

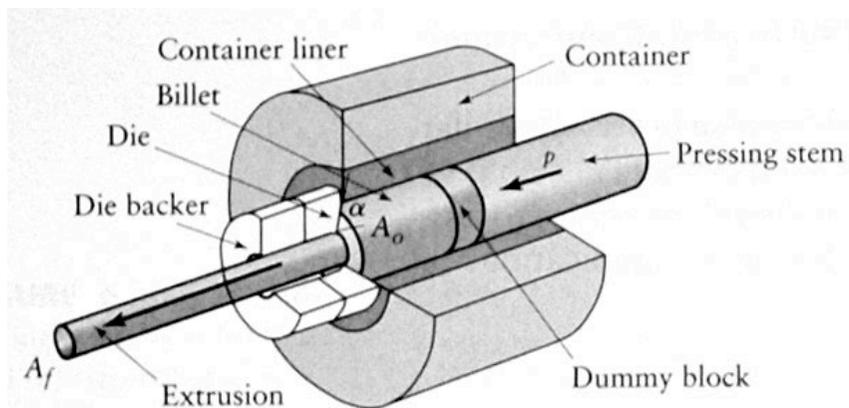
Estrusione e trafilatura

Estrusione

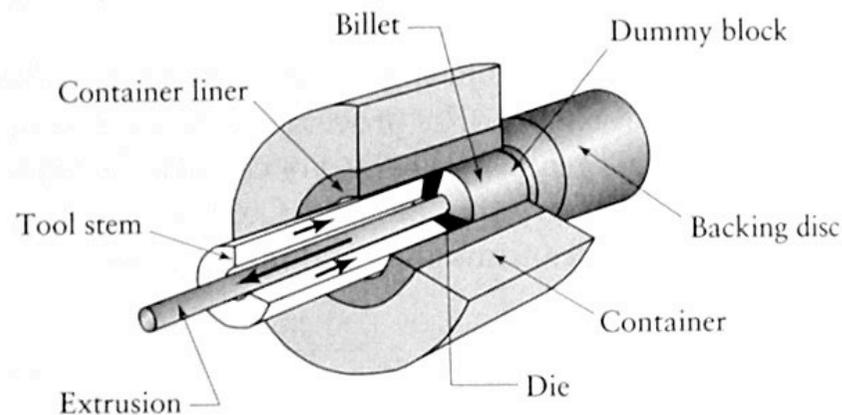
Trafilatura

Rastrematura

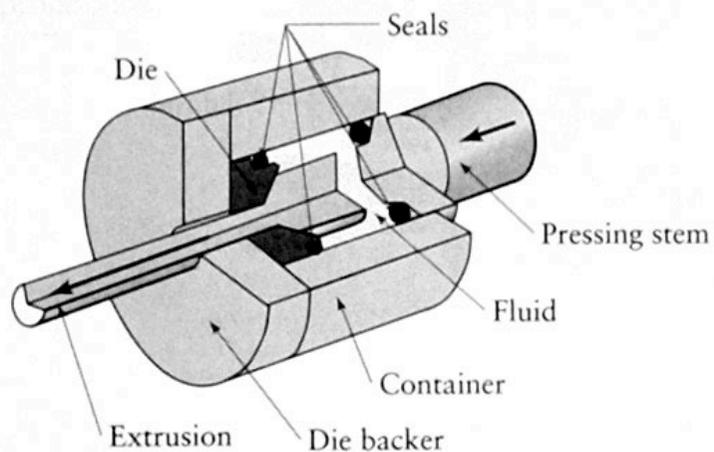
Estrusione



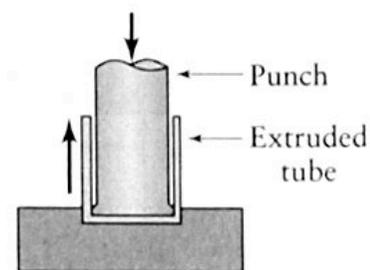
Diretta



Indiretta



Idrostatica



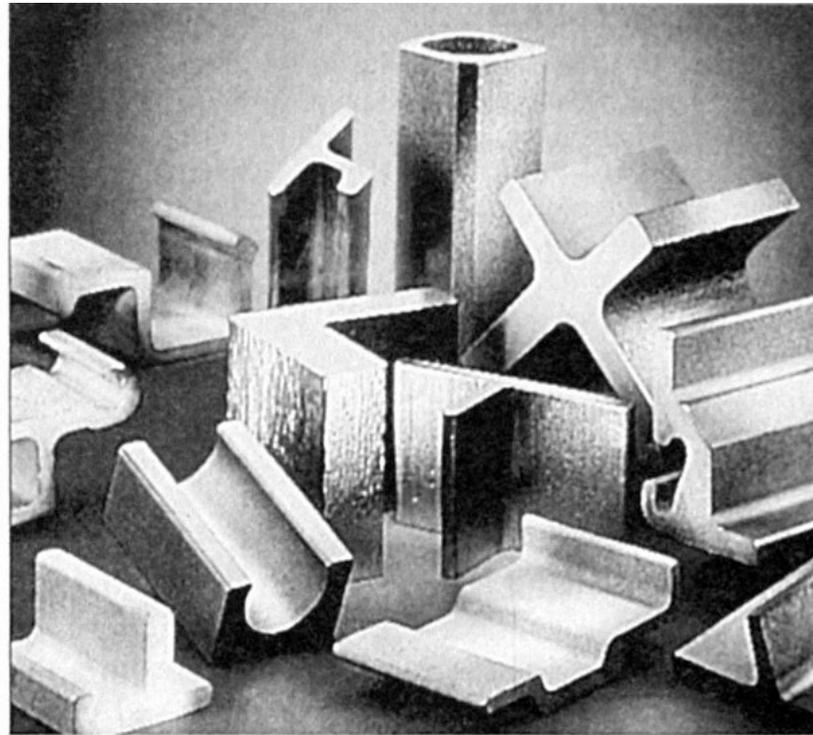
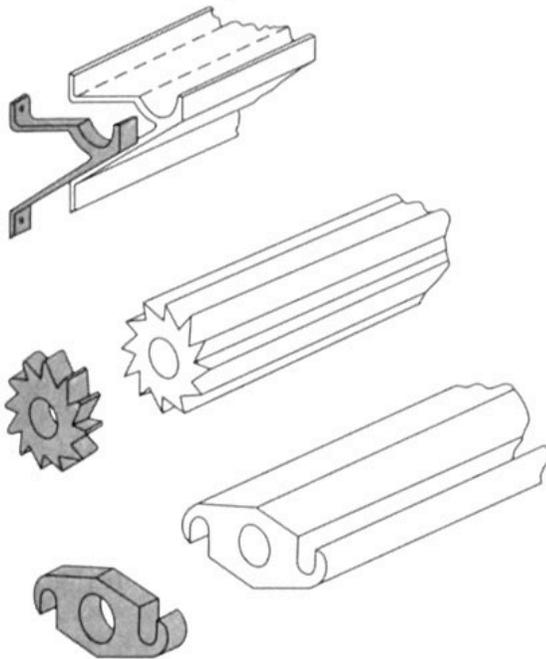
Ad impatto

Estrusione

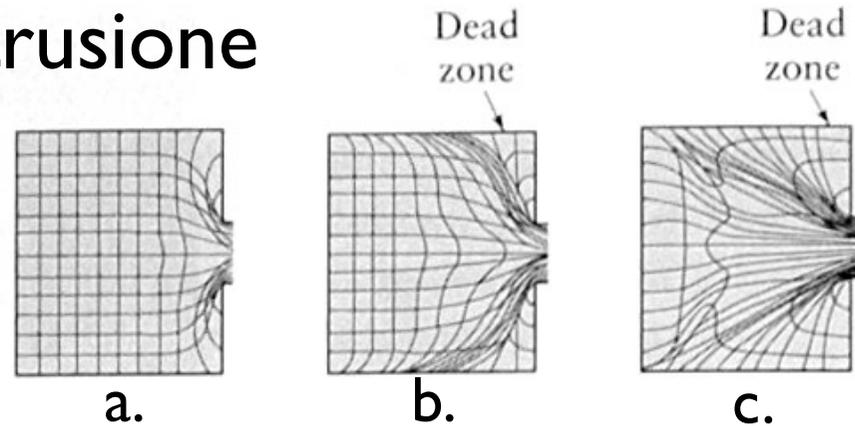
- Sviluppata nel tardo 1700. I tipi principali sono:
 - Estrusione diretta: l'attrito della billetta lungo le pareti del contenitore aumenta molto le forze richieste per l'estrusione.
 - Estrusione indiretta: l'attrito è limitato, ma le pressioni applicabili inferiori per via dell'uso di un pistone cavo.
 - Estrusione idrostatica: non si ha attrito con le pareti del contenitore.
 - Estrusione ad impatto: si usa per sezioni cave.
- Si può effettuare a caldo o a freddo.
- E' un processo non continuo, in quanto richiede che la billetta sia contenuta nella camera.
- Con billette coassiali di due metalli differenti si può fare "cladding", ossia rivestire per deformazione un metallo.

