Estrusione

Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.
Kalpakjian • Schmid

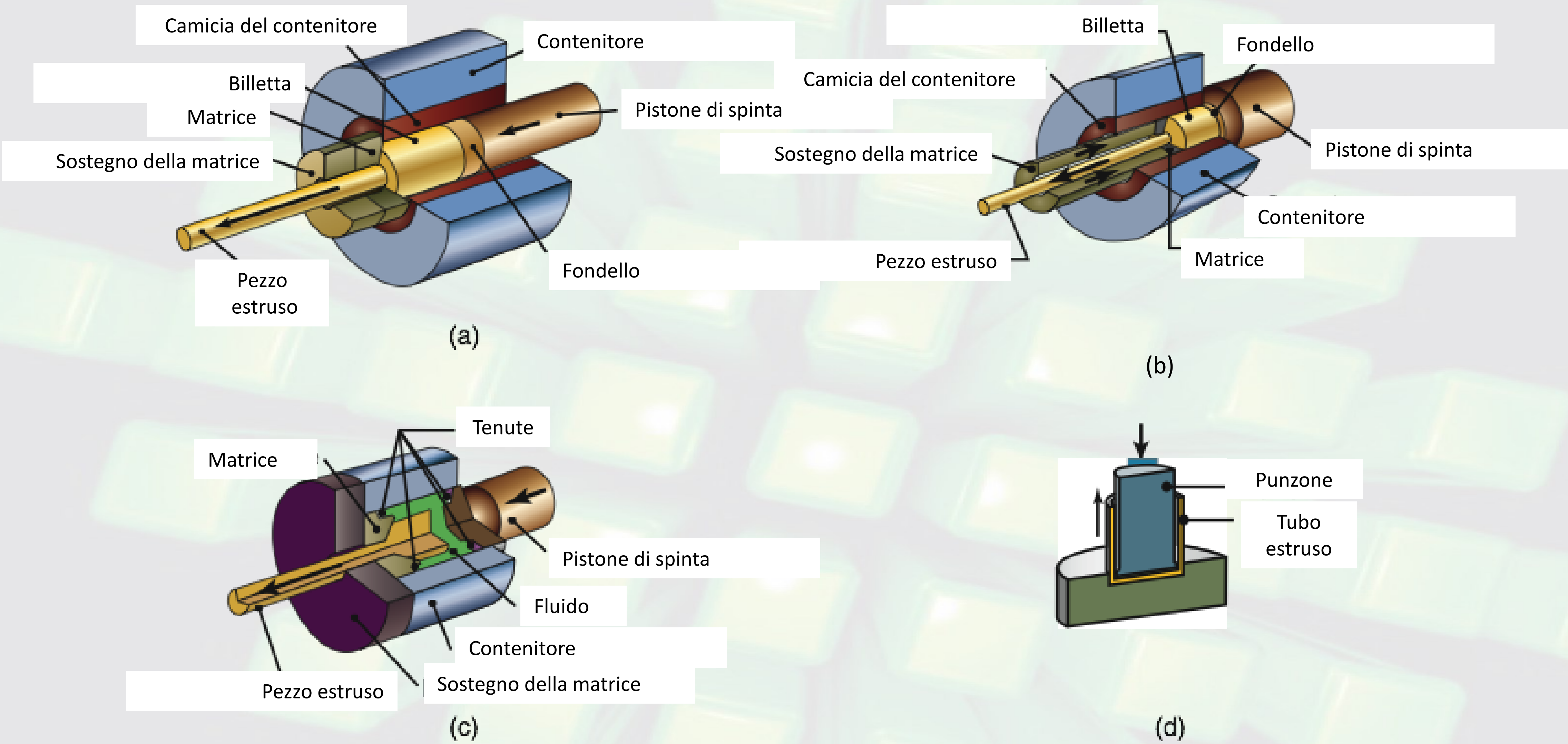
ISBN No. 0-13-227271-7

- Estrusione diretta
- Estrusione inversa
- Estrusione idraulica
- Estrusione ad impatto
- Estrusione di tubi e di sezioni cave

Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.
Kalpakjian • Schmid

ISBN No. 0-13-227271-7

Tipi di Estrusione



Tipi di estrusione:

(a)diretta;

(b)inversa;

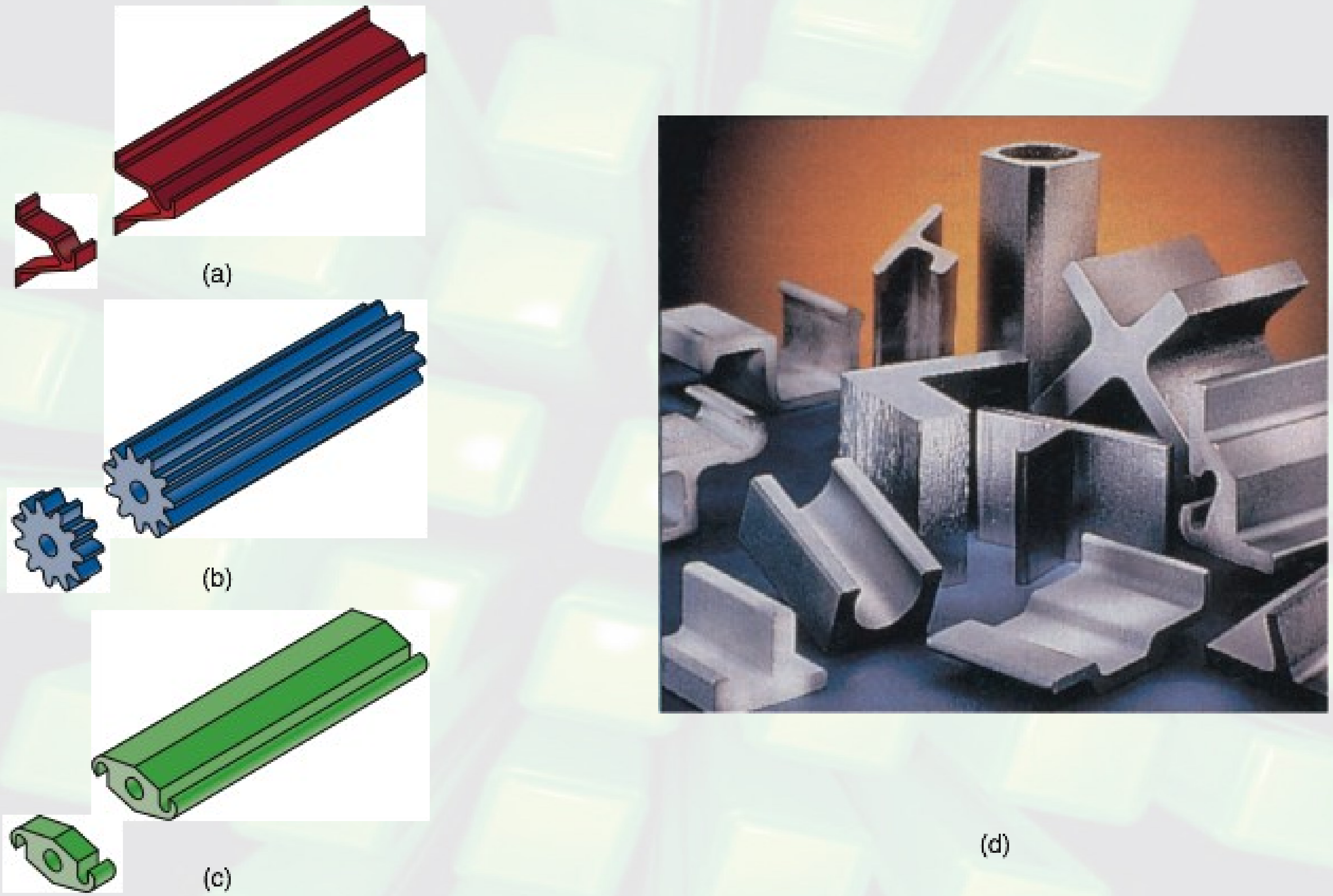
(c)idrostatica;

