,057
7	8		17,2	286	23	67,3	2,23	70,9		1,37
8	9		11,2-28	194	32,2	99,3	1,51	124,8		2,02
9	10		12,4	149	23	129,2	1,16	163,2	320	2,63
10	11		8,4-21	108,5	27,2	177,5	0,845	220,5		3,61
11	12		9,25	83,6	23	231	0,65	287,5		4,685
12	13		6,5-16,2	63,8	23,6	302	0,498	373	320	6,14
13	14		7,1	49,1	23	381	0,383	487		7,99
14	15		5,1-25	42,5	16	454	0,331	578	310	9,23
15	16		7-7,5	36,0	15,4	536	0,28	687		10,9
16	17		4,3-21,5	30,0	16,7	641	0,234	923		13,08
17	18		5,9-6,25	25,5	15	758	0,198	1091	275	15,38
18	19		3,9-11,7	22,5	11,7	858	0,175	1230		17,42
20			5 \varnothing	19,6	12,8	980	0,153	1411		20

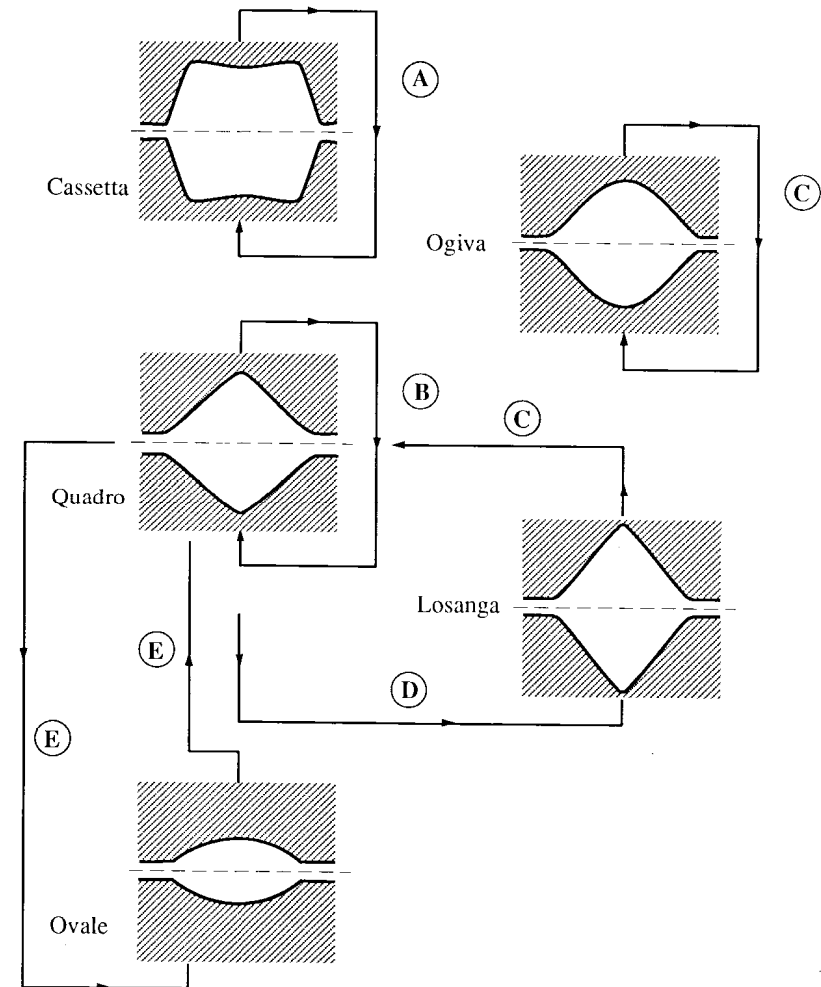
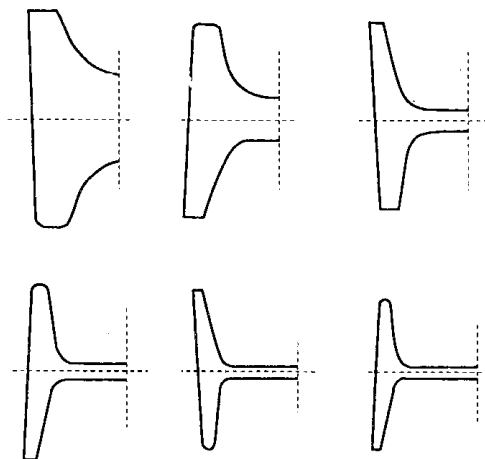


Tipi di calibri e sequenze di riduzione

Trave a C

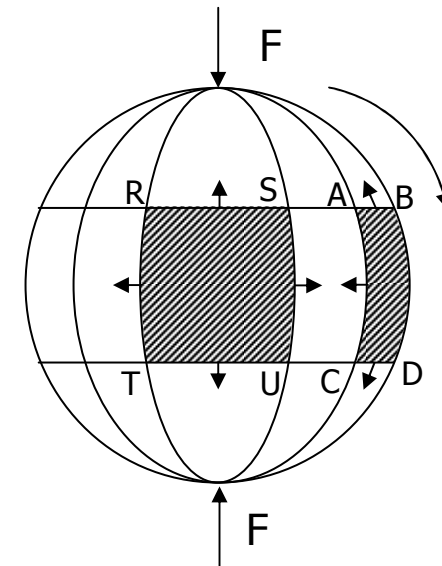
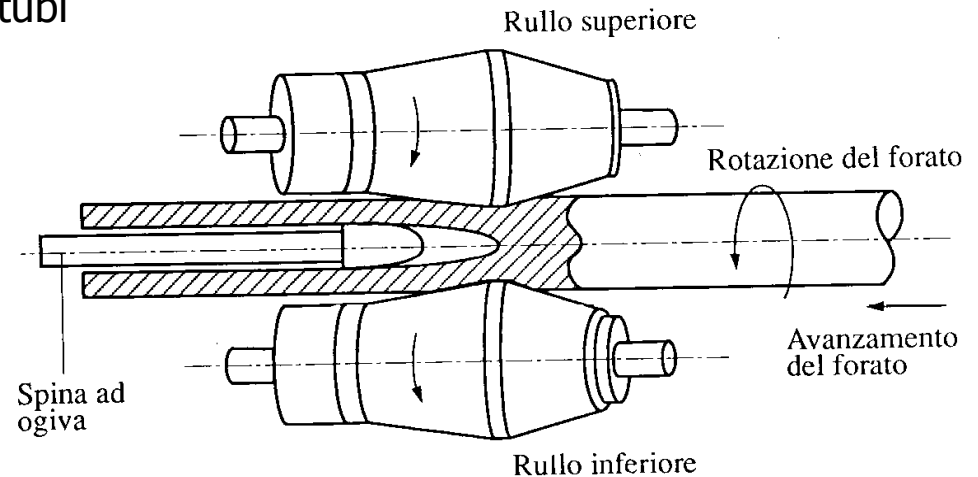


Trave a T



Laminatorio Mannesmann per la produzione di tubi

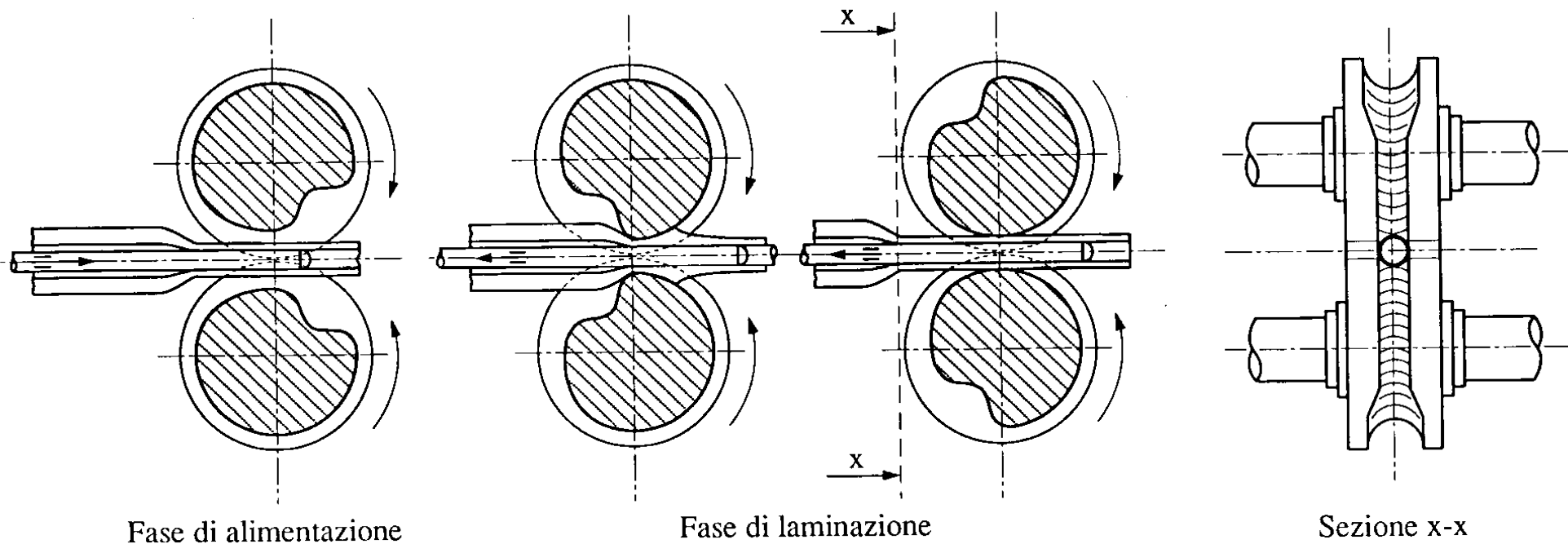
- I rulli ruotano concordi
- Il disassamento provoca avanzamento assiale
- Le forze di laminazione provocano un ciclo di incrudimento al centro sull'asse del laminato
- innesco di una cricca e successivo allargamento tramite il mandrino