Estrusione

- CCD: circumscribing-circle diameter: diametro del più piccolo cerchio nel quale circoscrivere la sezione.
- Fattore di forma: rapporto tra il perimetro e l'area della sezione, dà un'idea della complessità della forma da estrudere.



Flussi di metallo nell'estrusione



- a. Flusso di metallo omogeneo, avviene nel caso di assenza di attrito tra billetta, stampo e contenitore.
- b. Nel caso in cui l'attrito sia alto, si sviluppa una zona morta e la superficie della billetta entra nel flusso provocando difetti interni.
- c. Con un attrito elevatissimo con il contenitore, la zona morta si estende all'indietro e se l'estrusione avviene a caldo abbiamo anche la formazione di un gradiente con difetti a tubo.

Meccanica dell'estrusione

- Deformazione ideale (vale anche per la laminazione):

- Il rapporto di estrusione è definito come: $R = \frac{A_0}{A_f}$

- La deformazione reale vale:

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) = \ln\left(\frac{L_f}{L_0}\right) = \ln R$$

- L'energia dissipata per unità di volume nella deformazione:

$$u = Y\varepsilon_1$$

- Il lavoro quindi vale:

$$\text{Lavoro} = A_0 L_0 Y \varepsilon_1 = F L_0 = p A_0 L_0$$

- dove p è la pressione del pistone:

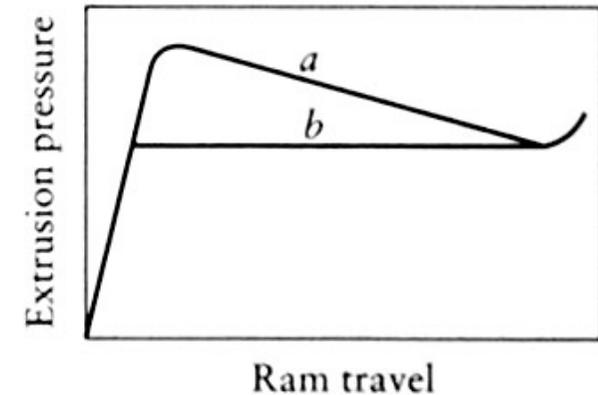
$$p = u = Y \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) = Y \ln R$$

Pressione di lavoro richiesta

- Nel caso reale risulta complicato calcolare l'effetto degli attriti e il lavoro ridondante di deformazione disomogenea, per cui la pressione richiesta per l'estrusione viene scritta semi-empiricamente come:

$$p = Y(a + b \ln R)$$

- dove a e b sono costanti da determinare sperimentalmente che approssimativamente valgono 0.8 e 1.2-1.5 rispettivamente.
- Per materiali ad incrudimento si sostituisce Y con \bar{Y} .

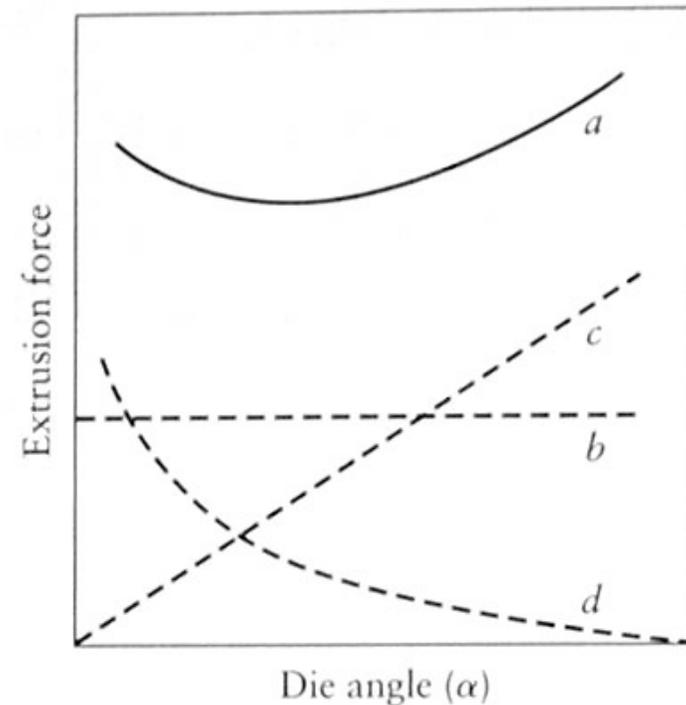


a: estrusione diretta

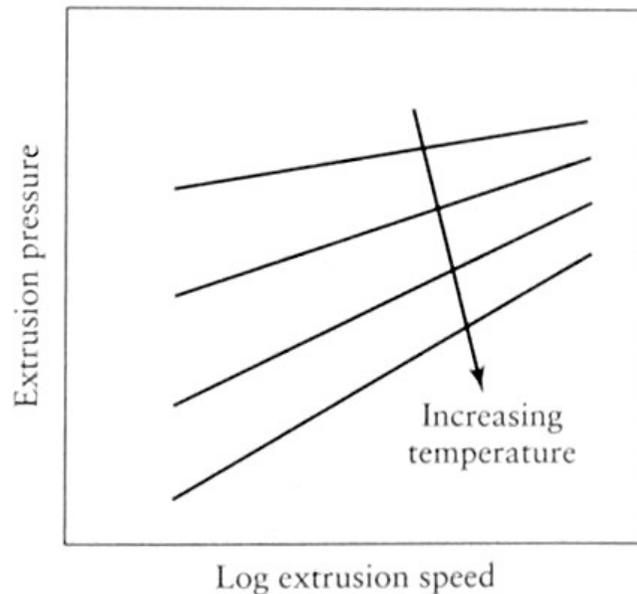
b: estrusione indiretta

Effetto dell'angolo di entrata

- La forza totale (a) richiesta per l'estrusione è funzione dell'angolo dello stampo o matrice:
- la forza nel processo ideale non dipende dall'angolo (b)
- la forza richiesta per il lavoro di deformazione ridondante (c) cresce con l'angolo
- la forza richiesta per vincere l'attrito cala con il crescere dell'angolo in quanto diminuisce la lunghezza del percorso.



