

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

# EXTRUSÃO

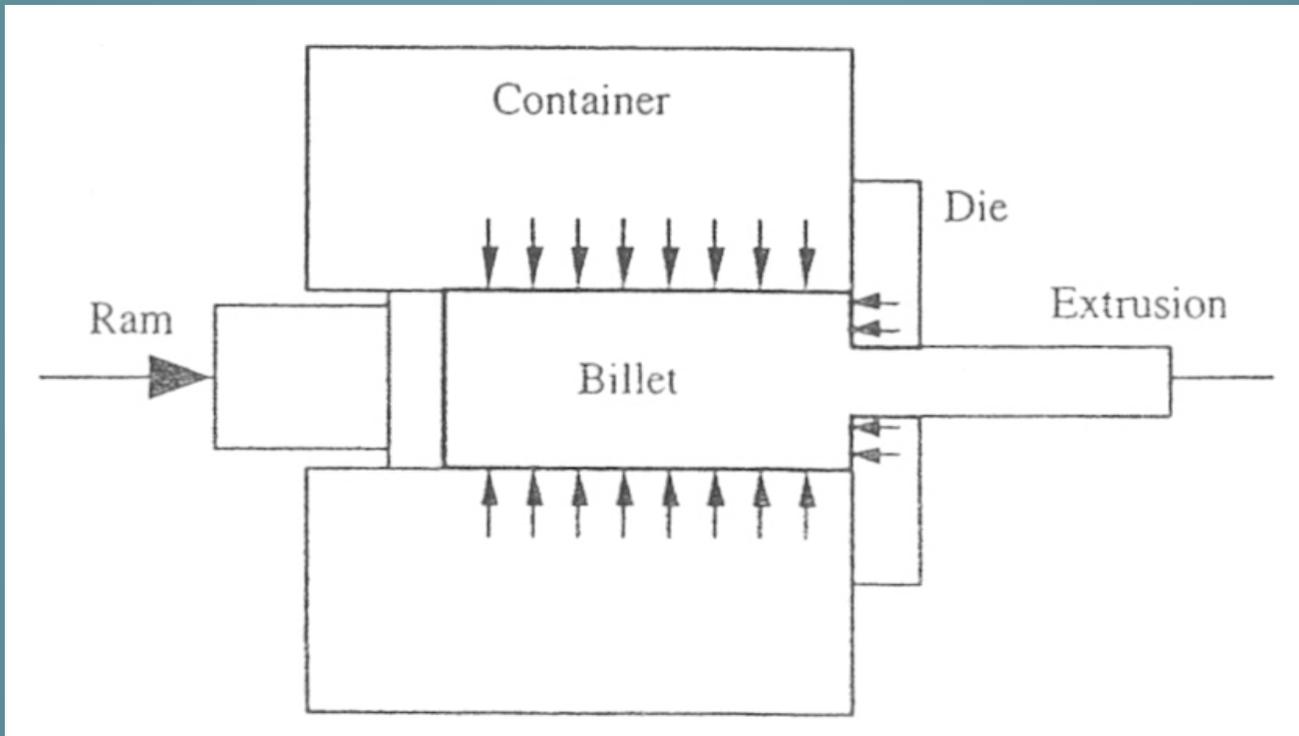
# Definição

Processo pelo qual um bloco ou tarugo de metal é empurrado através de uma matriz de conformação, obtendo-se um produto longo de perfil constante

# Características

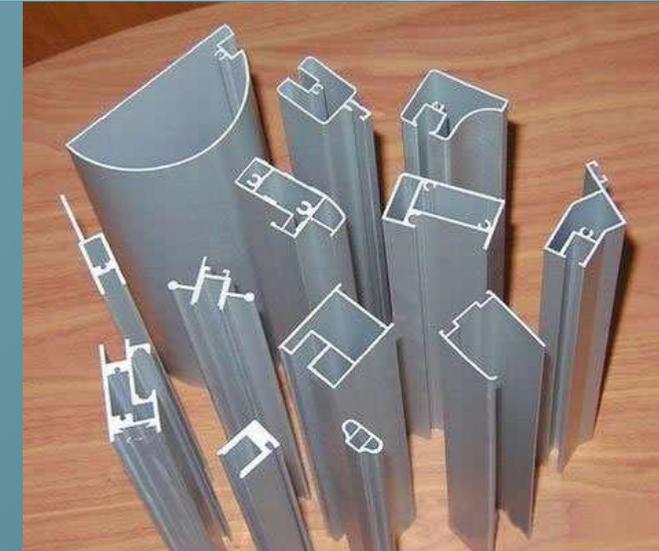
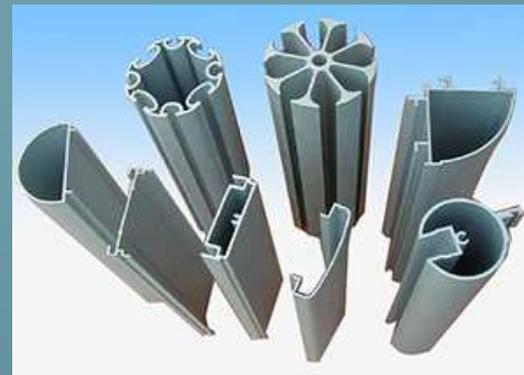
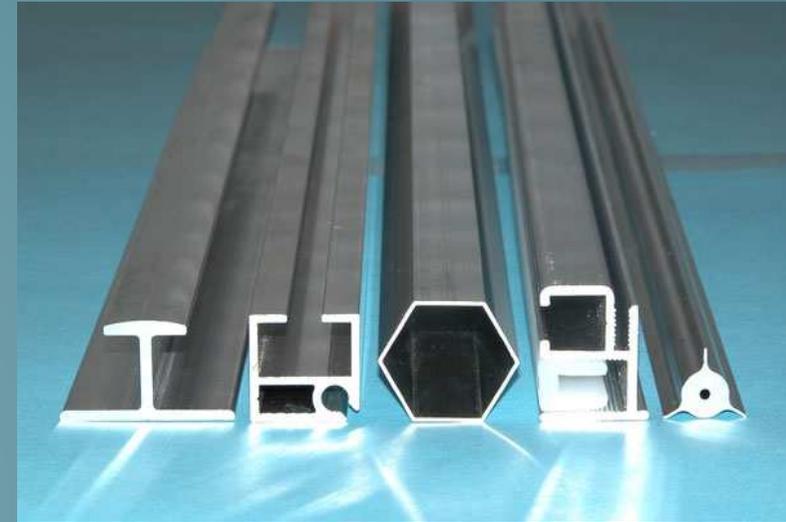
- Processo compressivo indireto
- Fortes esforços compressivos desenvolvem-se entre a parede do contenedor e a parede do tarugo
- Esforços compressivos diminuem a incidência de trincas de conformação
- Processo eficiente para destruição da estrutura bruta de fusão, devido à ausência de forças de tração

# Características

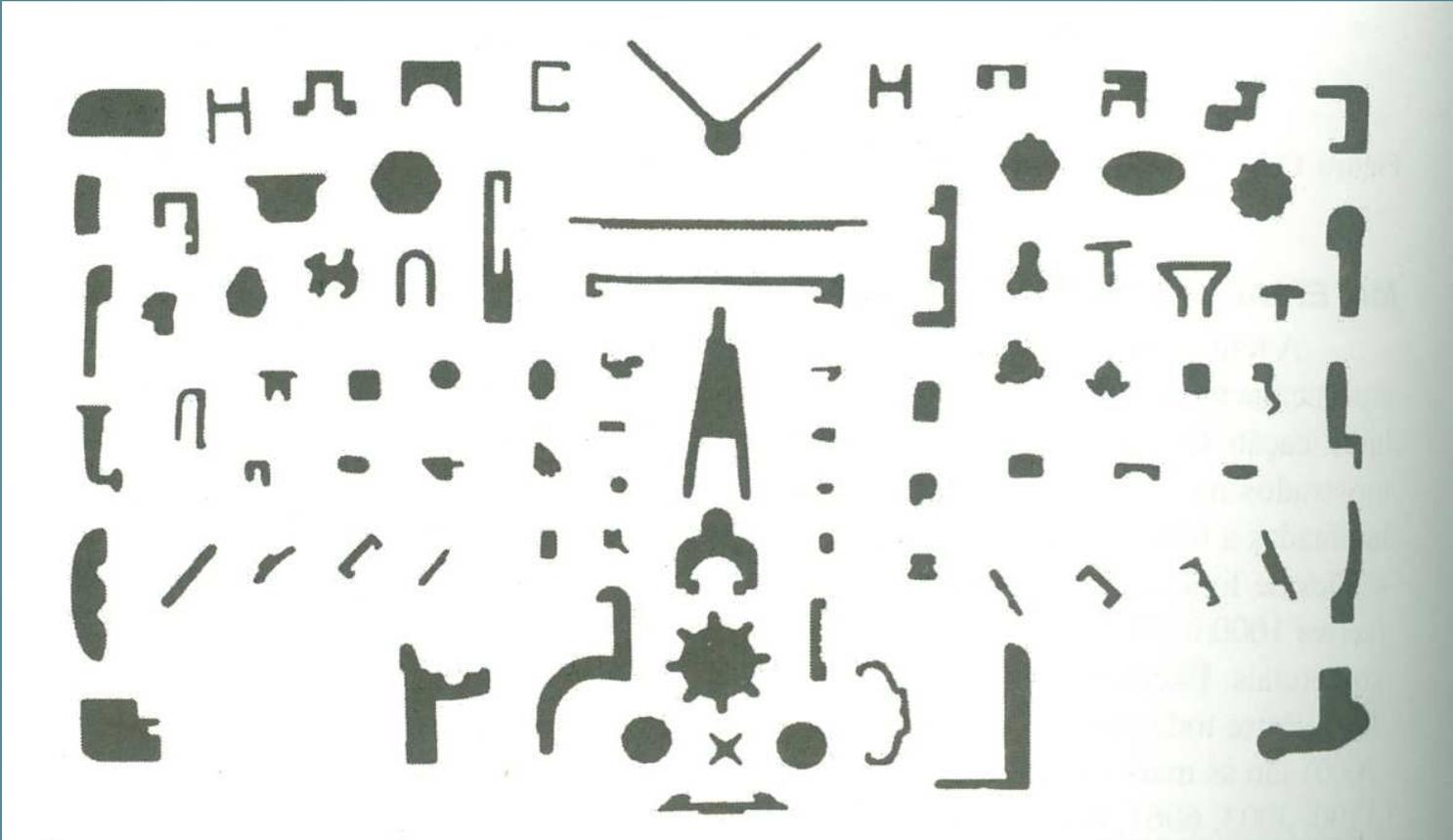


# Principais produtos

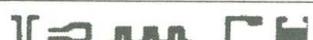
- Barras de geometria simples
- Perfis de geometrias complexas
- Perfis tubulares