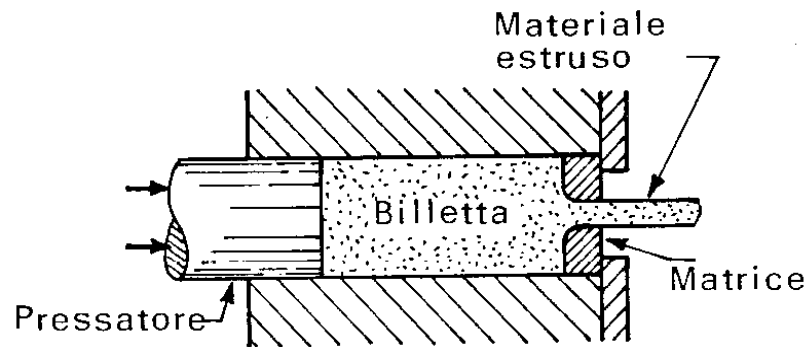
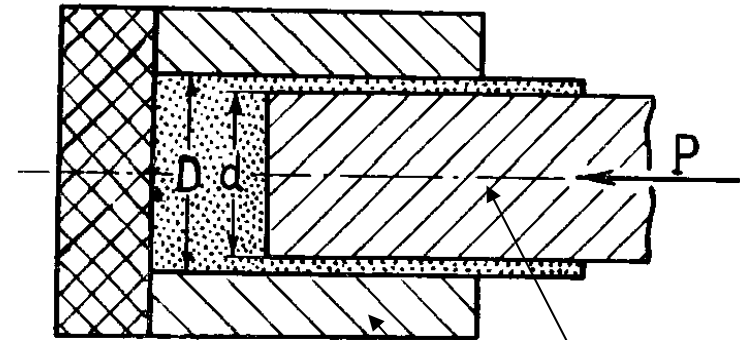
Laminatoio passo di pellegrino

per la riduzione di spessore e la finitura di tubi

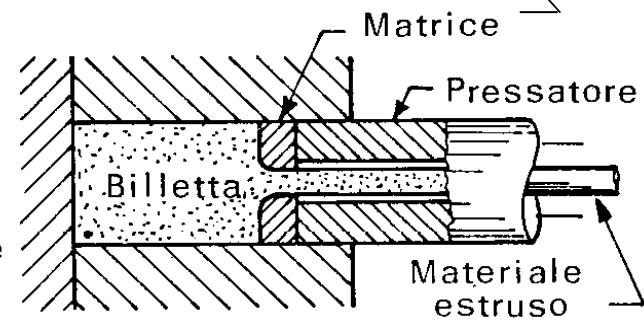


Estrusione

- A caldo
- Nessun collegamento fra forma finale e forma iniziale
- Matrici con forme anche molto complicate
- Distorsione sezioni (rendimento basso 30%)



diretta



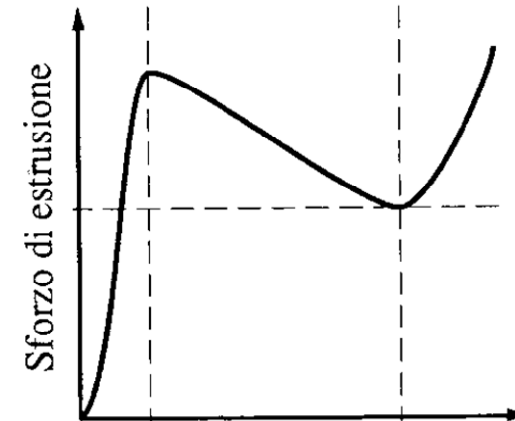
inversa



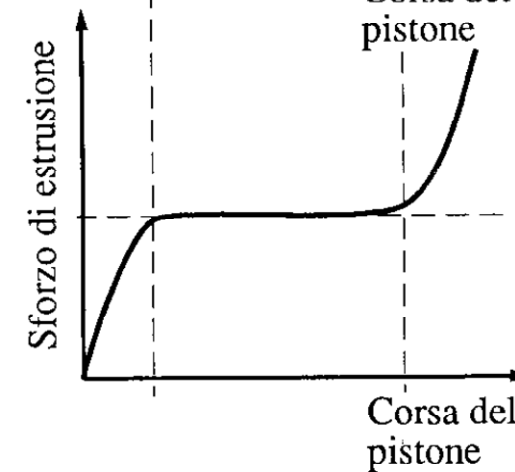
Meccanica dell'estrusione

- 3 fasi
- riempimento contenitore
 - scorrimento lungo x
 - fuoriuscita parte finale

diretta



inversa

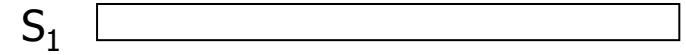




Analisi delle forze



L_0



L_1

Approccio parallelepipedo
(senza attrito)

$$FL_0 = R_e S_0 L_0 \ln \frac{L_1}{L_0}$$

Per sezioni circolari: $\frac{L_1}{L_0} = \left(\frac{r_0}{r_1}\right)^2$ quindi: $F = R_e \pi r_0^2 \ln \left(\frac{r_0}{r_1}\right)^2$

Con attrito:

si può ipotizzare $\left. \begin{array}{l} \sigma_{r \max} = R_e \\ \text{da cui: } \sigma_{t \max} = \mu R_e \end{array} \right\} \longrightarrow F_a = 2\pi r_0 L(x) \mu R_e$

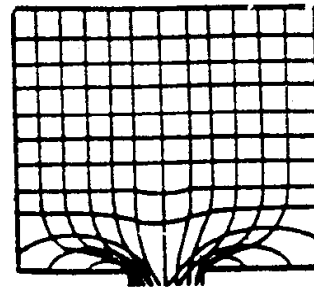
$$F_{TOT} = R_e \pi r_0 \left(r_0 \ln \left(\frac{r_0}{r_1}\right)^2 + 2\mu L_0 \right)$$

Distorsione delle sezioni
difficile da prevedere
quindi formula empirica

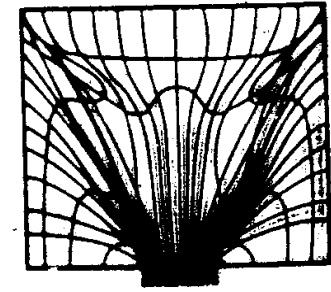
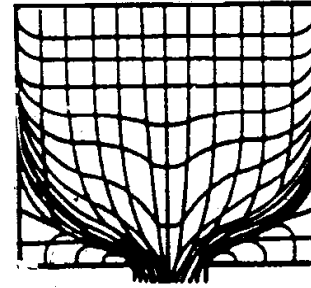
$$F = R_e \left[a + b \ln \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^2 \right]$$

$$a = 0.8$$

$$b = 1.2 \div 1.5$$

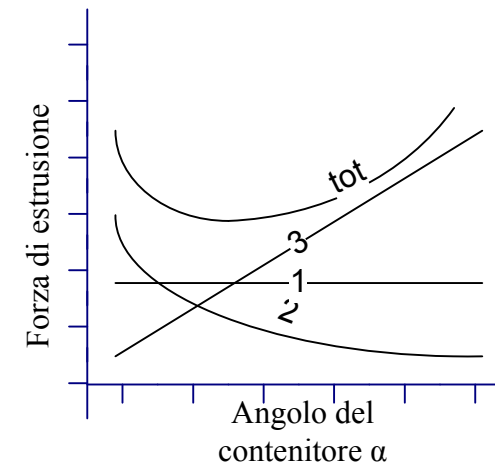
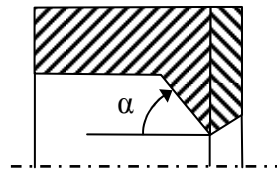


Ideale od inversa



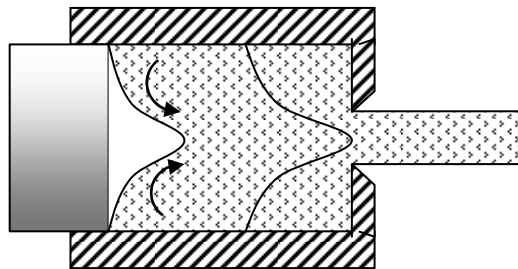
alto attrito

Angolo del contenitore





Alcuni difetti dell'estrusione

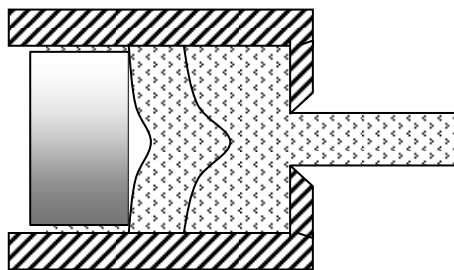


La zona centrale ha maggiore velocità

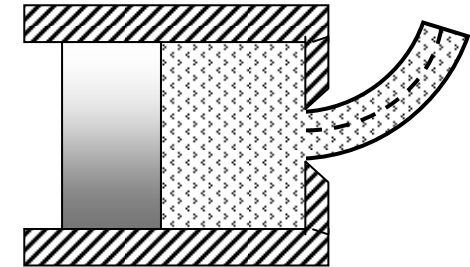
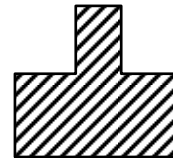
Cavità centrale

Modifica del pistone

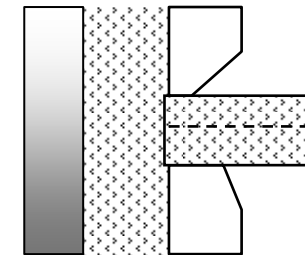
Diametro del pistone
leggermente inferiore per
ridurre le forze di attrito



Sezione variabili



Soluzione: nella zona
inferiore maggiore
superficie
attrito maggiore



Esempio: la pasta



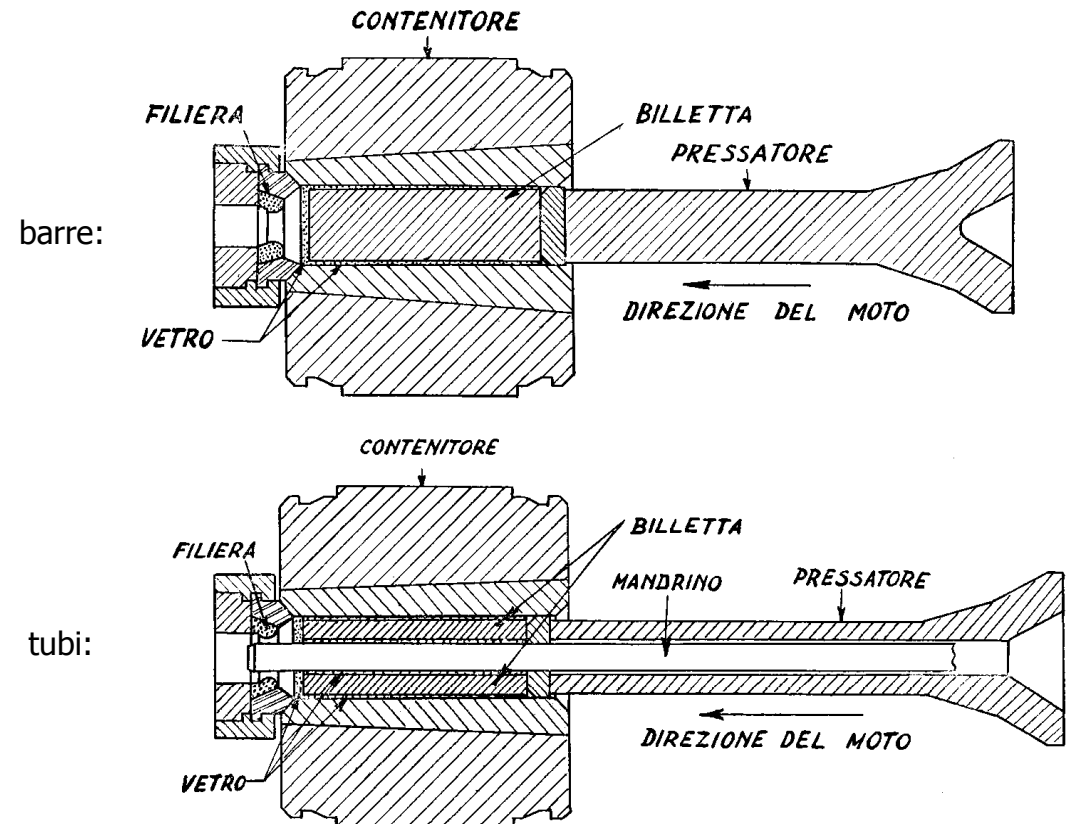
Estrusione acciaio

- problemi - alte temperature
- alta resistenza
- alta velocità
- usura matrici

- soluzioni - presse potenti
- matrici in WC
- riduzione scambio termico
- riduzione attrito

