

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

Análise numérica dos processos de deformação

Variáveis de entrada

- Material
- Ferramenta
- Lubrificação
- Mecanismos de deformação
- Características do produto final
- Equipamento
- Condições da fábrica

A chave para o sucesso na operação de conformação é o entendimento do fluxo de material.

Variáveis de Processo

MATERIAL DO TARUGO

- Tensão de escoamento como função da deformação, taxa de deformação, temperatura e microestrutura (equações constitutivas)
- Conformabilidade como função da deformação, da taxa de deformação, temperatura e microestrutura (curvas limites de conformação)
- Condições superficiais
- Propriedades termo-físicas
- Condições iniciais (composição química, temperatura, estados anteriores da microestrutura)
- Efeitos de mudanças em microestrutura e composição química na tensão de escoamento e conformabilidade

Variáveis de Processo

FERRAMENTAL

- Geometria das ferramentas
- Condições superficiais
- Material/dureza/tratamento térmico
- Temperatura
- Rigidez e precisão

Variáveis de Processo

CONDIÇÕES NA INTERFACE FERRAMENTA-PEÇA

- Tipo de lubrificante e temperatura de trabalho
- Isolação e características de resfriamento na camada de interface
- Lubrificação e tensão de cisalhamento ao atrito
- Características relacionadas à aplicação e remoção do lubrificante

Variáveis de Processo

ZONA DE DEFORMAÇÃO

- Mecanismo de deformação, modelo usado para análise
- Fluxo de metal, velocidade, taxa de deformação, deformação (cinemática)
- Tensões (variação durante a deformação)
- Temperaturas (geração e transferência de calor)

Variáveis de Processo

PRODUTO

- Geometria
- Precisão dimensional/tolerâncias
- Acabamento superficial
- Microestrutura, propriedades mecânicas e metalúrgicas

Variáveis de Processo

AMBIENTE

- Capacidade da mão-de-obra disponível
- Poluição do ar e sonora e resíduos líquidos
- Controle da produção e equipamentos disponíveis na fábrica

Variáveis de Processo

EQUIPAMENTO USADO

- Velocidade/razão de produção
- Força/capacidade de conversão de energia
- Rigidez e precisão

Material

- Tensões de escoamento em várias direções são as variáveis mais importantes na análise de um processo de conformação
- Testes mecânicos: tensão, compressão, torsão.
- Deve-se considerar o aumento de temperatura ao longo dos testes.

Conformabilidade

- Capacidade do material de se conformar sem ruptura
 - Condições de processo
 - Temperatura
 - Taxa de deformação
 - Histórico de deformação
 - Condições do material
 - Composição química
 - Defeitos
 - Microestrutura

Atrito e lubrificação

- Expressa em função do coeficiente de atrito μ ou do fator de cisalhamento de atrito, m

$$\tau = \sigma_n \mu$$

ou

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

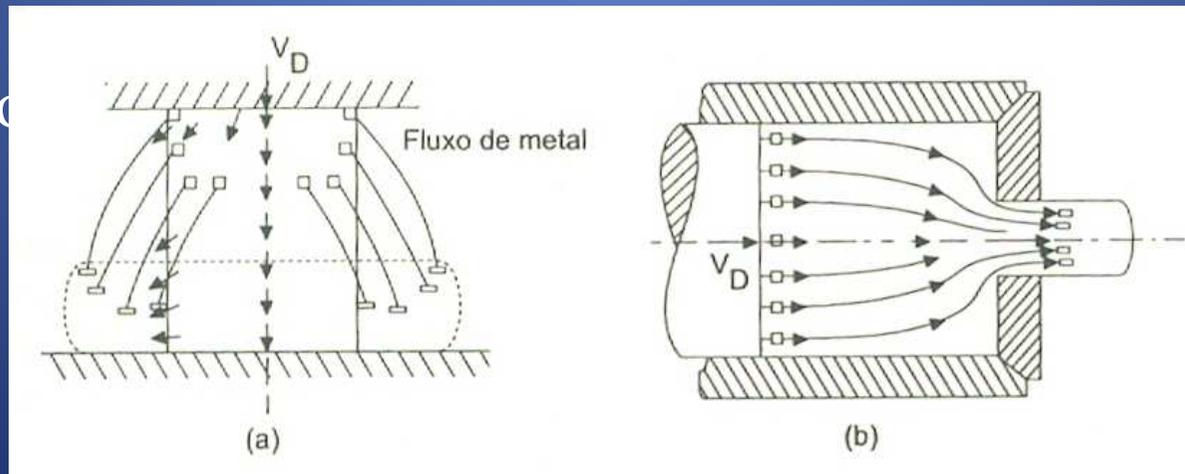
- Fatores que influenciam o fluxo de material