Estrusione a caldo

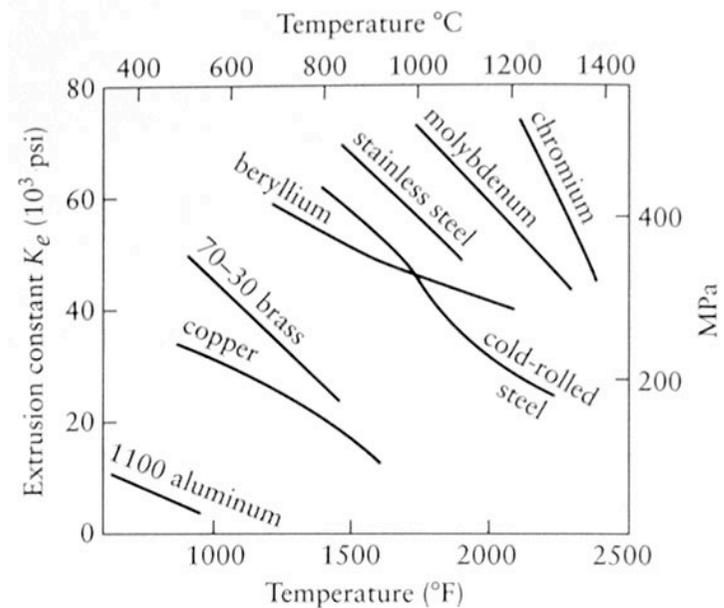


Effetto della temperatura e velocità di estrusione sulla pressione

La pressione si può esprimere convenientemente come:

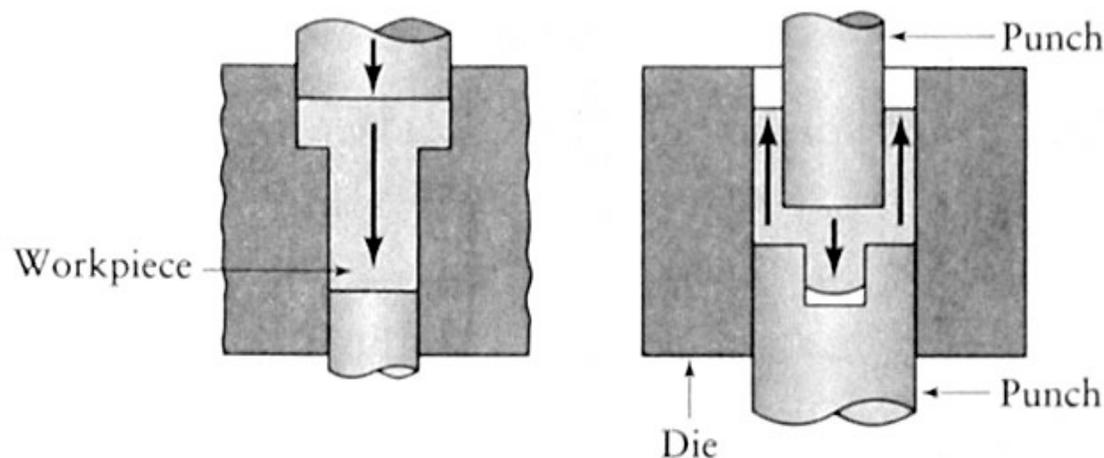
$$p = K_e \ln R$$

dove K_e si ricava dalla seguente figura:



Altri processi di estrusione

- Estrusione a freddo (cold extrusion): indica una combinazione di processi come estrusione diretta e indiretta e forgiatura.



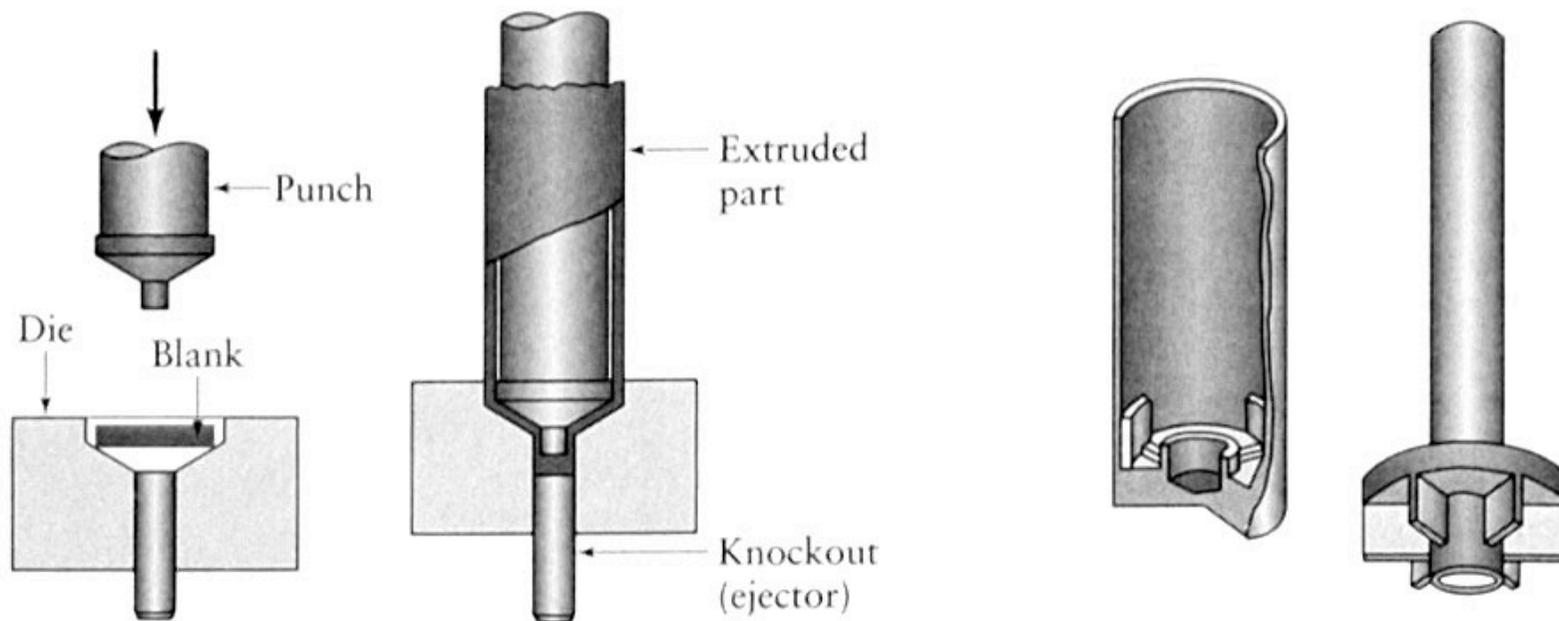
- L'estrusione a freddo involve sforzi su utensili e stampi (60-65 HRC di durezza) molto elevati. La lubrificazione è molto importante e si usano rivestimenti solfati da conversione sui pezzi e saponi o cere come lubrificanti.

Vantaggi estrusione a freddo

- L'estrusione a freddo sta venendo adottata sempre più frequentemente rispetto all'estrusione a caldo:
 - Proprietà meccaniche elevate come risultato dell'incrudimento a freddo
 - Buon controllo delle tolleranze dimensionali, che richiedono poche operazioni di finitura
 - Superfici con buona finitura (importante il lubrificante)
 - Assenza di ossidi superficiali
 - Alta produttività