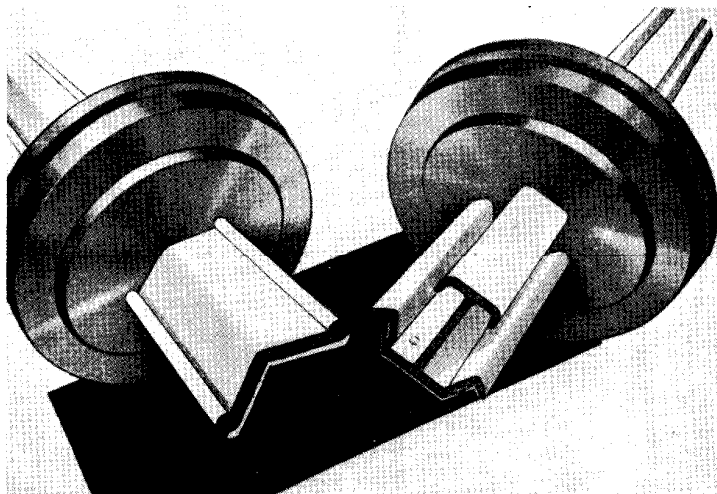
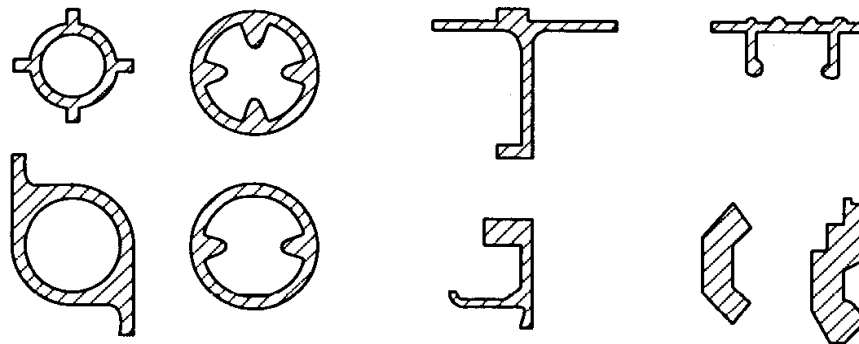
polvere di vetro che fonde a 1000 C
forma velo aderente, isolante
con basso coefficiente di attrito

Procedimento secondo il metodo Ugine-Séjournet

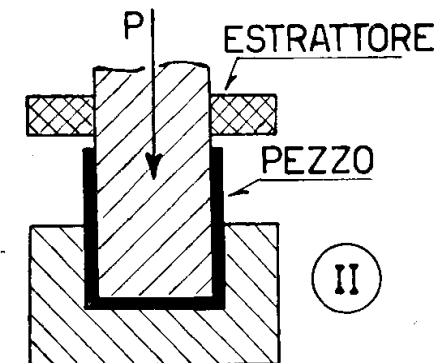
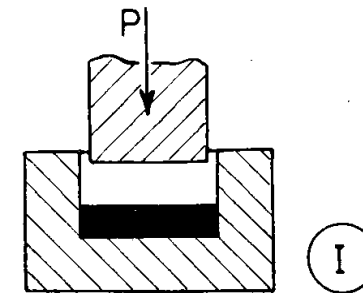




Prodotti



Filieri ed estrusi



Tubi

Trafilatura

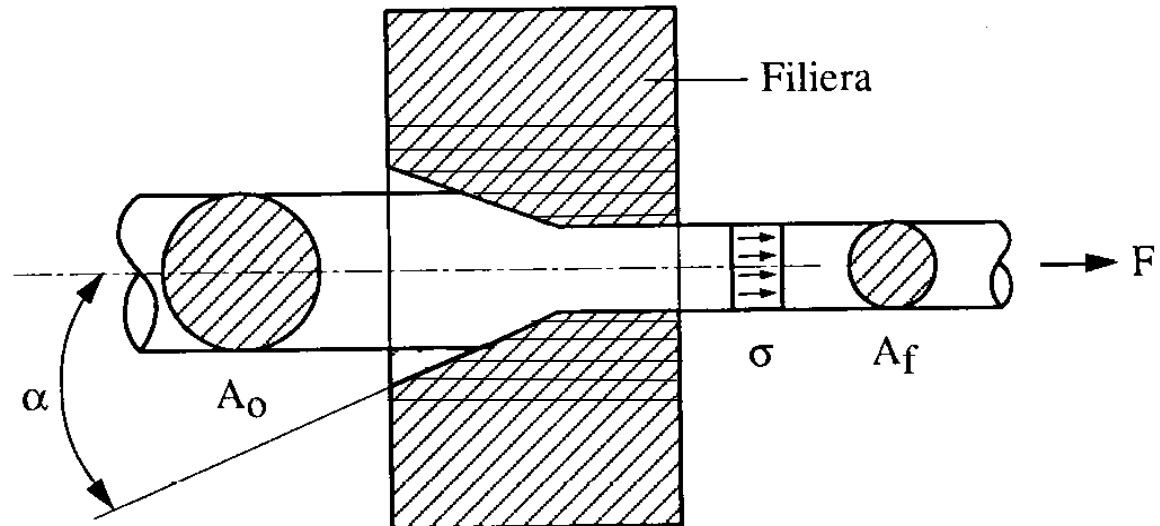
A freddo --> incrudimento

Prodotti finiti

- tubi
- barre
- fili

Elevata finitura superficiale

Tolleranze ??



Meccanica della trafilatura

Approccio parallelepipedo

Sulla sezione di entrata solo σ_r

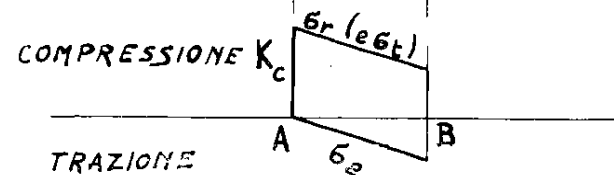
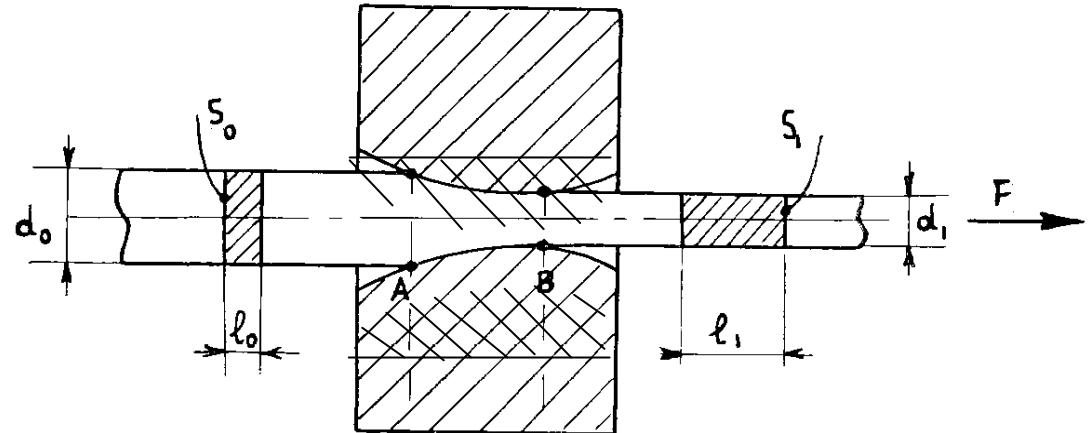
Sulla sezione di uscita sia σ_r che σ_a

$$\sigma_{r0} = R_e \quad \sigma_a = \dots$$

Costanza di volume : $S_0 l_0 = S_1 l_1 = V$

Criterio di resistenza: $\sigma_r - \sigma_a = R_e$

Lav. Parallelepipedo: $L_{dp} = F l_1 = V \int_{S_0}^{S_1} R_e \frac{dS}{S} = S_1 l_1 R_e \ln \frac{S_0}{S_1}$



NB: c'è incrudimento quindi R_e rappresenta un valore intermedio fra R_e R_e (def max)

Considerando che il valore massimo: $\ln \frac{S_0}{S_1} = 1$ corrispondente a: $\frac{F}{S_1} = R_{e \max def}$

Ipotesi: il materiale non incrudisce
non c'è attrito
non c'è deformazione delle sezioni

La sezione si riduce a: $\frac{S_0}{S_1} = e \Rightarrow \frac{S_1}{S_0} = \frac{1}{e} = 37\%$
vale a dire la sezione si riduce del: $1 - \frac{1}{e} = 63\%$

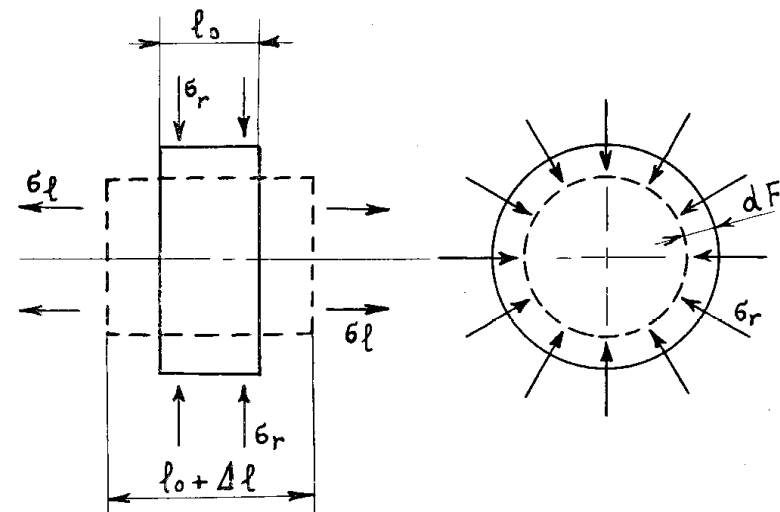
In realtà le riduzioni di sezione sono dell'ordine di grandezza del 10-15%

$$\sigma_l = 0.1 \div 0.15 R_{e \max def}$$

- la deformazione non avviene solo per effetto di F
- esiste un effetto delle pareti
- a destra non c'è deformazione plastica

σ_l cresce da 0 a F/S_1

σ_r decresce da R_e a: $R_{e \max def} - F/S_1$



Attrito

$$dF = \mu p dA$$

$$dF' = \mu p dA \cos \alpha$$

$$dA' = dA \sin \alpha$$

$$dF' = \mu p 2\pi r \frac{dr}{\tan \alpha}$$

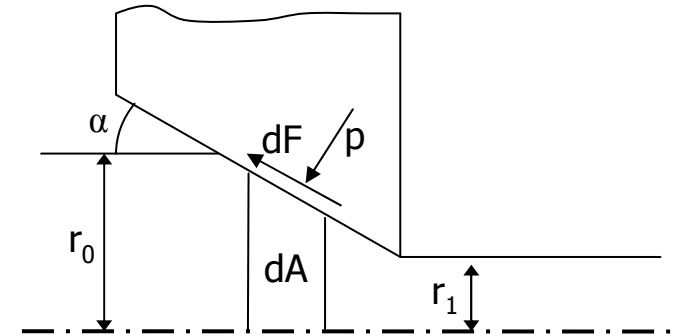
$$F' = \int_{r_0}^{r_1} \mu \frac{p}{\tan \alpha} 2\pi r dr$$

$$F' = \mu \frac{p}{\tan \alpha} 2\pi \frac{(r_0^2 - r_1^2)}{2}$$

$$F' = \mu \frac{p}{\tan \alpha} S_1 \left(\frac{S_0}{S_1} - 1 \right)$$

$$\sigma_{II}' = \frac{F'}{S_1} = \mu \frac{p}{\tan \alpha} \left(\frac{S_0}{S_1} - 1 \right)$$