# Perfis - Cobre



# Perfis - Alumínio

Seção categoria	Seção tipo	Exemplos
A	Barras simples	
B	Barras com forma	
C	Seções-padrão	
D	Seções sólidas simples	
E	Seções semi-ocas	
F	Seções com transições abruptas e paredes finas	
G	Seções com detalhes difíceis e entradas estreitas	
H	Tubos	
J	Seções ocas simples	
K	Seções ocas difíceis, com duas ou mais cavidades	
L	Tubos com projeções externas	
M	Tubos com projeções internas	
N	Seções ocas, largas ou grandes	

# Principais tipos

- Direta

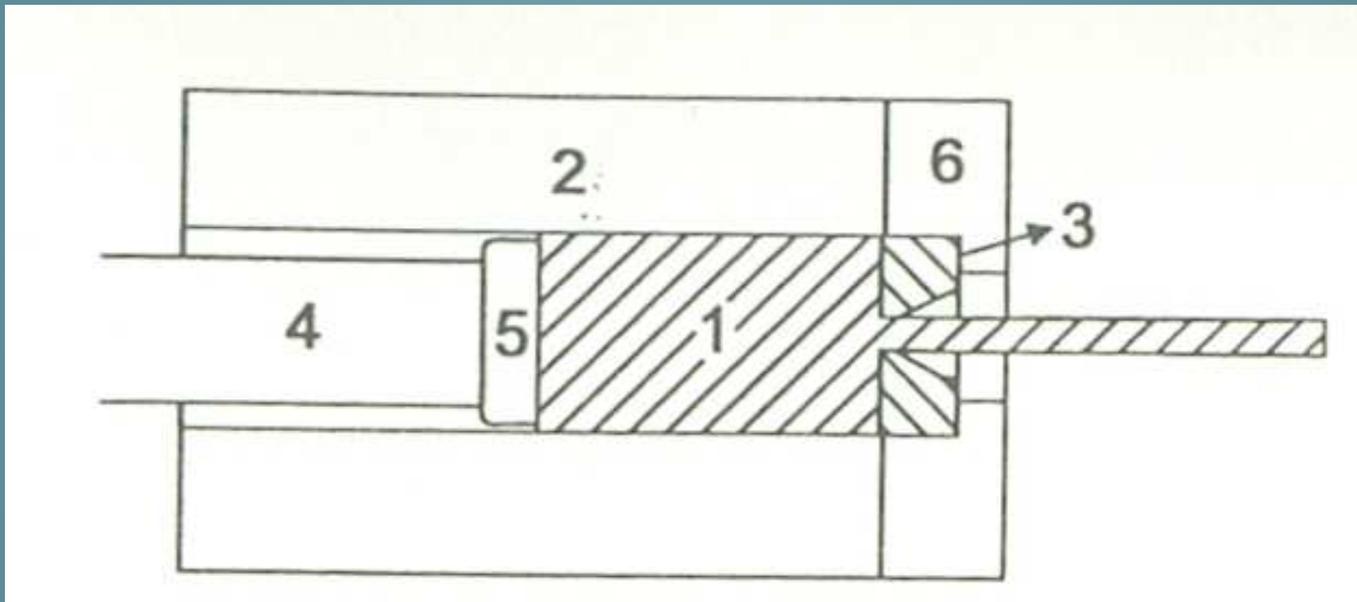
- Inversa

- Hidrostática

# Extrusão direta

- O tarugo é envolvido por um contenedor e empurrado por um pistão contra a matriz de conformação
- Há atrito entre o tarugo e a ferramenta e entre o tarugo e as paredes do contenedor

# Extrusão Direta



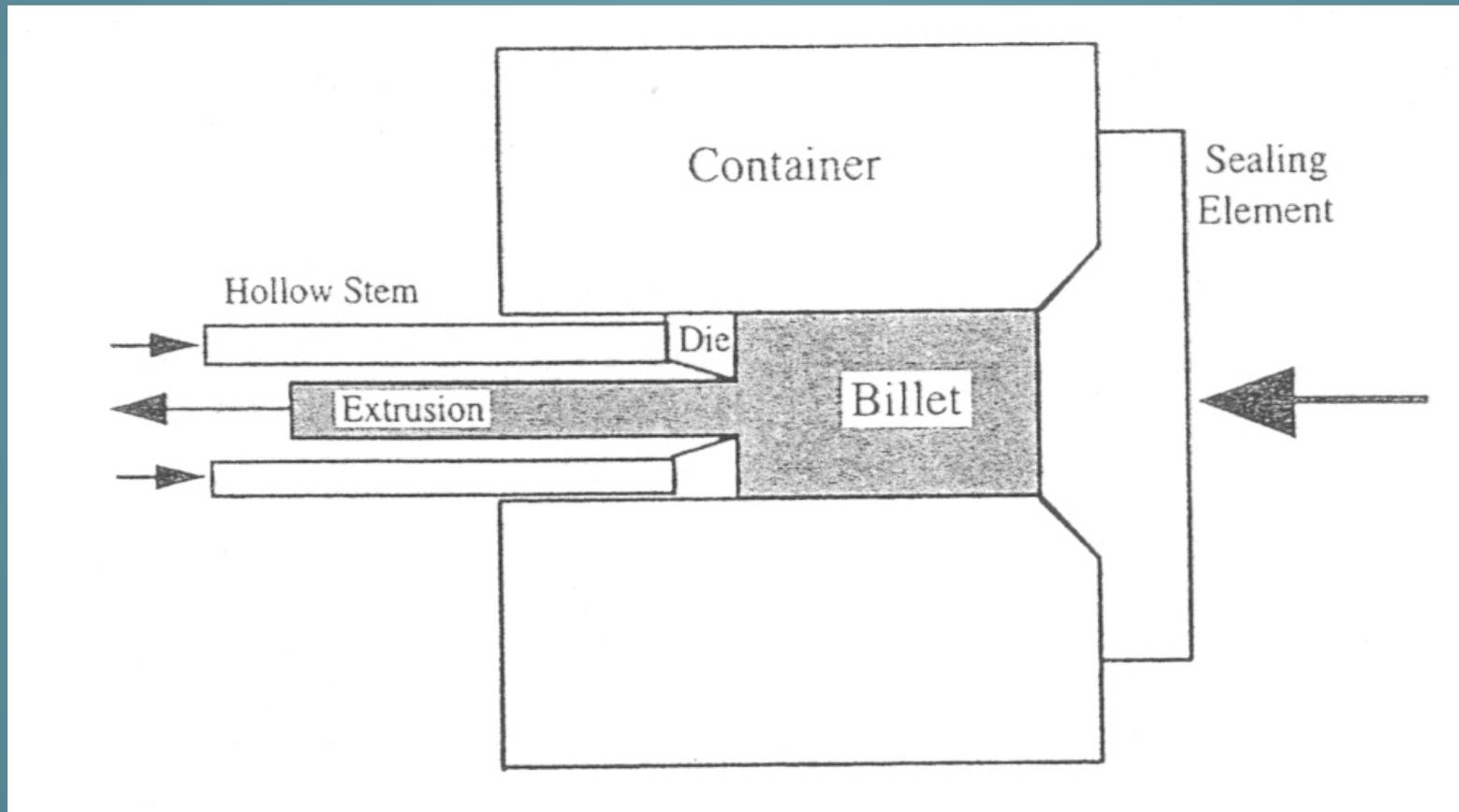
# Extrusão Direta



# Extrusão Indireta (Inversa)

- O tarugo é envolvido por um contenedor e a matriz de conformação é empurrada contra o tarugo
- O atrito entre o tarugo e o contenedor é eliminado pela ausência de movimentação do tarugo

# Extrusão Indireta



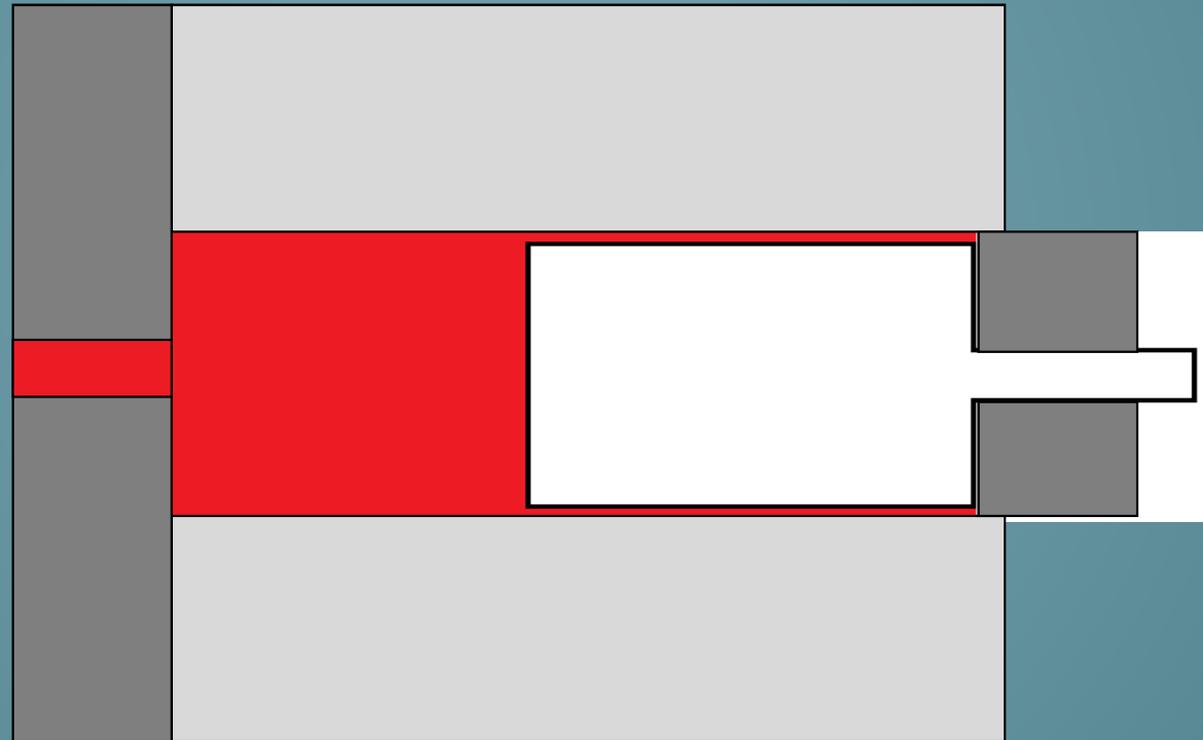
# Extrusão Indireta

- Carga máxima 25-30% menor do que na extrusão inversa
- Pressão de extrusão não é função do comprimento do tarugo
- Ausência de atrito entre o tarugo e o contenedor evita o aquecimento da superfície do tarugo
- Maior vida útil de ferramenta