(d)ad impatto.

Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.
Kalpakjian • Schmid

ISBN No. 0-13-227271-7

Prodotti Estrusi



(a)-(c) Esempi di profilati estrusi e di prodotti fatti sezionando tali profilati.
(d) Esempi di sezioni trasversali di prodotti estrusi.

Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.
Kalpakjian • Schmid

ISBN No. 0-13-227271-7

Flusso del materiale nella Estrusione

In generale **l'angolo ottimale a di estrusione** è *difficile da determinare* in quanto

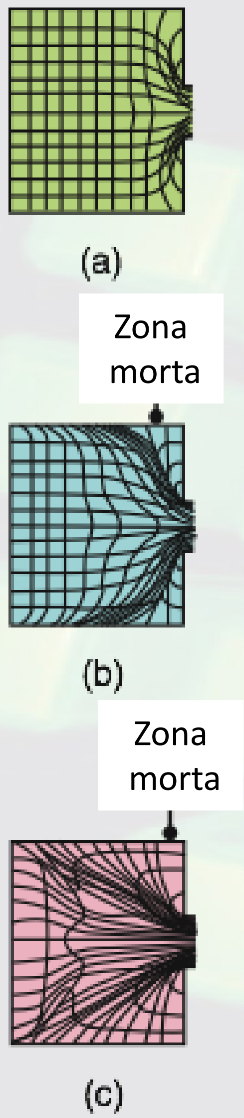
- *Lavoro ideale* non dipende da α;
- *Lavoro di attrito* cresce al decrescere di α perché aumenta la lunghezza di contatto;
- *Lavoro ridondante* è legato alle deformazioni non omogenee e cresce assieme all'angolo α.

Pressione di estrusione come prevista dal metodo dello slab

$$p = Y\left(1+\frac{\tan\alpha}{\mu}\right)\left[R^{\mu\cot\alpha}-1\right]$$

Pressione di estrusione con zona morta a 45°

$$p = Y\left(1.7\ln R+\frac{2L}{D_o}\right)$$



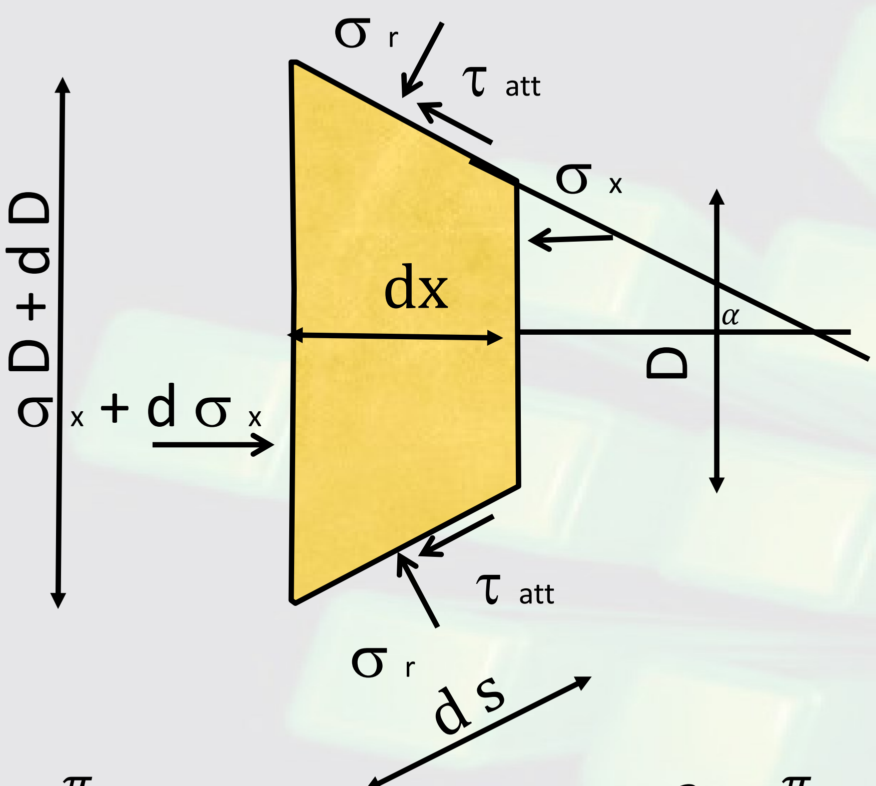
Schema di tre differenti tipi di flusso del metallo nel caso della estrusione diretta con angolo della matrice pari a 90°.

a) Con basso attrito,
b) Con elevato attrito tra la billetta e il contenitore e la billetta e la matrice,
c) Con elevato attrito e elevato raffreddamento dovuto al contenitore.

Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.
Kalpakjian • Schmid

ISBN No. 0-13-227271-7

Analisi con il metodo dello slab della Estrusione assial simmetrica (1/3)



$$d\,s\cos\alpha = dx$$

$$d\,s = \frac{dx}{\cos\alpha}$$

Infinitesimo di ordine superiore

Equilibrio forze in direzione x

$$\frac{\pi}{4}(\sigma_x + d\sigma_x)\,(D + dD)^2 - \frac{\pi}{4}\sigma_x\,D^{\,2} - \sigma_r\pi D dx\sin\alpha\,\frac{1}{\cos\alpha} - \mu\sigma_r\pi D dx\cos\alpha\,\frac{1}{\cos\alpha} = 0$$

$$\frac{1}{4}(\sigma_x + d\sigma_x)(D^2 + 2DdD + \cancel{(dD)^2}) - \frac{1}{4}\sigma_x\,D^{\,2} - \sigma_r\,D\,dx\tan\alpha - \mu\,\sigma_r D dx = 0$$

$$\frac{1}{4}(\cancel{\sigma_x D^2} + D^2 d\sigma_x + 2DdD\sigma_x - \cancel{\sigma_x D^{\,2}}) - \sigma_r\,D\,dx\;\tan\alpha - \mu\sigma_r D dx = 0$$

$$D\,d\sigma_x + 2dD\sigma_x - 4\sigma_r\;dx\;\tan\alpha - 4\mu\sigma_r dx = 0$$

$$\tan\alpha = \frac{\frac{dD}{2}}{dx} \Rightarrow dx\tan\alpha = \frac{dD}{2}$$

Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.
Kalpakjian • Schmid

ISBN No. 0-13-227271-7

Estrusione slab (2/3)

$$D\,d\sigma_x + 2dD\sigma_x - 2\,\sigma_r\,\,dD\,\left(1+\frac{\mu}{\tan\alpha}\right) = 0$$

Scrivendo il criterio energetico di von Mises

$$(\sigma_1-\sigma_2)^{\,2} + (\sigma_2-\sigma_3)^{\,2} + \,(\sigma_3-\sigma_1)^{\,2} = 2\,Y^2$$

e considerando le tre tensioni principali

$$\sigma_1 = \sigma_x$$
$$\sigma_2 = \sigma_r$$
$$\sigma_3 = \sigma_r$$

ottengo

$$|\sigma_x - \sigma_r| = Y$$

quindi

$$\sigma_r - \sigma_x = Y \quad \longrightarrow \quad \sigma_r = Y + \sigma_x$$

$$D\,d\sigma_x + 2dD\sigma_x - 2\,(Y+\sigma_x)\,dD\,\left(1+\frac{\mu}{\tan\alpha}\right) = 0$$

$$D\,d\sigma_x + 2\sigma_x dD - 2\sigma_x\,\left(1+\frac{\mu}{\tan\alpha}\right)dD\, - 2Y\left(1+\frac{\mu}{\tan\alpha}\right)dD = 0$$

$$D\,d\sigma_x = -\cancel{2\sigma_x}dD + 2\sigma_x\,\left(\cancel{1}+\frac{\mu}{\tan\alpha}\right)dD\, + 2Y\left(1+\frac{\mu}{\tan\alpha}\right)dD = 2\mu\sigma_x\frac{dD}{\tan\alpha} + 2Y\left(1+\frac{\mu}{\tan\alpha}\right)$$

$$B = \frac{\mu}{\tan\alpha}$$

Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.
Kalpakjian • Schmid

ISBN No. 0-13-227271-7

$D\,d\sigma_x = -2\sigma_x dD + 2\sigma_x\ (1+B)dD\ + 2Y(1+B)dD = \cancel{-2\sigma_x dD} + \cancel{2\sigma_x dD} + 2BdD\sigma_x + 2Y(1+B)dD = (2B\sigma_x + 2Y(1+B))dD$

Estrusione slab (3/3)

$$z = 2\sigma_x B + 2Y(1+B)$$
$$dz = 2B\ d\sigma_x$$
$$\frac{dD}{D} = \frac{d\sigma_x}{2\sigma_x B + 2Y(1+B)} = \frac{dz}{2B\ z}$$

integrazione

$$\ln(D) = \frac{1}{2B}\ln(z) + \ln(C)$$
$$\ln(z) = 2B\ln(C\ D) = \ln(C\ D)^{2B}$$
$$z = (C\ D)^{2B} = 2\sigma_x B + 2Y(1+B)$$
$$2\sigma_x B + 2Y(1+B) = C\ D^{2B}$$

Con le condizioni al contorno

$D = D_0 \qquad \sigma_x = \sigma_{estrus}$

$\boxed{D = D_f \qquad \sigma_x = 0}$

$$C = \frac{2Y(1+B)}{D_f^{\ 2B}}$$

$$2\sigma_x B + 2Y(1+B) = \frac{2Y(1+B)}{D_f^{\ 2}} D^{2B}$$

$$2\sigma_x B = \frac{2Y(1+B)}{D_f^{\ 2B}} D^{2B} - 2Y(1+B)$$

$$\sigma_x = \frac{Y(1+B)}{B}\frac{D^{2B}}{D_f^{\ 2B}} - \frac{Y(1+B)}{B} = \frac{Y(1+B)}{B}\left(\left(\frac{D}{D_f}\right)^{2B} - 1\right)$$

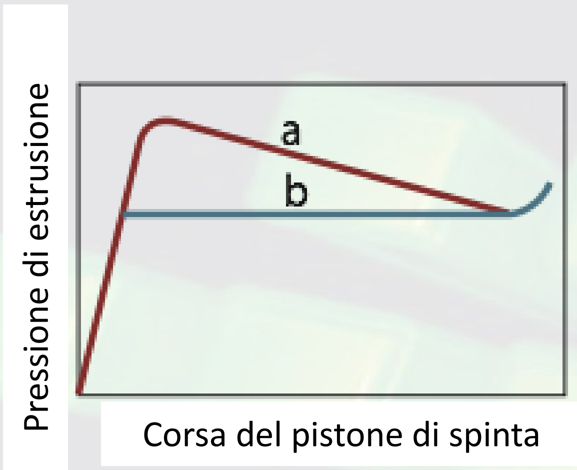
La σ_x che agisce sulla billetta di diametro D_0 non è altro che la $\sigma_{estrusione}$

$$\sigma_{estrusione} = \frac{Y\left(1+\frac{\mu}{\tan\alpha}\right)}{\frac{\mu}{\tan\alpha}}\left(\left(\frac{A_0}{A_f}\right)^{\frac{\mu}{\tan\alpha}} - 1\right)$$

Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.
Kalpakjian • Schmid

ISBN No. 0-13-227271-7

Meccanica dell'Estrusione

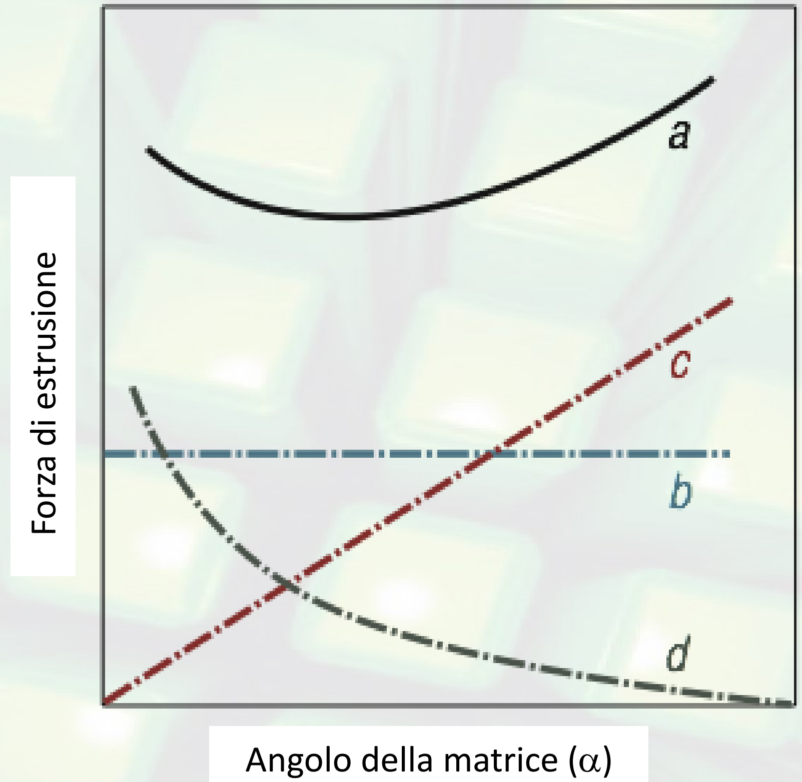


Andamento tipico della pressione di estrusione in funzione della corsa del pistone di spinta:

(a) Estrusione diretta,

(b) Estrusione inversa.

La pressione è maggiore nel caso di estrusione diretta a causa dell'effetto dell'attrito all'interfaccia tra billetta e contenitore, effetto che diminuisce al diminuire della lunghezza della billetta all'interno del contenitore.



Andamento della Forza di Estrusione in funzione dell'Angolo della matrice.

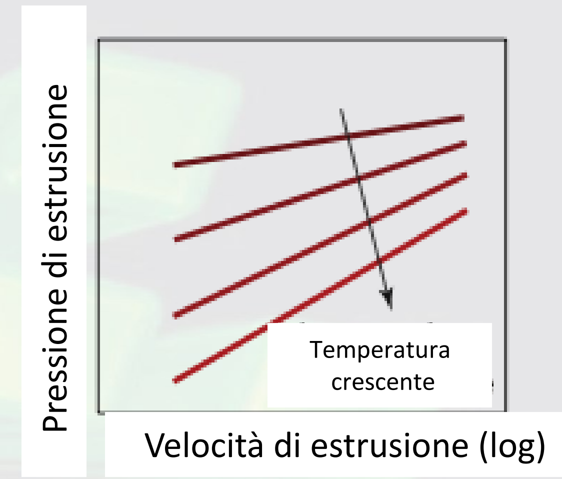
(a) Forza complessiva;

(b) Forza ideale;

(c) Forza richiesta per la deformazione ridondante;

(d) Forza richiesta per vincere l'attrito.

Esiste un angolo della matrice che rende minima la forza complessiva (***angolo ottimale***).



Effetto della temperatura e della velocità del pistone di sulla pressione di estrusione.

Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.
Kalpakjian • Schmid

ISBN No. 0-13-227271-7

Lavoro ideale nell'Estrusione (1/3)

Rapporto di estrusione = R = $\frac{A_0}{A_f}$

E in condizioni ideale la billetta passa da $L_0\ A_0$ a $L_f\ A_f$

Ma siccome $d\varepsilon = \frac{dl}{l}$ ➡ $\varepsilon = ln\frac{L_f}{L_0} = ln\frac{A_0}{A_f} = \ln R$

Il **lavoro ideale per unità di volume u$_{id}$** è dato da

$$u_{id} = \int \sigma d\varepsilon$$

E se il materiale è perfettamente plastico $\sigma = Y = costante$ quindi

$$u_{id} = Y \cdot\ \varepsilon = Y \ln R$$

Quindi il **lavoro totale ideale** è dato da

$$W_{id} = Volume \cdot\ u_{id} = Volume \cdot\ YlnR = A_0 L_0 YlnR$$

Invece il **lavoro esterno** W$_{ext}$ è dato da

$$W_{ext} = F_{ext} \cdot L_0 = p \cdot A_0 \cdot L_0$$

E in condizioni ideali $W_{ext} = W_{id}$ quindi

$$p \cdot A_0 \cdot L_0 = A_0 L_0 YlnR$$

ovvero

$$p = YlnR$$

Ne consegue che la **potenza esterna** data da

$$P_{ext} = F_{ext} \cdot v_0 = p\frac{\pi D_0^2}{4} \cdot v_0$$

Mentre la **potenza per deformazione plastica**

$$P_{plastica} = portata\ volumetrica\ \cdot lavoro\ ideale\ \ per\ unità\ di\ volume =$$

$$= v_0 \frac{\pi D_0^2}{4} \cdot u_{id} = v_0 \frac{\pi D_0^2}{4} \cdot Y \ln R = v_0 \frac{\pi D_0^2}{4} \cdot\ Y \ln\left(\frac{D_0}{D_f}\right)^2$$

Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.
Kalpakjian • Schmid

ISBN No. 0-13-227271-7

Infine la **potenza per attrito sulla matrice** (*ipotesi di una zona morta a 45°*) con una tensione di flusso tangenziale $\tau = k = \frac{Y}{2}$

(2/3)

$$\mathrm{P}_{att-mat} = \int dP_{att-mat} = \int dF_{att} \cdot v_x$$

Poiché la portata è costante cioè v$\cdot D^2 = costante$ → $v_0 \cdot D_0^2 = v_x \cdot D^2$

→ $v_x = v_0 \left(\frac{D_0}{D}\right)^2$

$$dA = \pi(r + dr + r) \cdot a = \pi(2r + dr) \cdot \sqrt{(r + dr - r)^2 + dh^2} \cong 2\pi r \cdot \sqrt{dr^2 + dh^2} = \pi D \cdot \sqrt{2dr^2}$$

$$dA \cong \pi D dD \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$dP_{att} = dF_{att} \cdot v_x$$

dove dF_{att} il contributo infinitesimo della forza di attrito che risulta orientato lungo le x vista la distribuzione assialsimmetrica delle τ sul tronco di cono infinitesimo. Quindi per calcolare la potenza devo moltiplicare una forza orientata in x con la corrispondente componente della velocità in x, cioè v_x per la quale vale (***portata volumetrica costante***) $v_x \cdot D^2 = v_0 \cdot D_0^2$ e quindi il contributo infinitesimo della forza di attrito è pari a

$$dF_{att} = \tau_{att} \cdot dA = \frac{Y}{2} \cdot \pi D dD \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.
Kalpakjian • Schmid

ISBN No. 0-13-227271-7

Potenza per attrito sulla matrice

$$\mathrm{P}_{att-mat} = \int dF_{att} \cdot v_x = \frac{Y}{2}\int_{D_1}^{D_0} \pi D dD \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot v_0 \frac{D_0^2}{D^2} = \frac{\pi Y v_0 D_0^2}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{D_1}^{D_0} \frac{dD}{D}$$

$$\mathrm{P}_{att-mat} = \frac{\pi Y v_0 D_0^2}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{D_1}^{D_0} \frac{dD}{D} = \frac{\pi Y v_0 D_0^2}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \ln\left(\frac{D_0}{D_1}\right)$$