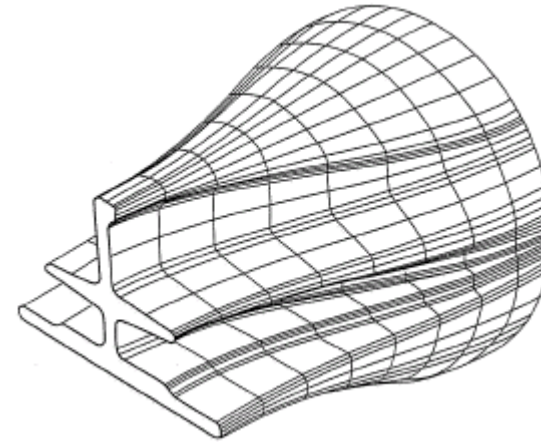
$$p \approx \sigma_r \approx R_e - \sigma_I$$



diminuisce se aumenta α
diminuisce se diminuisce μ

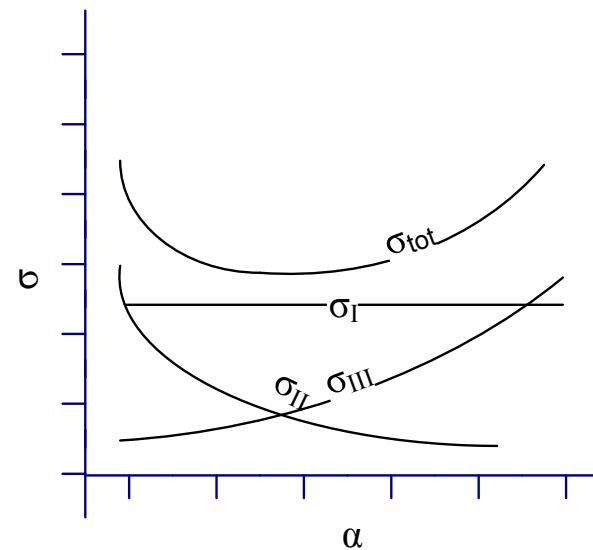
Distorsione sezioni

Analisi sperimentale
Modelli elementi finiti

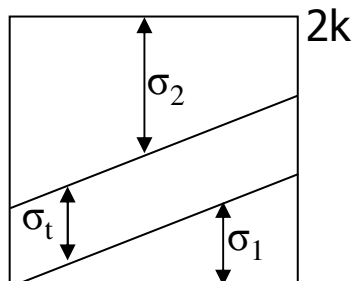
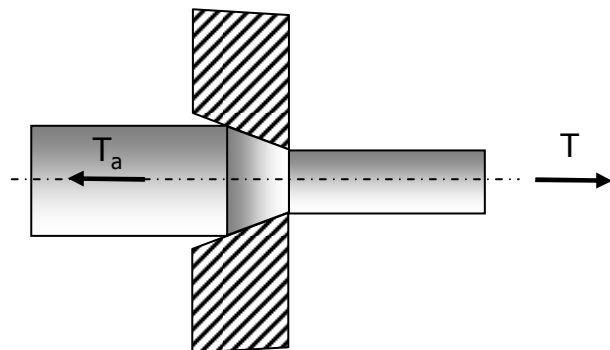


$$\sigma_{III} = R_e \frac{2}{3} \alpha$$

Risultato complessivo:

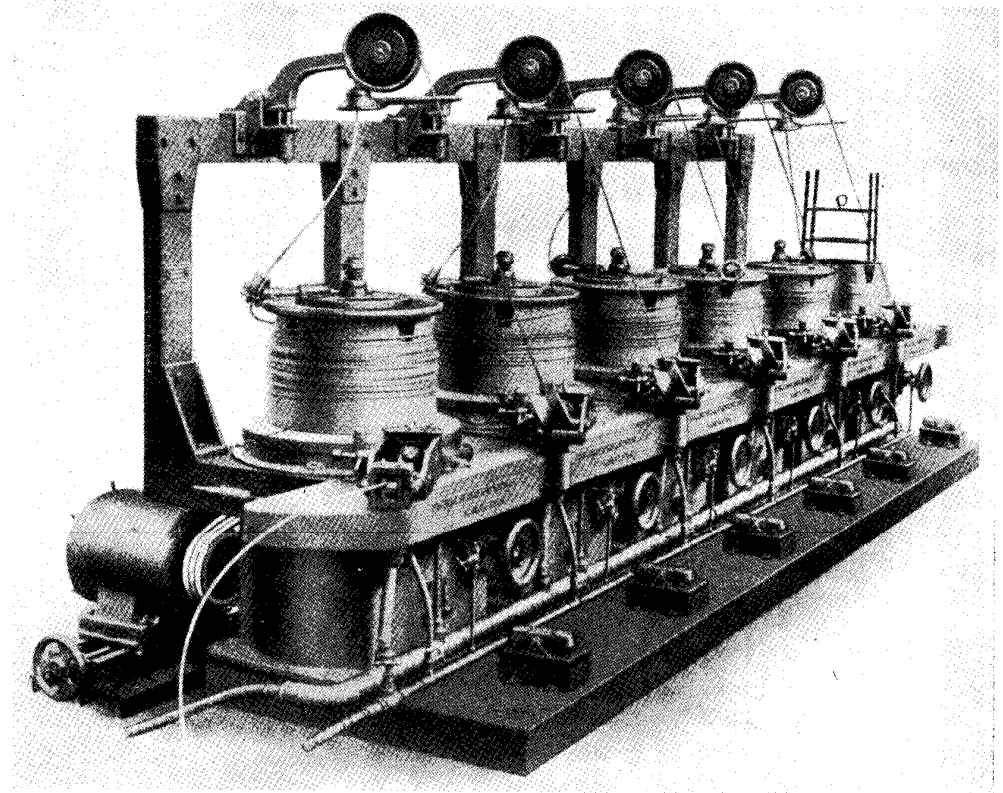


Controtiro



diminuisce σ_2
diminuisce l'attrito
aumenta la durata
recupero di lavoro

$$\sigma_t = \frac{T_a}{S_0}$$



Trafila multipla antislittante



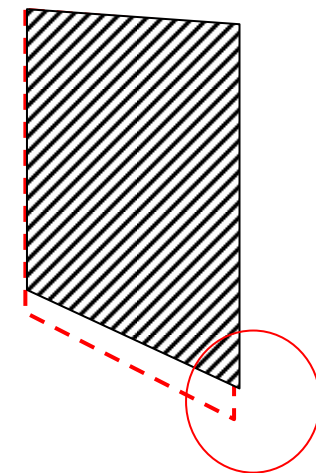
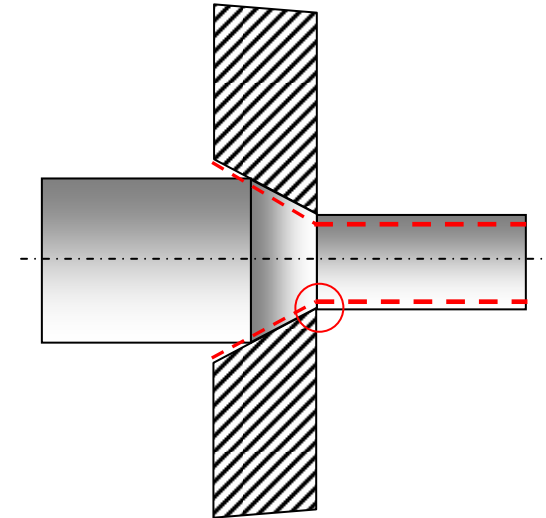
Problemi e difetti

- attrito metallo / trafilatura
- cedimento elastico
 - trafilatura
 - filo
- usura trafilatura --> vita utile trafilatura
tempo fra $\phi_1 = \text{inf (toll)}$
e $\phi_2 = \text{sup (toll)}$

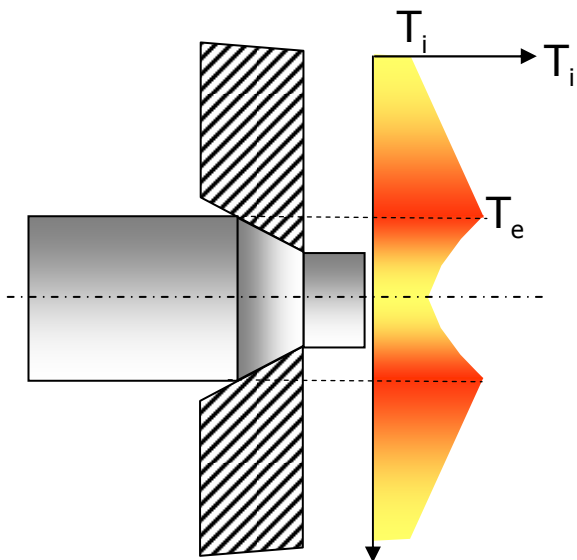
- materiali per trafilatura
- acciai alto legati
 - ghisa bianca
 - carburi (WC)
 - diamante

tolleranze larghe

tolleranze strette

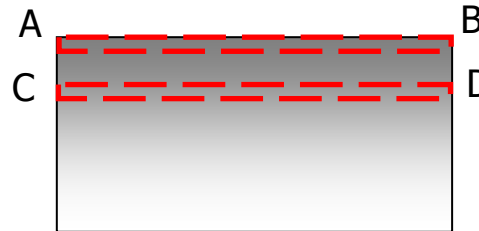


Tensioni residue



$T_e > T_i$ per:

- attrito
- piccolo tempo di contatto



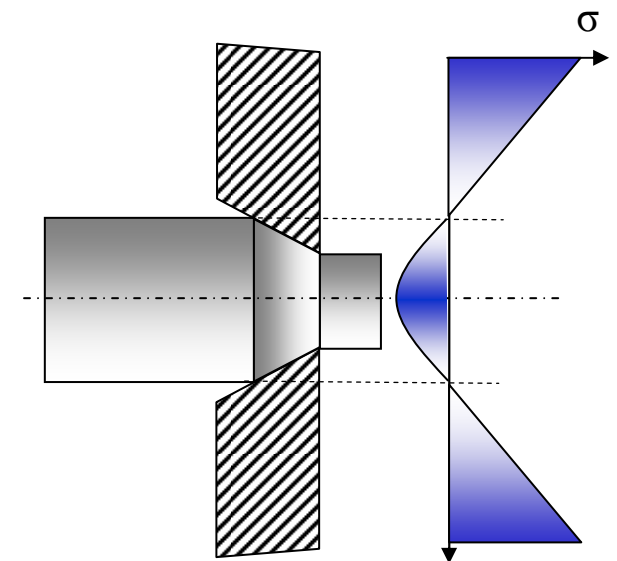
due fibre AB e CD
stessa lunghezza ma diversa temperatura:

$$L_{AB} = L_0 (1 - \alpha \Delta T_{AB})$$

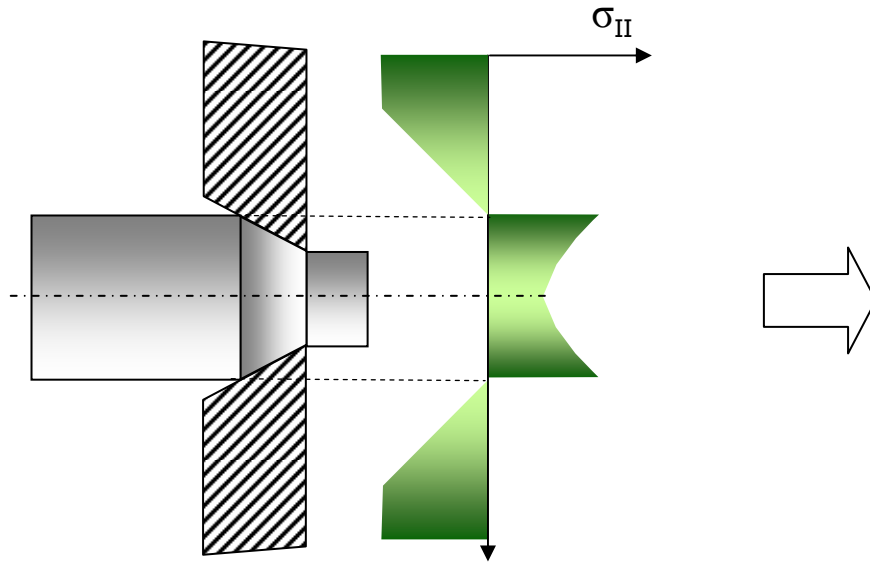
$$L_{CD} = L_0 (1 - \alpha \Delta T_{CD})$$

$$\Delta T_{AB} > \Delta T_{CD}$$

$$L_{AB} > L_{CD}$$



Attrito

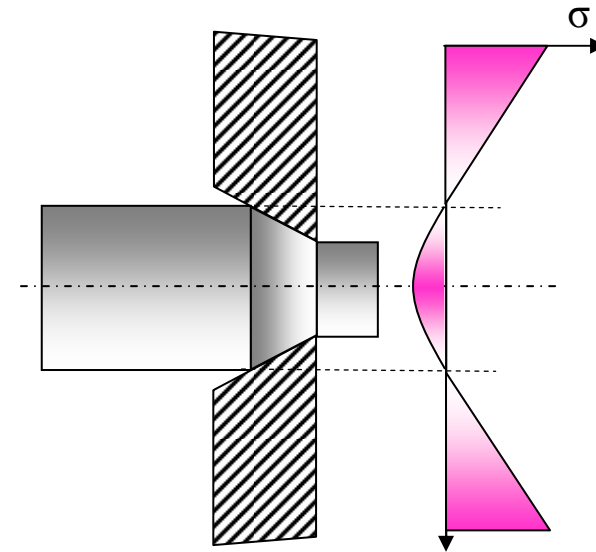


non rimane costante
sulla sezione di uscita

Ritorno elastico diverso $L_{AB} > L_{CD}$

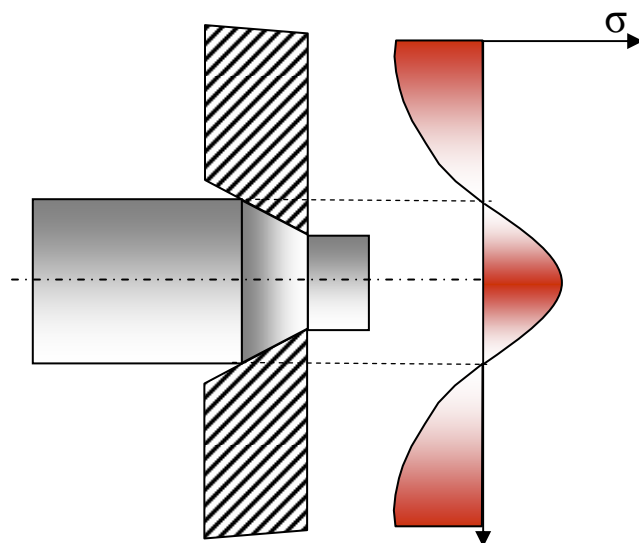
Stesso andamento delle tensioni residue:

$$\frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{\sigma}{E}$$





Plasticizzazione



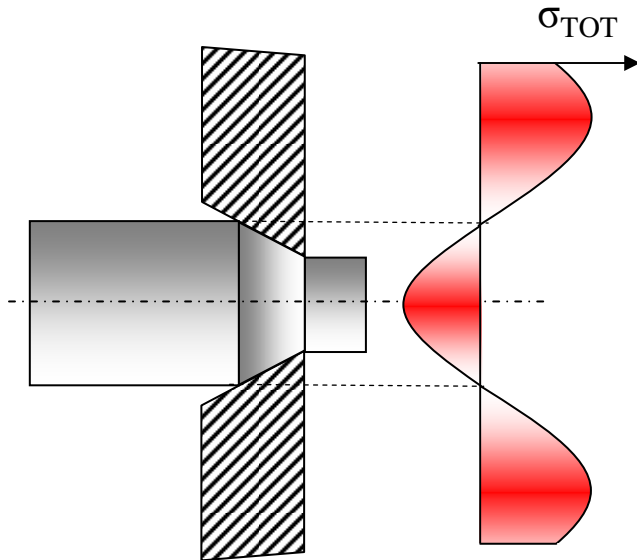
Le fibre interne
sono più calde

{ minore resistenza meccanica
lunghezza naturale minore

Andamento opposto alle tensioni residue

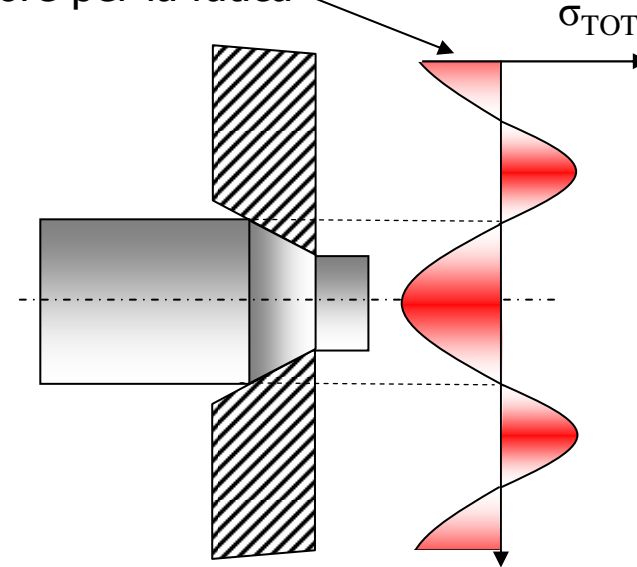


Somma totale delle tensioni



Contributo della plasticizzazione poco rilevante

migliore per la fatica



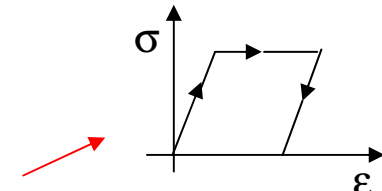
Contributo della plasticizzazione molto rilevante

Eliminazione tensioni residue

TT (bassa temperatura per evitare ricristallizzazione che ridurrebbe le caratteristiche meccaniche)

Pallinatura

Deformazione plastica controllata (stiramento)





Lavorazione delle lamiere

Processi a freddo per deformazione plastica

Spessore inferiore di vari ordini di grandezza rispetto alla larghezza e alla lunghezza

Caratterizzati da

- variazioni di forma
- non sostanziali variazioni di spessore

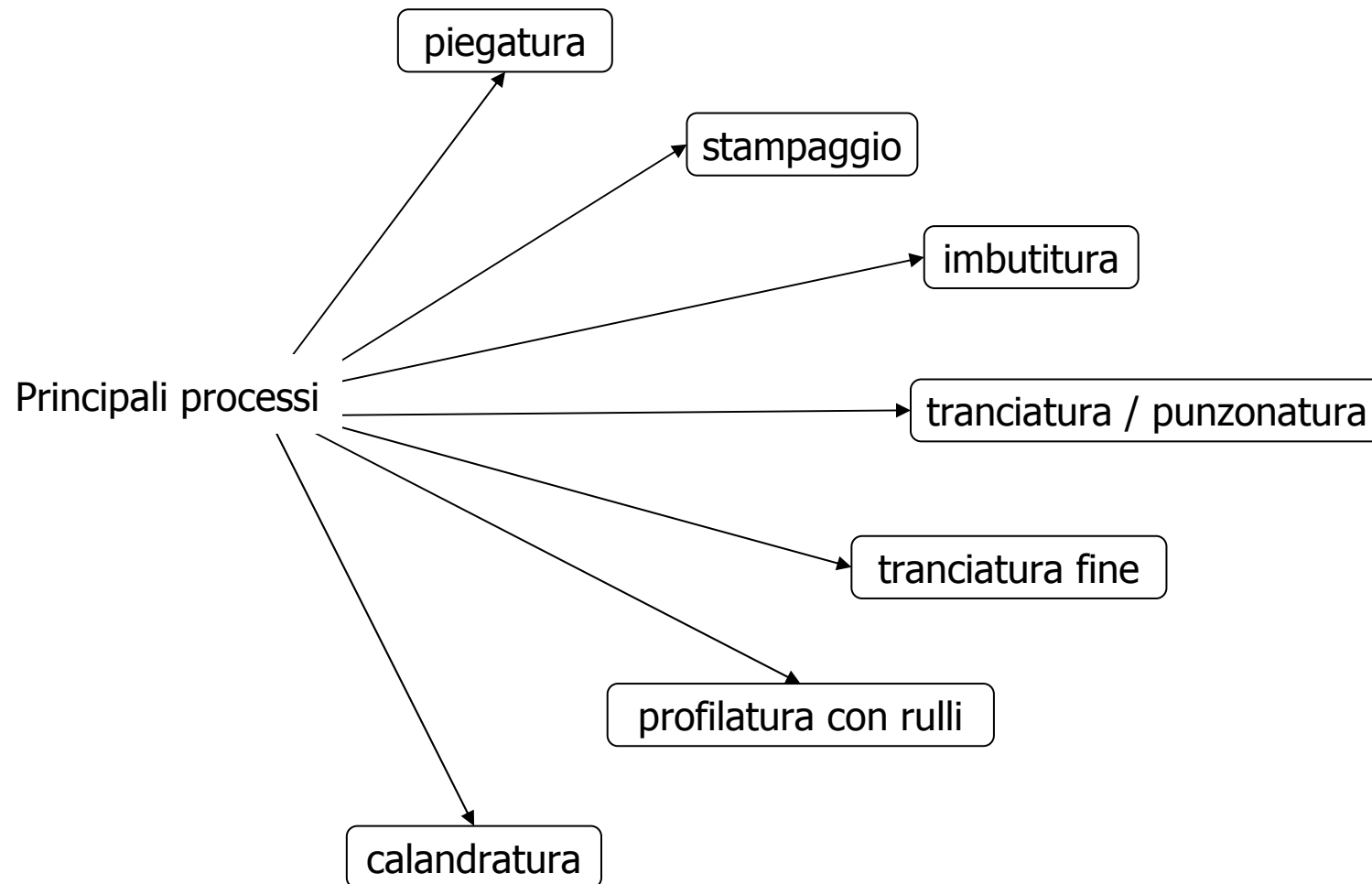
Max 6 mm Min 0.2 mm

Preceduti o seguiti da

- trattamenti termici
- zincatura
- rivestimenti superficiali

Si ottengono prodotti finiti

- carrozzerie per automobili ed elettrodomestici
- minuterie meccaniche
- lamierini magnetici
- pentolame
- reattori per industria chimica
- scatole metalliche





