

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
PMT-2521 – Conformação Mecânica dos Materiais Metálicos

Forjamento em matriz fechada

Definição

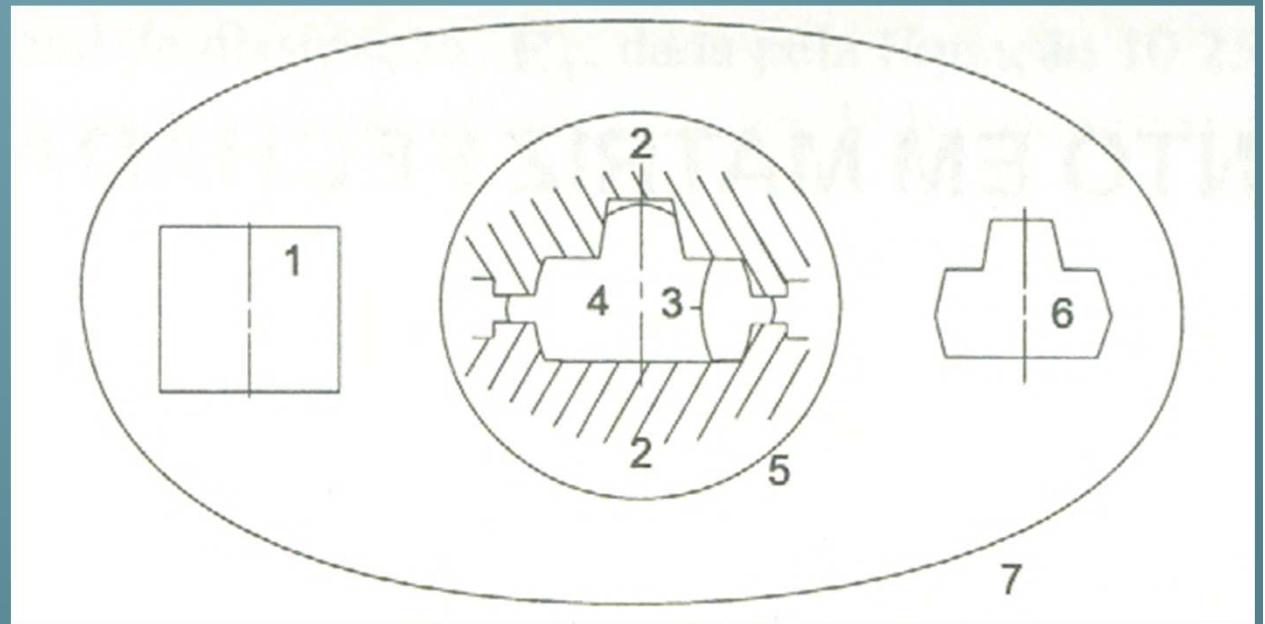
- Processo pelo qual um bloco ou tarugo de metal é pressionado entre duas matrizes, sendo conformado de acordo com a gravura da matriz
- As áreas da matriz em volta da gravura entram em contato durante a conformação, de forma que não há formação de rebarbas para fora da matriz

Características

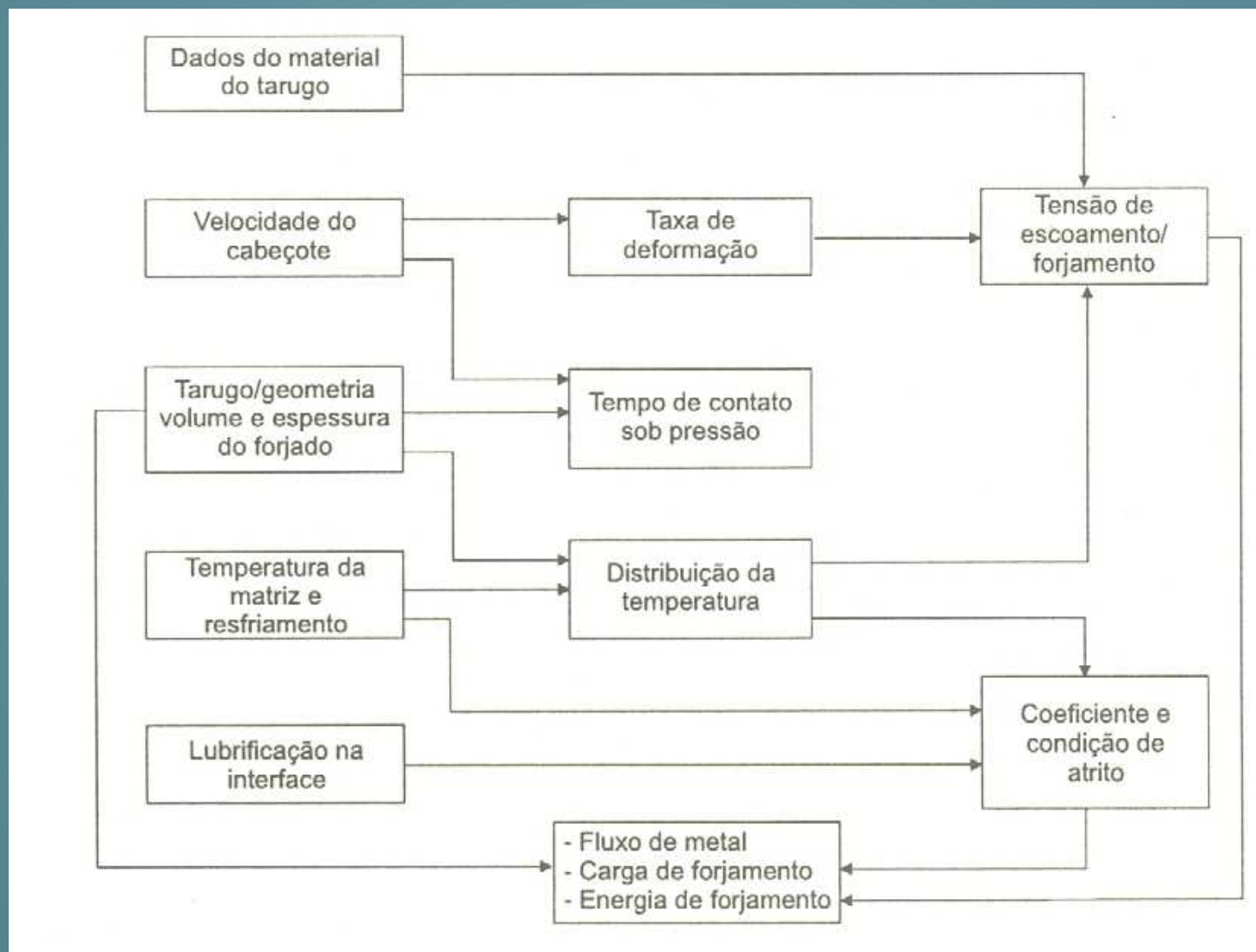
- Processo capaz de produzir componentes de alta qualidade a um custo moderado
- Boa taxa resistência/peso
- Mais de 50% dos produtos forjados são usados na indústria automobilística

Aspectos fundamentais

1. Tarugo
2. Ferramenta
3. Interface matriz/metal
4. Zona de deformação
5. Equipamento
6. Produto
7. Ambiente



Interação das variáveis de processo



Aspectos fundamentais

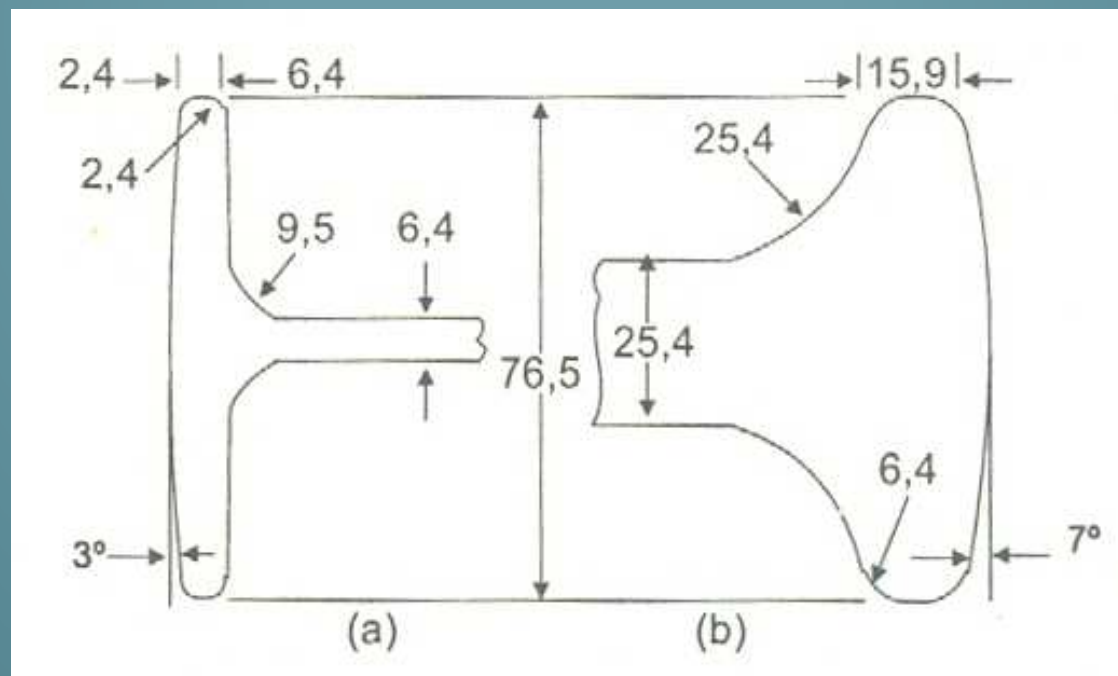
- Material deve ter:
 - Resistência (limite de escoamento) baixa o bastante para que a carga na matriz seja abaixo do seu limite de escoamento
 - Capacidade de se deformar sem romper suficiente para sofrer a quantidade de deformação necessária
- Por convenção, o forjamento em matriz fechada é considerado operação a quente

Aspectos fundamentais

- Material influencia o projeto do forjamento e os detalhes do processo

a) Al

b) Ni



Aspectos fundamentais

Metal ou liga	Faixa aproximada de temperatura de forjamento, °C
Ligas de alumínio (menos difícil)	400-550
Ligas de magnésio	250-350
Ligas de cobre	600-900
Aços carbono e de baixa liga	850-1150
Aços inoxidáveis martensíticos	1100-1250
Aços "Maraging"	1100-1125
Aços inoxidáveis austeníticos	1100-1125
Ligas de níquel	1000-1150
Aços inoxidáveis semi-austeníticos PH	1100-1250
Ligas de titânio	700-950
Superligas a base de ferro	1050-1180
Superligas a base de cobalto	1180-1250
Ligas de nióbio	950-1150
Ligas de tântalo	1050-1350
Ligas de molibdênio	1150-1350
Superligas a base de níquel	1050-1200
Ligas de tungstênio (mais difíceis)	1200-1300

Aspectos fundamentais

- Temperatura de trabalho na peça é usualmente maior do que a temperatura de trabalho da matriz
- Fluxo de material e preenchimento da matriz dependem de:
 - Tensão de escoamento e forjabilidade
 - Atrito e efeitos de resfriamento na interface metal-matriz
 - Complexidade da forma a ser forjada

Aspectos fundamentais

- Tensão de escoamento e forjabilidade dependem de:
 - Características metalúrgicas do material do tarugo
 - Temperaturas, deformações e taxas de deformação no material sendo deformado

Forjabilidade

Aumento da resistência ao escoamento →

	Baixo	Médio	Alto	
Diminuindo forjabilidade ↓	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) Ti-13V-11Cr-3Al Ni55 (Liga Ni-Cr-Co)	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)

Forjabilidade

- Conceito vago que indica combinação de limite de escoamento com capacidade de se deformar sem romper (alongamento). Pode ser vagamente vinculada à razão elástica do material
- Capacidade do material de se deformar sem ruptura independente das condições de carga
- Em geral, aumenta com a temperatura, mas pode ser prejudicada por aumento do tamanho de grão

Forjabilidade

- Em algumas ligas, é fortemente influenciada pelas características das segundas fases
- Estado de tensões também influencia significativamente:
 - Recalque em grande redução, que causa embarrilamento da parte externa do tarugo
- Deve-se prover suporte compressivo a regiões em que possam se desenvolver tensões de tração

Forjabilidade

- Pode ser estimada por meio de testes mecânicos como tração, torção e compressão
- A deformação atingida antes da ruptura é indicativa da forjabilidade nas condições de temperatura e velocidades de deformação usadas no teste.