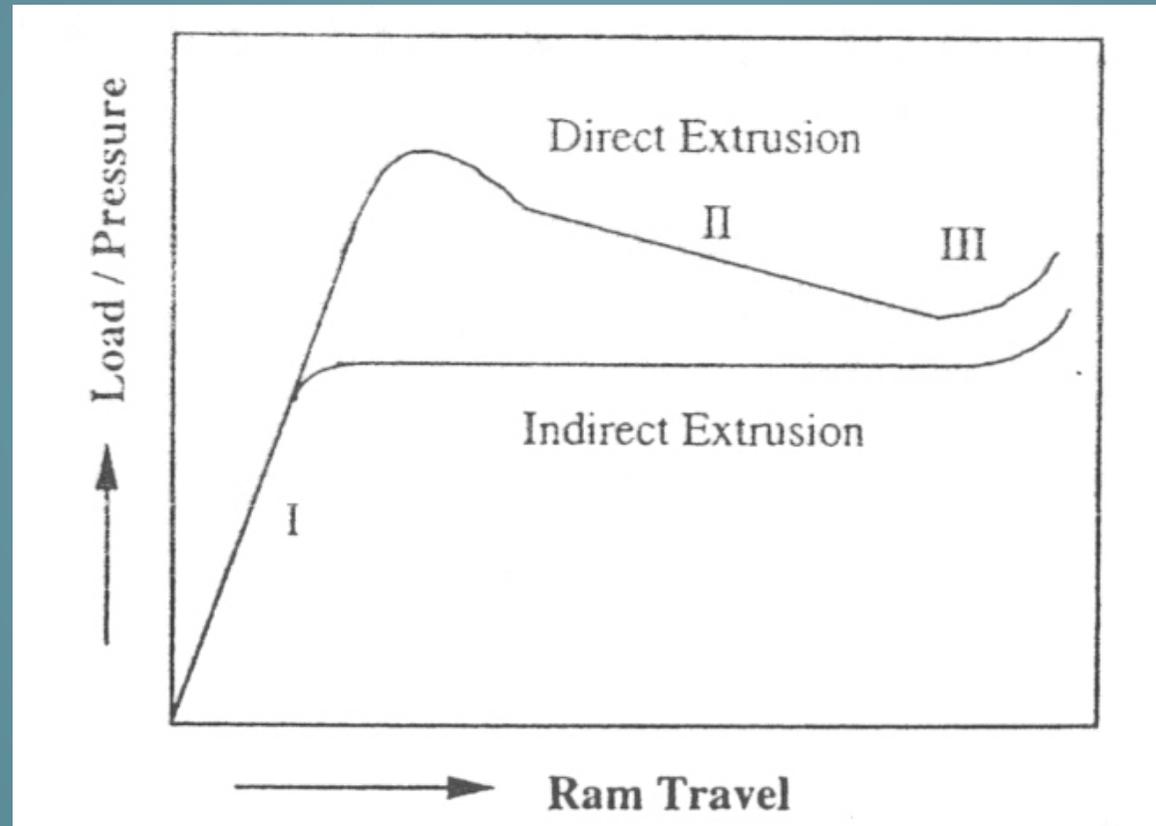
# Extrusão hidrostática

- O tarugo, dentro do contenedor selado, é envolto por fluido hidráulico, e empurrado contra a ferramenta por meio do aumento da pressão do fluido
- O fluido envolve as laterais do tarugo, evitando atrito com o contenedor
- Temperatura de trabalho limitada pela estabilidade do fluido hidráulico

# Extrusão hidrostática



# Evolução dos esforços ao longo do processo



# Extrusão contínua

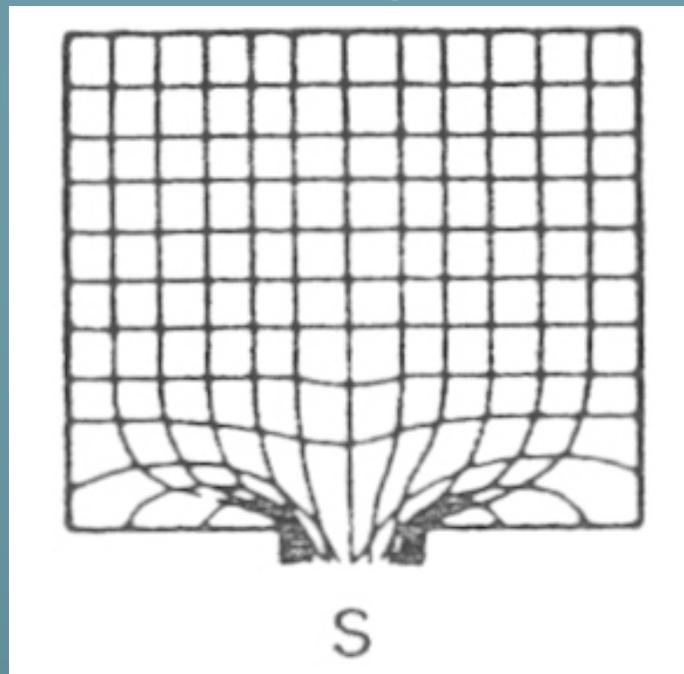
- Tarugos alimentados sequencialmente (tarugo-a-tarugo). Pode ser feita uma solda por contato dos dois tarugos

# Razão de extrusão

- Razão entre a área do tarugo e a área de seção extrudada.
- Maior quanto maior for a redução de área.

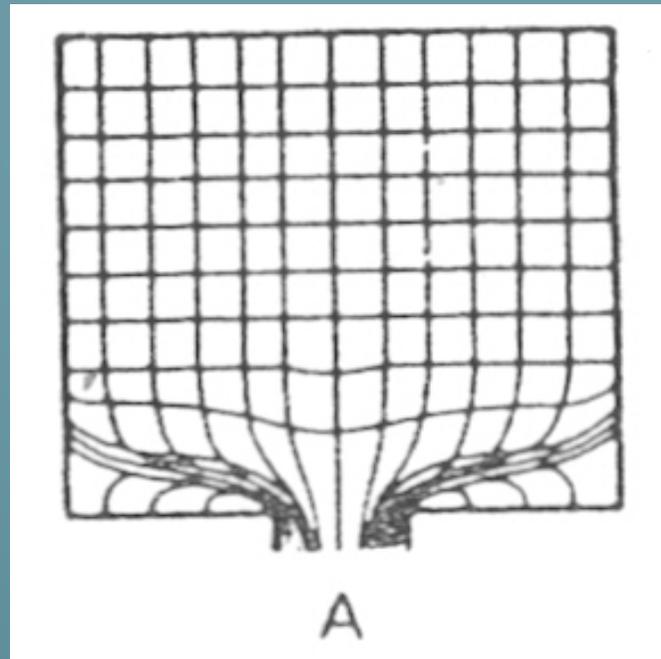
# Padrão de fluxo de material

- Padrão S – Ausência de atrito entre o tarugo e o contenedor e entre o tarugo e a ferramenta.



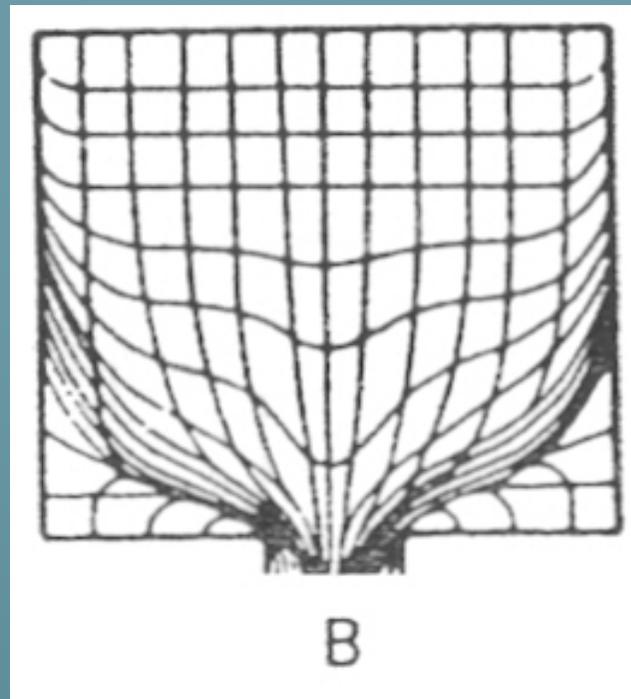
# Padrão de fluxo de material

- Padrão A – Materiais homogêneos; ausência de atrito entre o tarugo e o contenedor



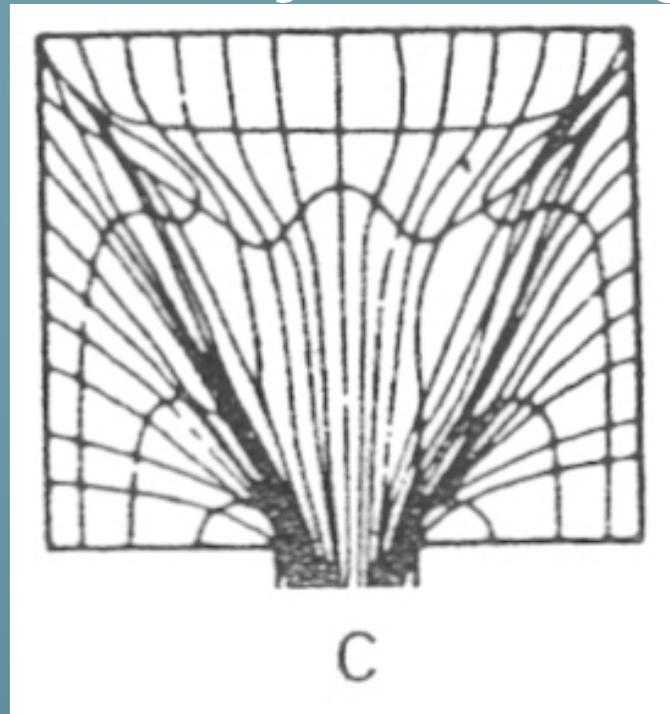
# Padrão de fluxo de material

- Padrão B - Material homogêneo; presença de atrito tarugo/contenedor e tarugo/ferramenta.