Potenza per attrito sul contenitore dove L è la lunghezza di contatto nel contenitore

$$P_{att-cont} = \pi D_0 \cdot k \cdot L \cdot v_0 = \pi D_0 \cdot \frac{Y}{2} \cdot L \cdot v_0$$

Quindi

$$P_{ext} = P_{plastica} + P_{att-mat} + P_{att-cont}$$

$$P_{ext} = p \frac{\pi D_0^2}{4} \cdot v_0 = v_0 \frac{\pi D_0^2}{4} \cdot Y \ln\left(\frac{D_0}{D_f}\right)^2 + \frac{\pi Y v_0 D_0^2}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \ln\left(\frac{D_0}{D_1}\right) + \pi D_0 \cdot \frac{Y}{2} \cdot L \cdot v_0$$

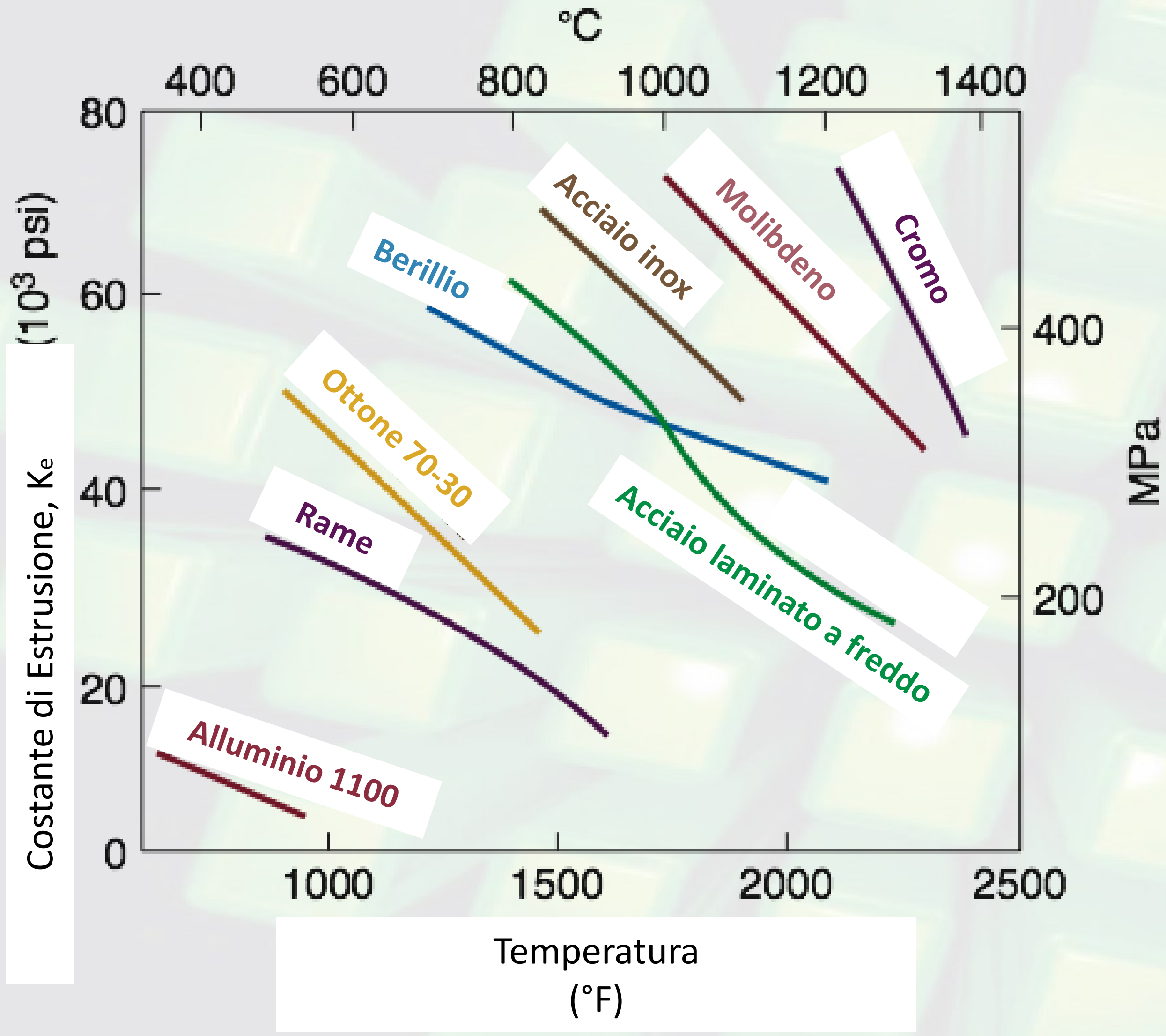
E dividendo per $\frac{\pi D_0^2}{4} \cdot v_0$ ottengo la pressione necessaria ad estrudere

$$p = Y \ln\left(\frac{D_0}{D_f}\right)^2 + \sqrt{2} Y \ln\left(\frac{D_0}{D_1}\right) + Y \cdot \frac{2L}{D_0}$$

Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.
Kalpakjian • Schmid

ISBN No. 0-13-227271-7

Costante di Estrusione



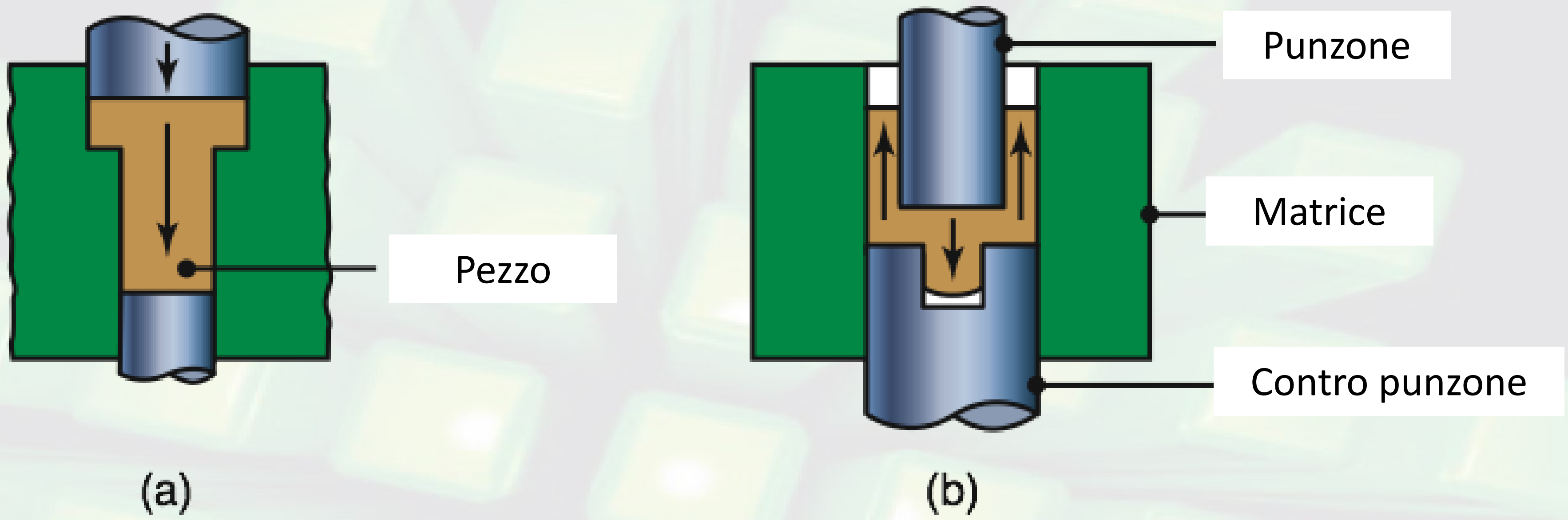
$$p = K_e \ln R$$

Costante di Estrusione, **Ke**, per diversi materiali in funzione della temperatura

Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.
Kalpakjian • Schmid

ISBN No. 0-13-227271-7

Estrusione a Freddo

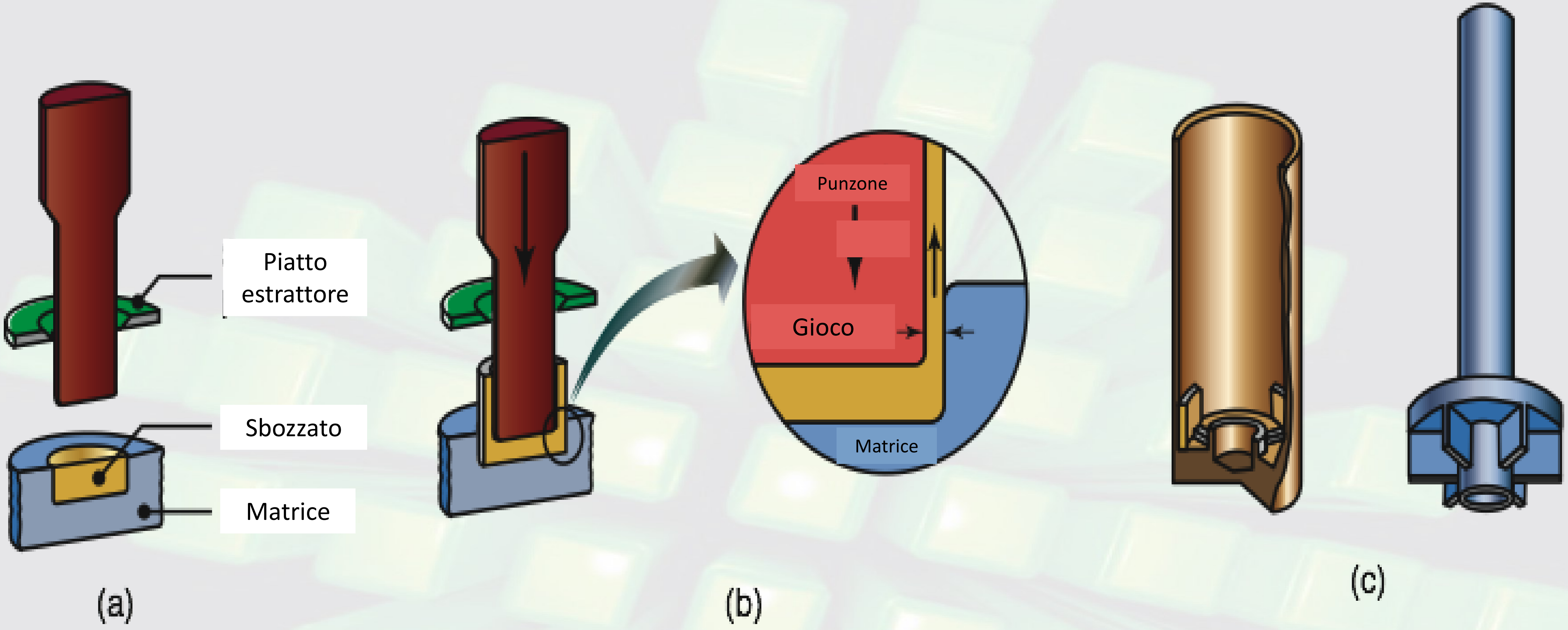


Due esempi di estrusione a freddo: a) **in avanti** , b) **sia in avanti che indietro**.

Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.
Kalpakjian • Schmid

ISBN No. 0-13-227271-7

Estrusione ad Impatto



(a)-(b) Schema del processo di estrusione ad impatto. Le parti estruse vengono estratte usando il piatto estrattore, altrimenti rimarrebbero attaccate al punzone nella sua corsa indietro.

(c) Due esempi di prodotti ottenuti con l'estrusione ad impatto.

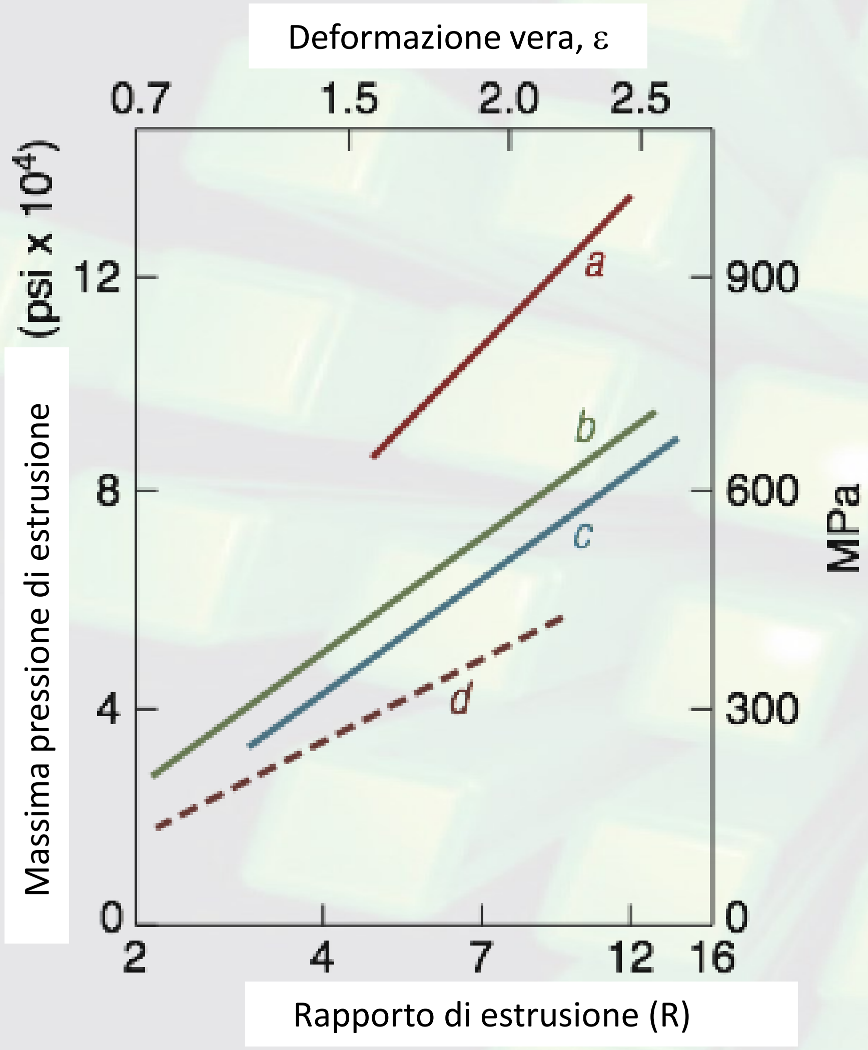
Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.
Kalpakjian • Schmid