Lubrificação

- Além dos efeitos de lubrificação, efeitos térmicos devem ser considerados
- Condições de atrito válidas para uma dada condição podem não ser válidas para outras
 - Valores obtidos em prensas hidráulicas podem não ser válidos em prensas mecânicas ou martelos
- Esse dado não é sempre considerado na literatura

Lubrificação

- Papel do lubrificante
 - Reduzir o atrito de deslizamento entre a matriz e o material – deve-se notar, porém, que o preenchimento da cavidade é feito pelo atrito na região de rebarba
 - Evitar soldagem localizada
 - Isolar termicamente o material da matriz para diminuir as perdas de calor entre eles
 - Recobrir uniformemente toda a superfície

Lubrificação

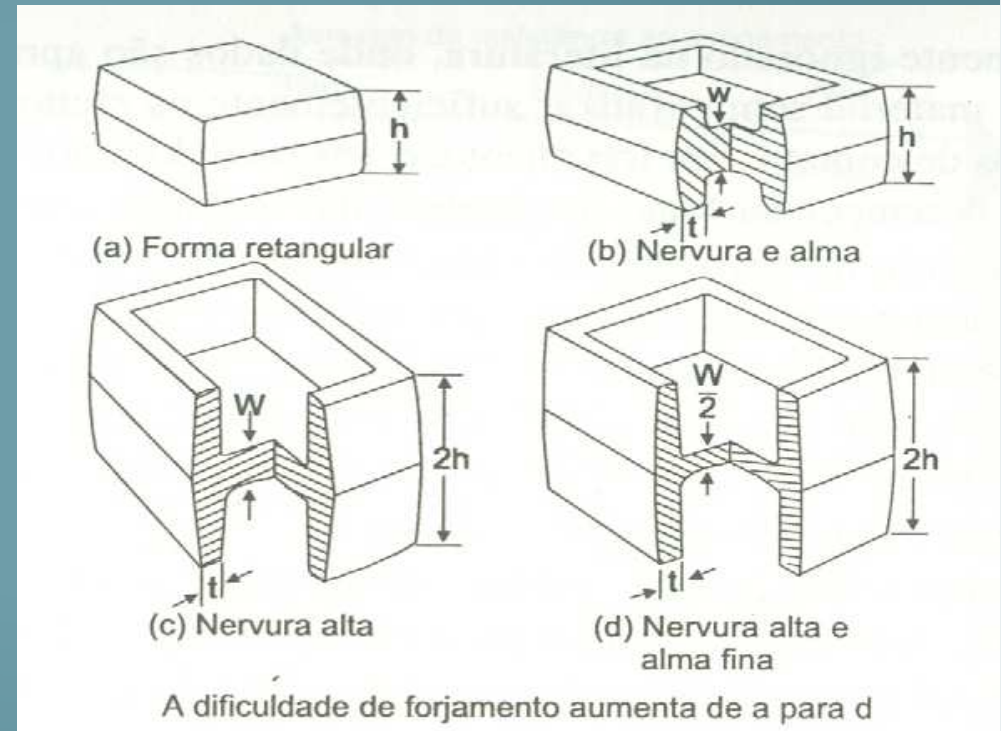
- Papel do lubrificante
 - Ser livre de resíduos que se acumulem nas cavidades
 - Desenvolver uma pressão balanceada de gases, auxiliando na extração da peça
 - Não gerar resíduos tóxicos

Complexidade da forma

- Objetivo no processo de forjamento é assegurar o fluxo do metal para garantir a forma final sem defeitos
- Em geral, várias pré-formas podem ser necessárias
- Formas esféricas ou de blocos são mais fáceis de forjar
- Componentes com seções longas ou nervuras são mais difíceis devido à maior razão área/volume, que muda as condições de atrito e fluxo de calor
- Há uma relação direta entre a razão área/volume e a dificuldade de forjamento

Complexidade da forma



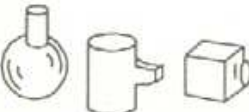


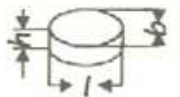
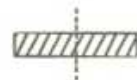
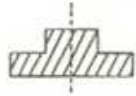
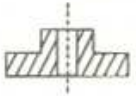
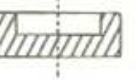

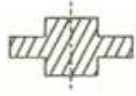
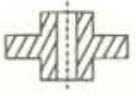
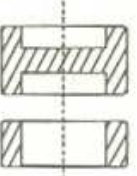
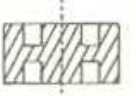
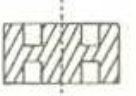
- Facilidade de forjar uma peça depende das proporções relativas entre as projeção horizontal e a vertical
- Peças (c) e (d) requerem maior carga de forjamento e provavelmente mais operações intermediárias do que (a) e (b)







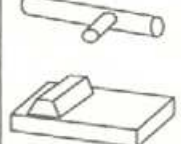

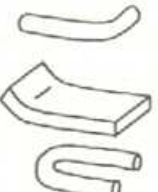
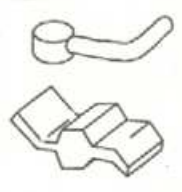



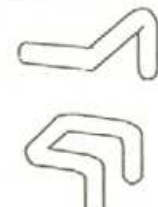

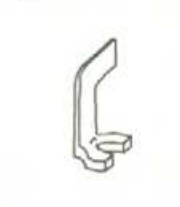


Complexidade da forma

- Forjados podem ser classificados em três grupos
 - Formas compactas – três principais dimensões aproximadamente iguais
 - Formas de disco – Duas dimensões próximas, menores do que a altura h
 - Formas longas com uma dimensão principal significativamente maior que as outras
- Esses grupos ainda se dividem em subgrupos

Classificação de complexidade de forma

<p>Forma Classe I Forma Compacta</p>  <p>h b $= bh$</p> <p>Esférica e cúbica</p>	<p>Subgrupo</p>	<p>101 Sem detalhes</p> 	<p>102 Com detalhes laterais</p> 	<p>103 Com detalhes rotacionais</p> 	<p>104 Com detalhes unilaterais</p> 	
<p>Forma classe 2 Forma disco</p>  <p>$l = b > h$</p> <p>Peças com contornos circulares, quadrados e similares. Peças com pequenos detalhes laterais, cabeças e formas longas (flanges, válvulas etc.).</p>		<p>Subgrupo</p> <p>Forma do grupo</p>	<p>Sem elemento subsidiário</p>	<p>Com cubo</p>	<p>Com cubo e furo</p>	<p>Com aba</p>
<p>21 Formas de disco com elemento unilateral</p>	<p>211</p> 	<p>212</p> 	<p>213</p> 	<p>214</p> 	<p>215</p> 	
<p>22 Formas de disco com elemento bilateral</p>	<p>222</p> 	<p>223</p> 	<p>224</p> 	<p>225</p> 	<p>225</p> 	

Classificação de complexidade de forma

Forma classe 3 Forma longa  $l > b \geq h$ Partes com: Eixos longos Eixos por comprimento 1 - Curtos $> 3b$ 2 - Médio $= 3-8b$ 3 - Longos $= 8-16b$ 4 - Muito longo $> 16b$ grupo comprimento, número após barra ex. 334/2	Subgrupos					
	Forma do grupo	Sem elementos	Elementos paralelos ao eixo principal	Elementos abertos fechados em garfo	Elementos assimétricos aos eixos principais	Com dois ou mais elementos de tamanho similar
31 Forma principal elementos eixos retos	311 	312 	313 	314 	315 	
32 Eixos longos forma principal curvada em um plano	321 	322 	323 	324 	325 	
33 Eixos longos forma principal curvada planos diversos	331 	332 	333 	334 	335 	

Fator de dificuldade de forma

- P = perímetro da seção axial do forjado
- F = Área da seção axial do forjado
- P_C = Perímetro da seção axial do cilindro que circunscribe o forjado
- F_C = Área da seção axial do cilindro que circunscribe o forjado

$$\alpha = X_f / X_c$$

$$X_f = P^2 / F$$

e

$$X_c = P_c^2 / F_c$$

Fator de forma lateral

Em formas redondas, protuberâncias e abas longe do centro são difíceis de forjar

$$\beta = 2R_g / R_c$$

R_g = Distância radial entre o eixo de simetria e o centro de gravidade de metade da seção

R_c = Máximo raio da parte forjada

Fator de dificuldade de forma:

$$S = \alpha\beta$$

Complexidade da forma

- O fator S compara a complexidade de metade da seção de um forjado redondo e um cilindro circunscrito ao forjado
- Durante o forjamento de uma peça redonda, o material move-se lateralmente partindo do centro.