Piegatura

La deformazione plastica è concentrata in una zona limitata della lamiera

Grandezze caratteristiche:

raggio di raccordo del punzone r
 spessore della lamiera s
 lunghezza della lamiera b
 distanza fra gli appoggi l
 angolo di piegatura α

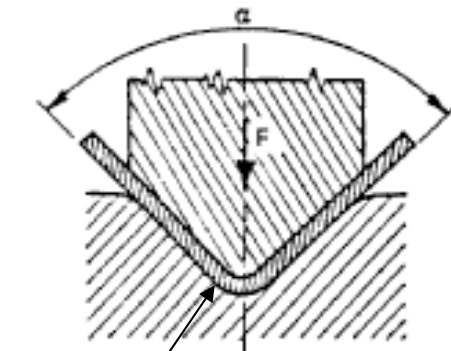
da cui la forza applicata F

$$F = \frac{b \cdot s^2 \cdot \sigma}{1.5 \cdot l}$$

valida per $6s < l < 12s$
 e per $s < 2r < 2s$

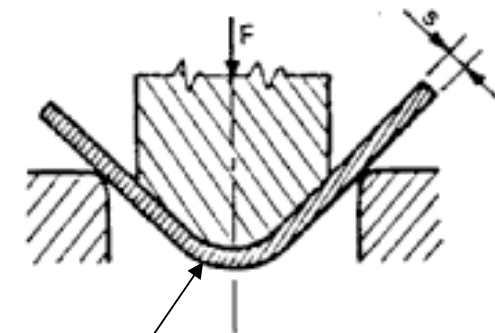
Si tiene conto dell'incrudimento e degli attriti attribuendo a σ il valore $2(2k)$

in stampo



zona deformata

libera



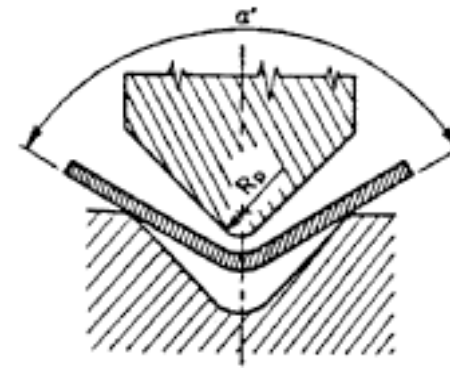
zona deformata



Ritorno elastico

Dipende da

- materiale
- stampo (libero o meno)
- pressione di coniatura
- raggio del punzone
- velocità di lavorazione



Se ne tiene conto con punzoni ad α ridotto opportunamente in funzione di r , s e materiale

Per gli acciai.

$$\alpha / \alpha' = 0.99 \quad \text{per} \quad r / s = 1$$

$$\alpha / \alpha' = 0.97 \quad \text{per} \quad r / s = 10$$

Stampaggio

Produzione di un oggetto tridimensionale di forma corrispondente a quella di una matrice sulla quale viene fatta adattare la lamiera per azione di un contro-stampo

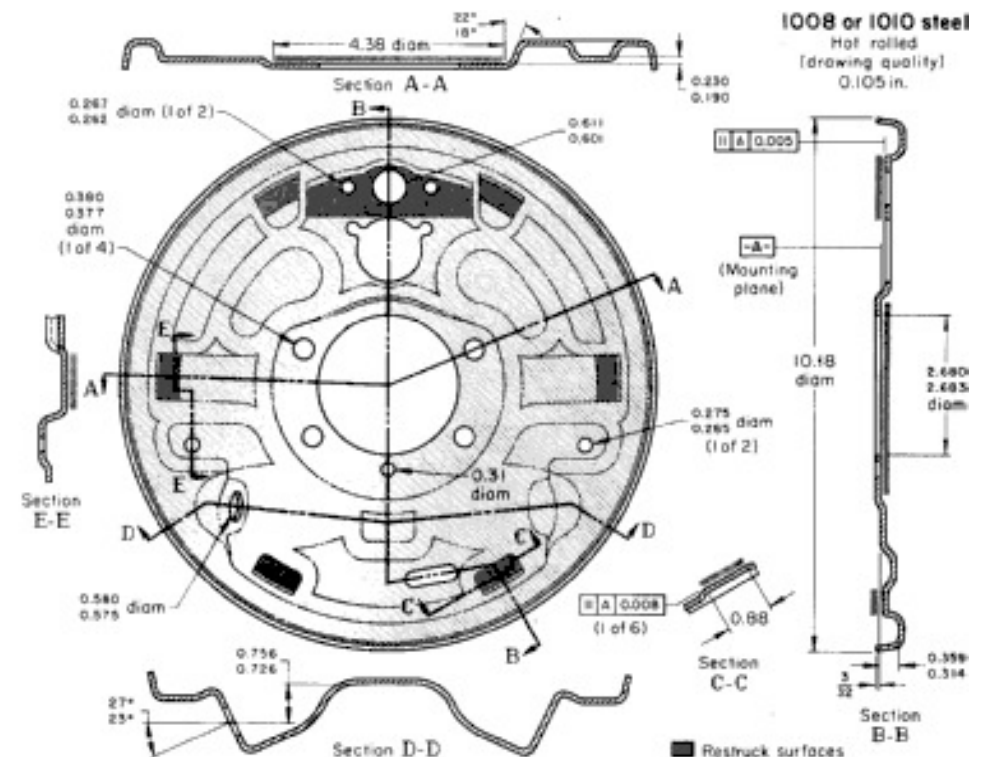
In realtà si tratta di una serie di piegature su piani e con direzioni diverse

Produzione di freni a tamburo:

Fasi: 7 presse capaci di forza variabile fra 30 e 600 ton con diversi stampi

Produzione circa 600 pezzi / h

Tolleranze: da 50 μm fino a 0.2 mm



Produzione di minuteria meccanica

Un singolo stampo produce tutta la forma

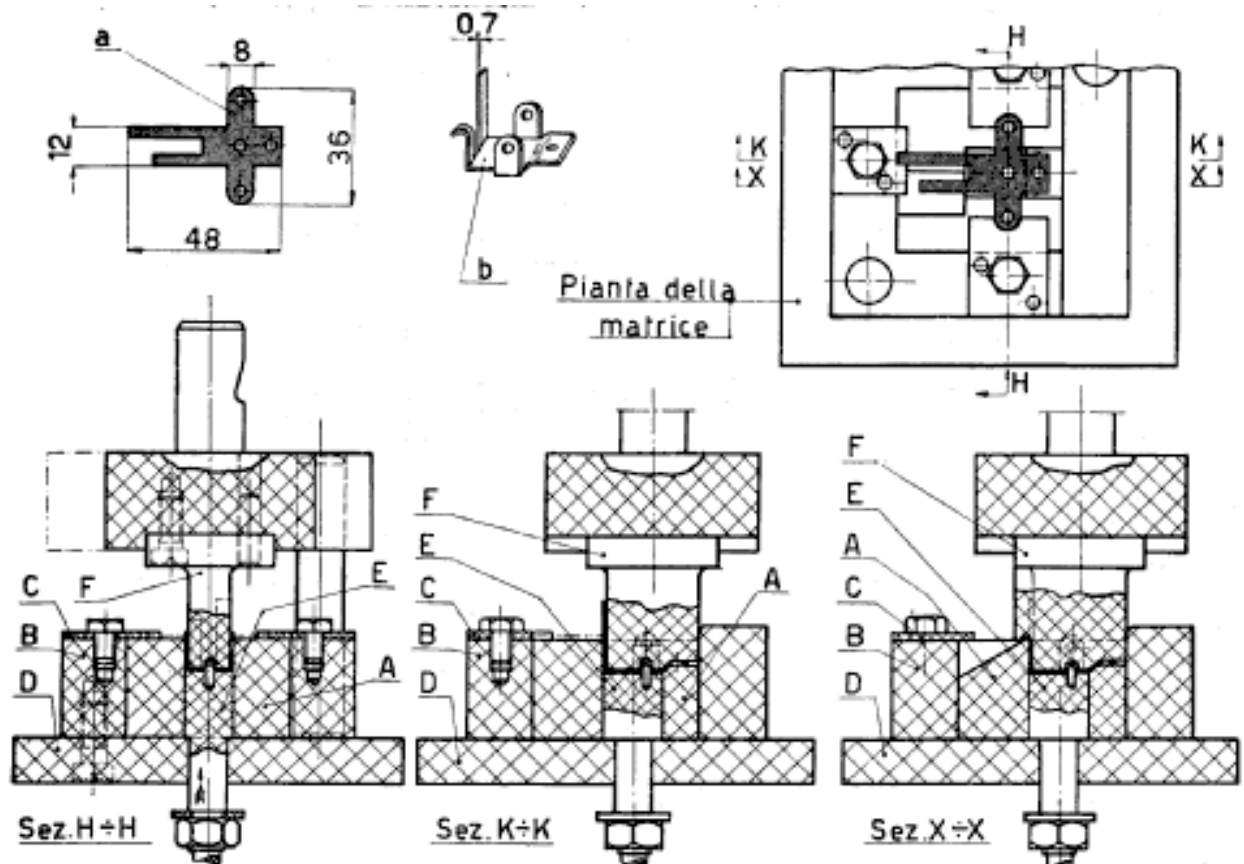


Fig. 281 - Piegatura multipla realizzata con un solo stampo.



Lavorazione dei fili

Inizialmente viene raddrizzato (dalla bobina)
Lavorazione sempre a freddo

Piegatura
Laminazioni (per variare forma della sezione)

Produzione di una clip

A partire da un trafilato, successivamente
avvolto su tamburi rotanti che piegano
e raddrizzano solamente alcune zone.
Infine il filo viene tranciato.



Produzione di un filo a sezione quadrata

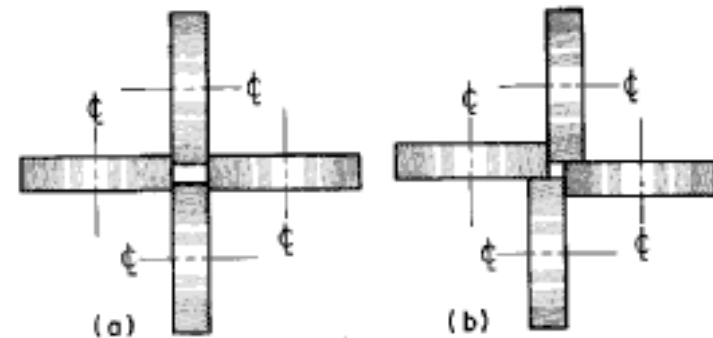


Fig. 1. Turk's-head rolls: (a) positioned in line to form a rectangular cross section, and (b) offset to form a square section

Produzione di molle

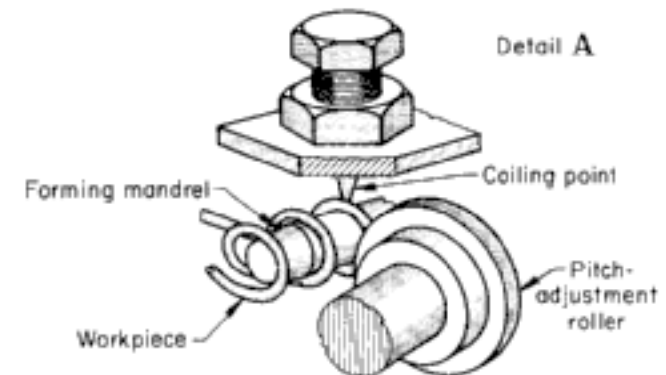
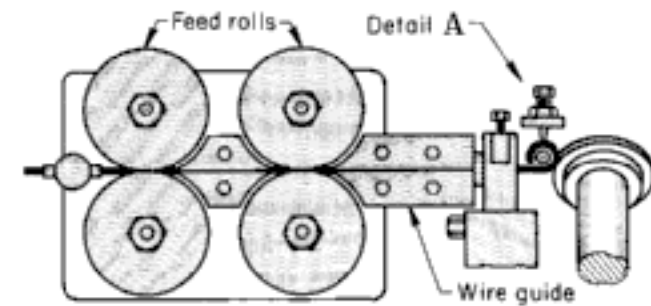