# Padrão de fluxo de material

- Padrão C – Material com propriedades heterogêneas; Distribuição heterogênea de temperatura



# Zona morta

- Região do tarugo que praticamente não sofre deformação e não passa pela matriz de conformação
- Definida por um semi-ângulo definido entre a aresta da cavidade da ferramenta e o fim da zona morta
- A extensão da zona morta determina a região do tarugo que não vai ser passada pela ferramenta (talão)

# Zona morta

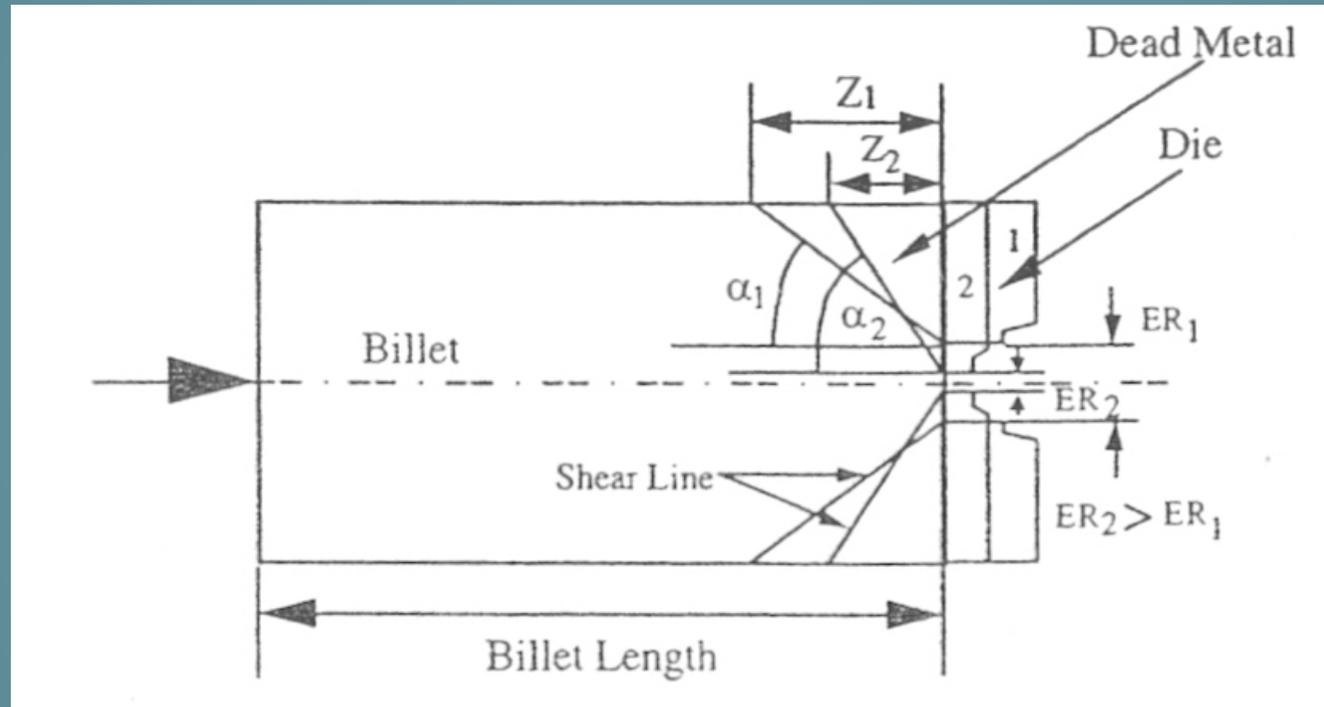
- O material cisalha ao longo da fronteira da zona morta, e esta age como uma superfície de matriz de conformação.

# Zona morta

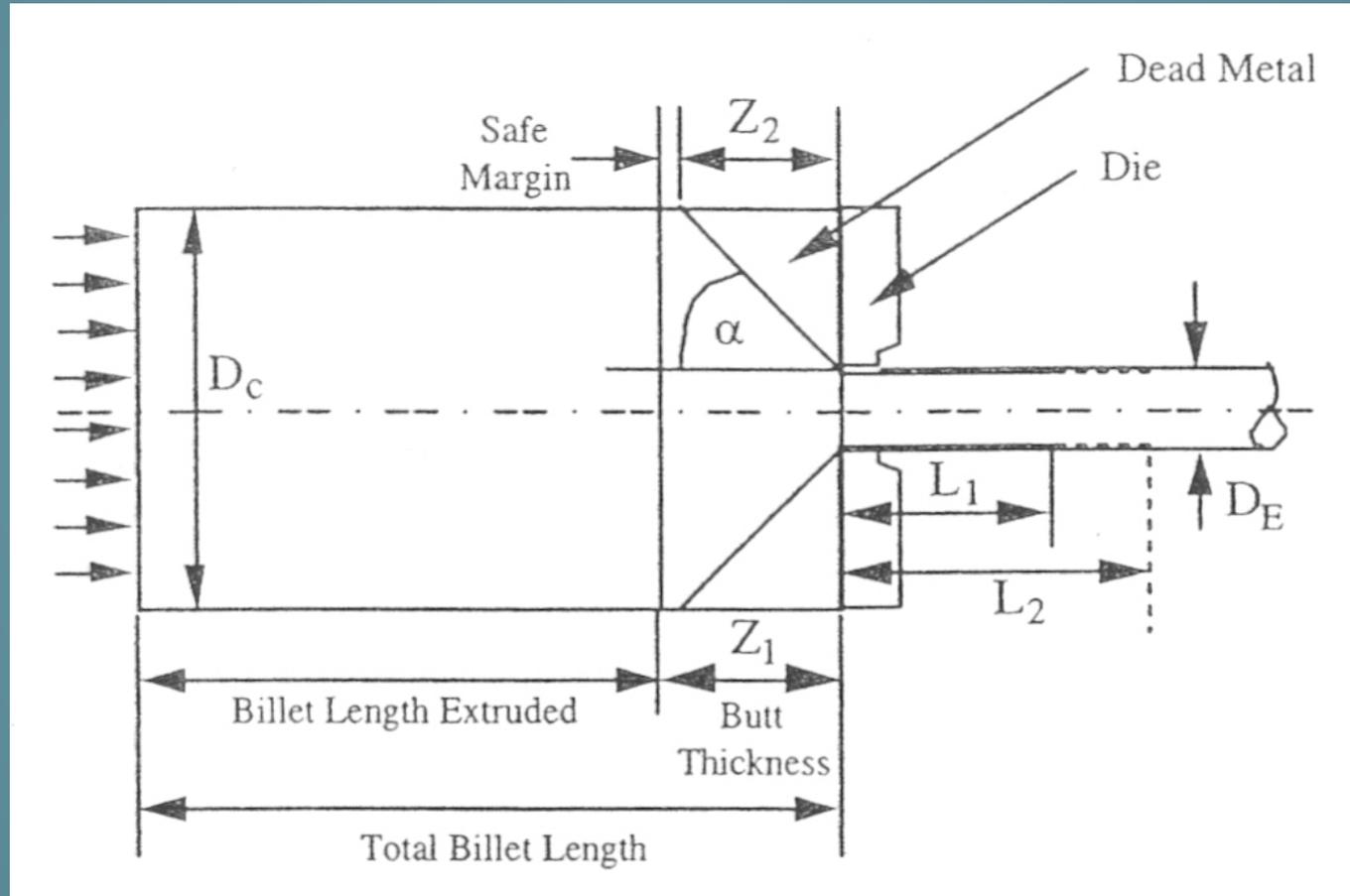
Semi-ângulo da zona morta é função de:

- Razão de extrusão
- Tensão de escoamento do material
- Atrito entre o tarugo e o contenedor
- Atrito entre o tarugo e a ferramenta