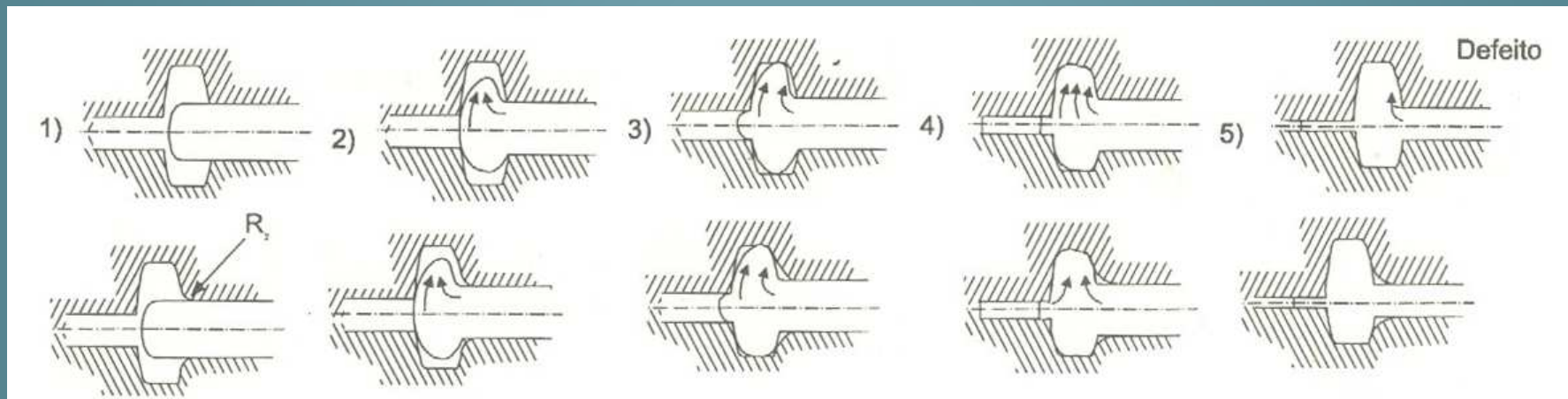
Projeto de matrizes para pré-formas

- Projeto das pré-formas e suas matrizes para garantir distribuição adequada de material é extremamente importante
- O projeto adequado minimiza a formação de rebarbas e permite o preenchimento completo da cavidade
- A distribuição de volume da peça é atingida a partir de tarugos quadrados ou redondos antes dos forjamento na gravura final.

Projeto de matrizes para pré-formas

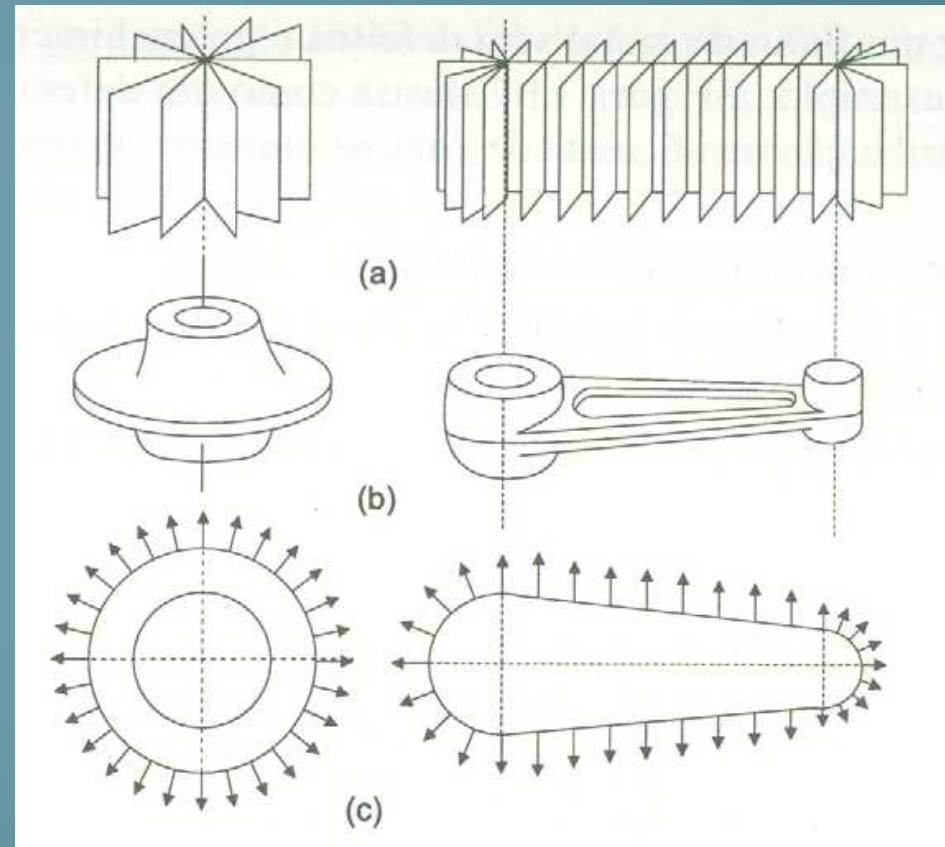
- Objetivo da pré-forma é distribuir o material para:
 - Assegurar o fluxo de material, ausência de defeitos e preenchimento adequado da gravura
 - Minimizar a perda de material em rebarba
 - Minimizar o desgaste da matriz pelo deslocamento de material
 - Atingir o fluxo de material desejado e controlar as propriedades mecânicas

Formação de defeito no preenchimento



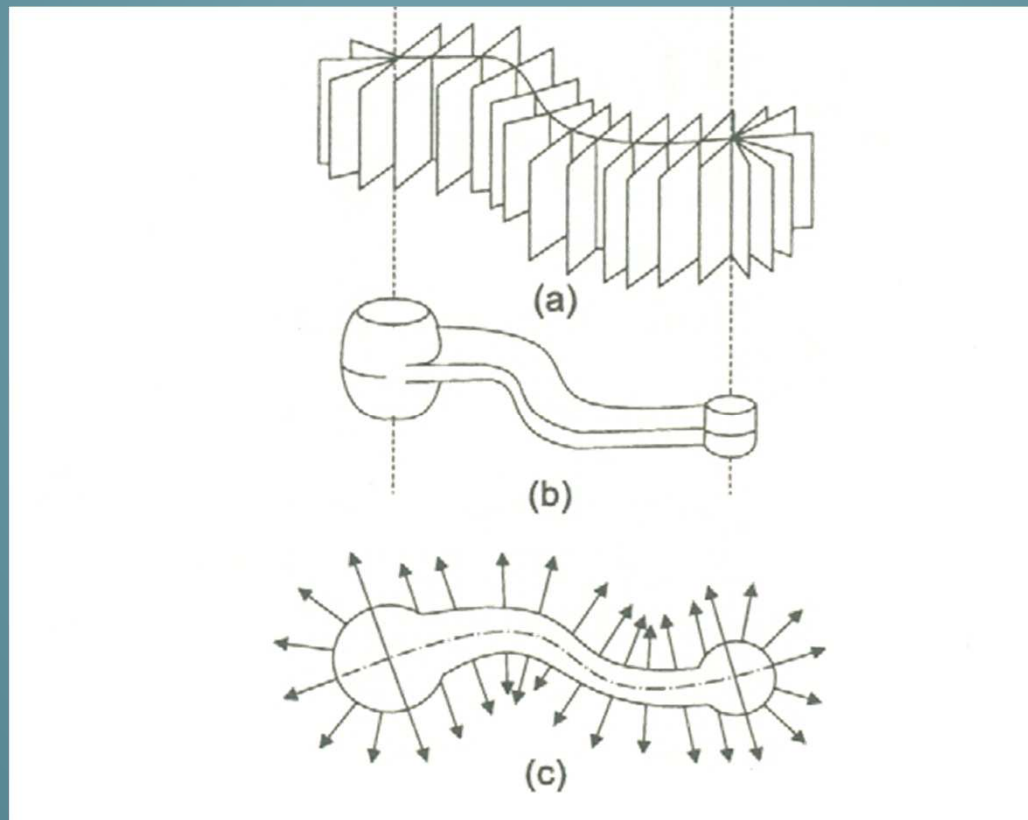
Projeto de matrizes para pré-formas

- É comum no projeto da pré-forma considerar os planos de fluxo do metal (seções transversais do forjado)



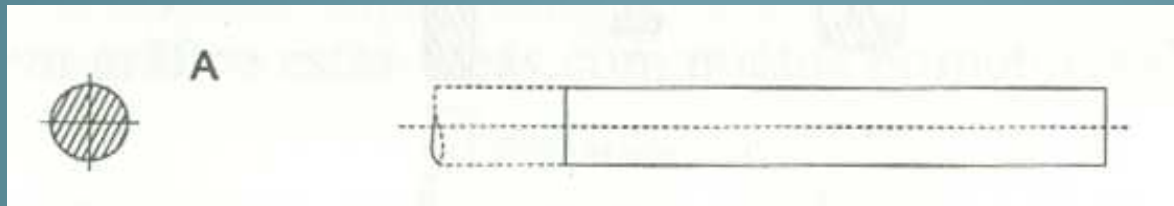
Projeto de matrizes para pré-formas

- É comum no projeto da pré-forma considerar os planos de fluxo do metal (seções transversais do forjado)

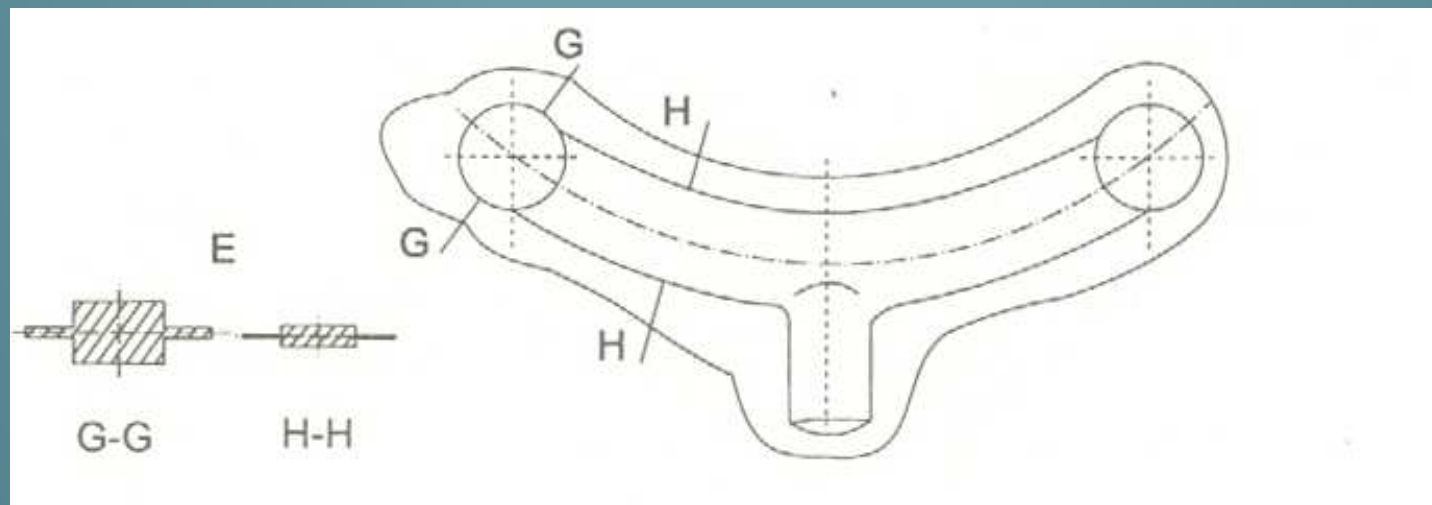


Projeto de matrizes para pré-formas

Como se sai de uma barra redonda...