Fig. 6. Roll-forming coiler for producing helical springs

Produzione di un occhiello

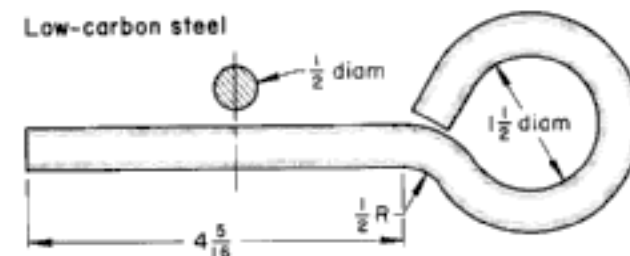
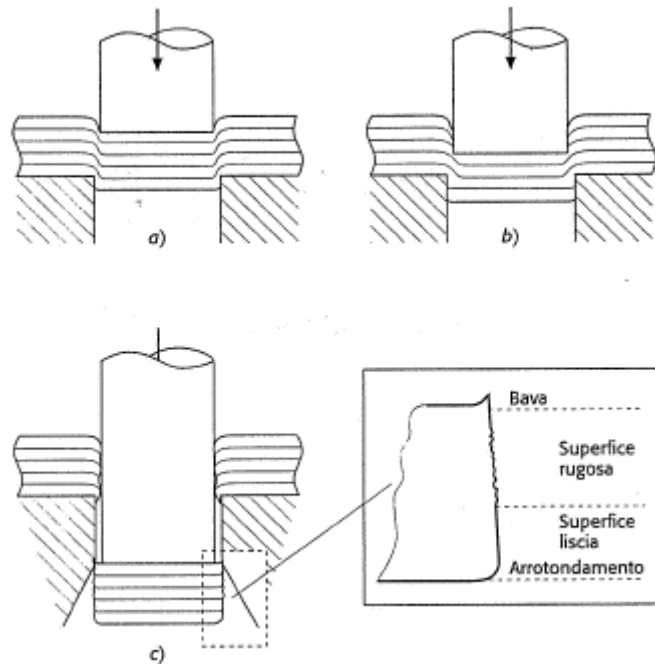
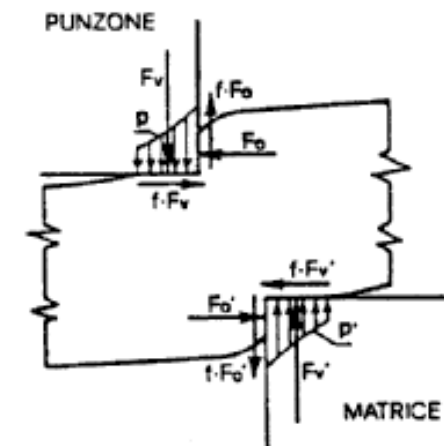
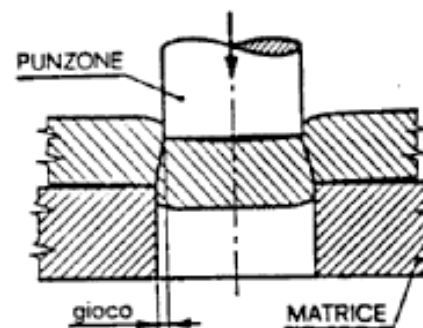


Fig. 7. Eyebolt formed in a rotary bender

Tranciatura e punzonatura di lamiera



Stato di sollecitazione



La lavorazione avviene per deformazione plastica fino alla formazione di cricche

Influenza del gioco:

- legato allo spessore
- si possono formare altre cricche se il gioco è troppo alto o basso
- gioco ottimale -> forze minime

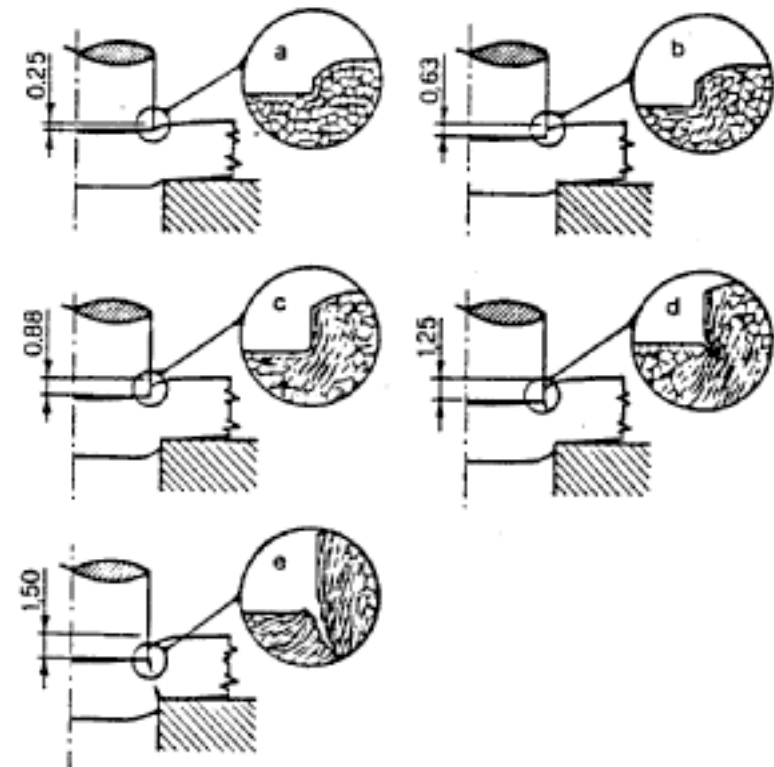
$g = f(\text{materiale, spessore})$

$$g = 0.007 \cdot s \cdot \sqrt{k_t} \quad [mm] \quad \text{per } s < 3mm$$

$$g = (0.007 \cdot s - 0.005) \cdot \sqrt{k_t} \quad [mm] \quad \text{per } s > 3mm$$

$$k_t = 0.75 \div 0.80 \cdot R_m$$

$$\phi_{matrice} = \phi_{pezzo} + 2g$$



9.16 - Successione delle varie fasi in un processo di tranciatura.

Fig. 9.17

Forma del disco tranciato.



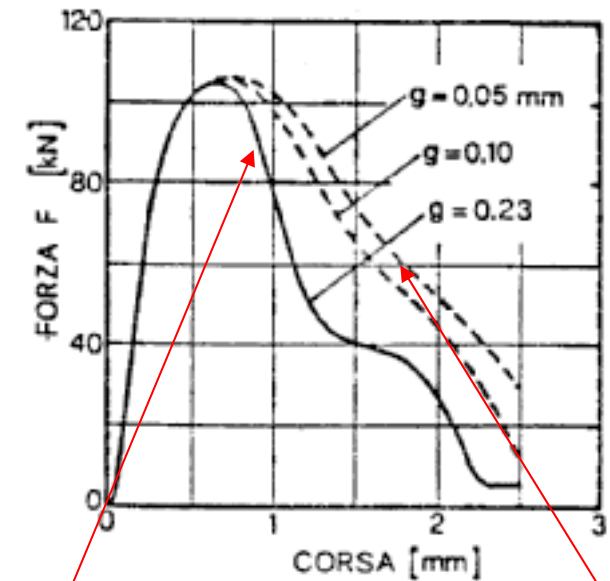
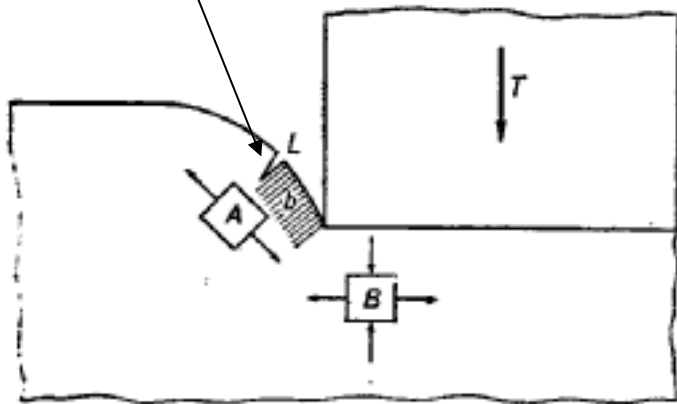
$$F = k_t \cdot A$$

A = perimetro del contorno x spessore della lamiera

Andamento della forza in funzione della corsa.

- Mat.: acc. al carbonio (C10),
- Spessore lamiera $s = 2,5$ mm,
- Resist. traz. $R_m = 420$ N/mm².

Formazione di bave dovute a stato di sollecitazione di trazione pura

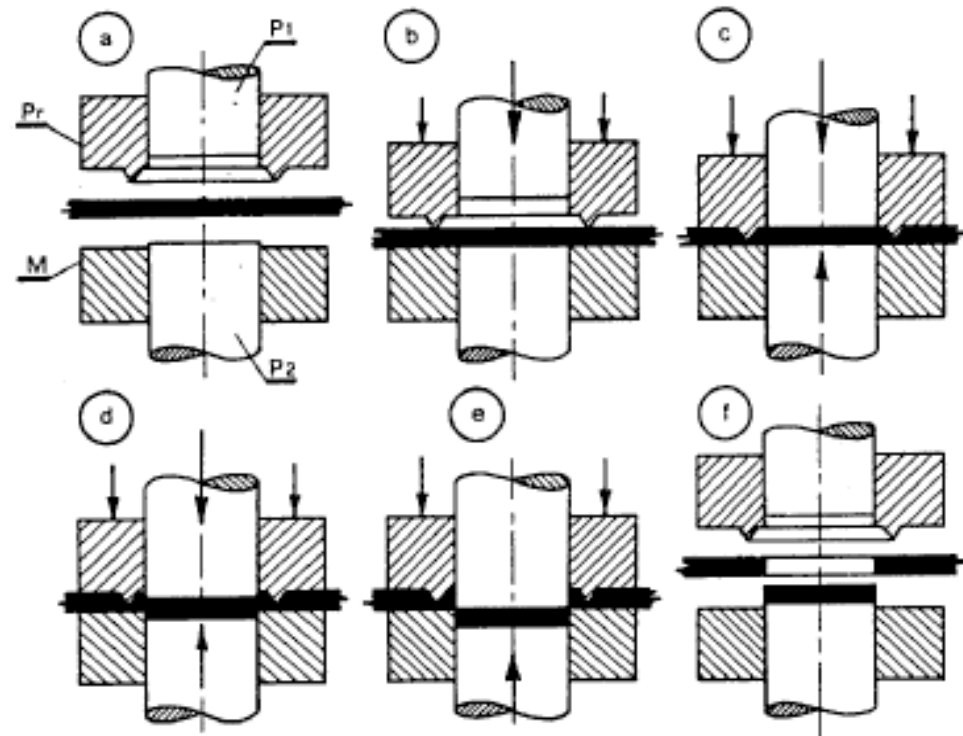


Notare l'effetto del gioco

Brusca discesa della forza dovuta al rapido propagarsi delle cricche

Tranciatura fine

- tolleranze molto spinte (0.005 mm)
- gioco = 0
- lubrificazione abbondante
- velocità di avanzamento bassa



- Sequenza operativa della tranciatura fine.