# Zona Morta



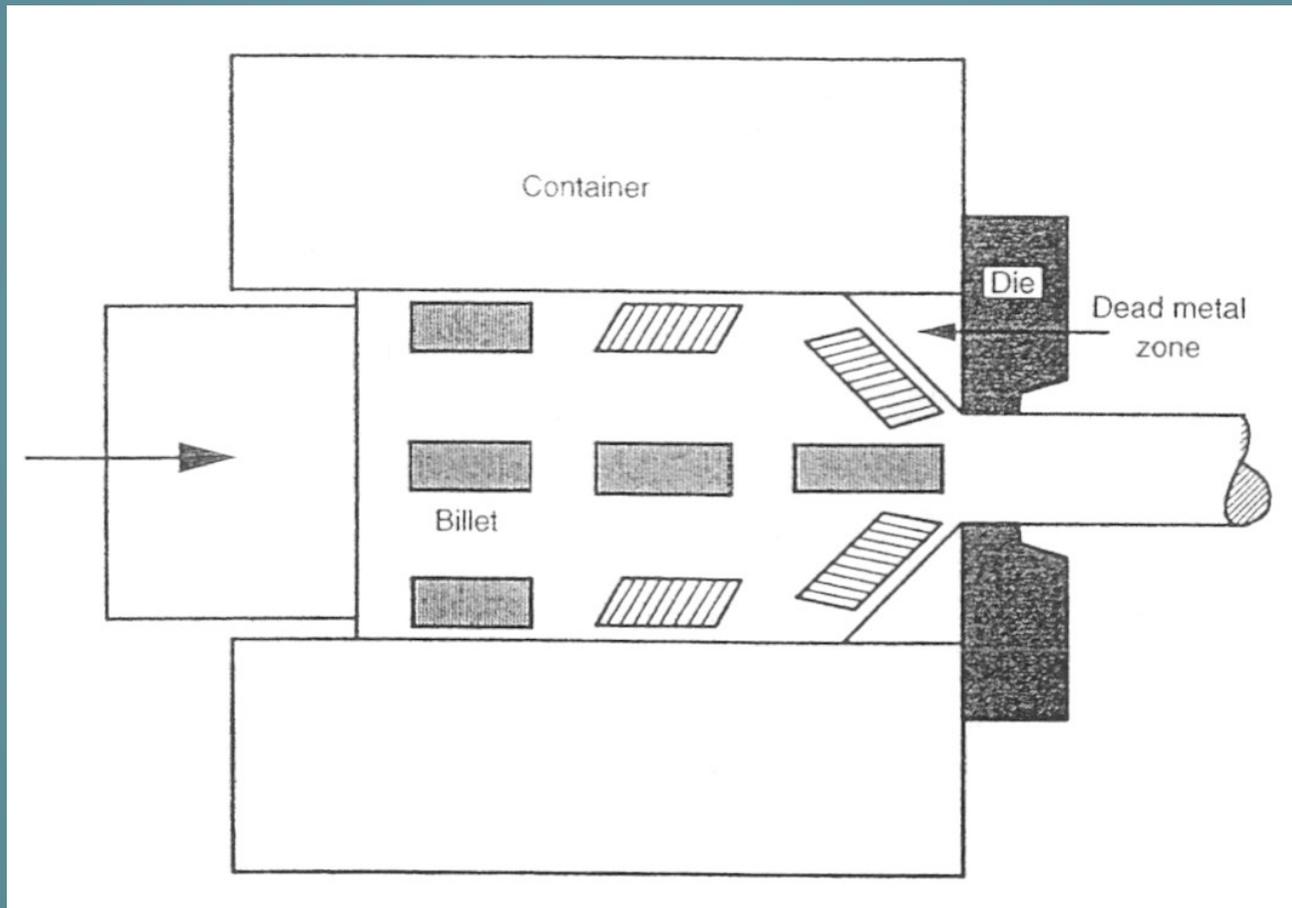
# Zona Morta



# Trabalho redundante

- O centro do tarugo sofre essencialmente alongamento uniforme;
- As regiões próximas da parede e da zona morta sofrem intenso cisalhamento
- Essa energia gasta nesse processo não é aproveitada para a mudança de dimensões

# Trabalho redundante



# Talão

- Industrialmente, cerca de 10-15% do comprimento do tarugo
- A interrupção da extrusão no ponto de segurança impede que óxidos superficiais sejam empurrados para o perfil

# Talão

- Análise do talão fornece informações sobre o processo:
  - Efeito das variáveis de processo na zona morta
  - Efeito das características da matriz na zona morta
  - Determinação da espessura ideal do talão para as condições de processo
  - Características do fluxo de metal

# Perfis Ocos e tubulares

- Como podem ser feitos perfis tubulares por meio de extrusão?

# Extrusão de seções ocas (tubos)

- Extrusão com mandril flutuante
- Extrusão com mandril estacionário
- Extrusão com câmara de soldagem
- Pode ser feita tanto pelo processo direto quanto pelo indireto

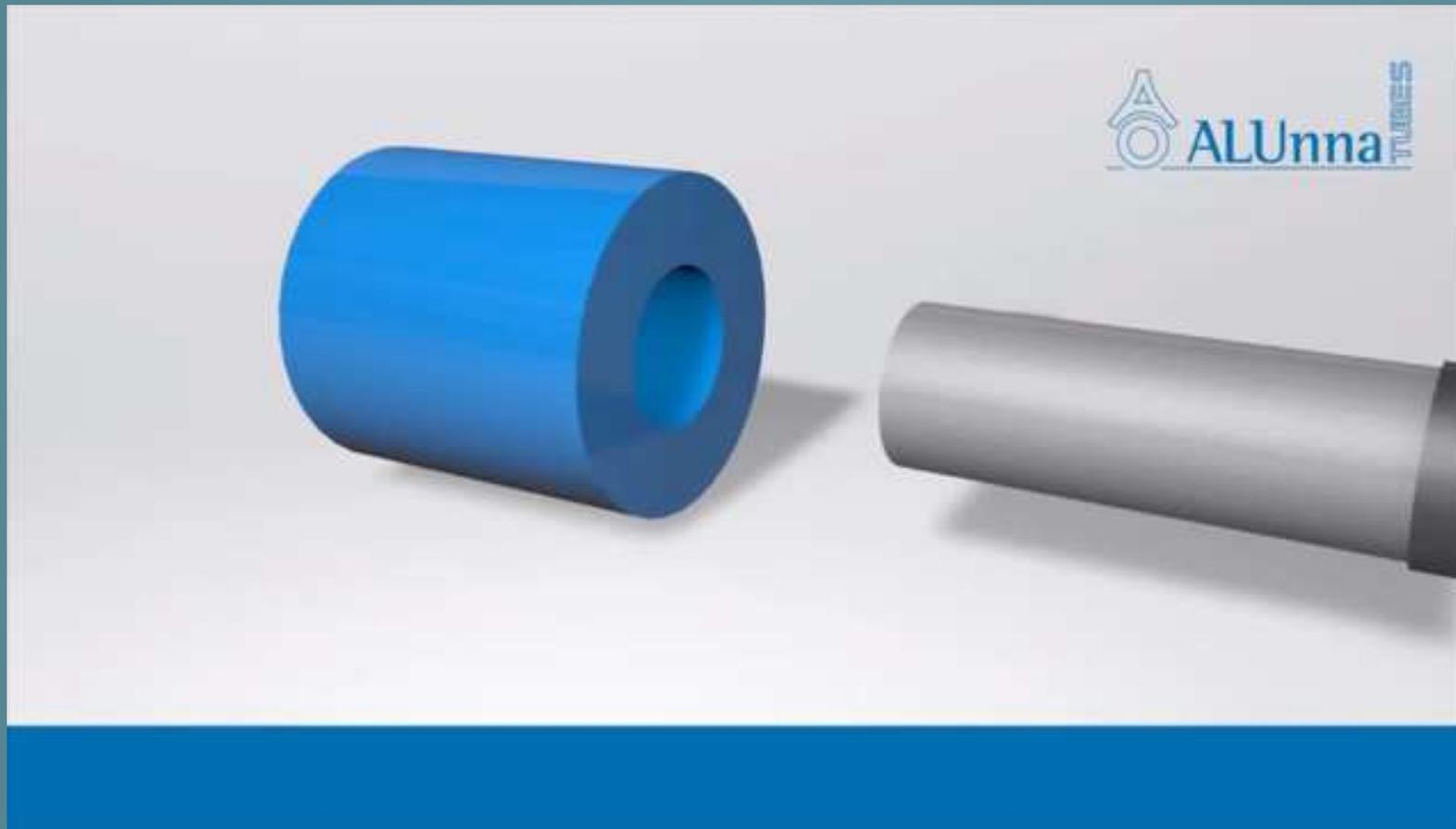
# Extrusão com mandril flutuante

- O mandril é adicionado antes do início da extrusão
- O mandril é mantido no lugar pelo atrito com o tarugo.

# Extrusão com mandril estacionário

- O tarugo pode ser sólido ou já oco
- Se for sólido, precisa ser furado por usinagem ou punção na própria prensa
- O mandril é mantido no lugar por uma haste ligada à parte externa

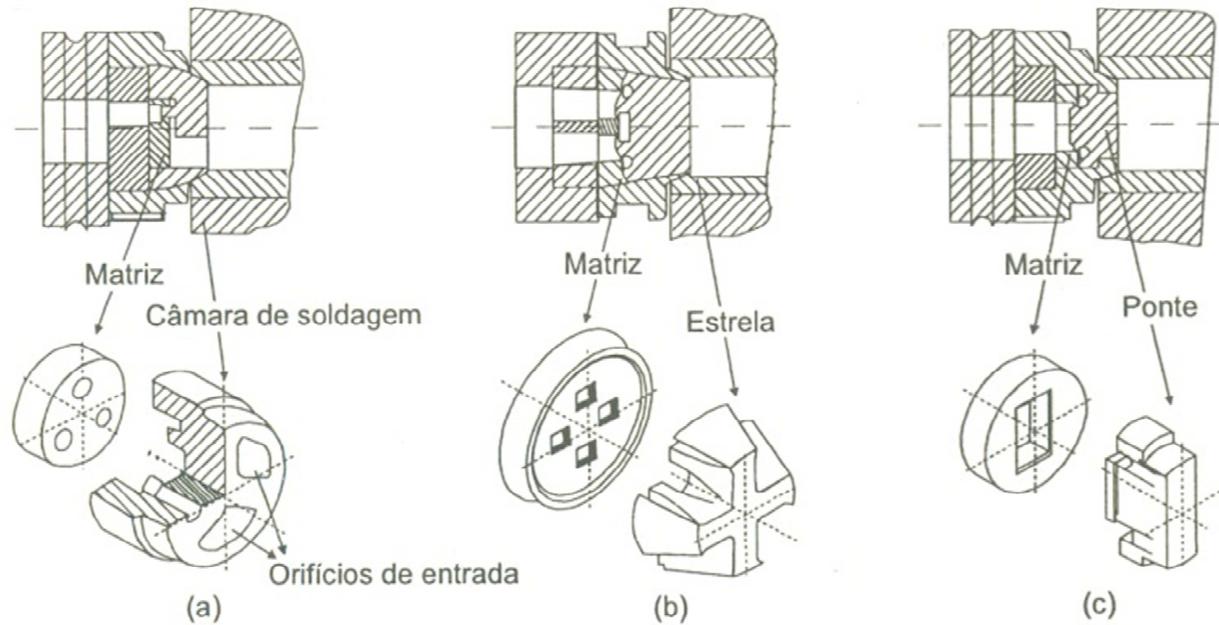
# Perfis ocos e tubulares



# Extrusão com câmara de soldagem

- Tarugo sólido
- A matriz de conformação tem várias cavidades que compõem o perfil do tubo
- Na saída da ferramenta, há uma câmara onde é aplicada pressão ao tubo, soldando-o por contato sob pressão;
- Apenas possível para materiais soldáveis por contato.