- Geometria da ferramenta

- Atrito

- Sobremetal

- Co



o

Deformação plástica

- Objetivos da análise: determinar
 - Fluxo de metal
 - Temperaturas e transferência de calor
 - Variações locais de propriedades
 - Tensões e carga necessárias à conformação

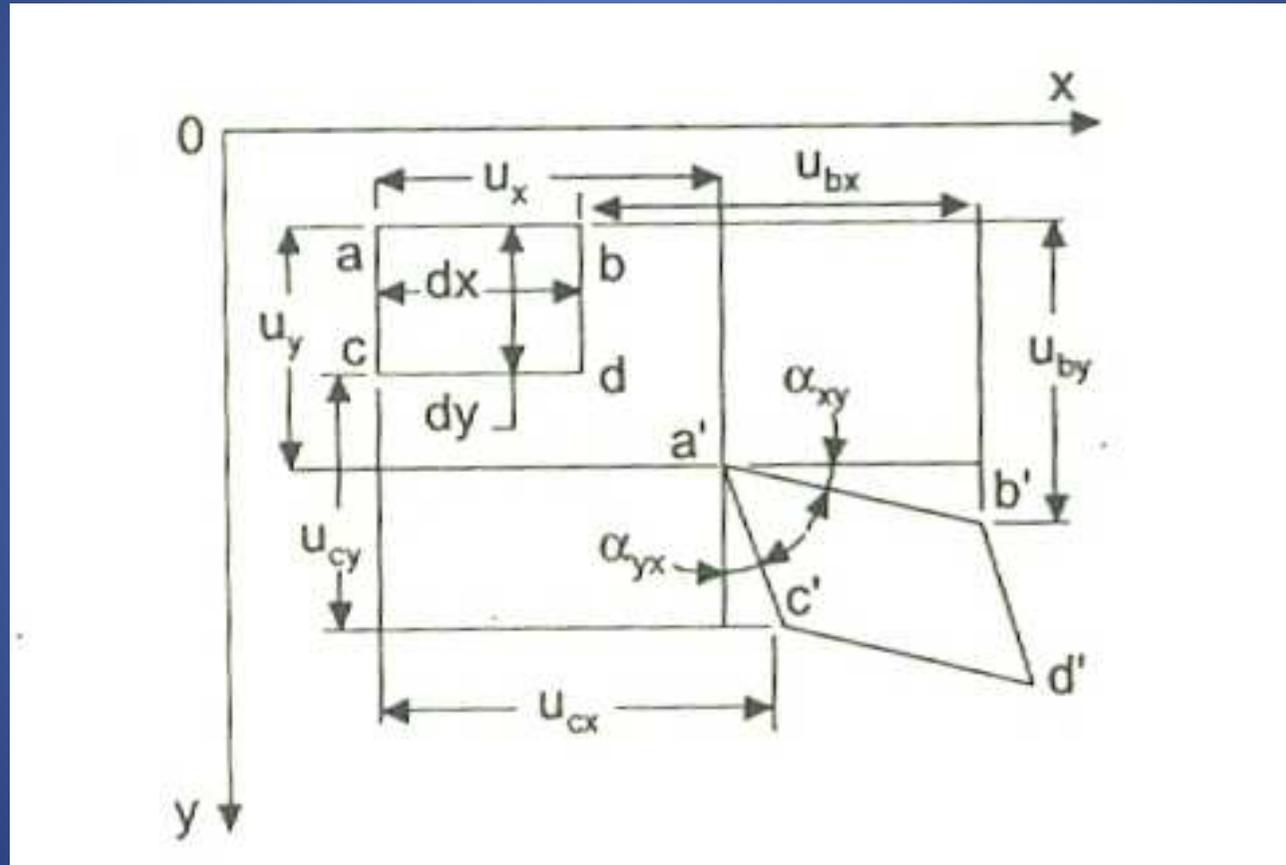
Simplificações

- Deformações elásticas são negligenciadas
- Material é considerado meio contínuo
- São usados dados extraídos de ensaios de tração e compressão
- Anisotropia é negligenciada
- Volume não se altera
- Atrito é expresso simplificadamente