P₁ = punzone, P₂ = contropunzone,
P_r = prelamiera, M = matrice.

Imbutitura

Produzione di oggetti tridimensionali
a partire da lamiere piane

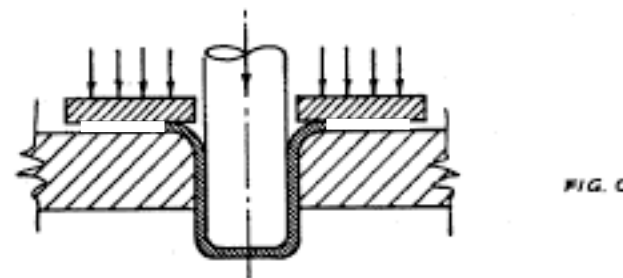
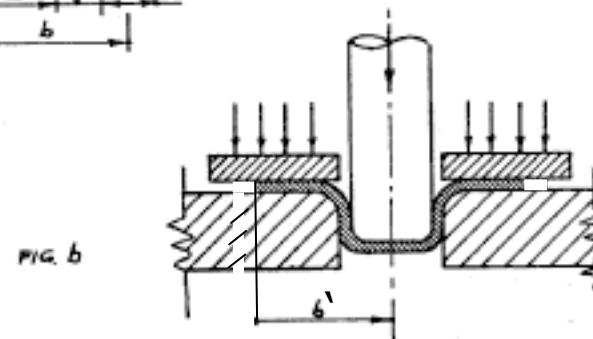
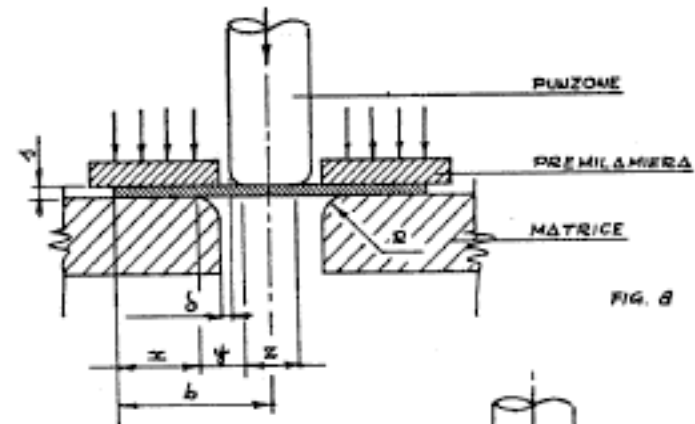
Problema: sviluppo 3D di un figura piana

Esempio: pentole

Fase a: il punzone forza la lamiera a penetrare in una matrice, la lamiera scorre radialmente e, quindi, assialmente

Fase b: iniziano variazioni di spessore ed instabilità

Fase c: completamento (con o senza flangia)

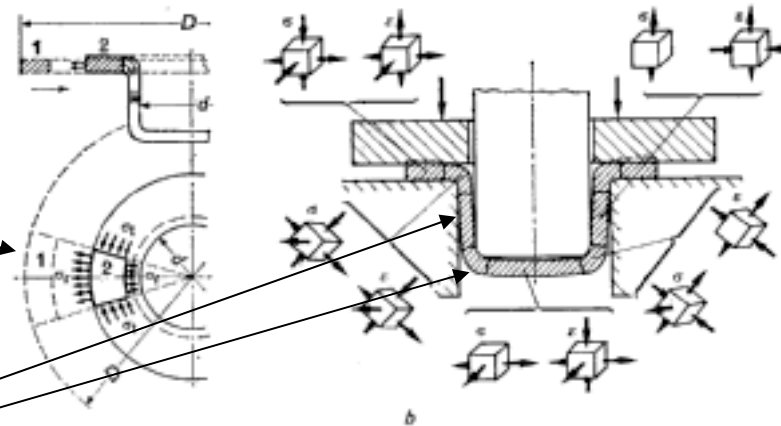
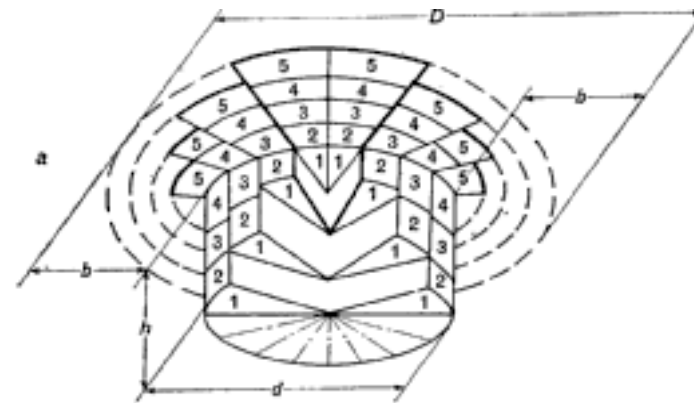


Stato di tensione

Le singole porzioni di materiale sono sottoposte a stati di tensione progressivamente variabili

Instabilità a compressione e quindi ingobbamento

Instabilità a trazione e quindi assottigliamento



Progressiva deformazione di elementi del disco nell'imbutimento (a), stati di tensione nelle diverse zone (b) e deformazioni locali.

a) Col progredire della deformazione le singole parti in cui si è idealmente suddiviso il disco D di partenza assumono le forme e posizioni indicate dal numero corrispondente. b) Rappresentazione schematica dei tipi di sollecitazioni σ e dilatazioni ϵ nelle diverse zone durante il progressivo imbutimento.



Dimensionamento

Gioco deve essere maggiore dello spessore della lamiera

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

C costante dipendente dal materiale

C= 0.22 acciaio

C= 0.06 alluminio

C= 0.12 altri non ferrosi

S_i = superficie delle parti elementari
componenti l'imbutito

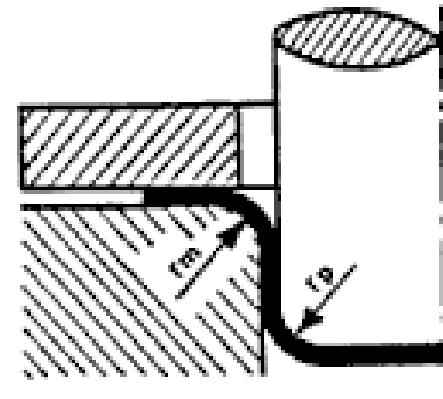
Dimensione iniziale del disco:

$$D = 1.13 \cdot \sqrt{\sum_i S_i}$$

Punzone e matrice:

$$\left. \begin{array}{l} r_0 = (5 \div 6) \cdot s \\ r_m = 4 \cdot s \end{array} \right\} \text{primo passaggio}$$

$$\left. \begin{array}{l} r_0 = (5 \div 6) \cdot s \\ r_m = (3 \div 4) \cdot s \end{array} \right\} \text{ulteriori passaggi}$$





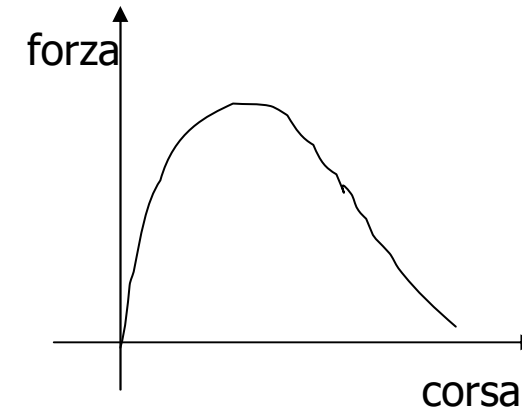
Rapporto di imbutitura :

$$\beta_{\text{tot}} = D / d$$

$$\beta_{\text{max}} = 2 \div 2.7 \text{ (primo passaggio)}$$

$$\beta_{\text{max}} = 1.3 \div 1.15 \text{ (ulteriori passaggi)}$$

da cui si determina il numero di passaggi



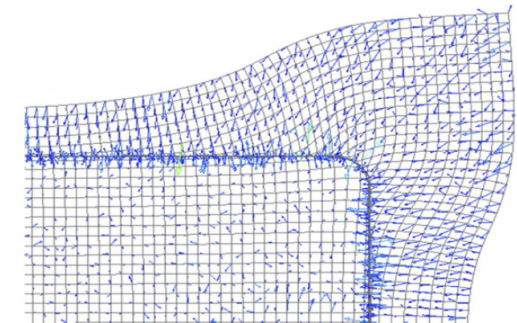
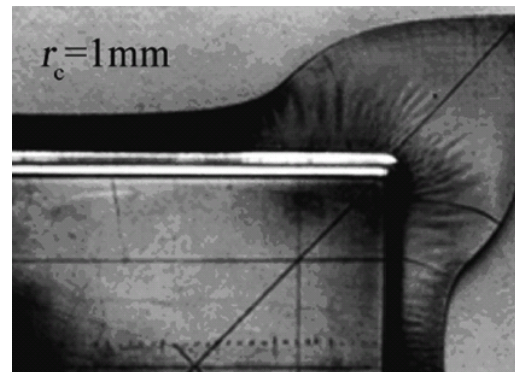
Calcolo delle forze necessarie:
$$F = R_m \frac{\left[(\beta - 1)^2 + 0.005 \frac{d}{s} \right] \pi \left[D^2 - (d_m + 2r_m)^2 \right]}{1600}$$

Premilamiera:
$$F_{1\text{max}} = 1.1 \cdot \frac{\beta_1 - 1}{\beta_{1\text{max}} - 1} \cdot \pi \cdot d \cdot s \cdot R_m$$

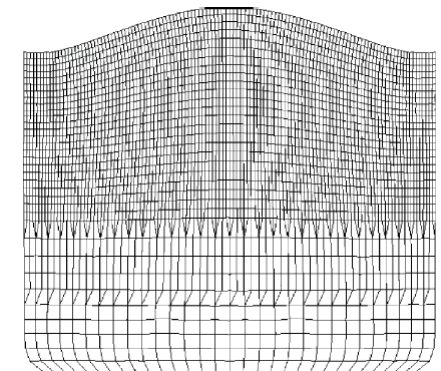
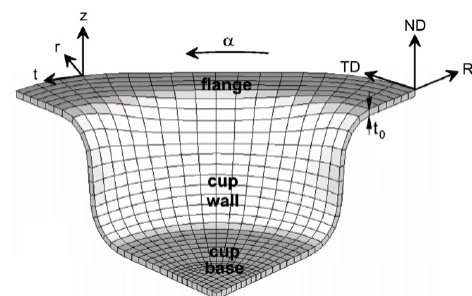
Punzone:
$$F_{n\text{max}} = 0.1 \cdot F_{1\text{max}} + \dots + 0.1 \cdot F_{n-1\text{max}} + 1.1 \frac{\beta_n - 1}{\beta_{n\text{max}} - 1} \cdot \pi \cdot d_n \cdot s \cdot R_m$$
 tiene conto dell'incrudimento



Difetti dovuti ad anisotropia



Il materiale fluisce a diverse velocità





Difetti dovuti a non sviluppabilità nel piano