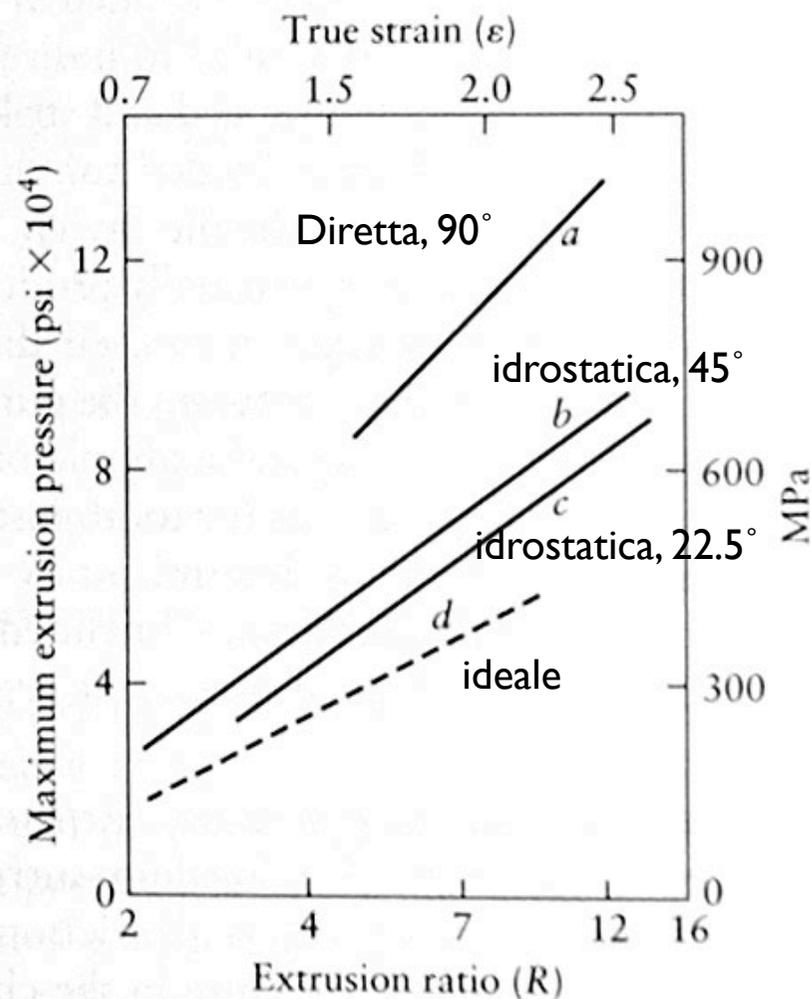
Estrusione a impatto

- Simile all'estrusione indiretta viene classificata anche come estrusione a freddo. L'impatto ad alta energia del punzone contro il pezzo estrude verso l'alto un tubo con pareti sottili (rapporto spessore/diametro fino a 0.005).
- In figura la formatura di un tubetto di dentifricio.



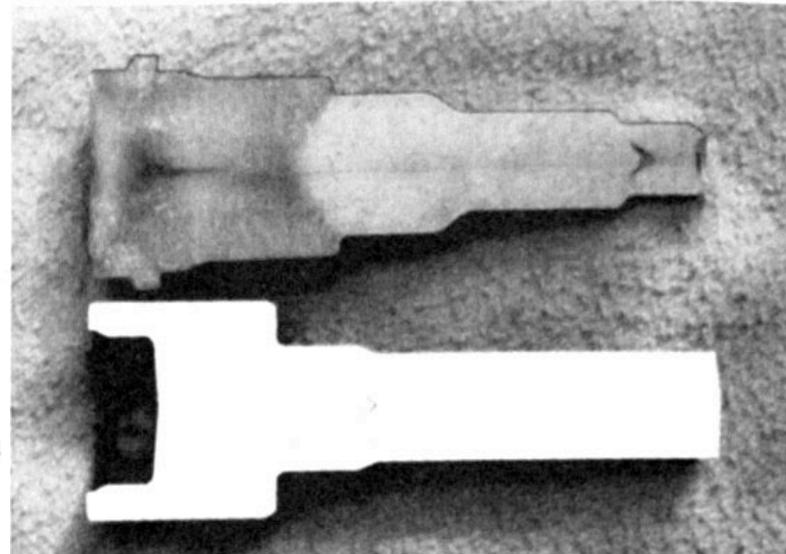
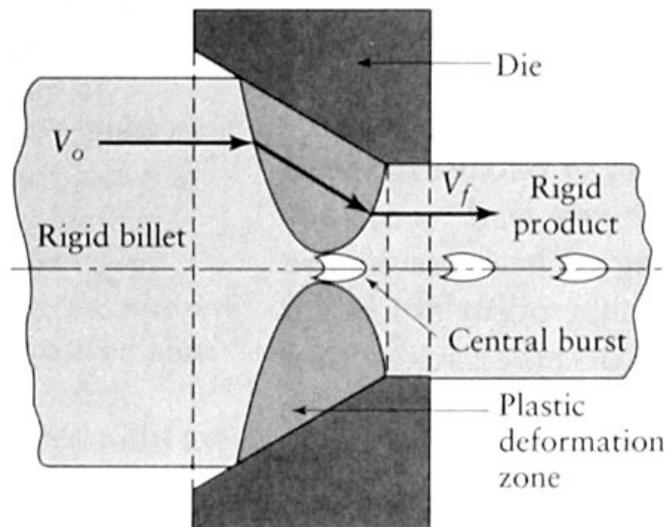
Estrusione idrostatica

- Evita attriti con il contenitore e permette di utilizzare bassi angoli per la matrice.
- Si utilizzano come fluidi oli vegetali a bassa temperatura e cere, polimeri o vetri ad alta temperatura.
- Non viene molto utilizzata industrialmente a causa della complessità del sistema a tenute.



Difetti d'estrusione

- Cricche superficiali: velocità troppo elevate e locali aumenti di temperatura possono portare alla formazione di cricche superficiali. Bisogna diminuire velocità e temperatura. Difetti a bamboo: il materiale rimane bloccato per attrito alle pareti e rilasciato a scatti. Comune nell'estrusione idrostatica, si riduce con un miglior lubrificante.
- Difetti di estrusione: si tratta di inclusioni di ossidi e impurità che nell'estrusione vengono inglobati e indirizzati verso il centro del pezzo dai flussi di materiale
- Cricche interne: da deformazioni disomogenee, si riducono aumentando l'attrito, diminuendo l'angolo alla matrice e h/L .

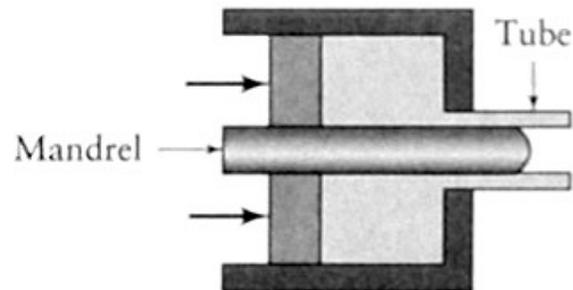


Operazioni nell'estrusione

- Si estrudono diversi materiali con rapporti d'estrusione che vanno da 10 a 100. Velocità tipiche del pistone sono fino a 0.5 m/s.
- Si preferiscono velocità inferiori per leghe bassofondenti più duttili come Al, Mg, Cu. Maggiori per acciai e metalli refrattari (Mo).
- Si usano presse idrauliche orizzontali per l'estrusione a caldo e verticali per quella a freddo.
- Nell'estrusione a caldo si usano le temperature della forgiatura a caldo. La billetta viene riscaldata prima dell'inserimento nell'estrusore. Il raffreddamento della billetta nel contenitore aumenta le deformazioni disomogenee. Inoltre l'ossido formato a caldo può essere eliminato utilizzando un tampone pressatore di diametro leggermente inferiore al pezzo.