# Extrusão com câmara de soldagem



**Figura 13.8** Matrizes com múltiplos orifícios alimentadores usados para extrusão de alumínio: (a) matriz com múltiplos orifícios do tipo “port hole”; (b) matriz com múltiplos orifícios do tipo estrela; e (c) matriz do tipo ponte.<sup>(13-1)</sup>

# Velocidades de extrusão

- Velocidade é altamente influenciada pela temperatura atingida durante o processo

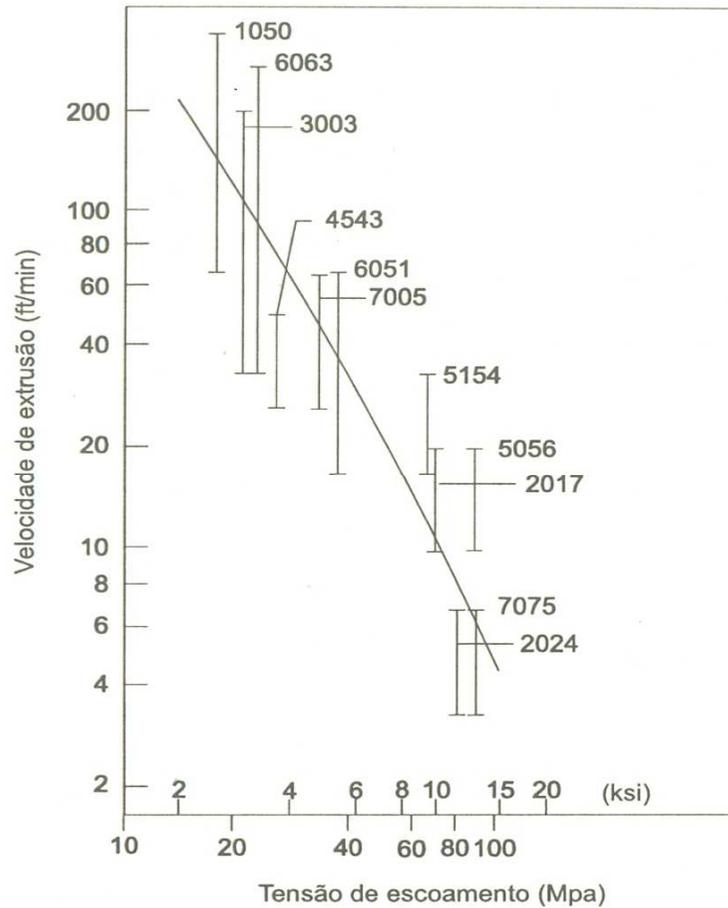
Temperatura:

- Geração de calor pela deformação plástica
- Geração de calor por atrito interno e entre o tarugo partes do sistema
- Transferência de calor dentro do tarugo
- Transferência de calor entre o tarugo e a ferramenta
- Calor transportado com o material já extrudado

# Velocidades de extrusão

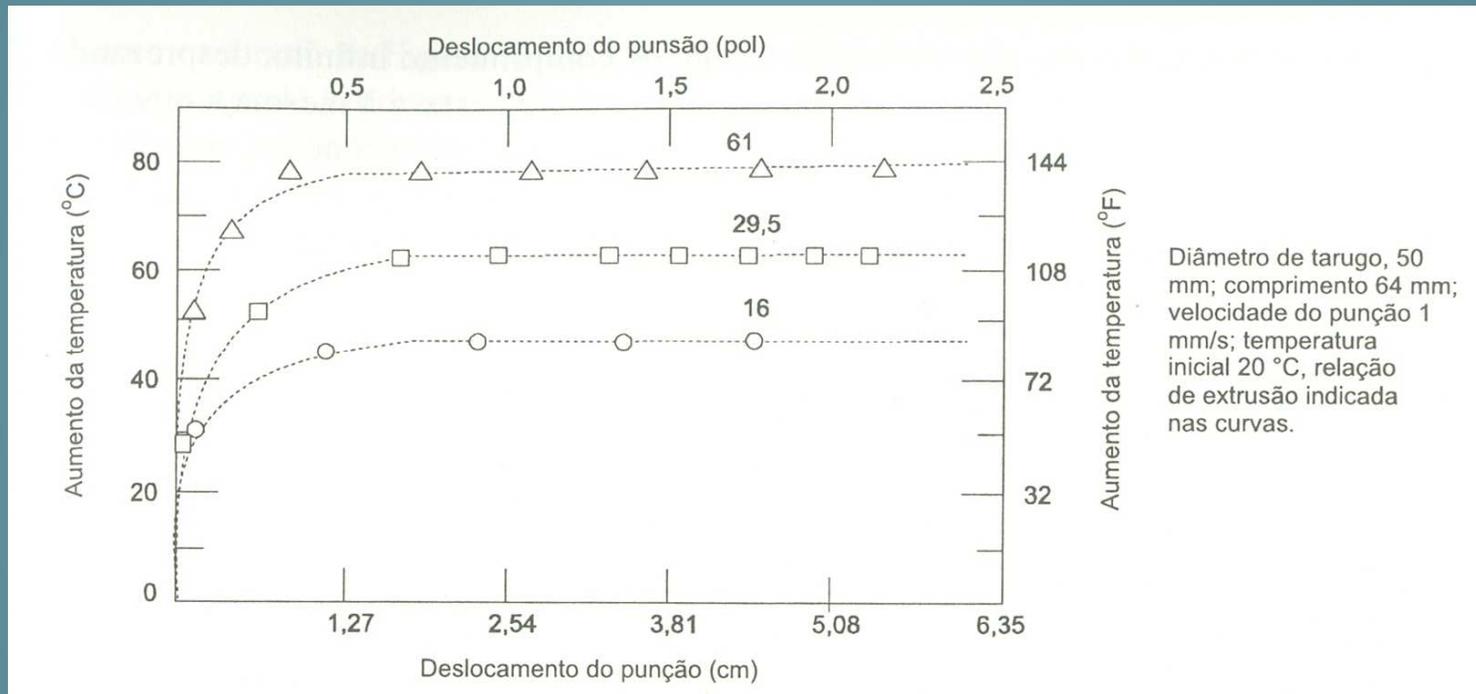
- Idealmente, deve-se aumentar a relação de extrusão e a velocidade, mantendo-se uma pressão de extrusão dentro dos limites seguros do equipamento.
- Tensão de escoamento deve ser mantida baixa, de forma a favorecer a velocidade.

# Velocidades de extrusão

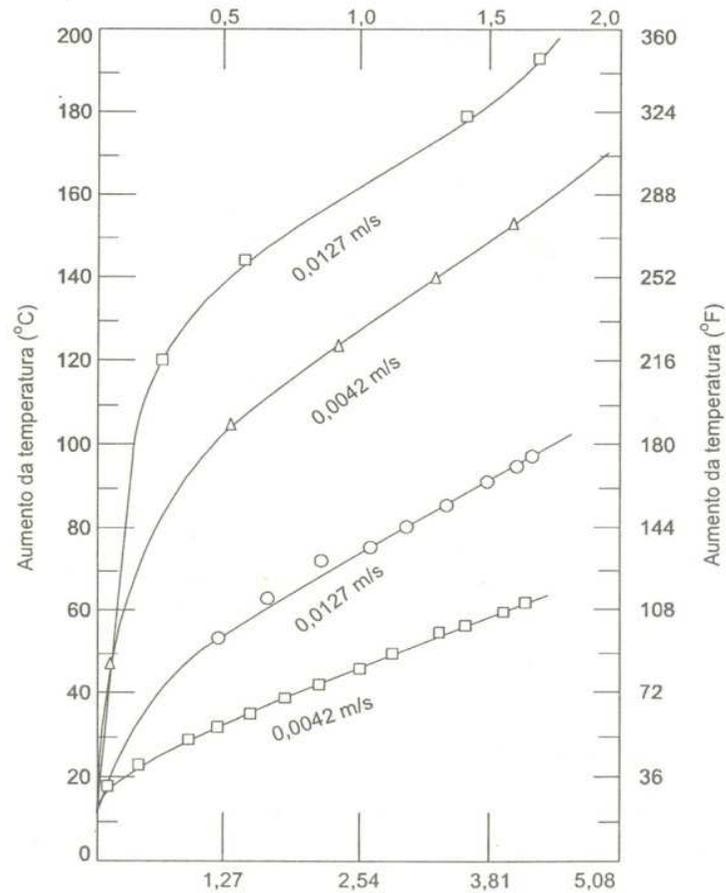


1 ft/min = 0,3048 m/min

# Temperaturas de saída



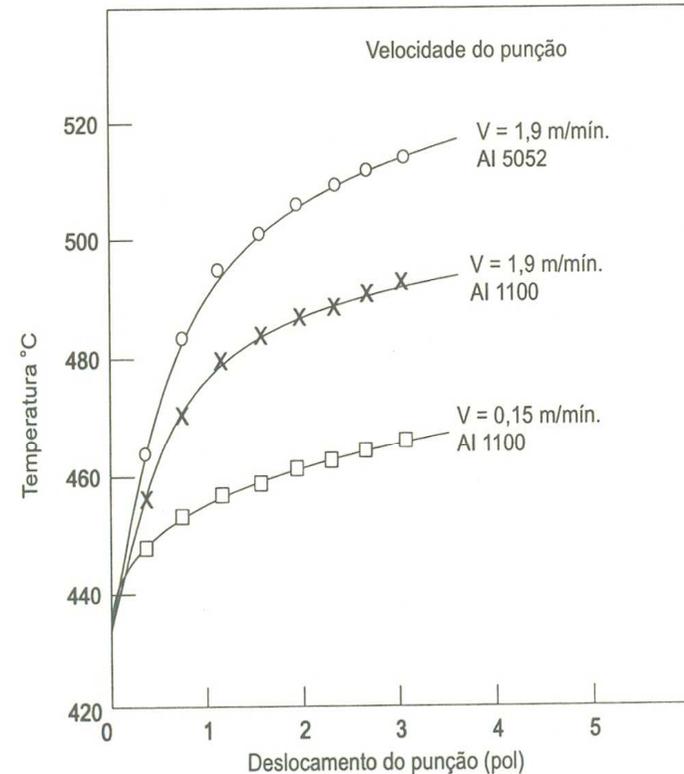
# Velocidade x temperatura



Diâmetro do tarugo, 38 mm;  
comprimento, 51 mm;  
relação de extrusão, 16;  
temperatura inicial 20 °C,  
relação de extrusão indicado  
nas curvas.

# Velocidade x temperatura

- Aumento esperado de temperatura em condições práticas industriais:
  - Materiais duros: até 100°C
  - Materiais moles: até 50°C



Taxa de redução 5:1; diâmetro do tarugo 71,12 mm; comprimento do tarugo 142,24 mm;  
temperatura inicial do tarugo e ferramenta 440 °C

# Velocidades de extrusão x temperatura

- Aumentos excessivos de temperatura podem causar defeitos superficiais no produto extrudado.
- A temperatura na superfície do tarugo tende a ser maior do que no centro
- Temperatura de saída é um fator essencial que influencia a qualidade do produto.