ISBN No. 0-13-227271-7

Pressione di Estrusione

Pressione di estrusione in funzione del **rapporto di estrusione $R=A_0/A_f$** per una lega di alluminio nel caso di

a. Estrusione diretta, α=90°
b. Estrusione idrostatica, α=45°,
c. Estrusione idrostatica, α=22.5°
d. Estrusione ideale, calcolata come deformazione omogenea

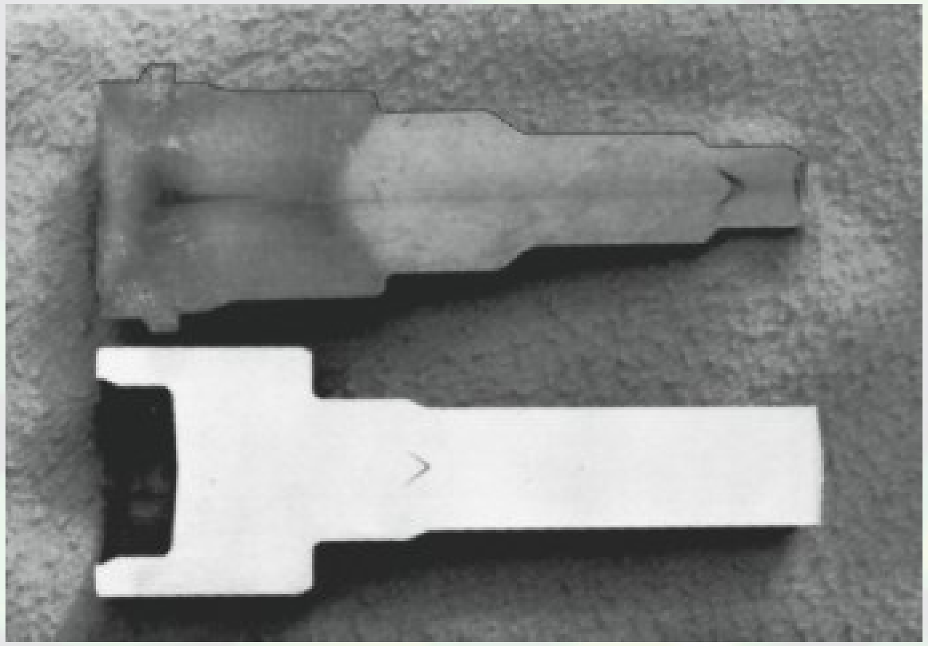


$$p = K_e \ln R$$

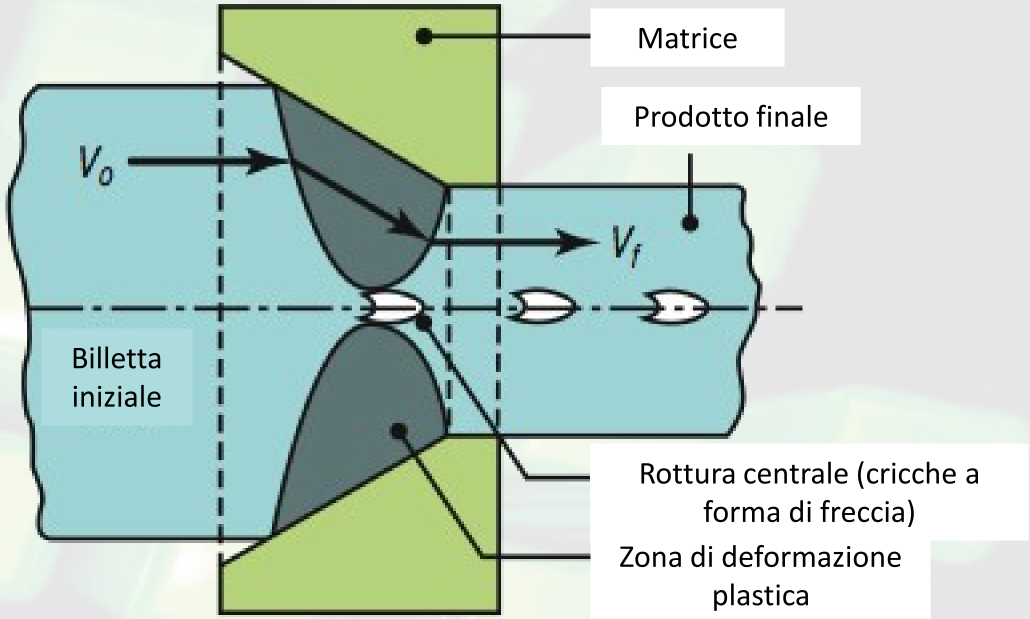
Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.
Kalpakjian • Schmid

ISBN No. 0-13-227271-7

Difetto dovute a Cricche a forma di Freccia (Chevron Cracks)



(a)