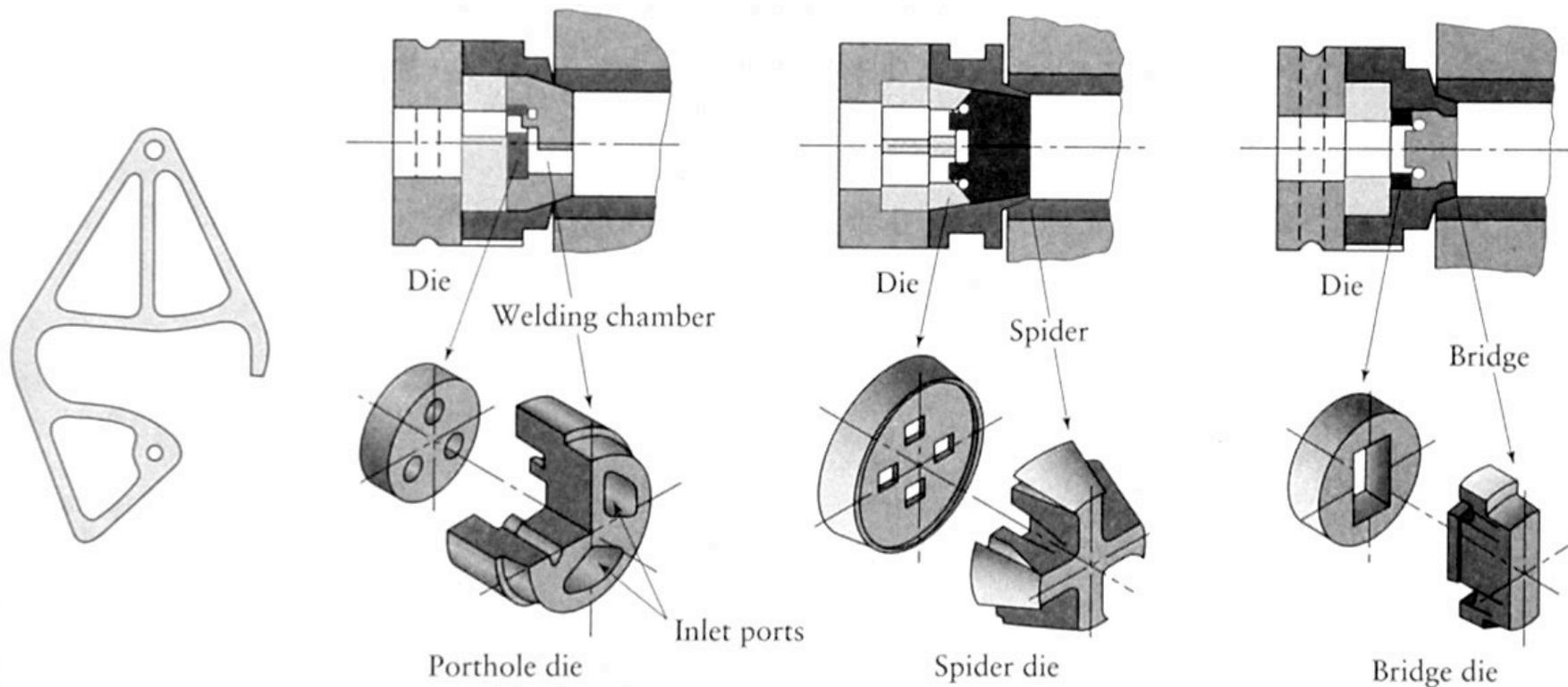
Operazioni nell'estrusione

- Lubrificazione: nell'estrusione a caldo per acciai e metalli refrattari si usa vetro che mantiene buona viscosità ad alta T e agisce da barriera termica. Oppure si usa grafite o disolfuro di molibdeno. Per leghe non ferrose no si usa lubrificante o al massimo grafite. Se si hanno problemi di adesione al contenitore si usa una camicia di materiale soffice come il rame (canning).
- Matrici: con Al si possono usare anche angoli di 90° (square o shear dies). Tubi vengono estrusi interponendo un mandrino



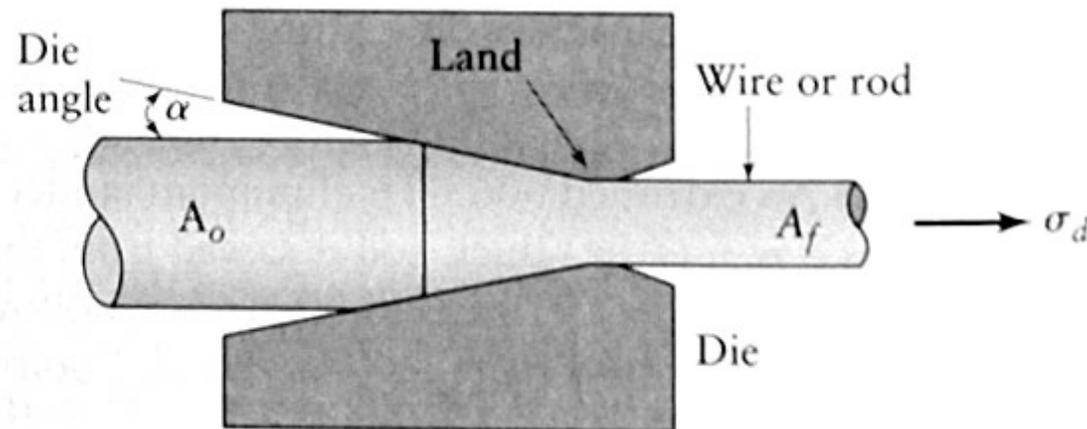
Matrici, continua

- Possiamo avere matrici complesse per estrarre forme cave con l'Al utilizzando metodi welding chamber (camera di saldatura). Il pezzo separato nella matrice si risalda all'uscita per effetto dell'enorme pressione.



Trafilatura

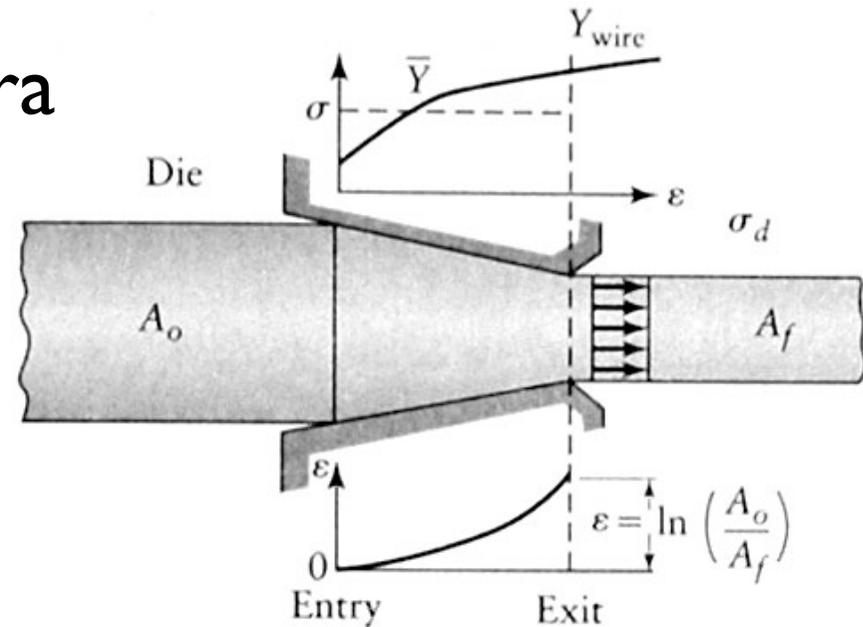
- La trafilatura è simile all'estrusione, l'unica differenza è che il materiale viene tirato all'uscita e risulta in trazione invece che compressione.
- Si producono in genere cilindri, fili e tubi. Tra fili e cilindri cambia solo il diametro. Per i fili metallici si arriva a 0.025 mm in diametro.



Meccanica della trafilatura

- Nel processo ideale:

$$\sigma_d = Y \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right)$$

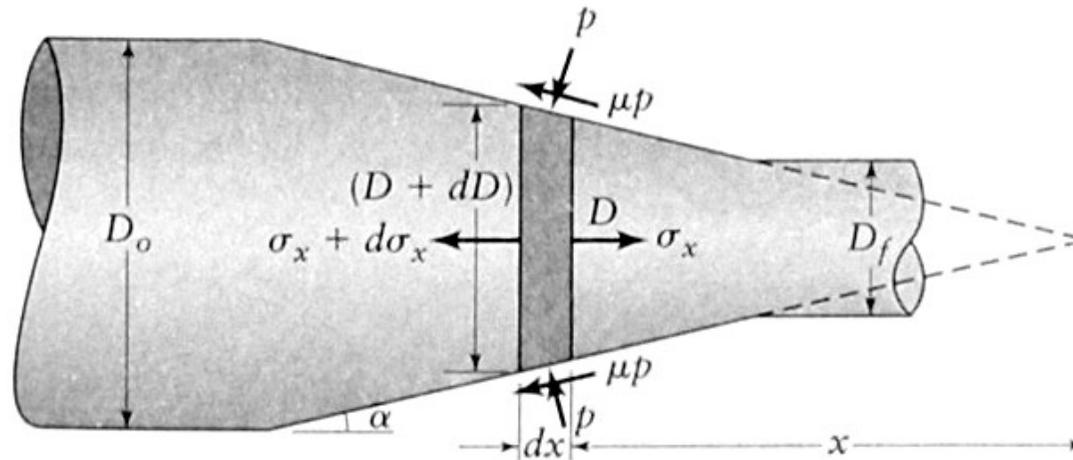


- e considerando materiale con incrudimento:

$$F = \bar{Y} A_f \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right)$$

- dove da definizione:
$$\bar{Y} = \frac{K \epsilon_1^n}{n + 1}$$

Attrito e deformazione ridondante



- Al lavoro per deformazione ideale dobbiamo poi sempre aggiungere il lavoro per vincere l'attrito e il lavoro di deformazione ridondante