# Velocidades x temperatura

- A velocidade ótima de extrusão pode ser determinada por meio do controle de temperatura de saída
- Medidas de temperatura:
  - Termopares de contato
  - Pirômetros ópticos
- Gradientes de temperatura no tarugo podem ser usados para controle do processo

# Ferramental

- Haste de extrusão (e mandril para seções ocas)
- Contenedor (Câmara)
- Porta-matriz e matriz de conformação
  
- Disco de contato
- Disco raspador

# Ferramental

- Hastes de extrusão e contenedores são iguais independente do material ou perfil extrudado, e são definidos pela geometria do tarugo

# Ferramental

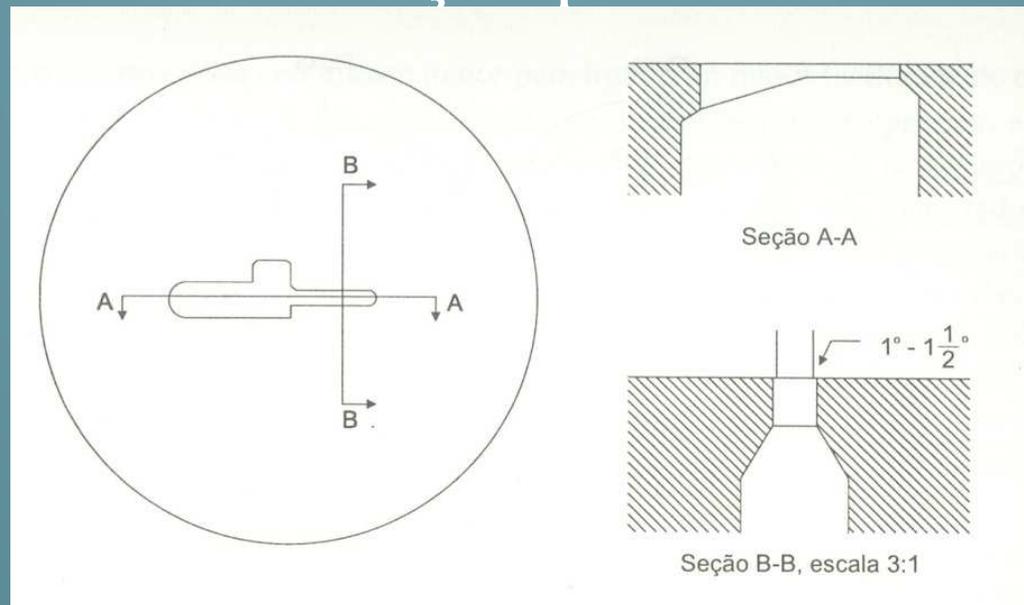
- Matrizes para perfis sólidos têm em geral uma placa de alimentação
  - Avanço suave do material
- Melhor preenchimento da cavidade de conformação

# Ferramental

- Em geometrias complexas, o fluxo de material não é uniforme
- Pode gerar distorções no perfil extrudado, torção
- Compensação feita pelo posicionamento da cavidade na matriz em relação ao eixo do tarugo e pela sua geometria

# Ferramental

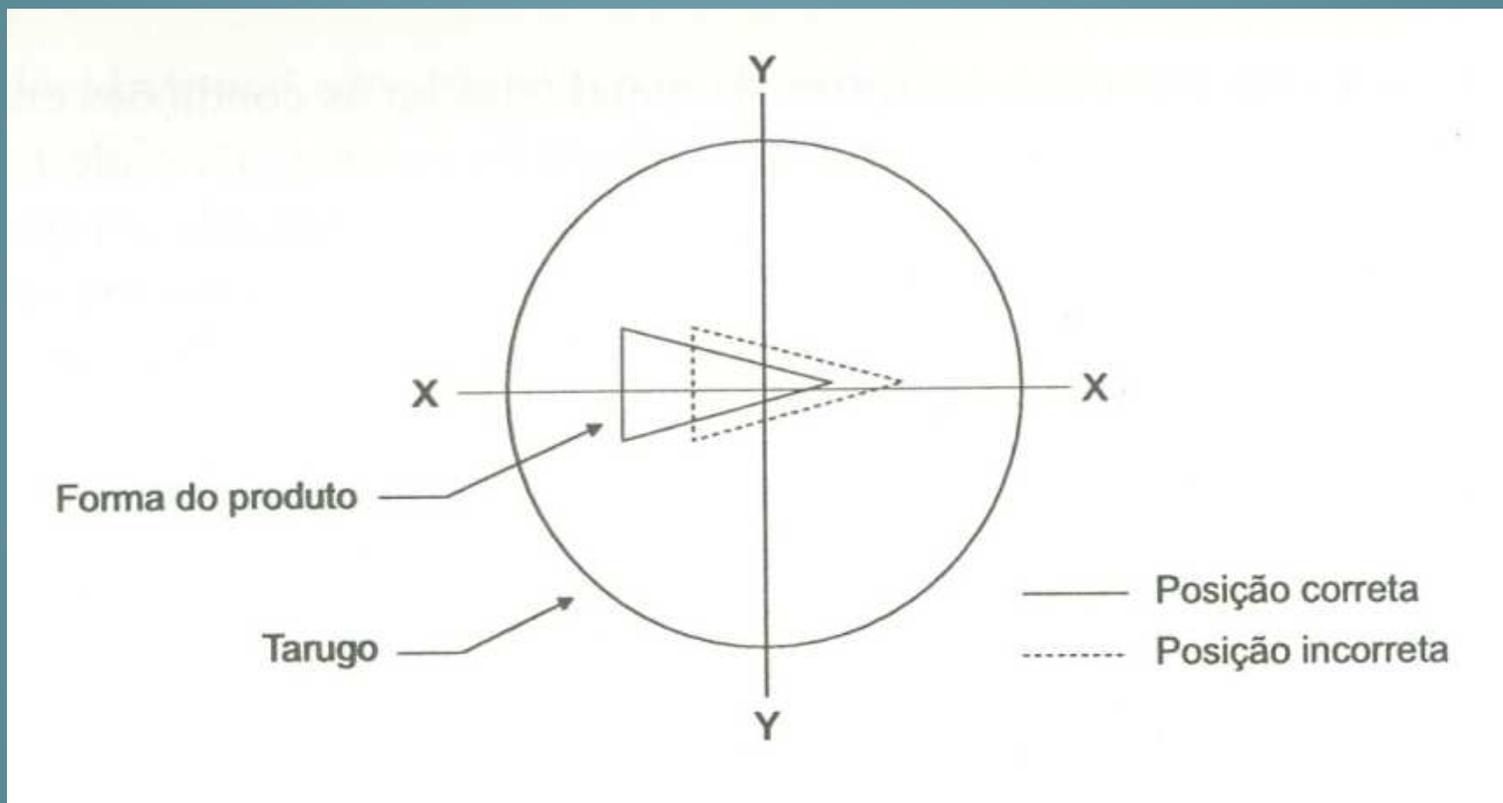
- Parte paralela da matriz tem seu comprimento definido em função da largura da seção
- Partes mais finas têm seção paralela da matriz mais curtas



# Ferramental

- Velocidade do material é maior no centro do tarugo, diminuindo em direção à superfície
- Partes mais finas do perfil tendem a ser movidas para próximo do eixo do tarugo

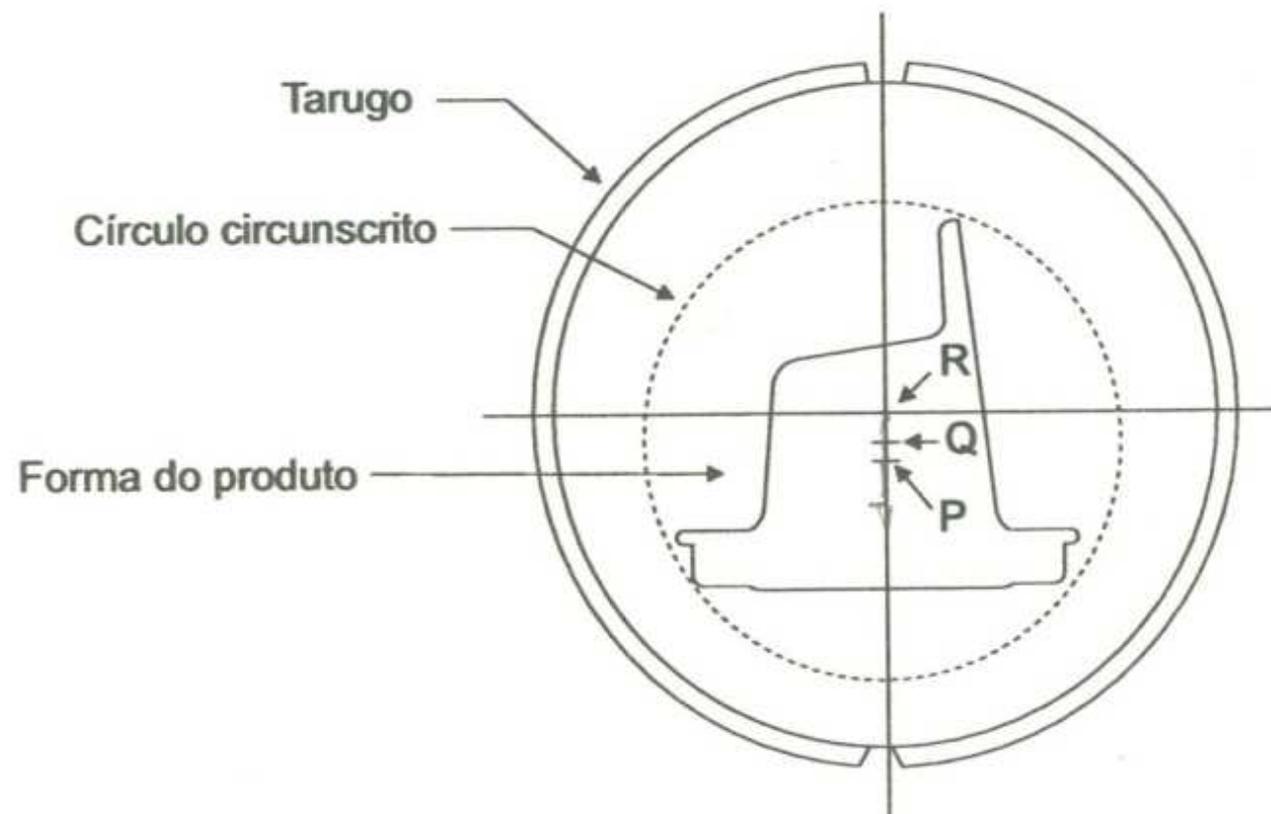
# Ferramental



# Ferramental

- Determinar o centro de gravidade do perfil e o centro do círculo circunscrito
- Se ambos forem muito próximos, posicionar um deles coincidente com o centro do tarugo
- Se estiverem muito distantes, o centro do círculo circunscrito é deslocado do centro do tarugo na direção do centro de gravidade

