

# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO

---

## SEP282 – PROCESSOS PARA INDÚSTRIA AERONÁUTICA

- AULA 3
- PROCESSOS DE FORJAMENTO

# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO

## Forjabilidade de materiais para matrizes fechadas

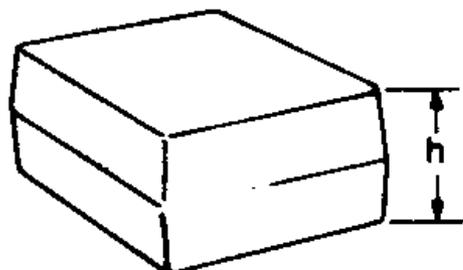
Aumento da resistência ao escoamento →

Diminui forjabilidade ↓

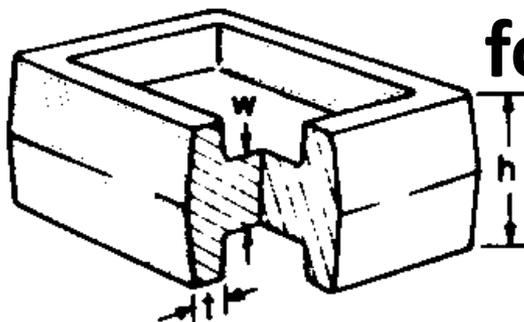
	Baixo	Médio	Alto
Bom	1030 (aço C) 4340 (aço liga) H11 (aço ferr.) 6061 (Liga Al)	304 (aço inóx)  Ti-6Al-4V	Molibdênio  16-26-6 (aço inóx)
Moderado	AZ80 (liga Magnésio) 7075 (liga Al)	A286 (Aço Inóx)  INCO901 (liga Ni)  17-7PH (Inóx)  Ti-5Al-26Zn	WASPALOY (liga Ni)  Ti-13V-11Cr-3Al  Ni55 (Liga Ni-Cr-Co)
Pobre	1130 (aço liga) Aços Resulfurados	321 (Inóx) 15-7 Mo (Inóx)	RENE 41 (liga de Ni) HASTELLOY (liga de Ni) HASTELLOY B (liga de Ni)

# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO

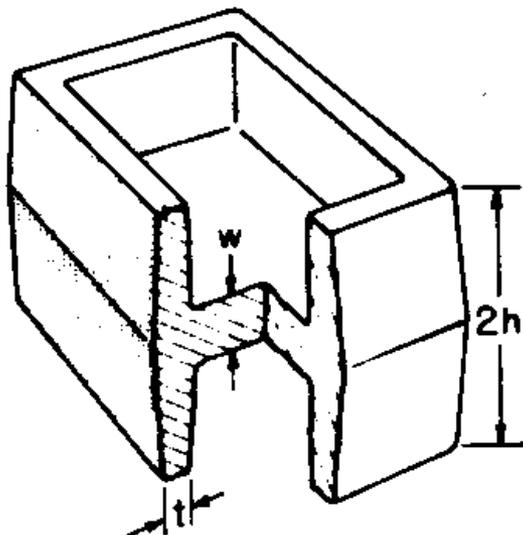
## Particularidades das formas forjadas



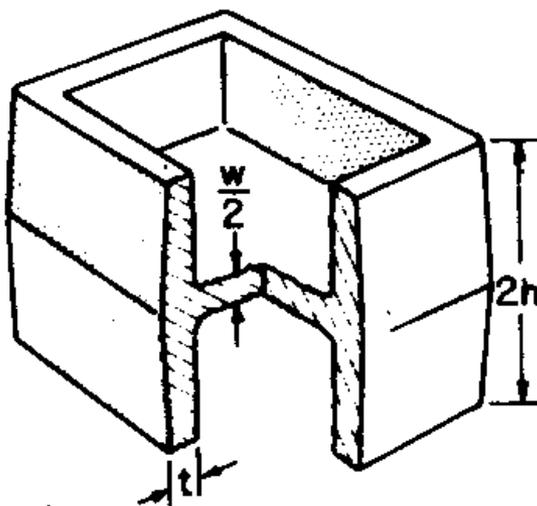
a RECTANGULAR SHAPE



b RIB-AND-WEB PART



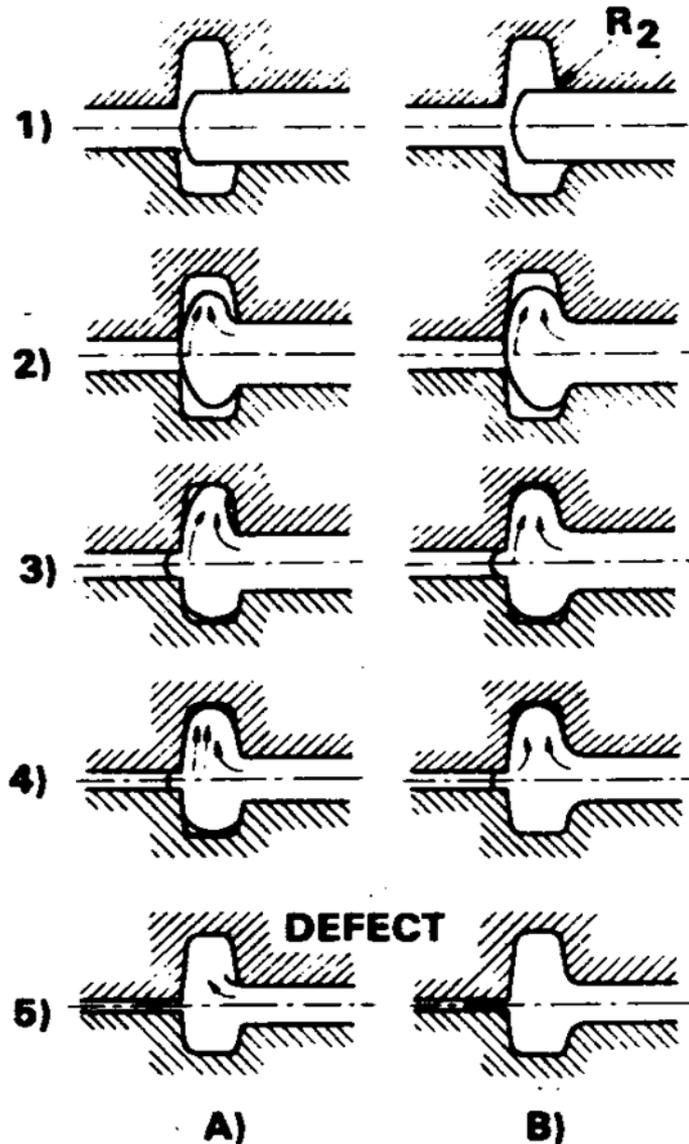
c PART WITH HIGHER RIB



d PART WITH HIGHER RIB  
AND THINNER WEB

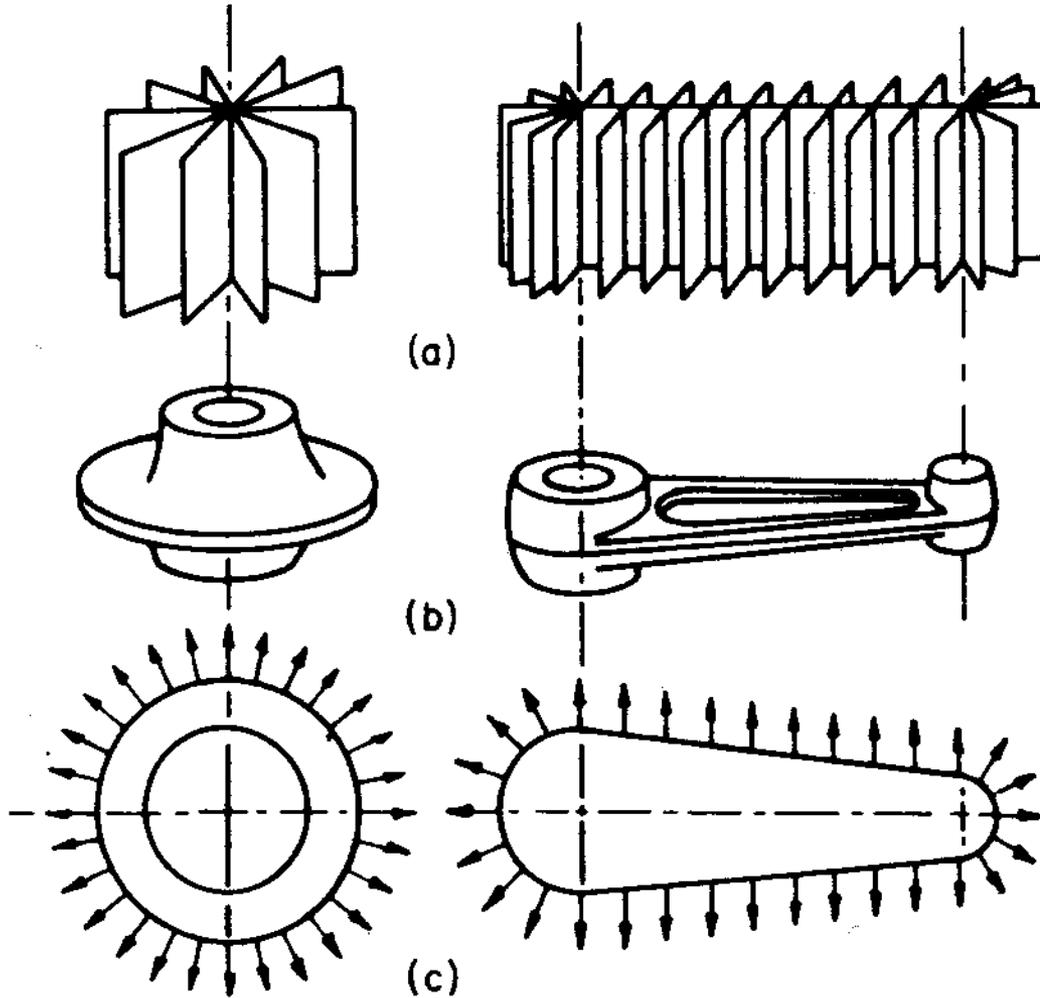
FORGING DIFFICULTY INCREASES FROM a TO d

# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO



**Defeitos devido  
ao fluxo de  
material**

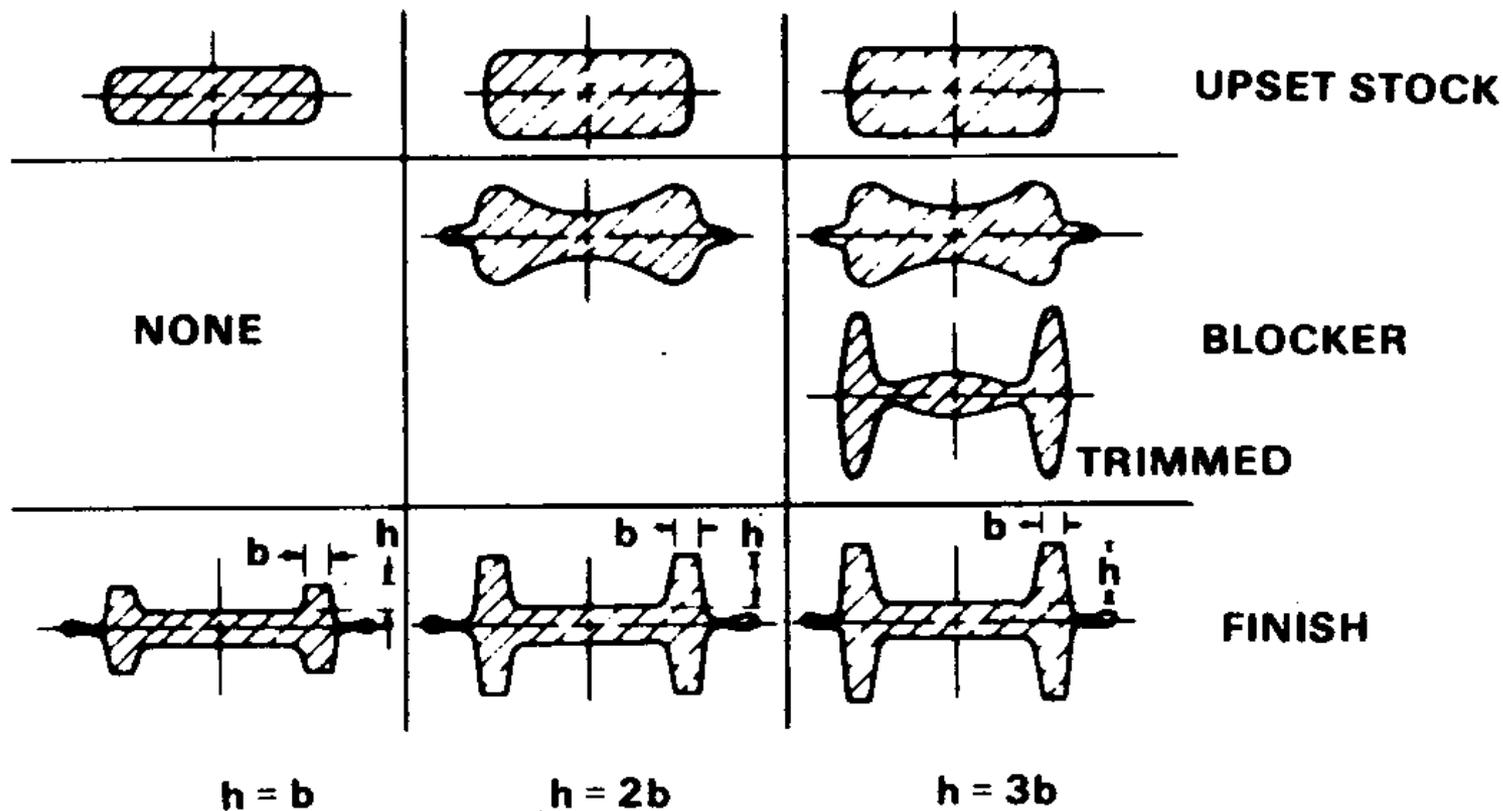
# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO



**Planejamento  
adequado do fluxo  
de material**

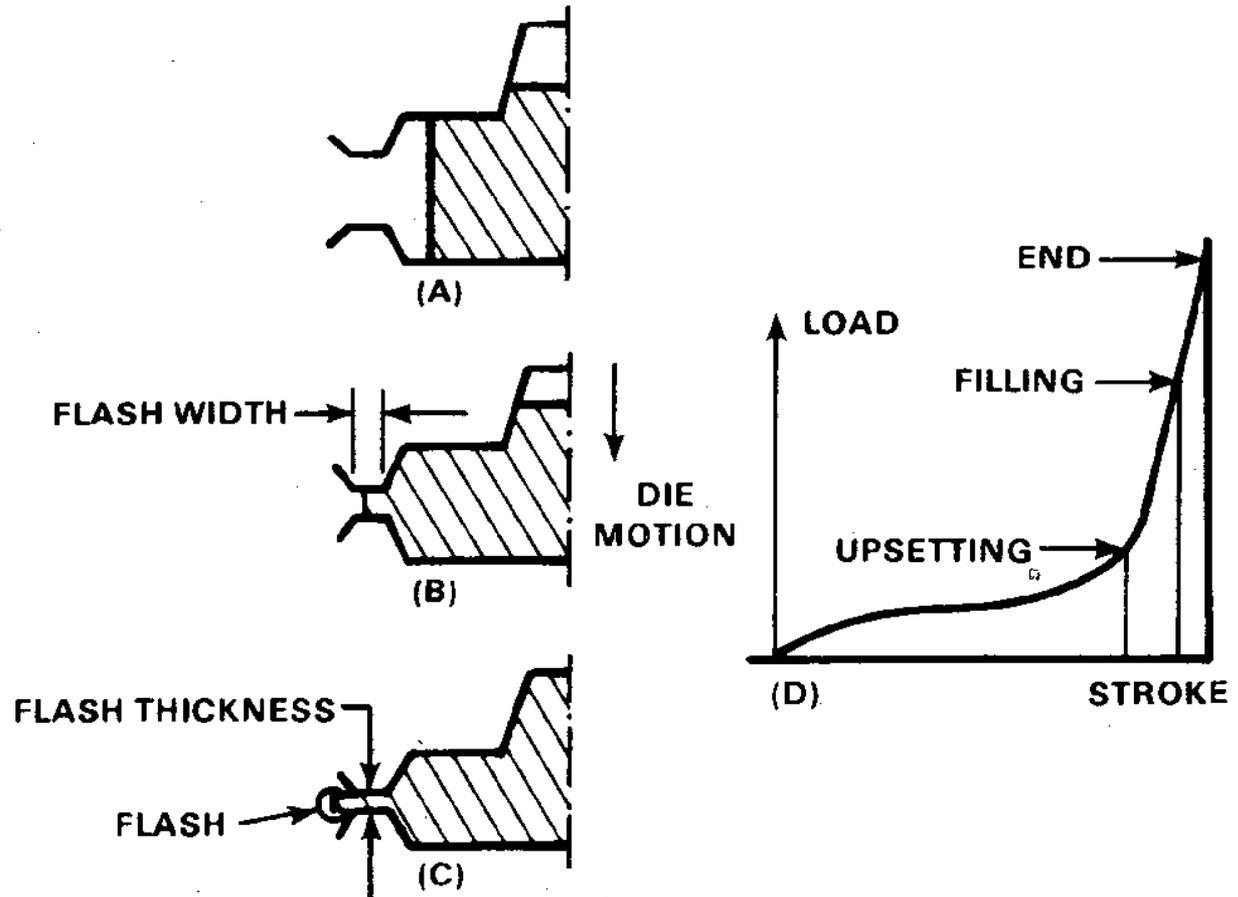
# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO

## Projeto da pré-forma



# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO

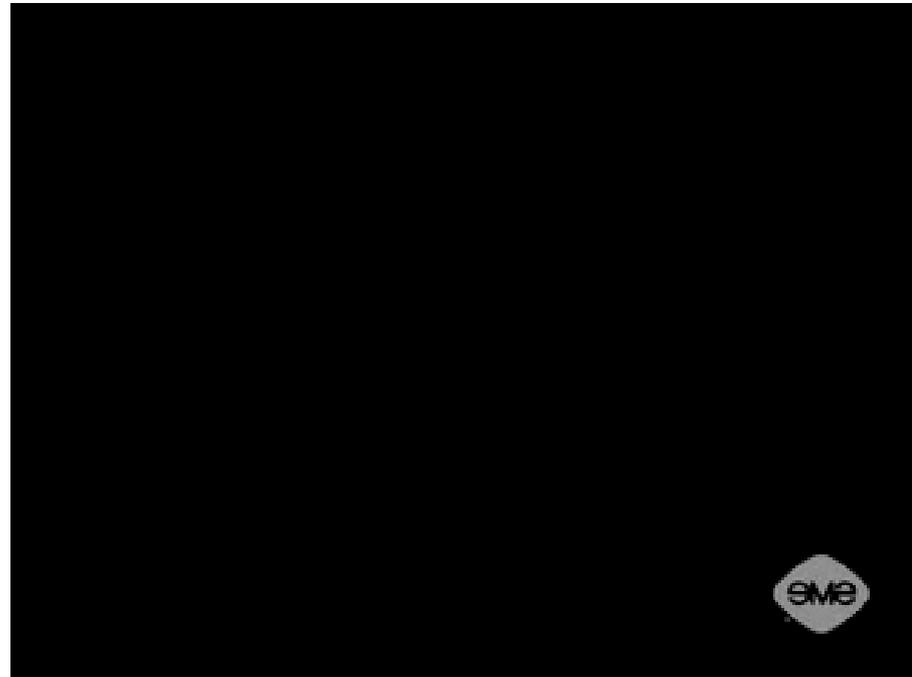
Relação entre o  
fluxo de material  
e a carga na  
máquina



# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO

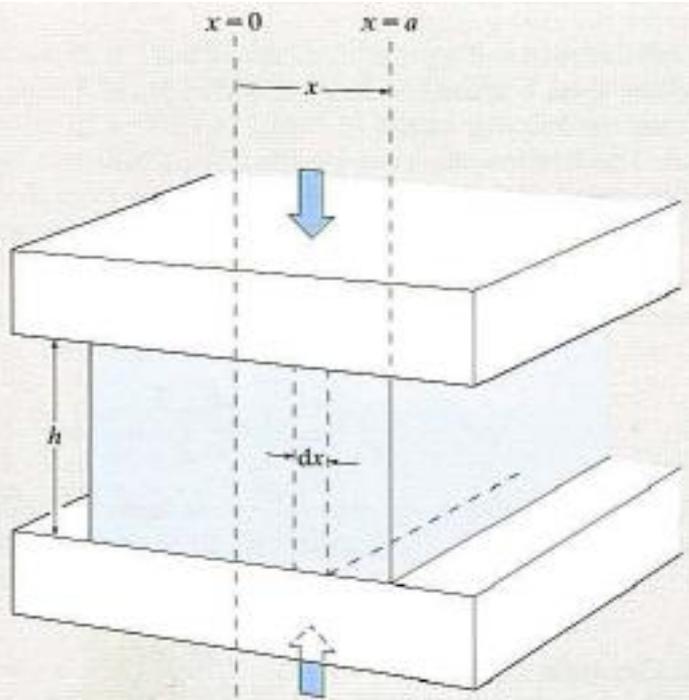
---

## Conformação de metais – Recalque Matriz Aberta



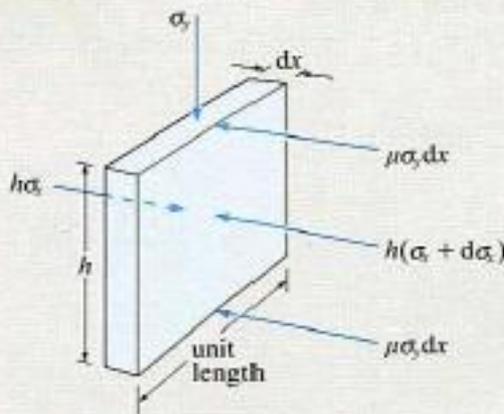
# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO

## Recalque plano



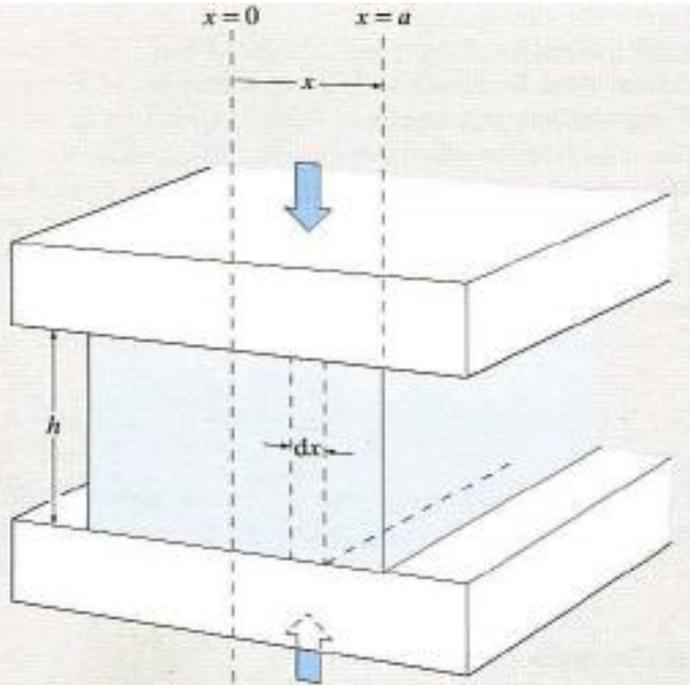
Deformação plana, material rígido plástico

A carga de forjamento é dada pela integração da tensão na direção  $y$  necessária para deformar a peça de largura  $2a$  na altura inicial  $h$



Quando reduzida a altura, a peça se expande proporcionalmente mantendo o volume original

# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO

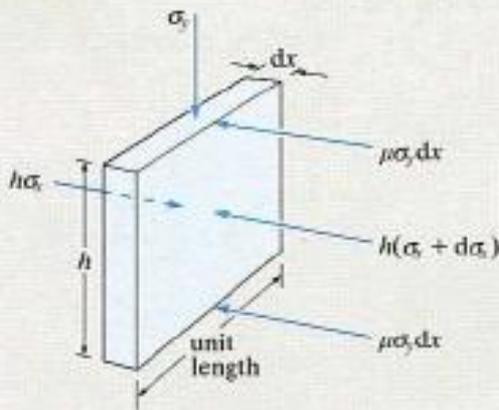


Considere a força agindo no elemento vertical de comprimento unitário e espessura  $dx$ . O elemento está a uma distância  $x$  da linha central, a qual não desliza. A força vertical é:

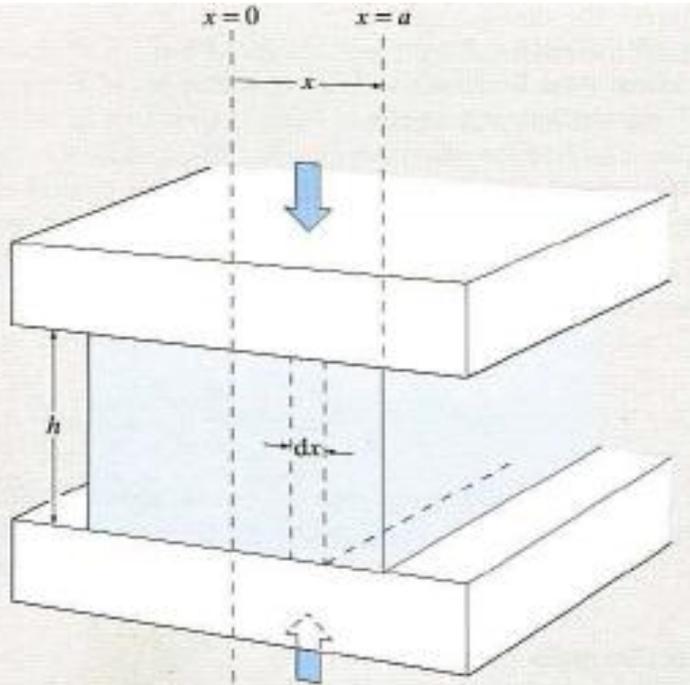
$$\text{Tensão} \times \text{área} = \sigma_y \cdot d_x \cdot 1$$

Se o coeficiente de atrito é  $\mu$  a força de atrito (horizontal) será  $\mu\sigma_y d_x \cdot 1$

A força total agindo nos dois lados será então  $2\mu\sigma_y d_x$ .



# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO



O balanço de forças na horizontal resulta:

$$h \cdot 1 \cdot (\sigma_x + d\sigma_x) + 2\mu\sigma_y dx \cdot 1 = h \cdot 1 \cdot \sigma_x$$

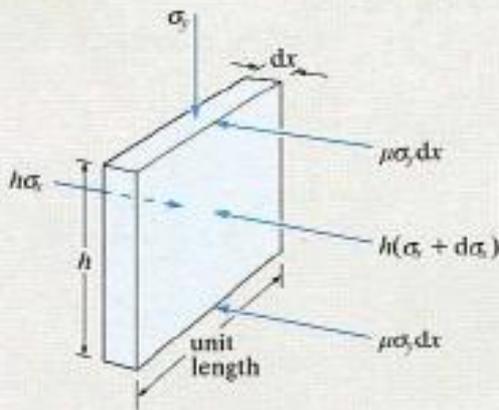
Rearranjando:

$$2\mu\sigma_y dx = -hd\sigma_x$$

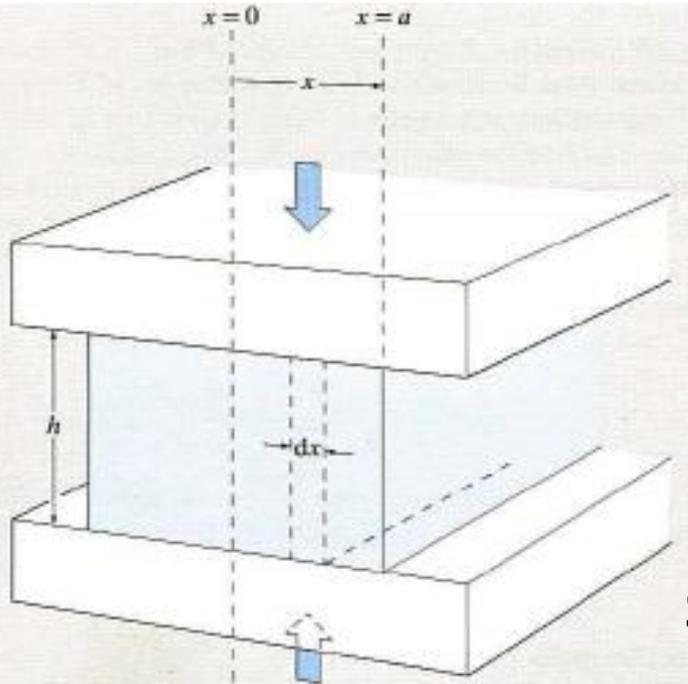
mas  $\mu\sigma_y = \tau$

Portanto:  $d\sigma_x = -2\tau dx/h$

Integrando  $\sigma_x = -\frac{2\tau}{h}x + C$  (I)



# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO



Usando o critério de escoamento de VonMises para deformação plana:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_y - \sigma_x = \left| 2\bar{\sigma} / \sqrt{3} \right|$$

Ou seja: 
$$\sigma_y = \sigma_x + \left| \frac{2\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \right|$$

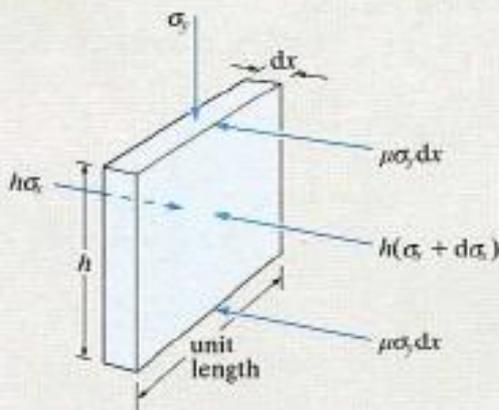
Substituindo (I): 
$$\sigma_y = -\frac{2\tau}{h}x + C + \left| \frac{2}{\sqrt{3}}\bar{\sigma} \right|$$

Na borda:

$$x = l/2 \quad \sigma_x = 0 \quad \sigma_y = 0 + \left| \frac{2\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \right|$$

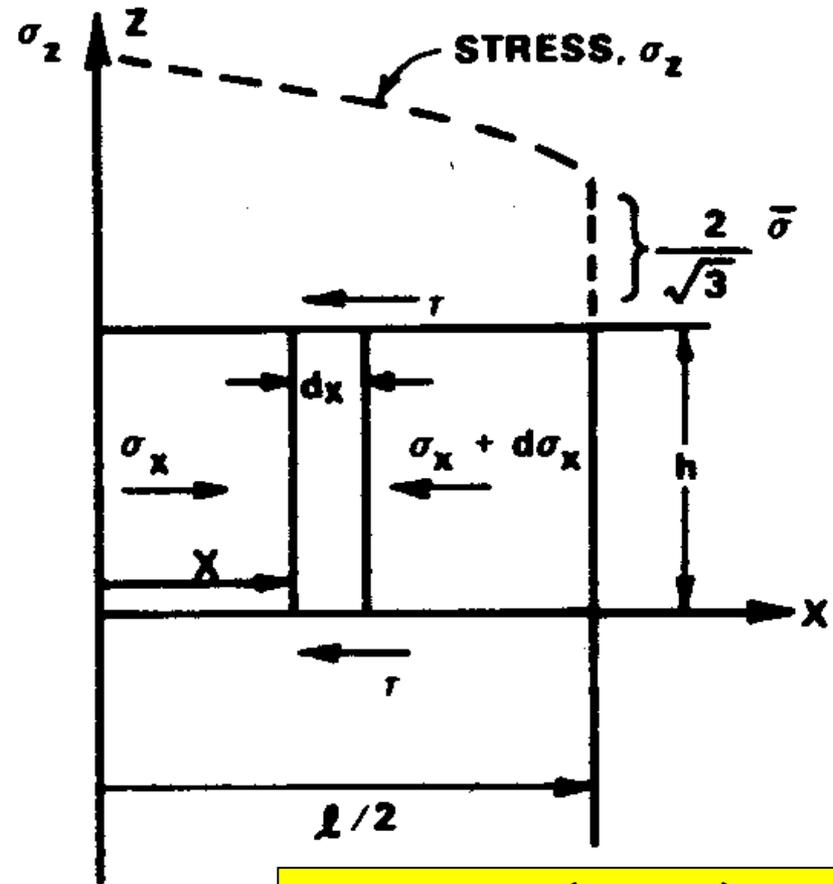
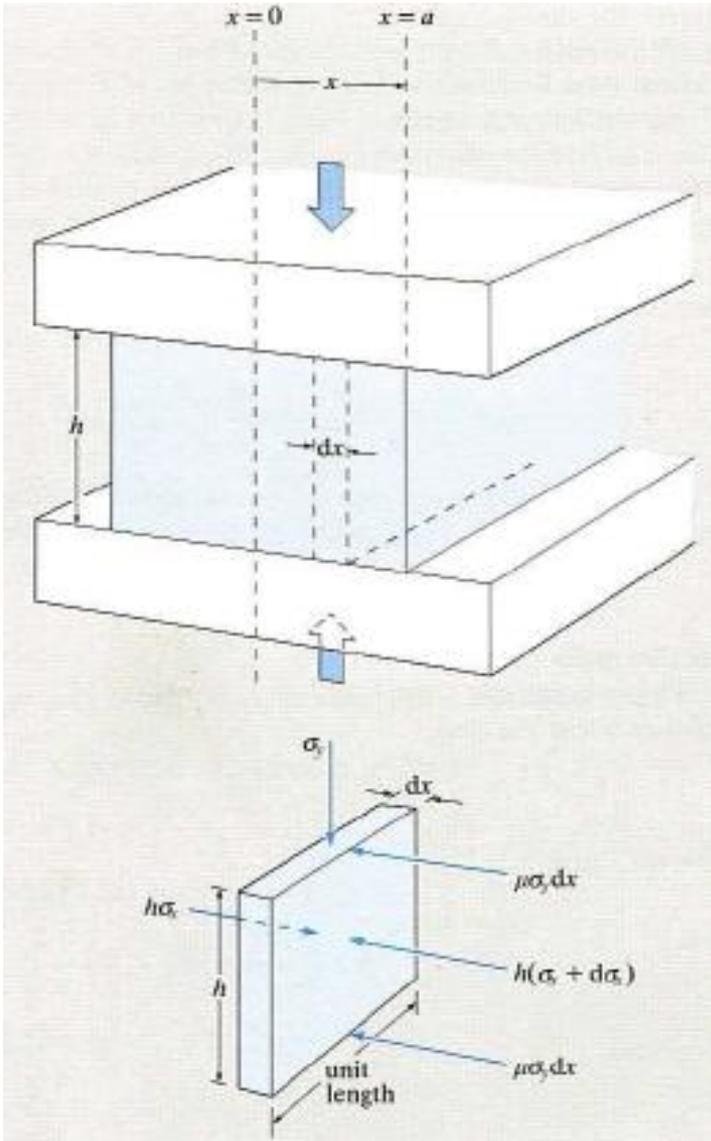
Assim:

$$\sigma_y = -\frac{2\tau}{h} \left( \frac{l}{2} - x \right) - \frac{2}{\sqrt{3}}\bar{\sigma}$$



# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO

A forma da tensão na direção vertical será:



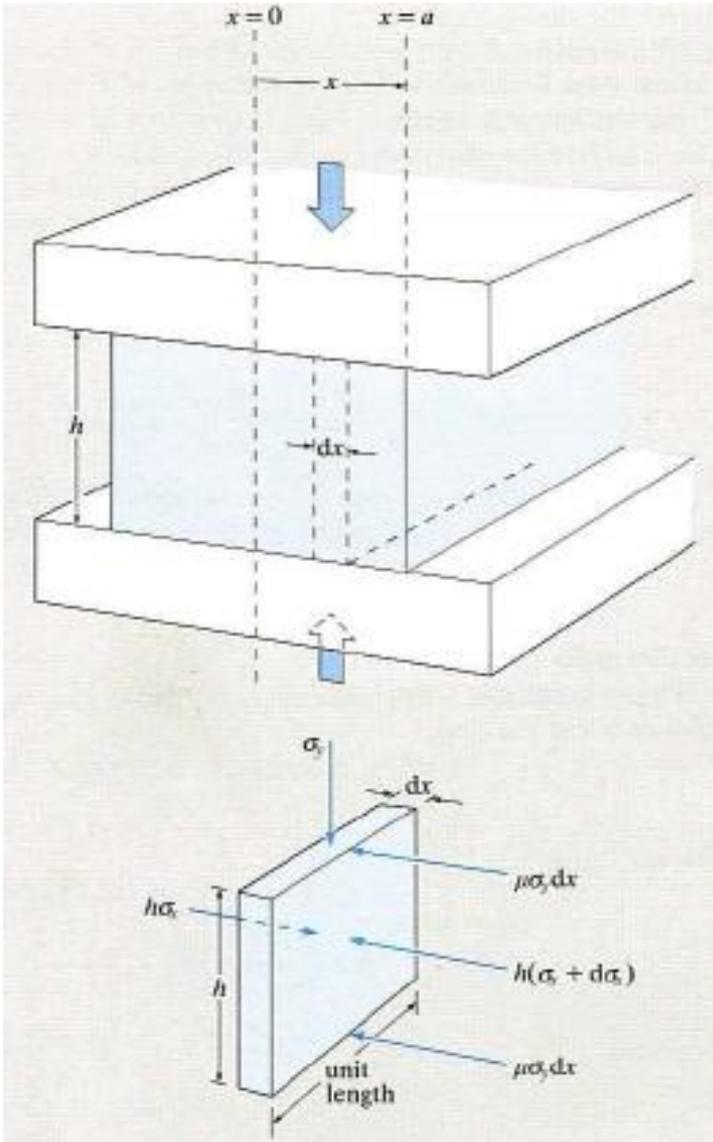
$$\sigma_y = -\frac{2\tau}{h} \left( \frac{l}{2} - x \right) - \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma}$$

# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO

A carga de recalque será:

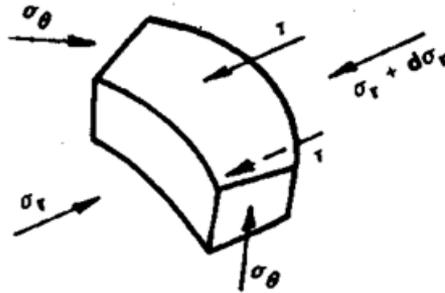
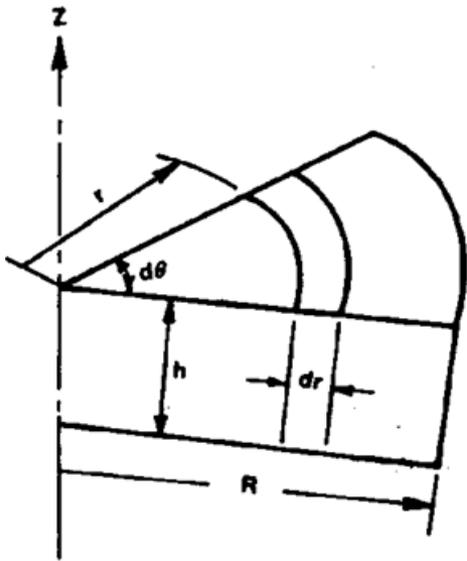
$$L = \int_{-l/2}^{l/2} \sigma_y dx$$

$$L = \frac{2\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \left( 1 + \frac{m\ell}{4h} \right) \ell$$



# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO

## Recalque axissimétrico



$$\Sigma F_r = \sigma_r (d\theta) r h - (\sigma_r + d\sigma_r) (r + dr) h d\theta + 2\sigma_\theta \operatorname{sen} \frac{d\theta}{2} h dr - 2\tau d\theta dr = 0$$

$$\sigma_r = -\frac{2\tau}{h} r + C$$

$$\sigma_z = \frac{2\tau}{h} (r - R) - \bar{\sigma}$$

$$L = \bar{\sigma} \pi R^2 \left( 1 + \frac{2}{3\sqrt{3}} m \frac{R}{h} \right)$$

# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO

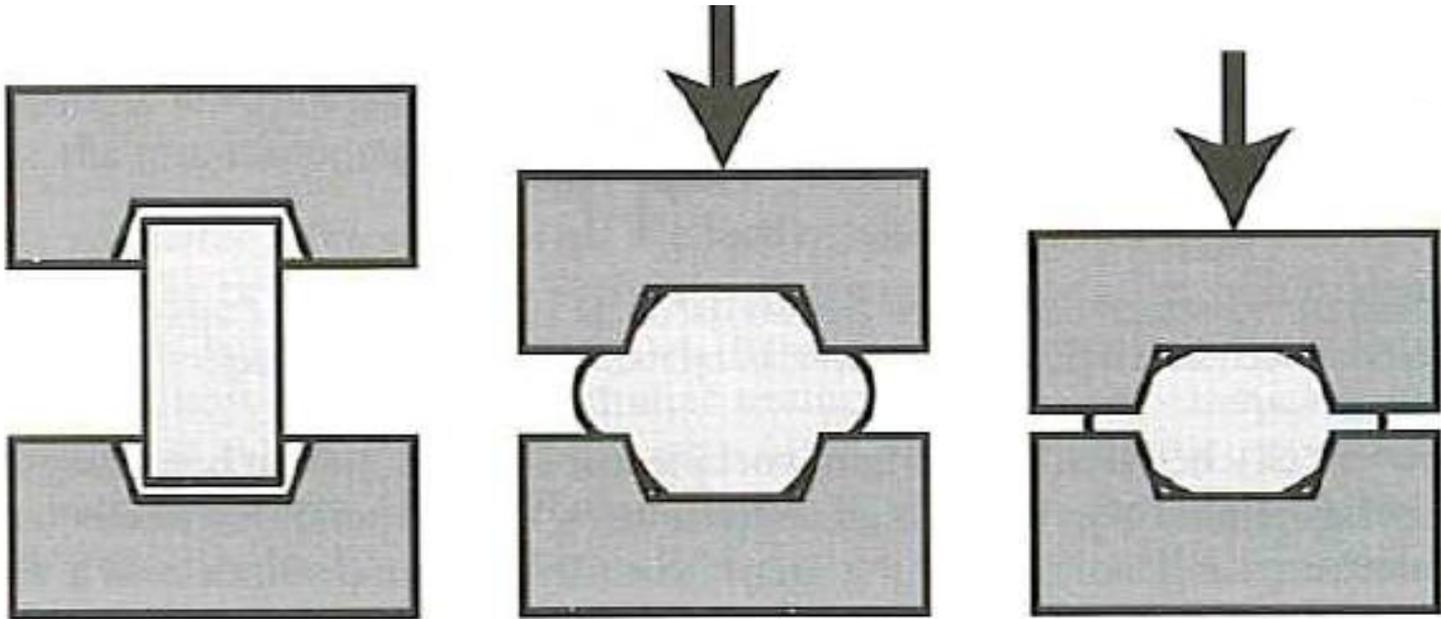
---

## Forjamento em matriz fechada



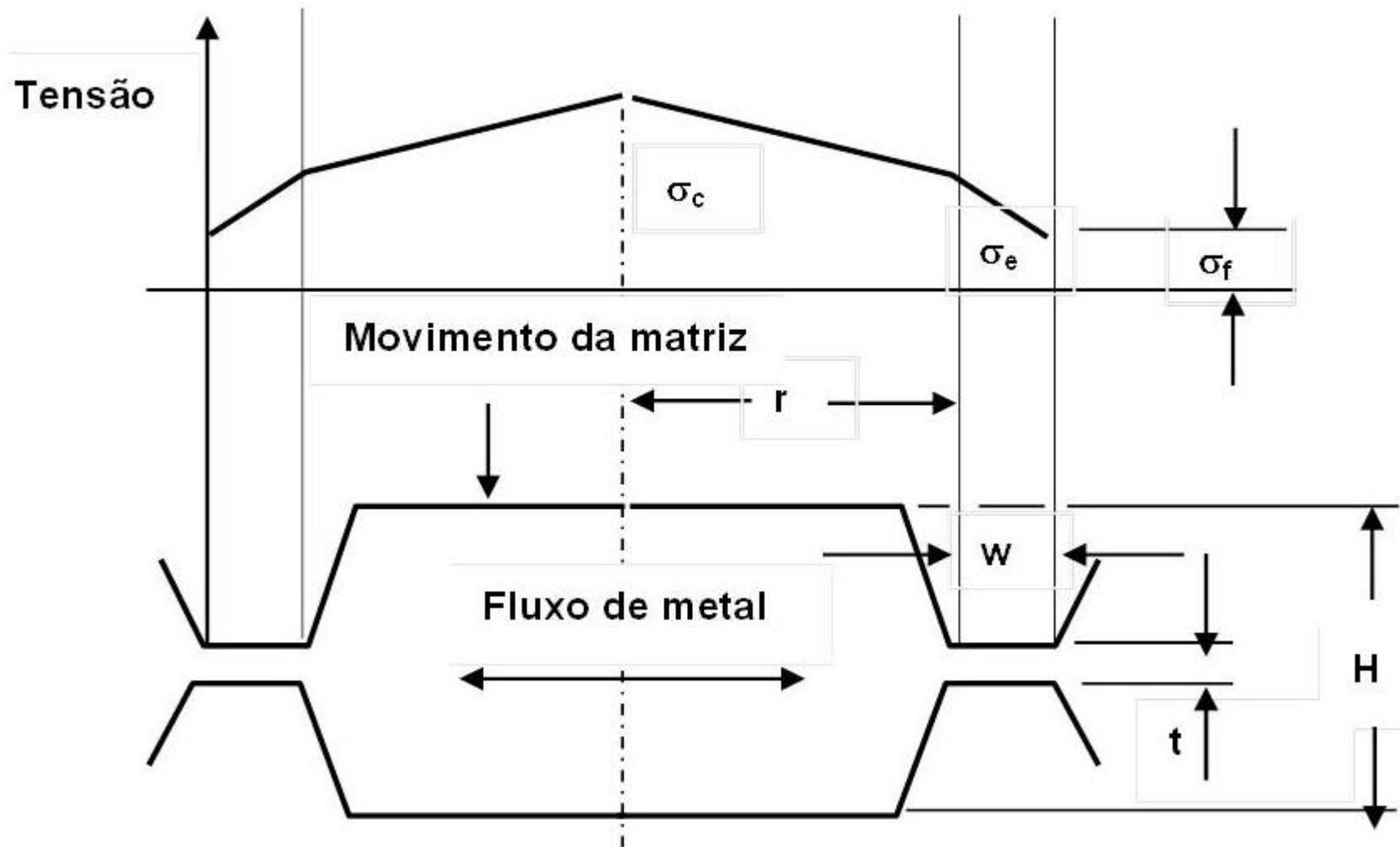
# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO

## Forjamento em matriz fechada



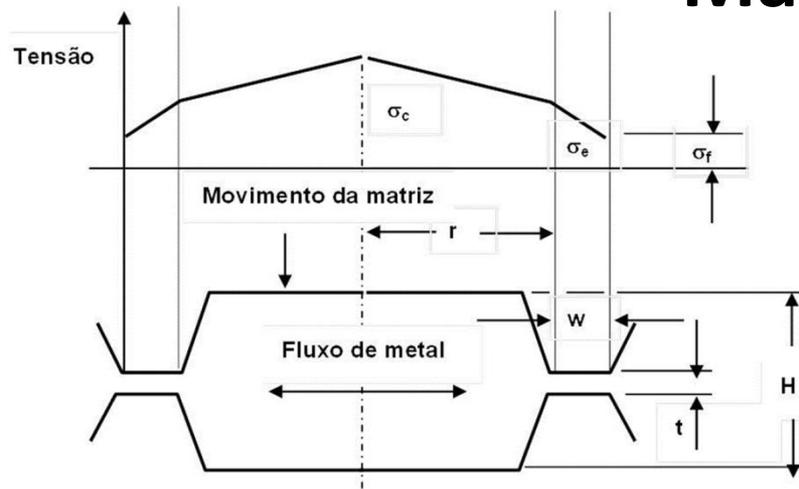
# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO

## Carga para o forjamento em matriz fechada



# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO

## Matriz fechada caso axissimétrico



$$\sigma_{ea} = \left( \frac{2}{\sqrt{3}} m \frac{w}{t} + 1 \right) \sigma_f$$

Sendo  $\sigma_{ea}$  a tensão de escoamento do material  
 $\sigma_{ea}$  a tensão de escoamento da rebarba (*flash*)

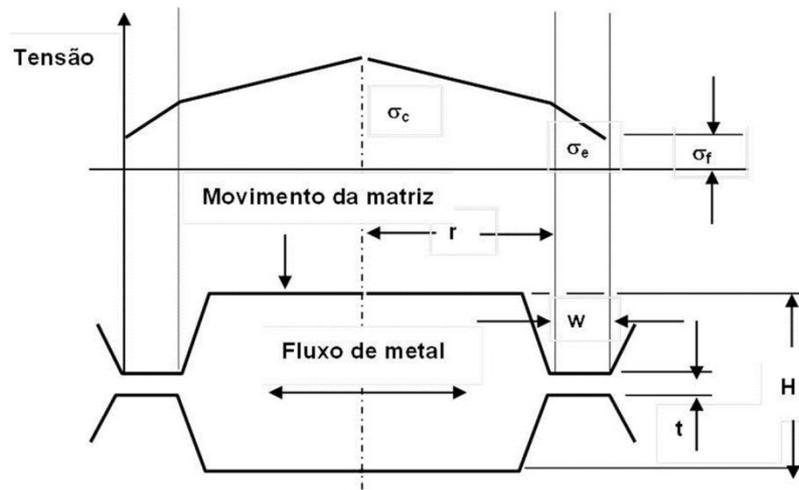
$$P_{fa} = 2\pi\sigma_f \left[ -\frac{2}{3} \frac{m}{\sqrt{3}} \frac{1}{t} (R^3 - r^3) + \left( 1 + 2 \frac{m}{\sqrt{3}} \frac{R}{t} \right) \left( \frac{R^2 - r^2}{2} \right) \right] \quad R = r + w$$

$$P_{ca} = 2\pi r^2 \left( \frac{m}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_c}{3} \frac{r}{H} + \frac{\sigma_{ea}}{2} \right)$$

$$P_{ta} = P_{fa} + P_{ca}$$

# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO

## Matriz fechada caso plano



$$\sigma_{ep} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_f \left( 1 + m \frac{w}{t} \right)$$

$$P_{fp} = \frac{2}{\sqrt{3}} w \sigma_f \left( 2 + \frac{mw}{t} \right)$$

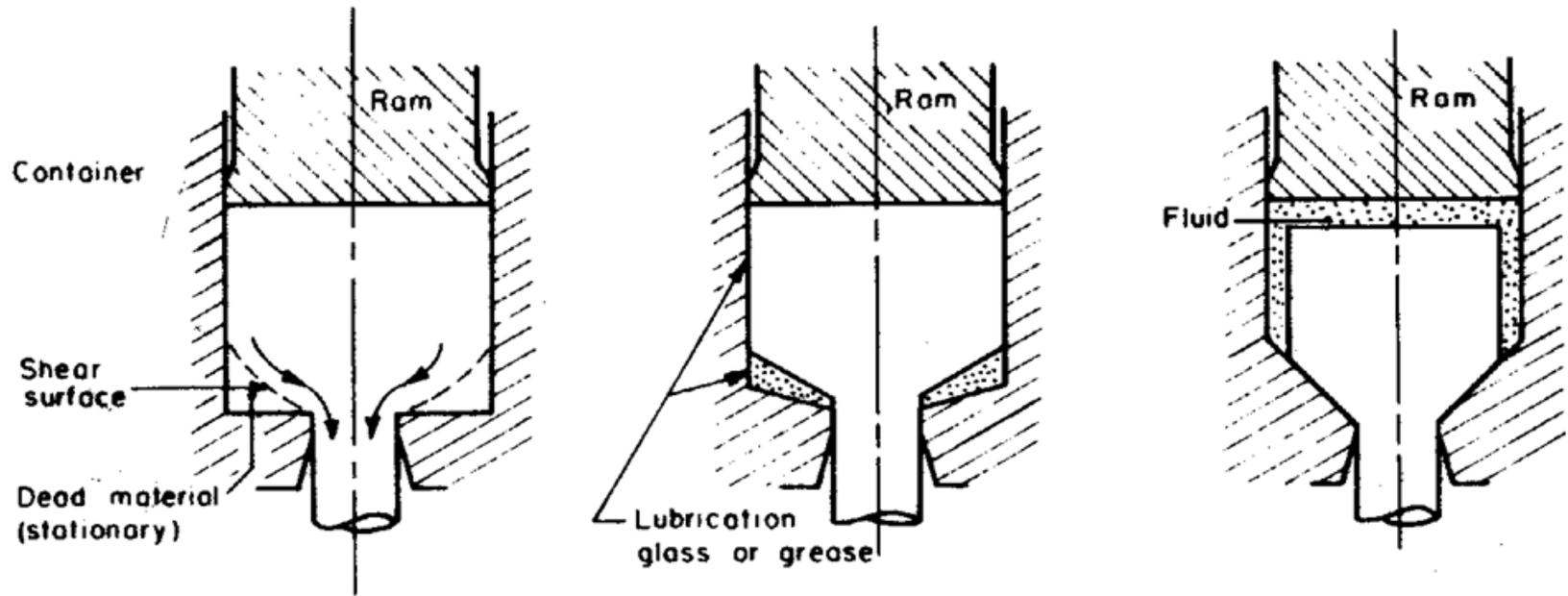
$$P_{cp} = \left( \sigma_{ep} + \frac{L}{2H} \frac{m}{\sqrt{3}} \sigma_c \right) L$$

$$L = 2r$$

$$P_{tp} = P_{fp} + P_{cp}$$

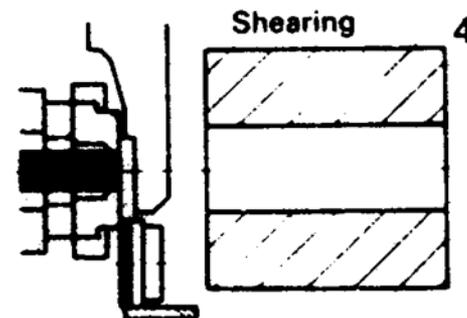
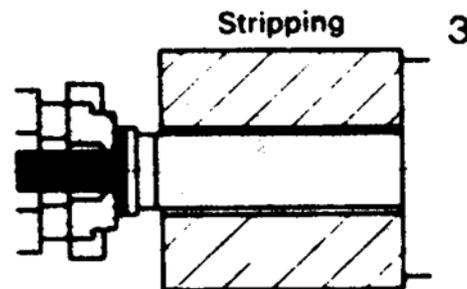
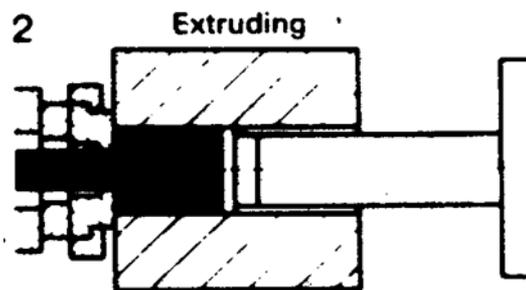
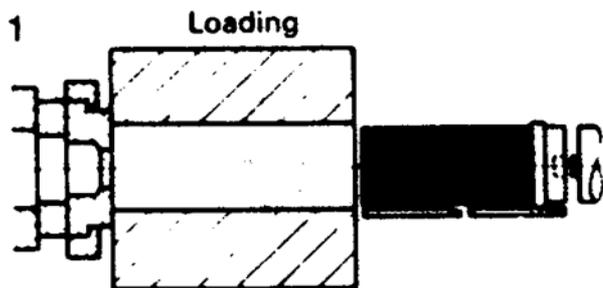
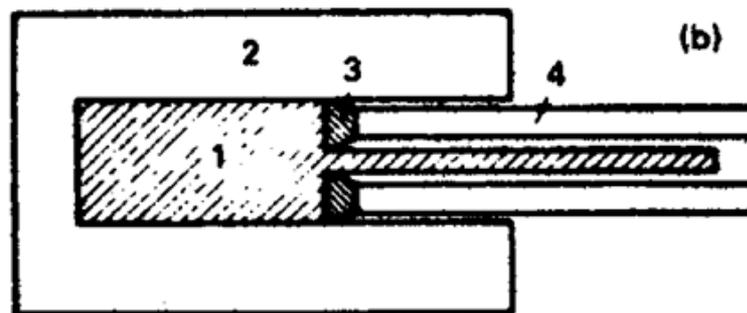
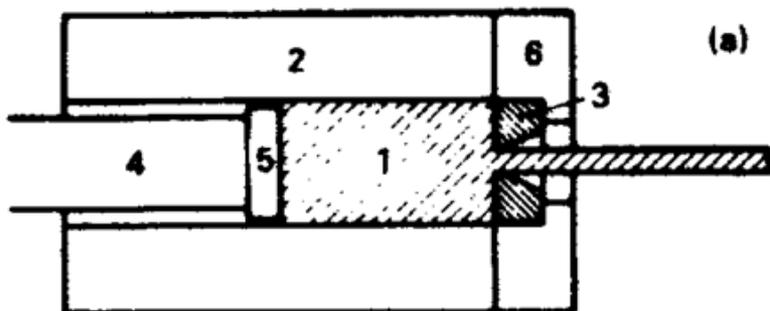
# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO

## Processo de extrusão



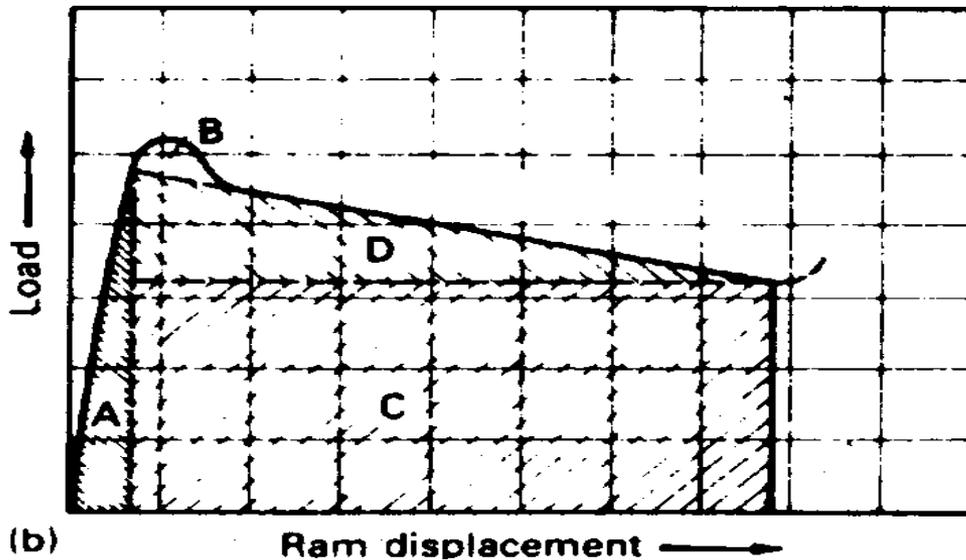
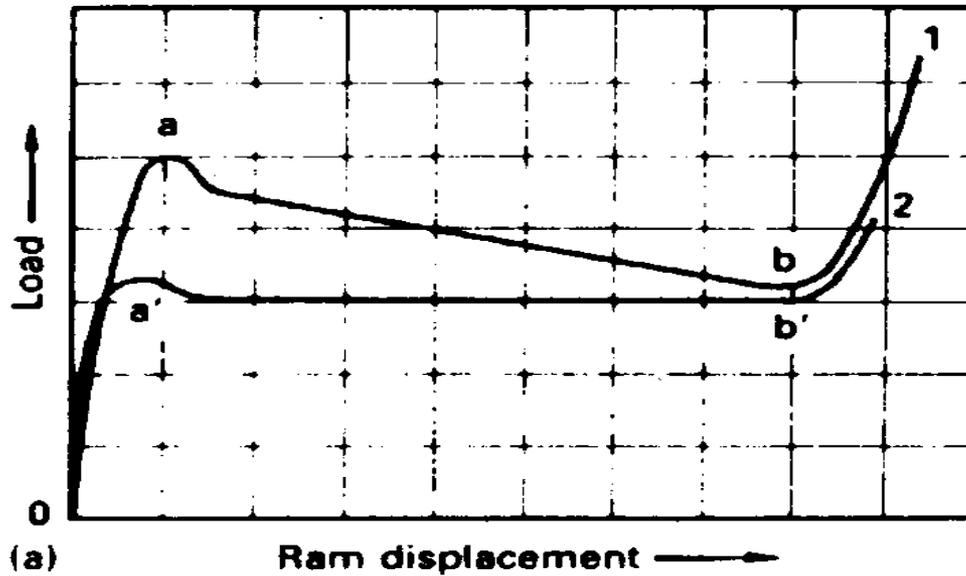
# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO

## Extrusão direta e retroextrusão



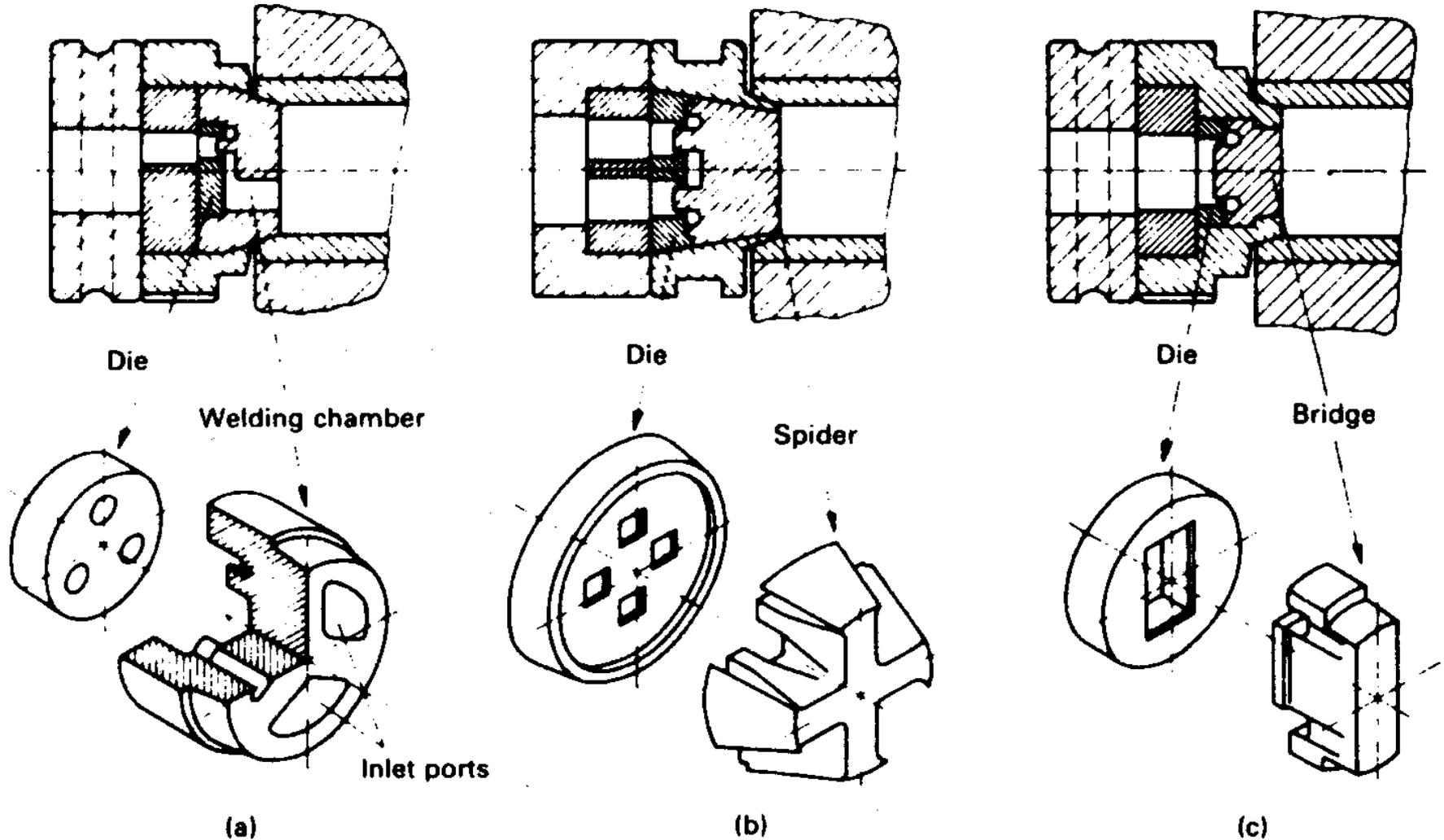
# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO

Carga no processo de extrusão



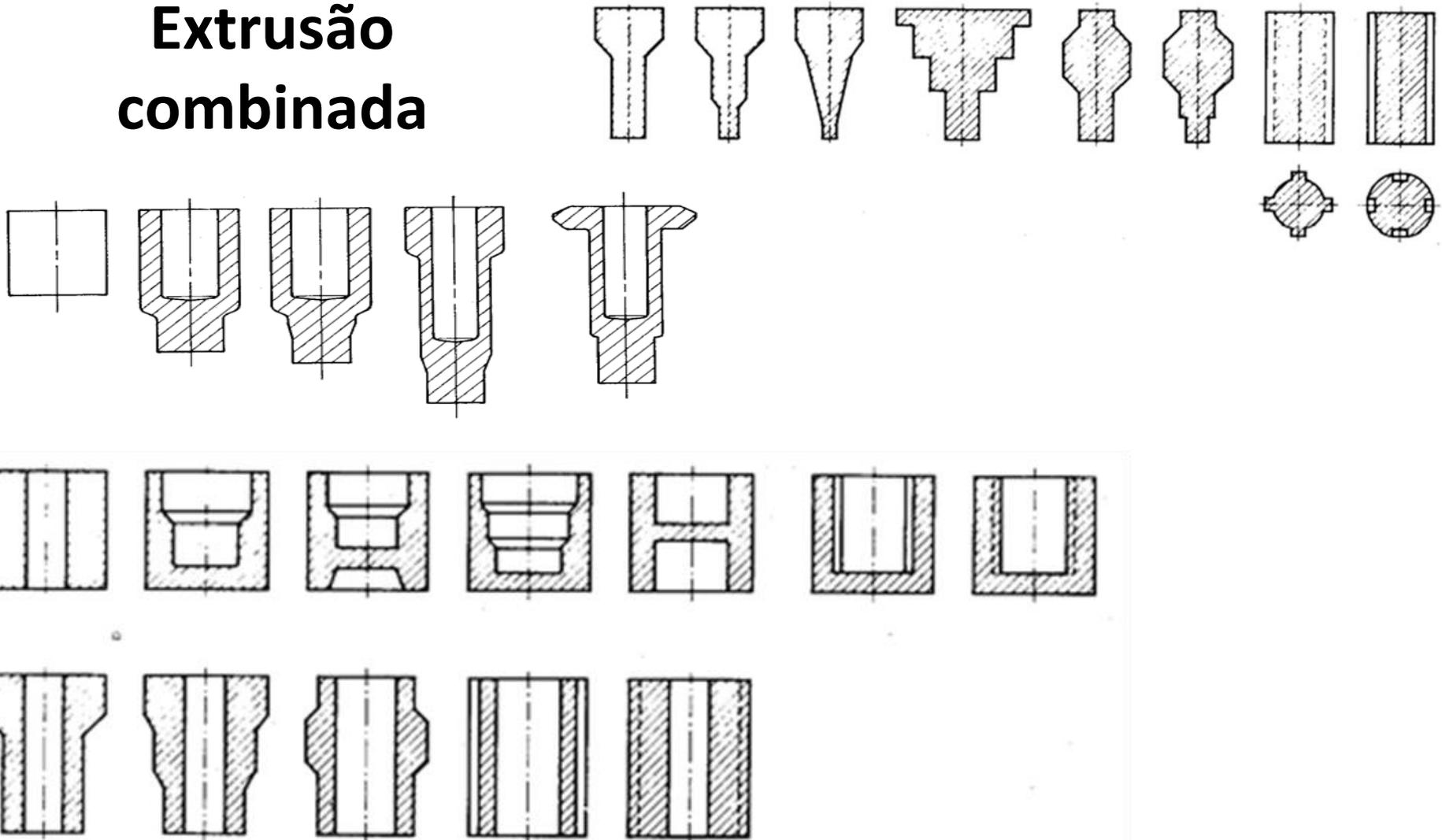
# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO

## Extrusão de perfis diversos



# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO

**Extrusão  
combinada**



# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO

## Carga de extrusão

$$P = P_{fd} + P_{fc} + P_{dh} + P_{ds}$$

Sendo:

$P_{fd}$  : a carga necessária para superar o atrito na superfície da matriz (na extrusão direta) ou na interface entre matriz e punção (na reto-extrusão),

$P_{fc}$  : a carga necessária para superar o atrito na câmara na extrusão direta ( $P_{fc} = 0$  na retro-extrusão),

$P_{dh}$  : a carga necessária para deformação homogênea, e

$P_{ds}$  : a carga necessária para cisalhamento interno devido à deformação heterogênea

# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO

## Carga de extrusão fórmulas empíricas

Fonte	Fórmula	Comentários
Siebel <sup>(13-13)</sup> Também Feldman <sup>(13-1)</sup>	$P = A_0 \bar{\sigma}_a \ln R + \frac{2}{3} \alpha A_0 \bar{\sigma}_a$ $+ \frac{A_0 \bar{\sigma}_a \ln R \mu}{\cos \alpha \sin \alpha} + \pi DL \bar{\sigma}_0 \mu$	<i>P</i> inclui cargas devido à deformação homogênea, cisalhamento, fricção na matriz e na câmara da matriz
P.E.R.A. <sup>(13-12)</sup>	$P = A_0 \bar{\sigma}_0 (3.45 \ln R + 1.15)$	Para aços carbono 0.1-0.3% C
Billigmann <sup>(13-3)</sup>	$P = \bar{\sigma}_a A_0 (\ln R + 0.6)$ $\left( 1.25 + 2\mu \sqrt{\frac{\pi L}{A_0}} \right)$	
Pugh et al <sup>(13-14)</sup>	$P = 8.2 A_0 \sigma_u^{0.78} (\ln R)^{0.73}$ $= 2.7 A_0 H^{0.78} (\ln R)^{0.73}$	Originalmente derivada para aços com fosfato de zinco +MoS <sub>2</sub> <i>H</i> = Dureza do tarugo antes da extrusão, kg/mm <sup>2</sup> . $\sigma_u$ em ton/in <sup>2</sup> , 1 ton = 2240lb, <i>P</i> em tons
James-Kottcamp <sup>(13-15)</sup>	$P = 0.5 A_0 (\bar{\sigma}_0 + \sigma_u F_n) \bar{\epsilon}_a$ $\exp \frac{4\mu L}{D}$ $F_n = \left( \frac{e \bar{\epsilon}_a}{n} \right)^n$ $\bar{\epsilon}_a = 1.24 \ln R + 0.53$	Baseado na deformação média, $\epsilon_a$ , determinada em modelos de teste com chumbo e $\alpha = 27^\circ$  <i>e</i> = 2.71828

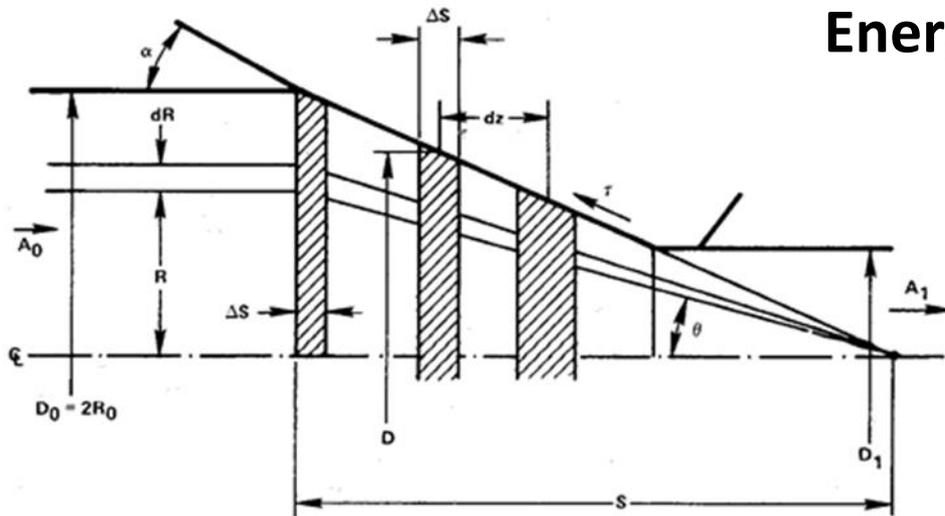
# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO

## Carga de retro-extrusão fórmulas empíricas

Fonte	Fórmula	Comentários
P.E.R.A. <sup>(13-12)</sup>	$P = A_0 \sigma_0 (3.45 \ln \frac{A_0}{A} + 1.15)$	Para aços carbonos 0.1-0.3%C
Pugh et al <sup>(13-14)</sup>	$P = A_0 6.0 \sigma_u^{0.8} (\ln R)^{0.72}$ $= A_0 2.8 H^{0.72} (\ln R)^{0.72}$	Para aços com fosfato de zinco +Bonderlube 235 $H$ = Dureza do tarugo antes da extrusão, kg/mm <sup>2</sup> . $\sigma_u$ em ton/in <sup>2</sup> , 1 ton = 2240lb, P em tons
James-Kottcamp <sup>(13-15)</sup>	$P = A_0 \left( \frac{\bar{\sigma}_0 + \sigma_u F_n}{2.4} \right) \bar{\epsilon}_a$ $F_n = \left( \frac{e \bar{\epsilon}_a}{n} \right)^n$ $\bar{\epsilon}_a = 2.36 \ln R + 0.28$	Baseado na deformação média, $\epsilon_a$ , determinada em modelos de teste com chumbo e $\alpha = 27^\circ$
Schoffmann <sup>(13-16)</sup>	$P = A_0 K_c \sigma_u \ln \frac{A_0}{A}$	$e = 2.71828$ $K_c = 2.5 \sim 3.0$ para aço de baixo carbono, mas usado $K_c = 3.0$

# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO

## Trefilação de barras e arames



Energia de deformação homogênea

$$E_{dh} = V \bar{\sigma}_a \ln(A_0/A_1)$$

$$\bar{\sigma}_a = (\bar{\sigma}_\theta + \bar{\sigma}_a)/2$$

Energia de atrito

$$E_f = V \tau_f \ln\left(\frac{A_0}{A_1}\right) \frac{1}{\cos \alpha \sin \alpha}$$

Energia de deformação por cisalhamento

$$E_s = \frac{2}{3} V \alpha \left( \frac{2\bar{\sigma}_a}{\sqrt{3}} \right)$$

Tensão total de trefilação

$$\sigma_D = (E_{dh} + E_f + E_s)/V$$

# PROCESSOS PRIMÁRIOS DE CONFORMAÇÃO

## Ângulo ótimo da fieira