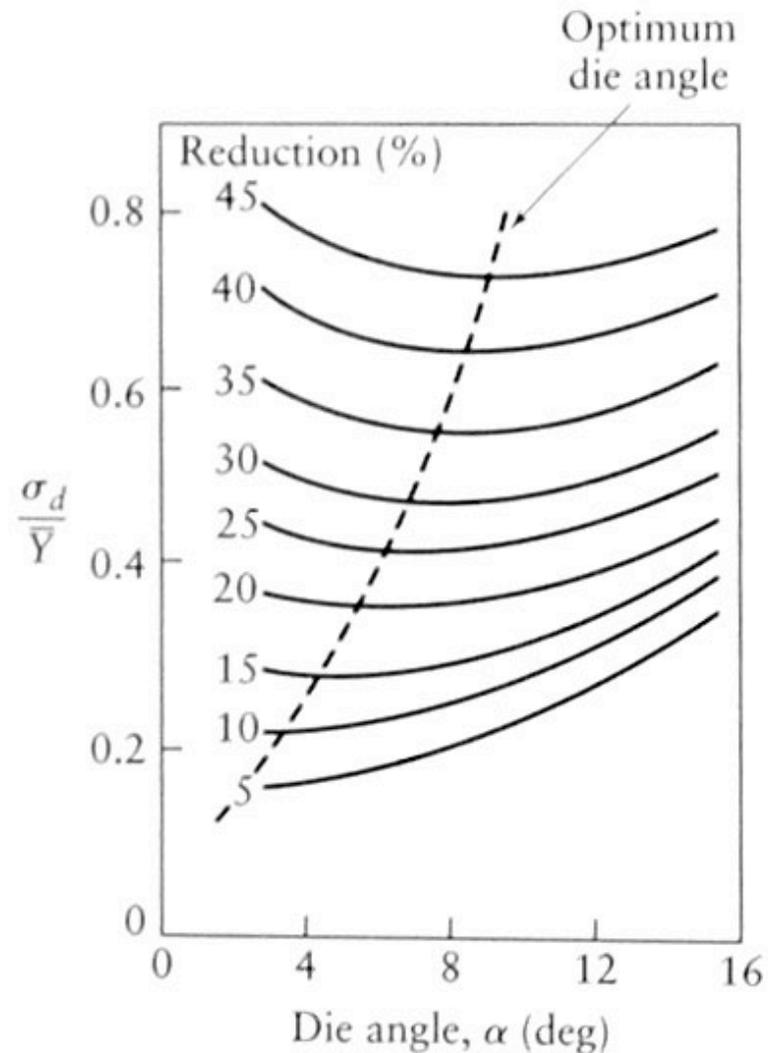
$$\sigma_d = \phi \bar{Y} \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) \ln \left(\frac{A_0}{A_f} \right)$$

$$\phi = 1 + 0.12 \frac{h}{L}$$

Fattore di disomogeneità

Angolo ottimale

- Come nel caso dell'estrusione l'angolo di ingresso nella filiera influenza sia l'attrito che il lavoro ridondante.
- Per cui esiste un angolo ottimale in funzione della riduzione d'area.

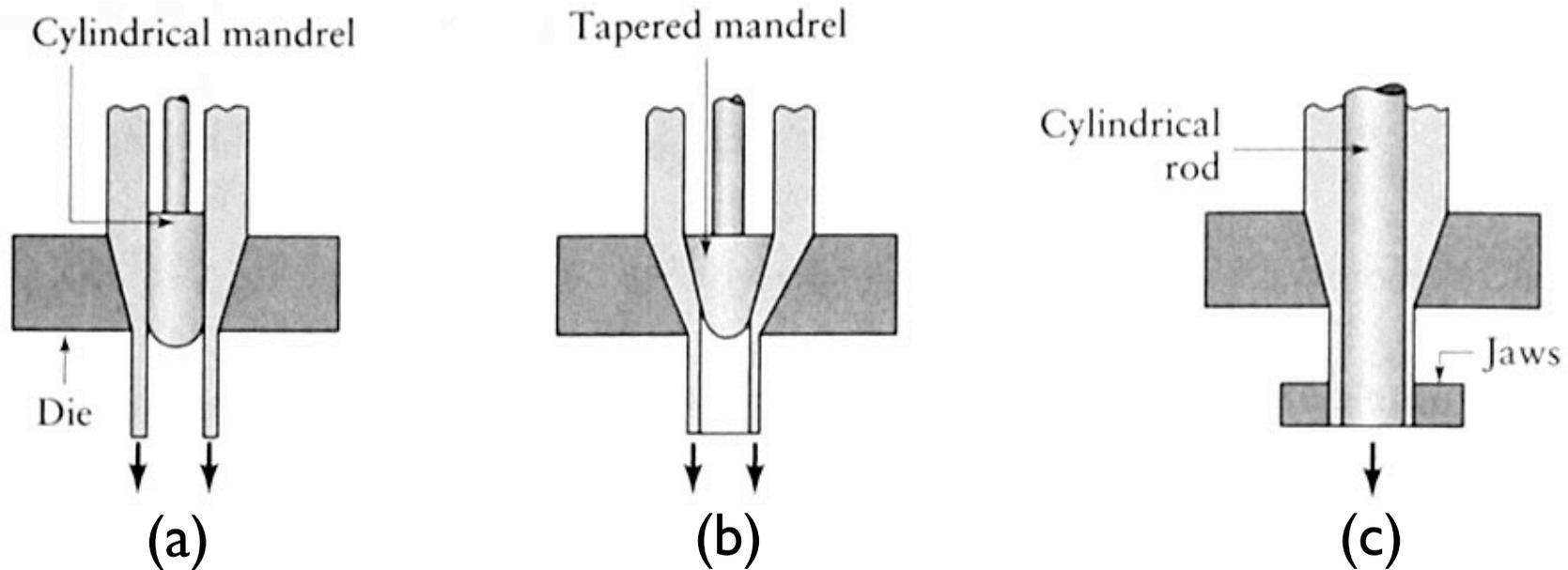


Massima riduzione per passata

- Si ottiene ricordando che lo sforzo di trazione non può superare lo sforzo di snervamento in trazione all'uscita e quindi prendendo la formula per l'estrusione ideale:
- $\sigma_d = Y \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) \leq Y \Rightarrow \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) \leq 1 \Rightarrow \frac{A_0}{A_f} = e \quad \frac{A_0 - A_f}{A_0} = 1 - \frac{1}{e} = 0.63$
- Quindi la riduzione massima è del 63% per trafilatura in fili o cilindri e del 58% per nastri piani.
- Attriti e deformazioni ridondanti la riducono ulteriormente.
- Con incrudimento: $\frac{A_0 - A_f}{A_0} = 1 - \frac{1}{e^{n+1}}$
- La massima riduzione aumenta con l'indice d'incrudimento