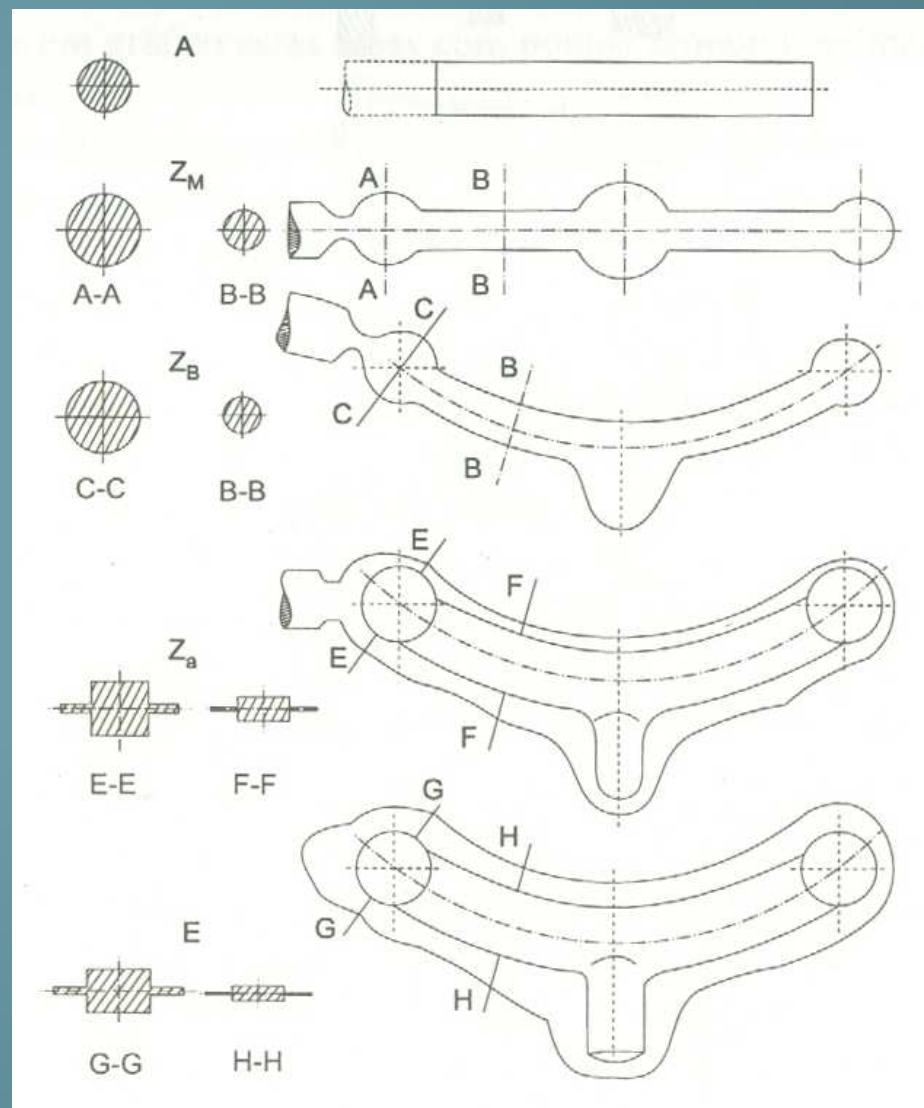


... e se chega nesta peça?



Projeto de matrizes para pré-formas

- Barra redonda laminada é passada em um laminador de perfil para distribuir o volume, curvada em um estampo, pré-formada e forjada



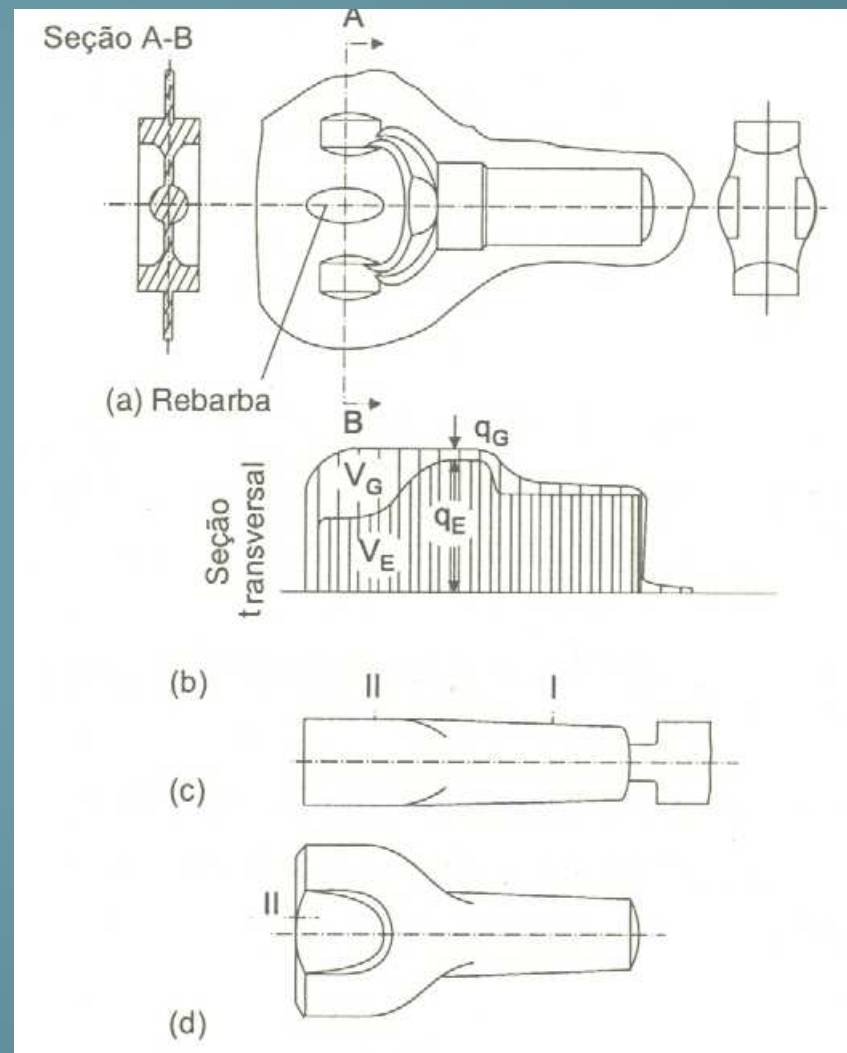
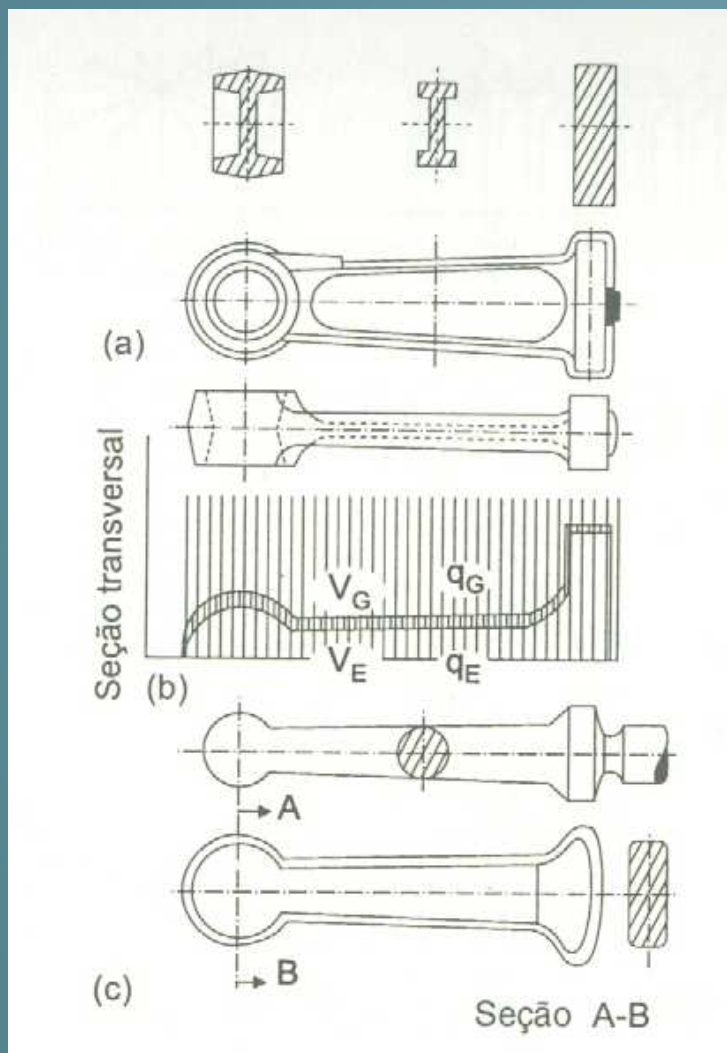
Projeto de matrizes para pré-formas

- É necessário obter o volume total do forjado, baseando-se nas seções transversais
 1. Desenhar em escala a configuração final com rebarbas
 2. Construir uma linha base para determinação das áreas, paralela à linha central do componente
 3. Determinar a máxima e mínima área da seção transversal perpendicular à linha central

Projeto de matrizes para pré-formas

4. Marcar essas áreas com pontos proporcionalmente distantes da linha-base
5. Conectar esses pontos com uma linha suave; podem ser necessários pontos adicionais para determinar a curva
6. Acima dessa curva adicionar a área aproximada de rebarba, levando em conta que seções estreitas deverão ter rebarbas mais largas e vice-versa
7. Converta os máximos e mínimos de área em figuras simples de área equivalente

Projeto de matrizes para pré-formas

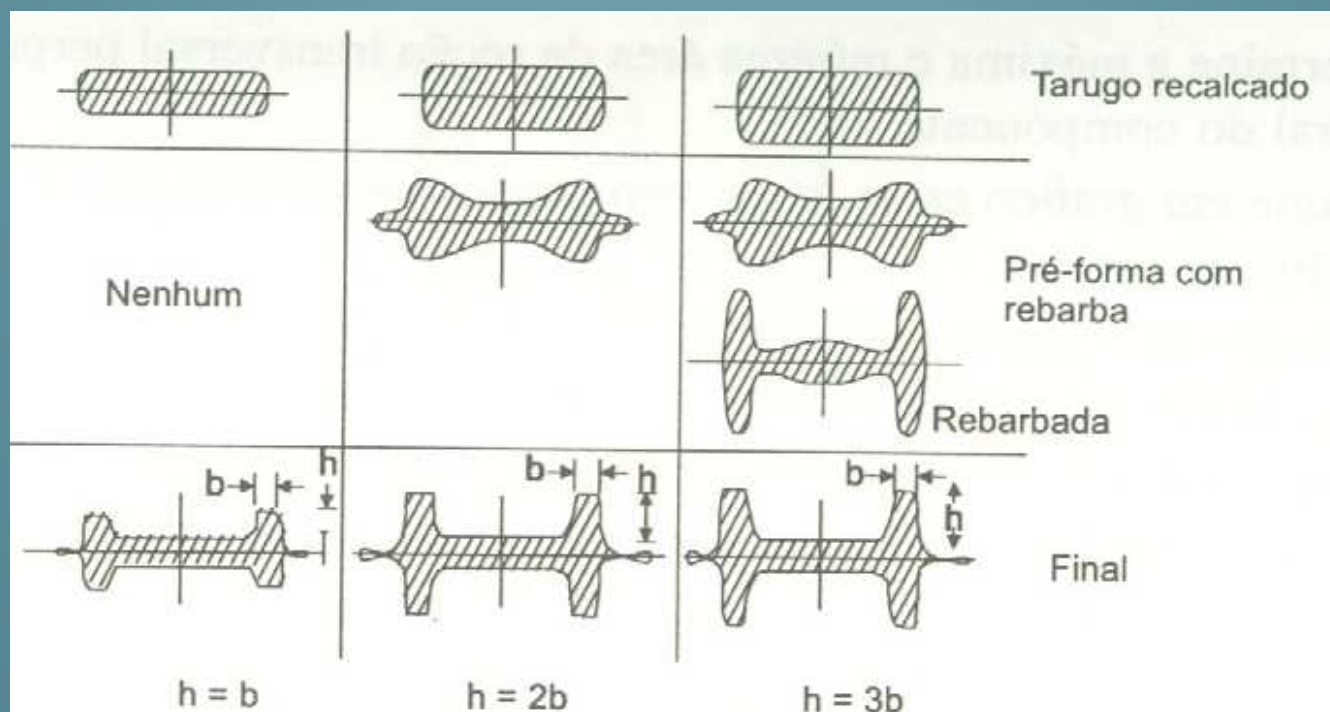


Projeto de matrizes para pré-forma

- A área da seção transversal ao longo do comprimento deve ser igual à área da seção final mais a rebarba.
- Todos os raios côncavos devem ser maiores do que os raios finais
- Sempre que for possível, as dimensões da pré-forma devem ser maiores do que a da peça final na direção do forjamento; com isso o escoamento é de recalque e não de extrusão