Deformação

- Elementos de volume têm seu deslocamento descrito por um campo de velocidades
 - Simplificação: campo de velocidades independe das propriedades do material

Deformação



Deformação

$$u_{bx} = u_x + \frac{\partial u_x}{\partial x} dx$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}; \epsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}$$

$$\epsilon_x = (u_{bx} - u_x) / dx$$

$$\epsilon_x = \left(u_x + \frac{\partial u_x}{\partial x} dx - u_x \right) / dx = \frac{\partial u_x}{\partial x}$$

Deformação

$$\alpha_{xy} = (u_{by} - u_y) / (u_{bx} + dx - u_x)$$

$$u_{by} = u_y + \frac{\partial u_y}{\partial y} dy$$

$$\alpha_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x}$$

$$\alpha_{yx} = \frac{\partial u_x}{\partial y}$$

$$\gamma_{xy} = \alpha_{xy} + \alpha_{yx} = \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y}$$

Deformação

- Velocidades e taxa de deformação

$$v_x = \frac{\partial u_x}{\partial t}; v_y = \frac{\partial u_y}{\partial t}; v_z = \frac{\partial u_z}{\partial t}$$

$$\dot{\epsilon}_x = \frac{\partial \epsilon_x}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial (u_x)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial (u_x)}{\partial t} = \frac{\partial v_x}{\partial x}$$

Deformação

- Velocidades e taxa de deformação

$$\dot{\epsilon}_x = \frac{\partial v_x}{\partial x}; \dot{\epsilon}_y = \frac{\partial v_y}{\partial y}; \dot{\epsilon}_z = \frac{\partial v_z}{\partial z}$$

$$\dot{\gamma}_{xy} = \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \quad /$$

$$\dot{\gamma}_{yz} = \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \quad /$$

$$\dot{\gamma}_{xz} = \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \quad /$$

Estado de tensão simples

- Tensão de escoamento depende de
 - Fatores não relacionados ao processo de deformação – composição, microestrutura, fases presentes, tamanho de grão, segregação
 - Fatores relacionados ao processo de deformação - temperatura de deformação, grau de deformação e taxa de deformação
- Deve ser determinada para as condições em que se dará o processamento do material.

Ensaio de tração

- Propriedades obtidas por esse método são aplicáveis a uma faixa pequena de deformações
- É necessária uma correção para a tensão verdadeira após a estrição

$$\sigma_s = \bar{\sigma} = \frac{L}{\pi r^2} \left[\left(1 + \frac{2R}{r} \right) \ln \left(1 + \frac{r}{2R} \right) \right]^{-1}$$

Ensaaios de compressão

- Usado para determinar tensão de escoamento em diversas temperaturas e taxas de deformação diferentes
- Corpo de prova e estampo (parte da máquina que aplica a carga) são mantidos à mesma temperatura.

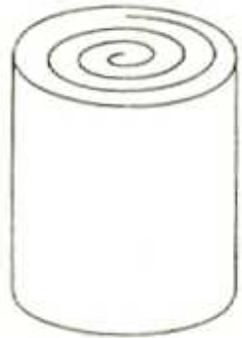
Ensaio de compressão

- Amostras cilíndricas devem ser recalçadas sem que sofram abaulamento da superfície.
 - Lubrificação adequada evita o abaulamento
 - Teflon ou óleo lubrificante para ensaio à temperatura ambiente
 - Testes a quente:
 - Grafite dissolvido em óleo (ligas de Al)
 - Vidro moído (aços e ligas de alta resistência mecânica)