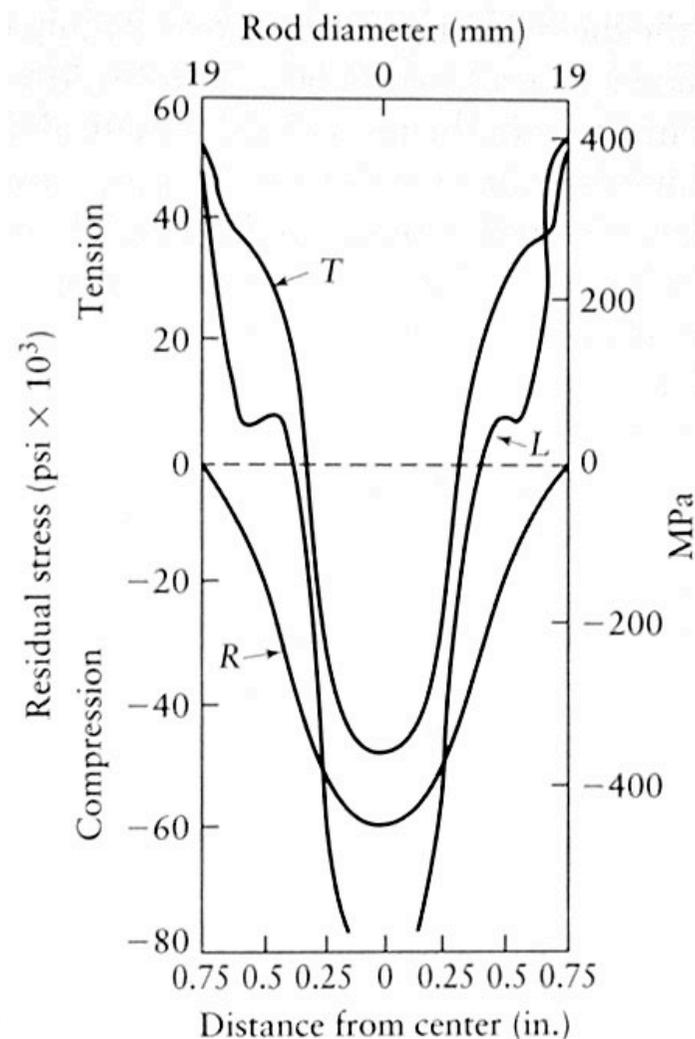
Trafilatura di tubi

- I tubi prodotti per estrusione vengono ulteriormente ridotti in spessore o diametro per trafilatura.
- Si usano diversi tipi di mandrino a seconda se si vuole ridurre solo lo spessore (a) o anche il diametro (b) o spessori minimi (c):



Difetti nella trafilatura

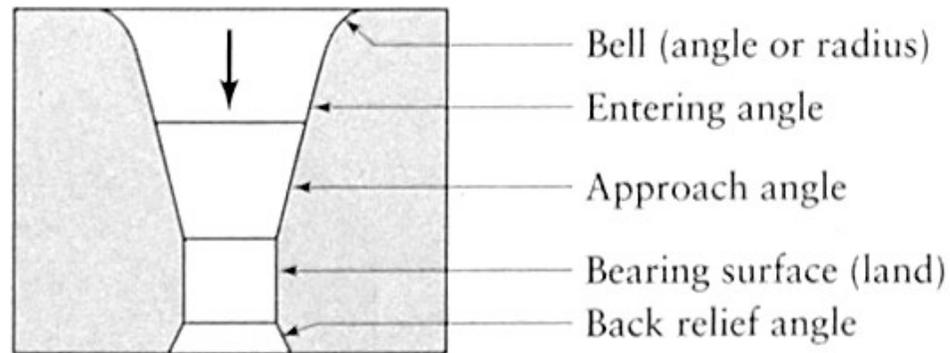
- Si osservano difetti simili a quelli d'estrusione, soprattutto cricche interne (centrali) che aumentano all'aumentare dell'angolo di trafilatura o diminuendo la riduzione per passata (in entrambi i casi aumenta la deformazione disomogenea).
- Poi possiamo avere la formazione in superficie di striature, piegature o cricche longitudinali che possono poi crescere in seguito a lavorazione successive. Bisogna controllare i parametri di lavorazione e la lubrificazione per ridurli.
- A causa della deformazione non omogenea anche nella trafilatura si possono avere sforzi residui. In figura gli sforzi residui in un tondino trafilato in acciaio.



T=Tangenziale
R=Radiale
L=Longitudinale

Operazioni di trafilatura

- La forma (sezione) tipica di una matrice è visibile in figura:



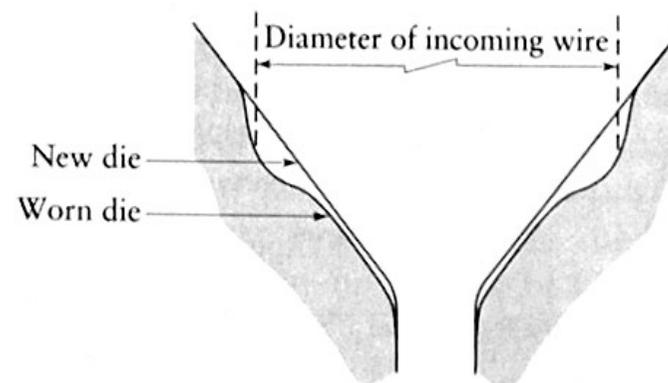
- gli angoli tipici vanno da 6° a 15° .
- Riduzioni superiori a 45% non si usano poichè possono dare origine a rotture. Riduzioni leggere intorno al 10% vengono fatte per migliorare la finitura superficiale e tolleranza dimensionali.
- Le velocità di trafilatura vanno da 0.15 a 50 m/s a seconda dei diametri e riduzione per passata.

Operazioni di trafilatura

- Un tondino o filo viene inizialmente rastremato all'estremità per inserirlo nella filiera, poi viene preso negli afferraggi della macchina trafilatrice.
- Si può effettuare la trafilatura in tandem facendo passare il filo attraverso più filiere in serie. Per ridurre la tensione dopo l'ultima si inseriscono dei rulli avvolgitori motorizzati su cui il filo compie 1 o 2 giri e oltre a trascinare il filo in uscita applicano una tensione antagonista su quello in entrata successiva facilitando la trafilatura (come nella laminazione).
- Si può rendere dritti i fili facendoli passare in flessione attraverso più filiere disallineate (come nei rulli allineanti nella laminazione).
- Sezioni più larghe vengono trafilate a temperature elevate.
- La trafilatura a freddo incrudisce il materiale. Per trafilazioni in serie a freddo bisogna procedere ad un annealing tra una passata e l'altra.

Operazioni di trafilatura

- Bundle drawing: viene utilizzato per cavi; si trafilano più fili insieme e avvolti in un unico cavo. Per prevenire l'incollaggio tra un filo e l'altro si inserisce del materiale opportuno (polimerico in genere che funge anche da protettivo per cavi in acciaio).
- Filiere: la matrice o stampo interno viene realizzato in acciaio per utensili, carburi o diamante (singolo cristallo o cristalli inglobati in matrice metallica). Sia gli inserti di diamante che di carburi vengono supportati da una parte in acciaio.
- L'usura maggiore nelle matrici avviene in corrispondenza della prima zona di contatto del pezzo.