Projeto de matrizes para pré-forma

- A terceira condição do slide anterior garante que não haja deslizamento adicional do metal na matriz, diminuindo o atrito e a carga de forjamento.



Projeto de matrizes para pré-forma

- Imagine que você projetou um conjunto de matrizes de forjamento e precisa testar se o projeto foi eficiente. Como você pode fazer esses testes sem grandes custos antes de encomendar a matriz final?

Projeto de matrizes para pré-forma

- Processos de tentativa e erro podem ter custo e tempo proibitivos
- Soluções:
 - Modelagem matemática
 - Modelagem física
 - Modelo em chumbo, massa de modelar ou cera para a peça
 - Modelo em plástico duro (por exemplo, PE de ultra alto peso molecular) ou aço baixo carbono para a ferramenta

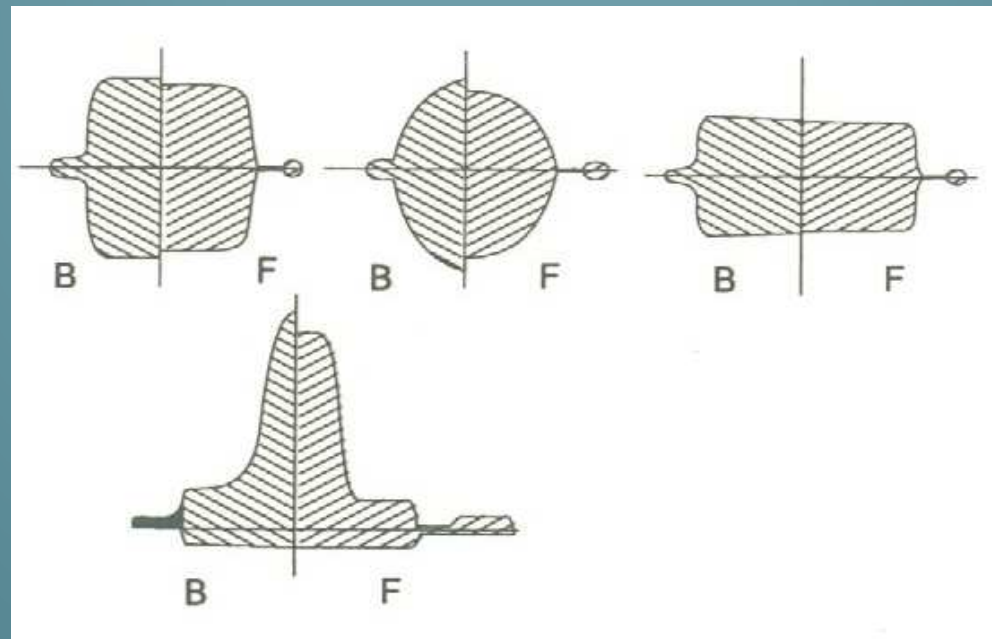
Projeto de matrizes para pré-forma

Dimensão do forjado final	Dimensão da pré-forma	
	Ligas de alumínio	Ligas de titânio
Espessura da alma t_F	$t_P = 1 - 1.5 t_F$	$t_P = 1.5 - 2.2 t_F$
Raio do filete R_{FF}	$R_{PF} = 1.2 - 2 R_{FF}$	$R_{PF} = 2 - 3 R_{FF}$
Raio de canto R_{FC}	$R_{PC} = 1.2 - 2 t_F$	$R_{PC} = 2 t_F$
Ângulo de saída α_F	$\alpha_P = \alpha_F (2 - 5^\circ)$	$\alpha_P = \alpha_F (3 - 5^\circ)$
Altura da nervura W_F	$W_P = W_F - 0.8 \text{ mm}$	$W_P = W_F - 1.6 - 3.2 \text{ mm}$

(a) O primeiro subscrito de cada dimensão indica o forjado final (F) ou a pré-forma (P)

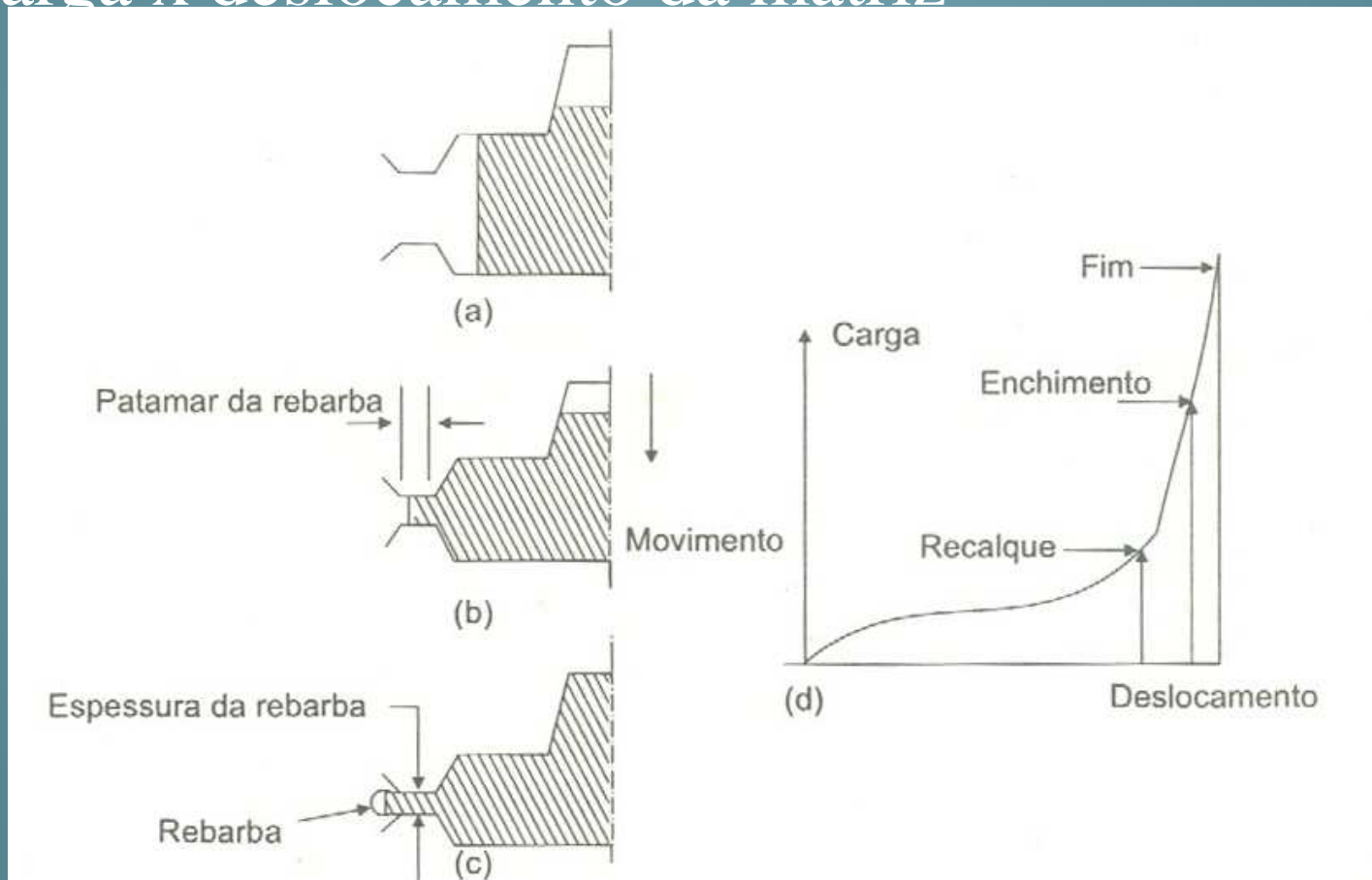
Projeto de rebarbas

- A pressão de forjamento aumenta com
 - Diminuição da espessura das rebarbas
 - Aumento da largura da rebarba, devido ao atrito, transferência de calor