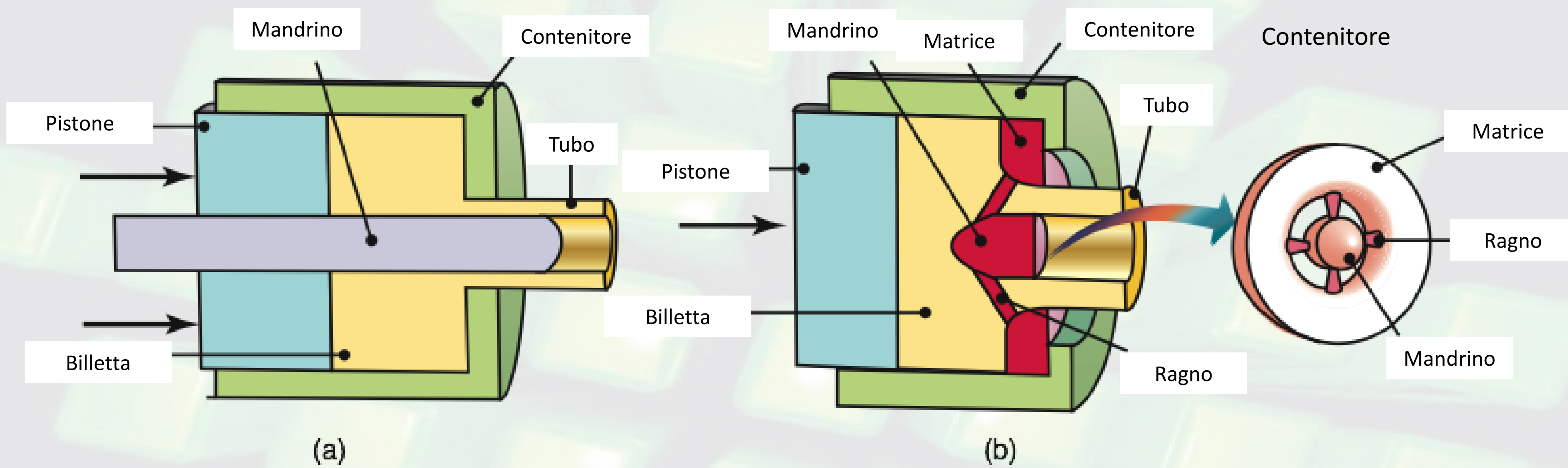
(b)

(a) Cricche a forma di freccia in barre cilindriche estruse. Finché il pezzo estruso non viene ispezionato questi difetti non vengono rilevati e possono provocare guasti nell'utilizzo del pezzo.
(b) Zona di deformazione nell'estrusione, sono evidenti la zona rigida e quella plastica. Da notare che le due zone plastiche non si incontrano ma portano alla formazione delle cricche a forma di freccia. Lo stesso tipo di osservazioni si possono fare nella trafilatura di barre cilindriche attraverso matrici coniche e nella trafilatura di fogli o lastre piatte attraverso matrici a forma trapezoidale.

Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.
Kalpakjian • Schmid

ISBN No. 0-13-227271-7

Estrusione di Tubi



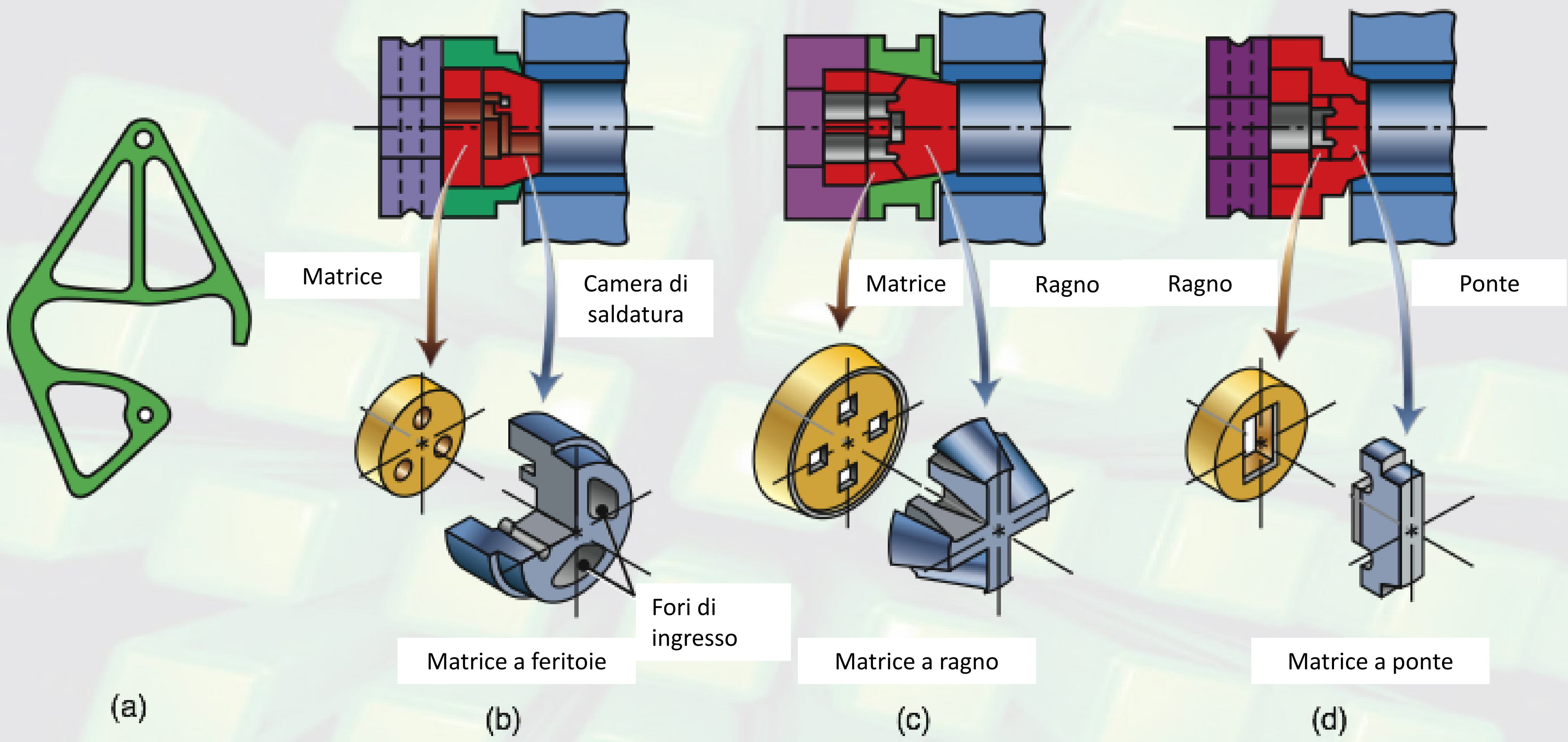
Estrusione di tubi senza giunzione.

(a) Basata sull'uso di un mandrino interno che si muove indipendentemente dal sistema di estrusione. Una soluzione alternativa prevede l'uso di mandrino integrato nel sistema di estrusione.

(b) Basata sull'uso di una matrice a ragno (***spider***) per produrre tubi privi di giunzioni longitudinali.

ISBN No. 0-13-227271-7

Estrusione di sezioni cave



(a) Sezione di un componente estruso prodotto in alluminio 6063-T6. Questa pezzo è spesso 8 mm e viene segato da un profilo estruso.
(b) - (d) Componenti di vari tipi di stampi da estrusione per sezioni cave complesse.

ISBN No. 0-13-227271-7