Operazioni di trafilatura

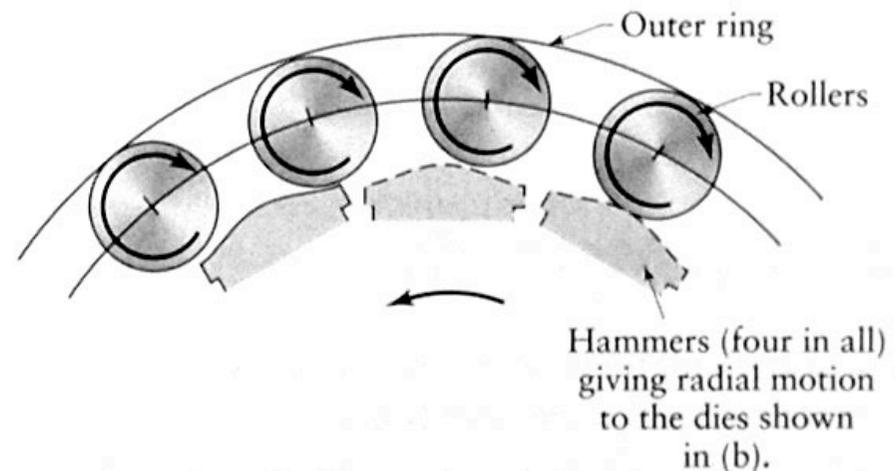
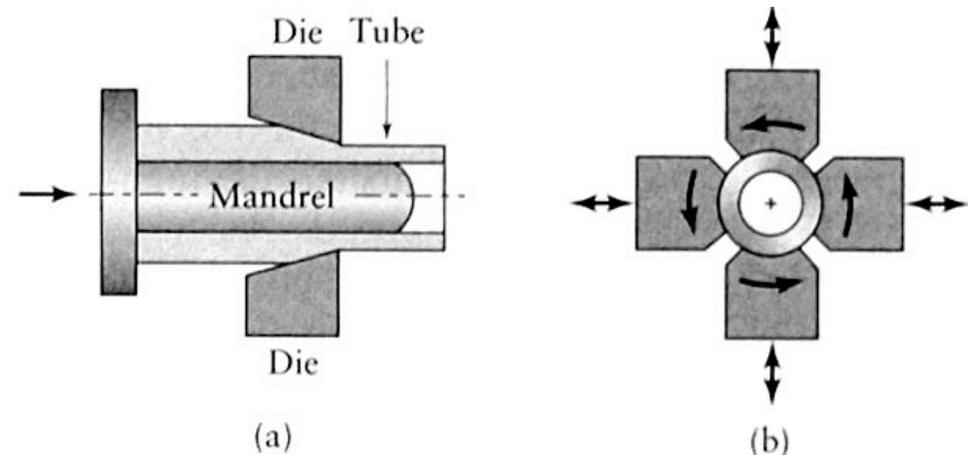
- Si possono avere due tipi di trafilatura in base alla **lubrificazione**:
 - trafilatura a secco: si rimuove prima di tutto l'ossido superficiale per attacco chimico e poi il materiale passa attraverso un bagno di sapone in polvere prima di entrare nella filiera. Nel caso di metalli ad alta resistenza come acciai si riveste il filo o la barra con metalli duttili (rame o stagno) o rivestimenti di conversione. Per il titanio si usano polimeri.
 - trafilatura ad umido: il pezzo e la matrice sono completamente immersi nel lubrificante (oli e emulsioni) durante la trafilatura.
- Si possono usare ultrasuoni per ridurre ulteriormente l'usura e migliorare sia la finitura superficiale che permettere alte riduzioni per passata.

Macchine per trafilatura

- Due tipi di macchinari vengono usati per mettere in trazione e trafilare i pezzi:
 - banchi da trafilatura, simili a macchine per trazione orizzontali, sono sistemi idraulici usati per sezioni molto grosse che richiedono carichi elevati, arrivano a trafilare in pezzi fino a 30m
 - bull block, rulli avvolgitori motorizzati che avvolgono i fili trafilati e applicano la trazione necessaria alla trafilatura.

Rastrematura (swaging)

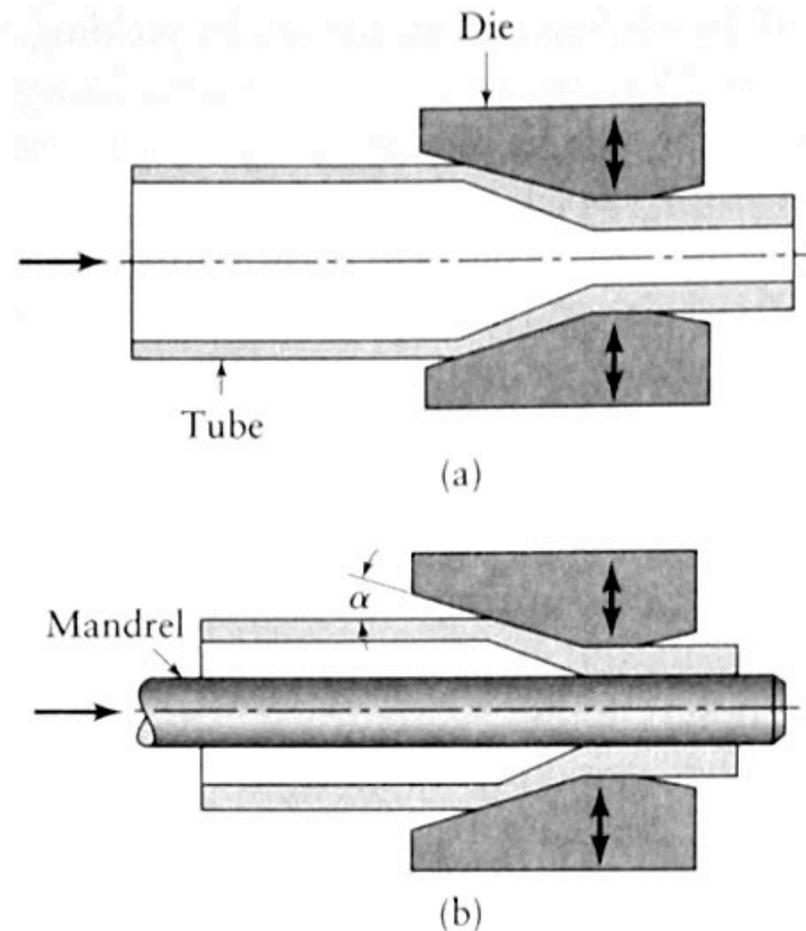
- Operazione di riduzione della sezione di tubi o cilindri nota anche come forgiatura radiale o rastrematura per rotazione.
- Un set di martelli possono muoversi anche radialmente durante la rotazione della matrice.



(c)

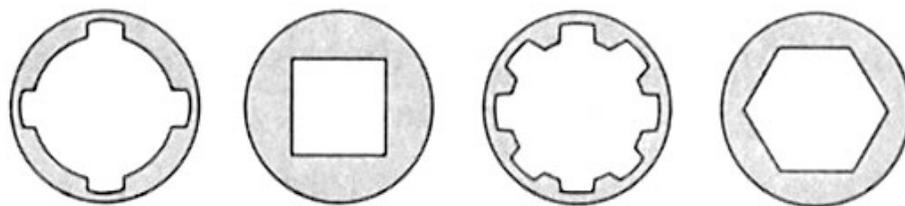
Rastrematura

- La rastrematura di un tubo si può effettuare sia con l'ausilio che senza di un mandrino.
- Nel caso (a) si effettua senza mandrino ed in genere questo vien fatto in preparazione alla trafilatura.
- Tipicamente nei pezzi interamente prodotti per rastrematura si fa uso del mandrino (b).

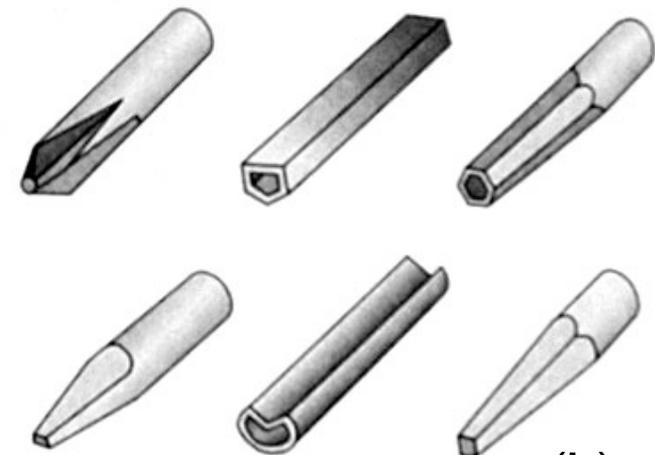


Tipi di sezioni per rastrematura

- Con questo processo si possono produrre sia pezzi con sezione interna particolare come in (a)
- Inoltre si possono ottenere anche sezioni non circolari esternamente. In (b) ci sono dei pezzi prodotti per rastrematura.
- Per rastrematura si hanno ottime finiture superficiali, tolleranze e proprietà meccaniche.



(a)



(b)