Projeto de rebarbas

- Carga x deslocamento da matriz

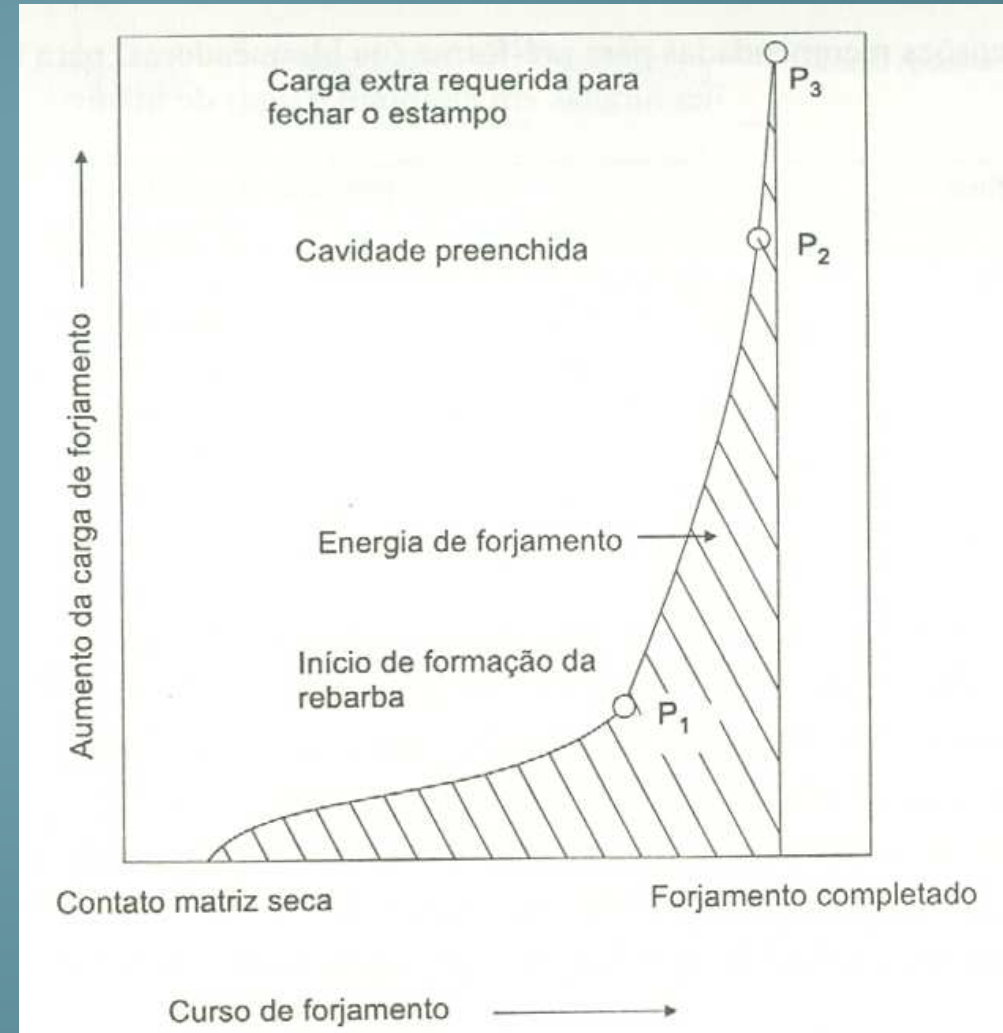


Projeto de rebarbas

- As cargas de forjamento são relativamente baixas até que os detalhes comecem a ser preenchidos
- A partir deste ponto:
 - Deve haver material suficiente na gravura para preenchimento dos vazios remanescentes
 - A extrusão de material pelas áreas de rebarba deve ser mais difícil do que o preenchimento dos detalhes da cavidade

Projeto de rebarbas

- Durante o preenchimento, a carga aumenta até o ponto P2, que indica que a cavidade deve ter sido totalmente preenchida.
- Na prática, leva-se o processo até P3 “para garantir”, e nesse estágio o fluxo de material é quase todo localizado nas áreas de rebarba.



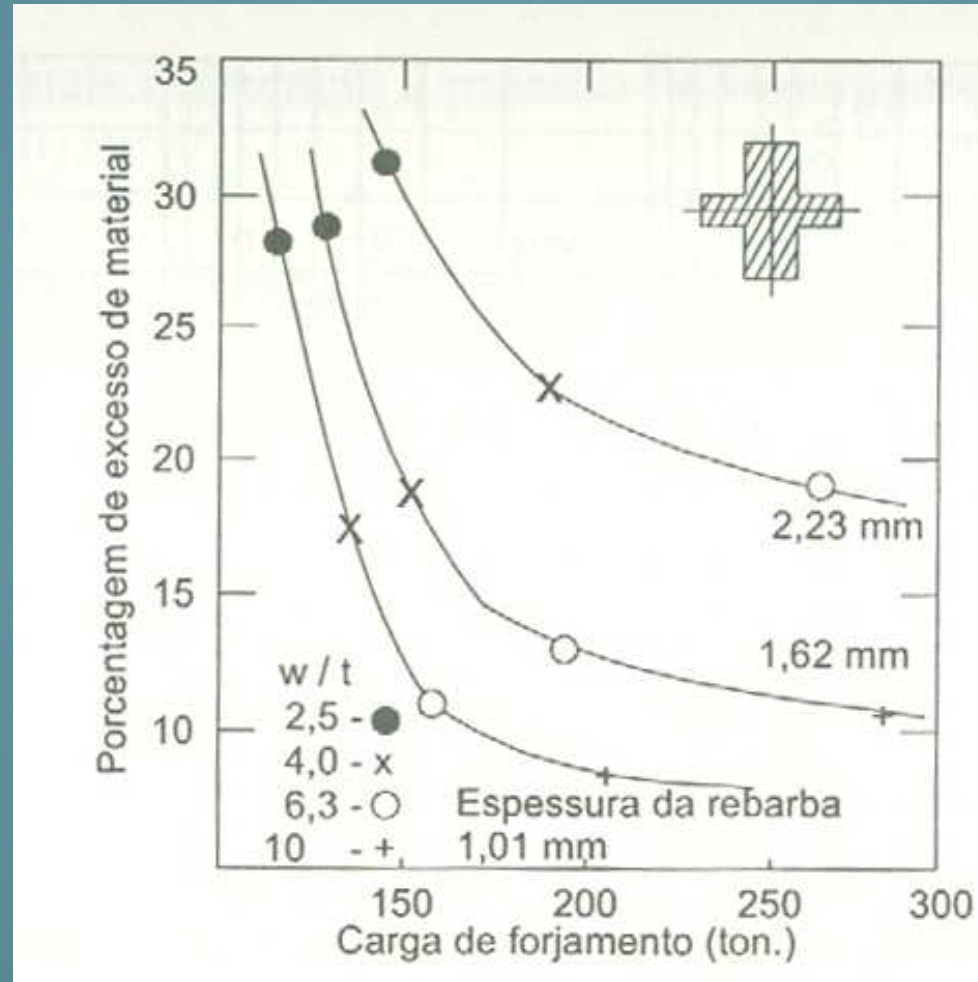
Projeto de rebarbas

- O detalhe mais difícil de preencher deverá determinar a carga mínima necessária para produção de uma peça sem falhas de preenchimento.
- A dimensão da rebarba determina a carga final necessária para fechar a matriz
- A formação da rebarba é influenciada pela quantidade de material em excesso disponível

Projeto de rebarbas

- A cavidade da matriz pode ser preenchida com várias geometrias de rebarba, contanto que haja material disponível.
- É possível fazer a mesma peça com uma rebarba mais espessa, diminuindo a carga de forjamento.
- A carga de forjamento também pode ser diminuída por meio de projeto adequado das pré-formas

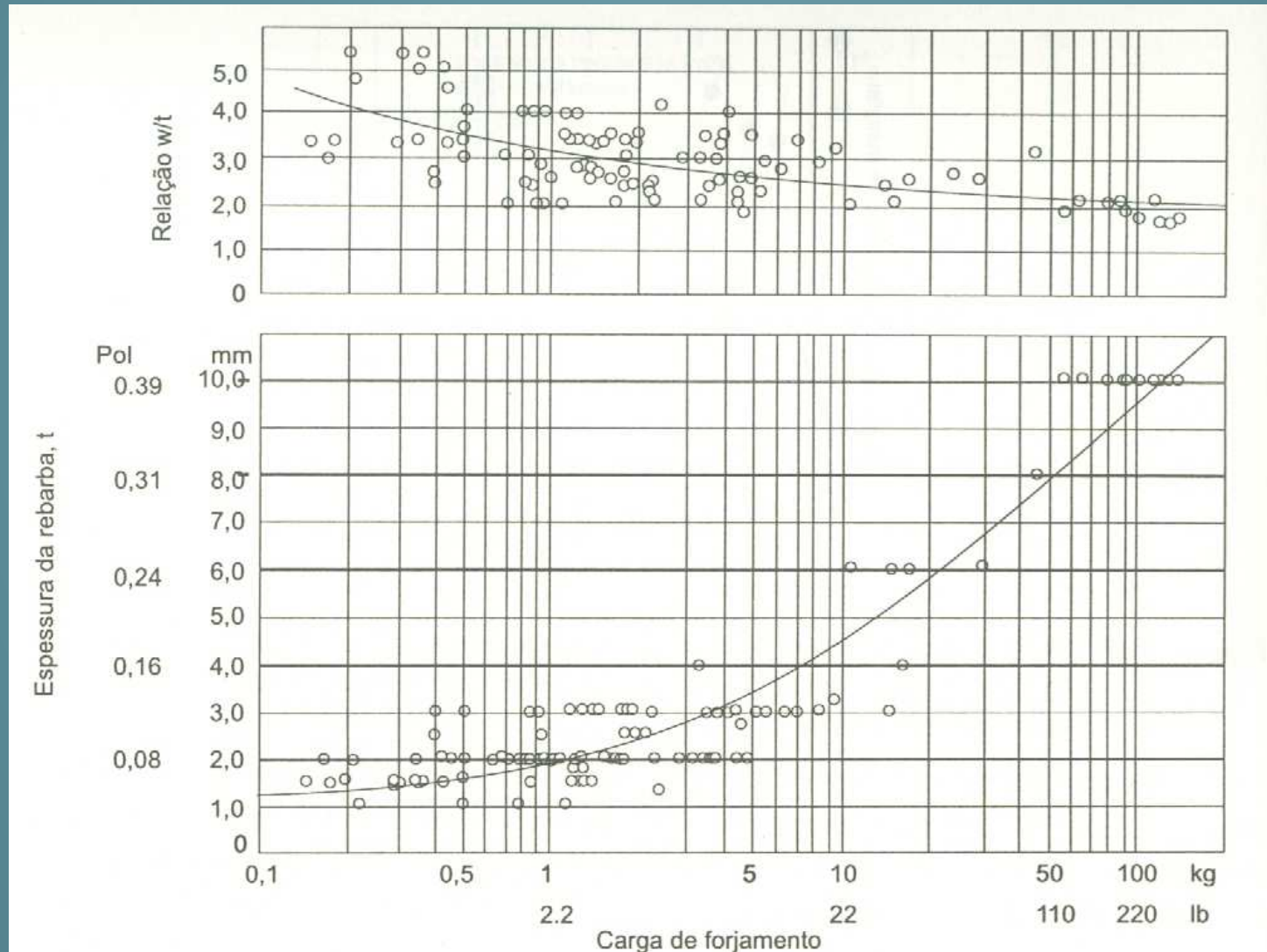
Projeto de rebarbas



Projeto de rebarbas

- A classificação de formas tem sido usada na avaliação das dimensões de rebarba
- Foi feita uma tentativa de estabelecer relações entre peso e dimensões das rebarbas
- Em geral, a espessura da rebarba aumenta com o peso da peça final, mas a relação largura/espessura diminui