# Ferramental



# Ferramental

- Material:
  - Matriz de conformação – em geral, aço ferramenta de alto cromo – H11, H12 ou H13.
- Contenedor pode ser de aços menos resistentes

# Ferramental

- Disco de contato
  - Colocado entre o pistão (haste de extrusão) e o tarugo
  - Evita contato do pistão, possibilitando o uso de material menos nobre
  - Cisalha uma casca do tarugo
    - Elimina defeitos superficiais do tarugo do material extrudado

# Ferramental

- Disco raspador
  - Inserido após o término da extrusão, empurra a casca cisalhada do tarugo para fora da câmara

# Fator de forma

- Fator de forma =  $\frac{\text{Perímetro, em mm}}{\text{Peso, em kg/m}}$

# Lubrificação a quente

- Pouco usada em alumínio
- Comum em cobre
- Comum em aços
  
- Lubrificação inadequada pode levar a defeitos superficiais
- Alguns estudos indicam que a lubrificação a quente para extrusão de alumínio é impraticável

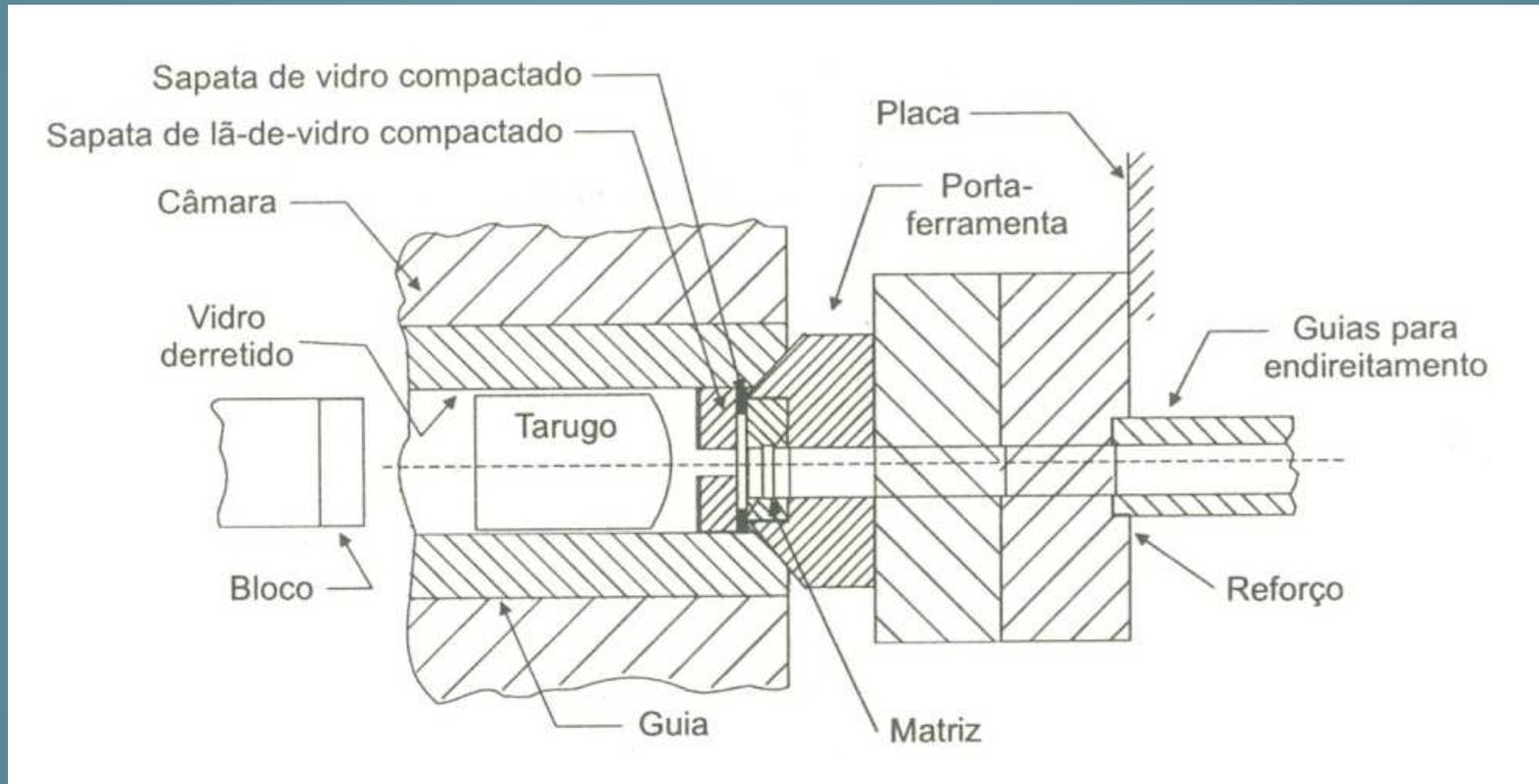
# Lubrificação a quente

- Cobre: óleos e graxas aplicados na matriz quente
- O lubrificante, na verdade, é o resíduo carbonoso resultante da combustão da graxa

# Lubrificação a quente

- Aços e titânio: vidro moído
- Tarugo aquecido é passado em uma cama ou salpicado com pó de vidro
- Sistema de lubrificação posicionado à frente da ferramenta.
- Vidro ajuda a isolar termicamente o ferramental

# Lubrificação a quente



# Temperaturas de trabalho

- Latão – 700°C
- Cobre – 780°C
- Aços – 980-1250°C
- Alumínio 400-500°C

# Equipamentos

- Prensa hidráulica

Capacidades:

Cobre – 3000-10000 toneladas

Horizontal

3 ou 4 colunas

# Periféricos

- Forno de aquecimento de tarugos
- Sistema de manuseio de tarugos quentes
- Mesa de saída/enrolador
- Esteira e ponte de carga para transporte

# Pressão de extrusão

Atrito na matriz

Deformação homogênea

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

Atrito o contenedor

Deformação cisalhante (trabalho redundante)

# Pressão de extrusão

- Atrito na câmara de extrusão

$$P_{fc} = 2\pi r_o L \tau_c$$

$$(\tau_c = m_c \bar{\sigma} / \sqrt{3}).$$

$0,1 < m_c < 0,4$ ; tipicamente:  $m_c = 0,25$

# Pressão de extrusão

- Atrito na ferramenta

$$P_{fd} = \frac{\tau \ln(A_o/A_I)}{\text{sen}\alpha \cos \alpha} \pi r_o^2$$

# Pressão de extrusão

- Deformação cisalhante

$$P_{ds} = 2\pi r_o^2 \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \left( \frac{\alpha}{\text{sen}^2 \alpha} - \cot \alpha \right)$$

# Pressão de extrusão

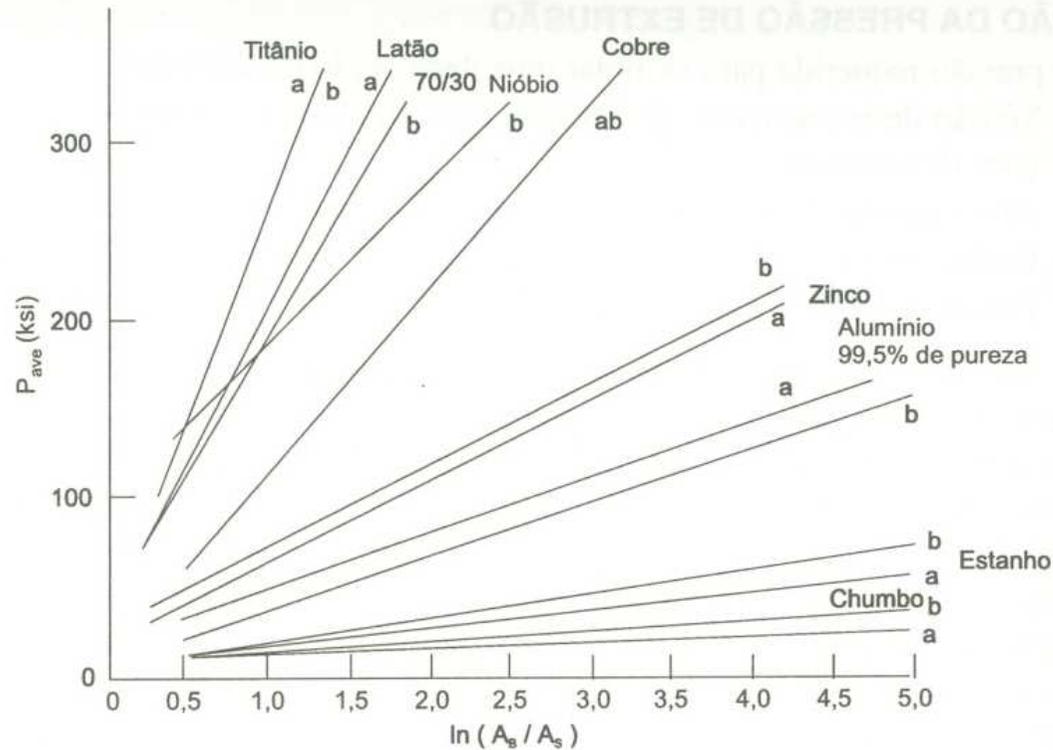
- Deformação homogênea

$$P_{dh} = \bar{\sigma} \ln(A_0/A_1) \pi r_0^2$$

# Pressão de Extrusão

$$P = 2\pi r_o L \tau_c + \pi r_o^2 \bar{\sigma} \ln(A_o/A_1) + \pi r_o^2 \tau_d \ln(A_o/A_1) / \sin \alpha \cos \alpha + 2\pi r_o^2 \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \left( \frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right)$$

# Pressão de extrusão



**Figura 13.22** Valores máximos de pressão requerida para extrusão de barras sobre uma faixa de valores de redução em diferentes metais: (a) velocidade de punção variando entre 10,16 e 139,7 mm/min, (b) altas velocidades de punção variando entre 33 e 398,8 mm/s.