Projeto de rebarbas



Previsão de cargas e pressões de forjamento

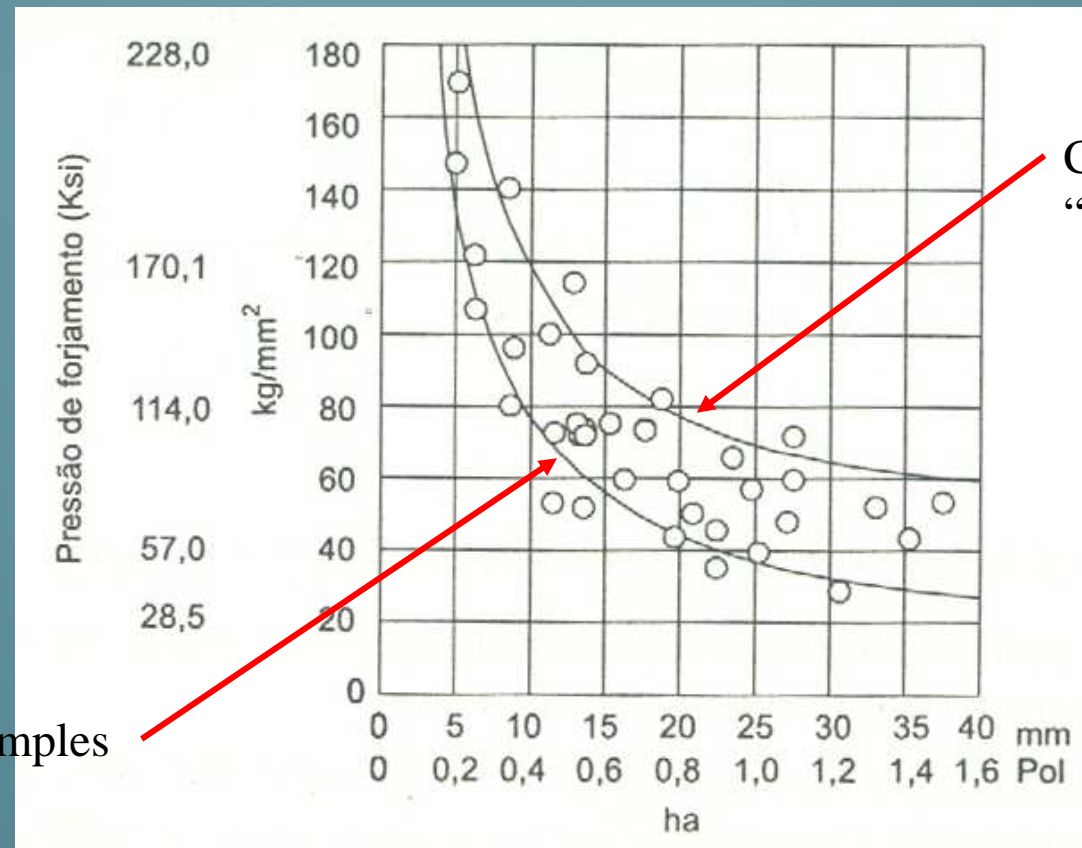
- Na maior parte dos processos de forjamento, o fluxo de material, tensões e temperaturas variam continuamente no decorrer do processo.
- Além disso, as geometrias das peças podem requerer técnicas de análise diferentes
- As estimativas são normalmente empíricas.

Previsão de cargas e pressões de forjamento

- Métodos empíricos
 - A área total da superfície do forjado (incluindo as rebarbas) é multiplicada por uma pressão de forjamento conhecida de experiência passada
 - Pressões típicas variam de 31-110 kgf/mm² dependendo do material e da geometria

Previsão de cargas e pressões de forjamento

- Experimentos em aços carbono e aços baixa-liga com rebarba com relação largura/espessura entre 2 e 4: Variável que mais influencia a pressão de forjamento é a altura média da peça forjada



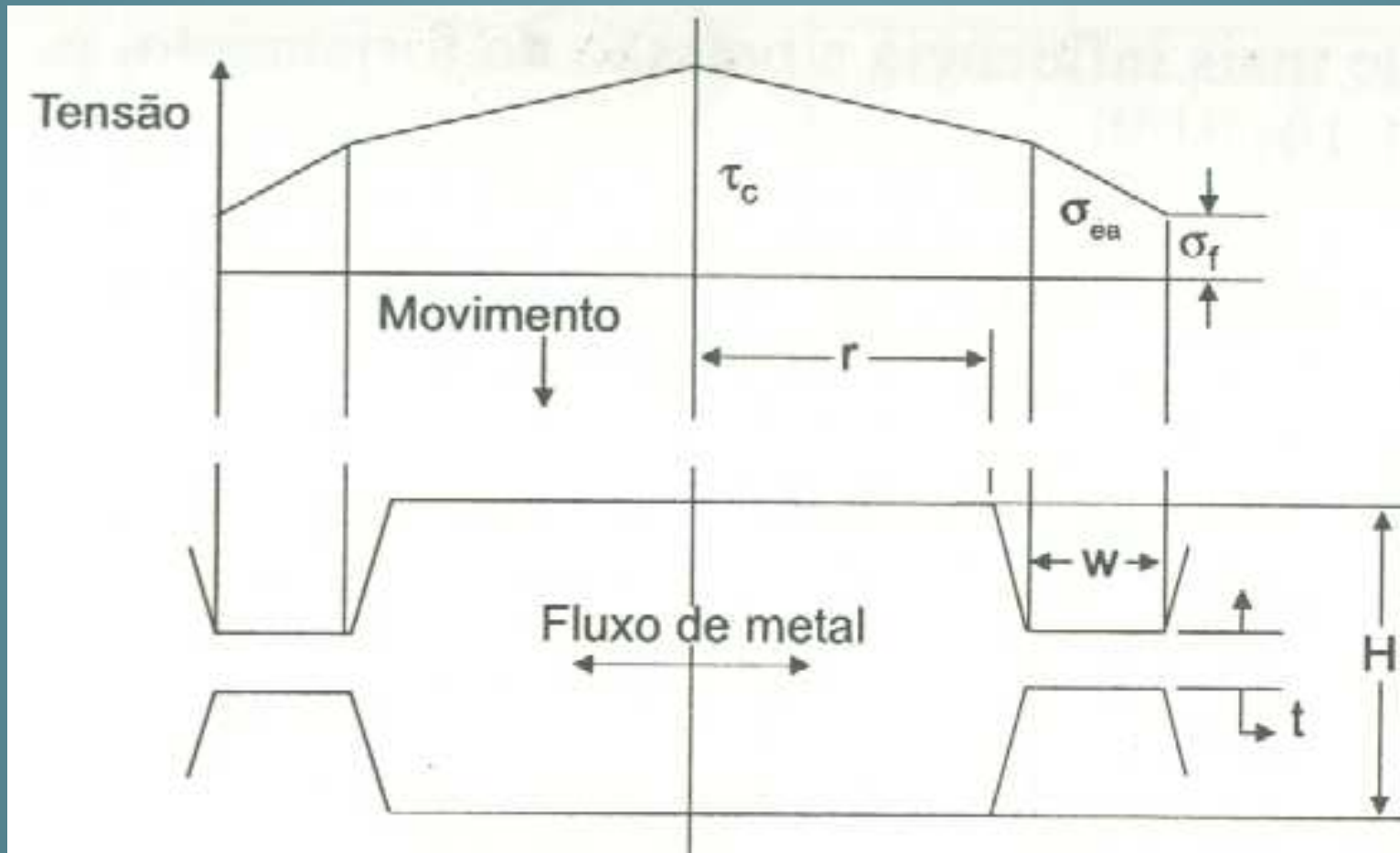
Componentes simples

Componentes
“difíceis”

Previsão de cargas e pressões de forjamento

- Método das tiras simplificado
 - Método das tiras consiste em dividir as peças em seções de deformação plana ou axissimétrica
 - Usam-se então equações simplificadas para cada seção, e os resultados são somados
 - As geometrias das seções transversais podem ser simplificadas para efeito de cálculos

Previsão de cargas e pressões de forjamento



Previsão das cargas e pressões de forjamento

σ_f = tensão de escoamento na rebarba

σ_{ea} = pressão na entrada da cavidade para uma rebarba

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

Integrando a pressão, chega-se à força na região da

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

$$R = r + w$$

Previsão das cargas e pressões de forjamento

A carga agindo na cavidade pode ser obtida de maneira análoga:

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

σ_c = tensão de escoamento na cavidade

A tensão de escoamento na rebarba é considerada diferente devido ao resfriamento mais rápido e alta taxa de deformação.

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

Previsão das cargas e pressões de forjamento

Para uma seção transversal em que ocorre deformação plana:

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

Pressão na entrada da cavidade para rebarba

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

Força na entrada da cavidade

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

Força na cavidade

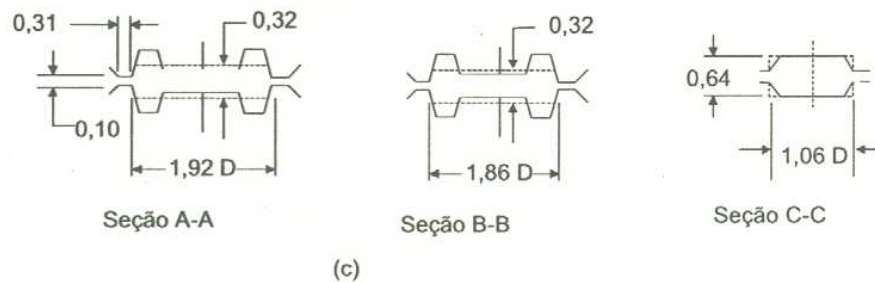
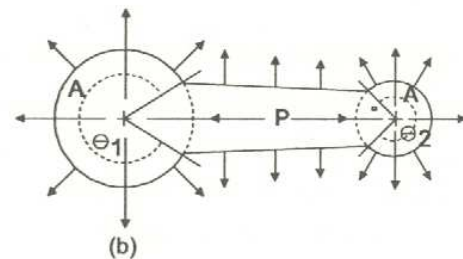
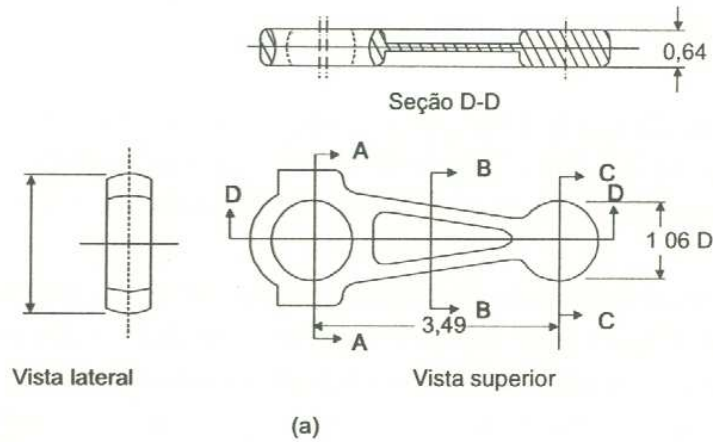
$$L = 2r$$

Exemplo

Carga de forjamento em uma biela

- Inicialmente, três seções transversais foram consideradas
- Dimensões de rebarba iguais em todas as seções
 - Pré-forma: 2,54 mm de espessura; 7,87 mm de largura
 - Peça final: 1,52 mm de espessura; 7,87 mm de largura

Exemplo



Seção A-A:

Pré-forma: $r = 24,3 \text{ mm}$ $H = 8,12 \text{ mm}$

Forjado: $L = 5,0 \text{ mm}$ $H = 4,57 \text{ mm}$

Seção B-B:

Pré-forma: $L = 23,62 \text{ mm}$ $H = 8,12 \text{ mm}$

Forjado: $L = 24,13 \text{ mm}$ $H = 4,57 \text{ mm}$

Seção C-C:

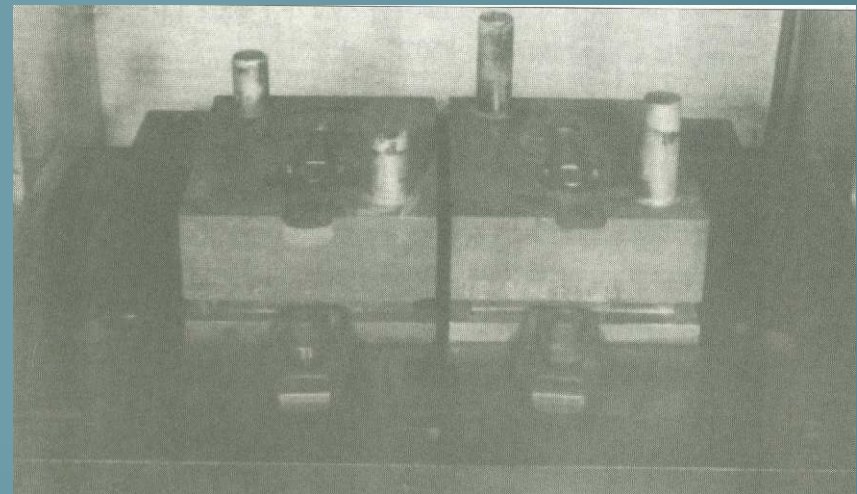
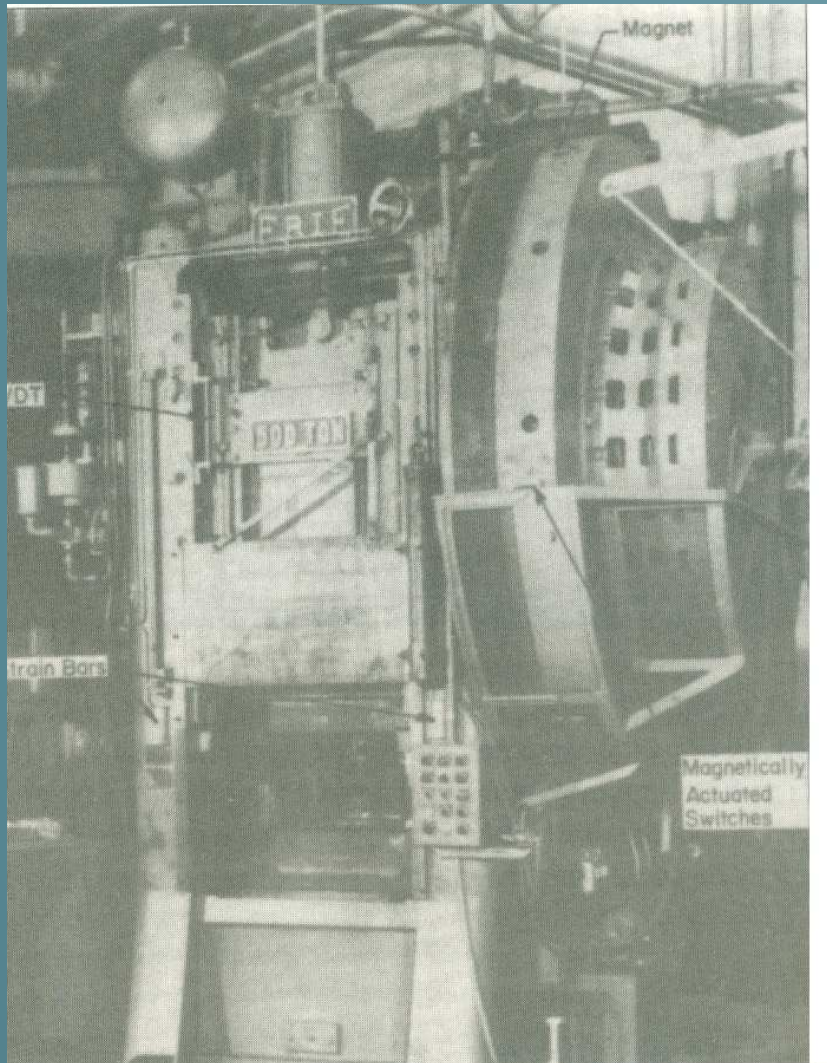
Pré-forma: $r = 13,46 \text{ mm}$ $H = 16,25 \text{ mm}$

Forjado: $r = 13,97 \text{ mm}$ $H = 14,98 \text{ mm}$

Exemplo

- Experimentos práticos
- Prensa mecânica com curso de 254 mm, 90 golpes por minuto
- Matrizes colocadas lado a lado
- Matrizes aquecidas a 177°C
- Tarugo de aço 1016 aquecido a 1149°C;
- Temperatura logo antes do golpe: 1065°C

Exemplo



Exemplo

- Tensão de escoamento é função da deformação, taxa de deformação e temperatura num dado momento

- Pode ser expressa como: $\bar{\sigma} = C \cdot \dot{\epsilon}^m$

Deformação	Valores de C e m em diversas temperaturas (°C)							
	900		1000		1100		1200	
	C	m	C	m	C	m	C	m
0.05	81.4	0.133	73.8	0.124	62.0	0.117	44.1	0.150
0.10	113.8	0.099	94.5	0.099	66.9	0.130	49.0	0.157
0.20	143.5	0.082	113.8	0.090	83.4	0.119	62.7	0.140
0.30	157.2	0.085	125.5	0.088	92.4	0.109	65.5	0.148
0.40	158.6	0.084	125.5	0.098	89.0	0.126	62.7	0.164
0.50	164.8	0.088	124.8	0.109	86.2	0.141	56.5	0.189
0.60	160.7	0.097	116.5	0.127	83.4	0.156	53.8	0.205
0.70	157.2	0.104	118.0	0.127	85.5	0.151	55.9	0.196

^(a) Aço AISI 1016 (0.15%C, 0.12%Si, 0.68%Mn, 0.034%S, 0.025%S) laminado a quente e normalizado

Exemplo

- A temperatura no fim do curso depende de:
 - Temperatura inicial
 - Temperatura da matriz
 - Velocidade de deformação
 - Condições de atrito
- Porém, se o gradiente de temperatura é desprezado e a peça é considerada uma placa fina resfriada simetricamente:

$$\theta = \theta_I + (\theta_0 - \theta_I) \exp\left(\frac{\alpha t}{c\rho h}\right)$$

Exemplo

- θ_1 (temperatura inicial da matriz) = 177 °C
- θ_0 (temperatura inicial do tarugo) = 11944 °C
- θ (coeficiente de transferência de temperatura) = 2741,8 cal/m²°C
- h (espessura média da placa) = 8,128 x 10³ m
- c (calor específico do material do tarugo) = 108 cal/kg°C (*)
- ρ (densidade do material do tarugo) = 7839 kg/m³

- Deve-se estimar a velocidade média do cabeçote da prensa
- Essa velocidade é metade da velocidade quando o cabeçote toca o tarugo

Exemplo

- O tarugo é aproximadamente esférico com um diâmetro médio de 19,05 mm
- A espessura média da peça é 8,128 mm
- Portanto, a distância média do martelo no início do golpe em relação ao ponto morto inferior é:

$$w = \frac{19,05 - 8,128}{2} = 5,461 \text{ mm}$$

Exemplo

- Velocidade do cabeçote em função da distância ao F

$$V = w \frac{\pi n}{30} \sqrt{\frac{S}{w} - 1}$$

- Para a prensa do exemplo: $n = 90$; $S = 254$

$$V = \frac{5,461 \times \pi \times 90}{30} \sqrt{\frac{254}{5,461} - 1} = 347,2 \text{ mm/s}$$

Exemplo

- Duração do tempo de contato:

$$T = \frac{(\text{Espessura média do tarugo}) - (\text{Espessura média do forjado})}{\text{Velocidade média do cabeçote}}$$

$$T = \frac{19,05 - 8,128}{347,2} = 0,0315 \text{ s}$$

- Temperatura média de forjamento:

$$\begin{aligned} \theta &= 177 + (1149 - 177)e^{\left(\frac{2741,8 \times 0,0315}{7,839 \times 10^8 \times 8,128 \times 10^{-3}}\right)} \\ &= 177 + 972 \times 0,98 = 1136,87 \end{aligned}$$

Exemplo

- O aumento de temperatura devido à deformação

$$\theta_d = A \bar{\sigma}_a \bar{\epsilon}_a / c\rho$$

- $A = 4,186 \text{ J/cal}$, uma vez que as propriedades térmicas estão em calorias
- σ_a é o limite de escoamento médio do material (126,5 MPa, obtido de fontes de dados)

Exemplo

- A deformação pode ser aproximada a partir das dimensões iniciais e finais da peça

$$\bar{\varepsilon}_a = \ln\left(\frac{\textit{Espessura inicial}}{\textit{Espessura final}}\right) = \ln\left(\frac{19,05}{8,128}\right) = 0,851$$

- Portanto o aumento de temperatura por efeito de deformação é:

$$\theta_d = \frac{126,5 \times 0,851 \times 10^6}{108 \times 4,186 \times 7,839} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Exemplo

- Voltando à tabela de C e m, esses valores a 1167°C para uma deformação de 0,85 podem ser calculados por interpolação linear:
- $C = 67,6$ MPa e $m = 0,187$
- A taxa de deformação pode ser calculada:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\textit{Velocidade}}{\textit{Espessura média}} = \frac{347,2}{(19,05 - 8,128) / 2} = 25,5 \text{ 1/s}$$

Exemplo

- Voltando à equação do limite de escoamento:

$$\begin{aligned}\bar{\sigma} &= 67,878(25,55)^{0,187} \\ &= 124,425 \\ &\cong 124,5 \text{ MPa}\end{aligned}$$

- Este é o limite de escoamento na seção A-A. Nas outras seções e na forma final, segue-se o mesmo procedimento:

Forjar	Temperatura do material (C)	Tensão de escoamento na seção (MPa)		
		A-A	B-B	C-C
Pré-forma	1150	124,5	117,3	112,5
Final	1065	151,7	149,0	139,3

Exemplo

- Estimando o fator de atrito:
- m varia de 0,25 a 0,4 para forjamento de aços.
- Apesar de o modelo assumir que o fluxo ocorre pode deslizamento na interface matriz/metal, há uma quantidade significativa de cisalhamento interno nas regiões de nervuras.
- Os comprimentos das regiões de nervuras são muito próximos nas seções A-A e B-B, e C-C não tem nervuras. Assim, escolheu-se $m=0,7$ para A-A e B-B e $m=0,4$ para C-C.

$$\tau = m\bar{\sigma} / \sqrt{3}.$$

Exemplo

- O comprimento da seção B-B é de 50,8 mm.
- Substituem-se os valores calculados nas equações de deformação plana e na equações de deformação axissimétrica, e obtêm-se as cargas de forjamento

Forjamento	Carga em cada seção transversal (Kgf)			Carga total	
	A-A	B-B	C-C	Kgf	Tf
Pré-forma	153.095	89.437	40.535	283.067	283,33
final	184.884	129.621	56.271	370.777	371,14

Exemplo

- Comparação com valores medidos na prensa

Tabela 11.6 Resumo e comparação das cargas de forjamento (Tf).

	Análise simplificada	Resultado experimental
Pré-forma	283,3	291,5
Acabado	371,1	386,3