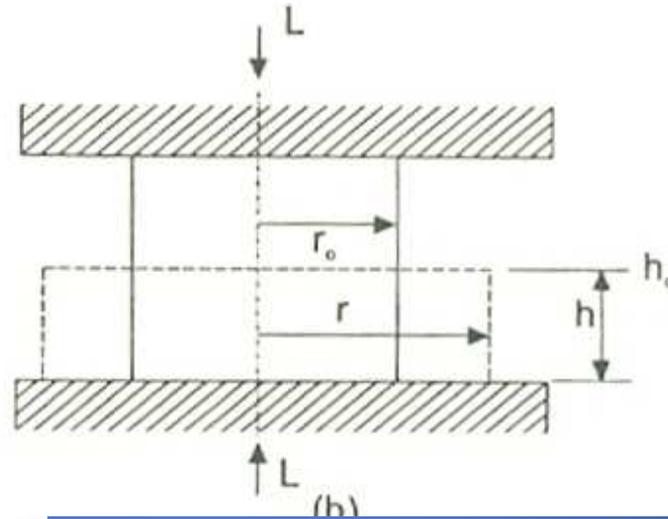
Ensaio de compressão

- Amostra costuma se deformar até 50% (em redução de altura) sem sofrer abaulamento
- Teste de tração em altas taxas de deformação requer correções devido à estricção
- Essa vantagem em relação à tração faz que os testes de compressão sejam largamente utilizados

Ensaio de compressão



(a)



(b)

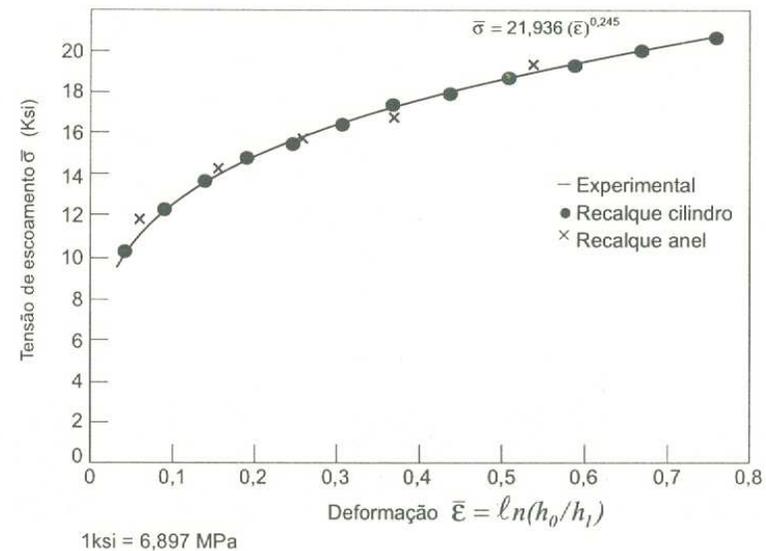
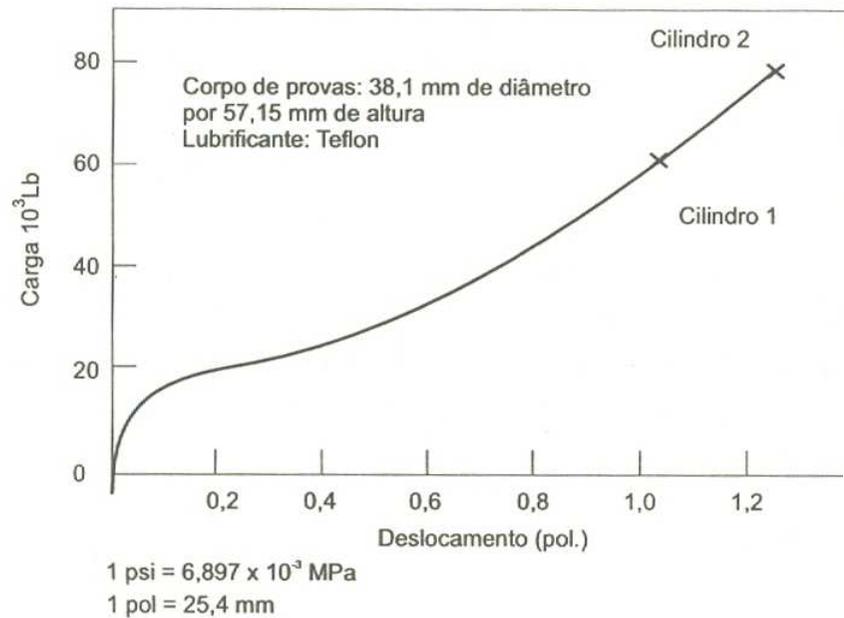
$$\bar{\varepsilon} = \ln\left(\frac{h_0}{h}\right) = \ln\left(\frac{A}{A_0}\right)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{L}{A}$$

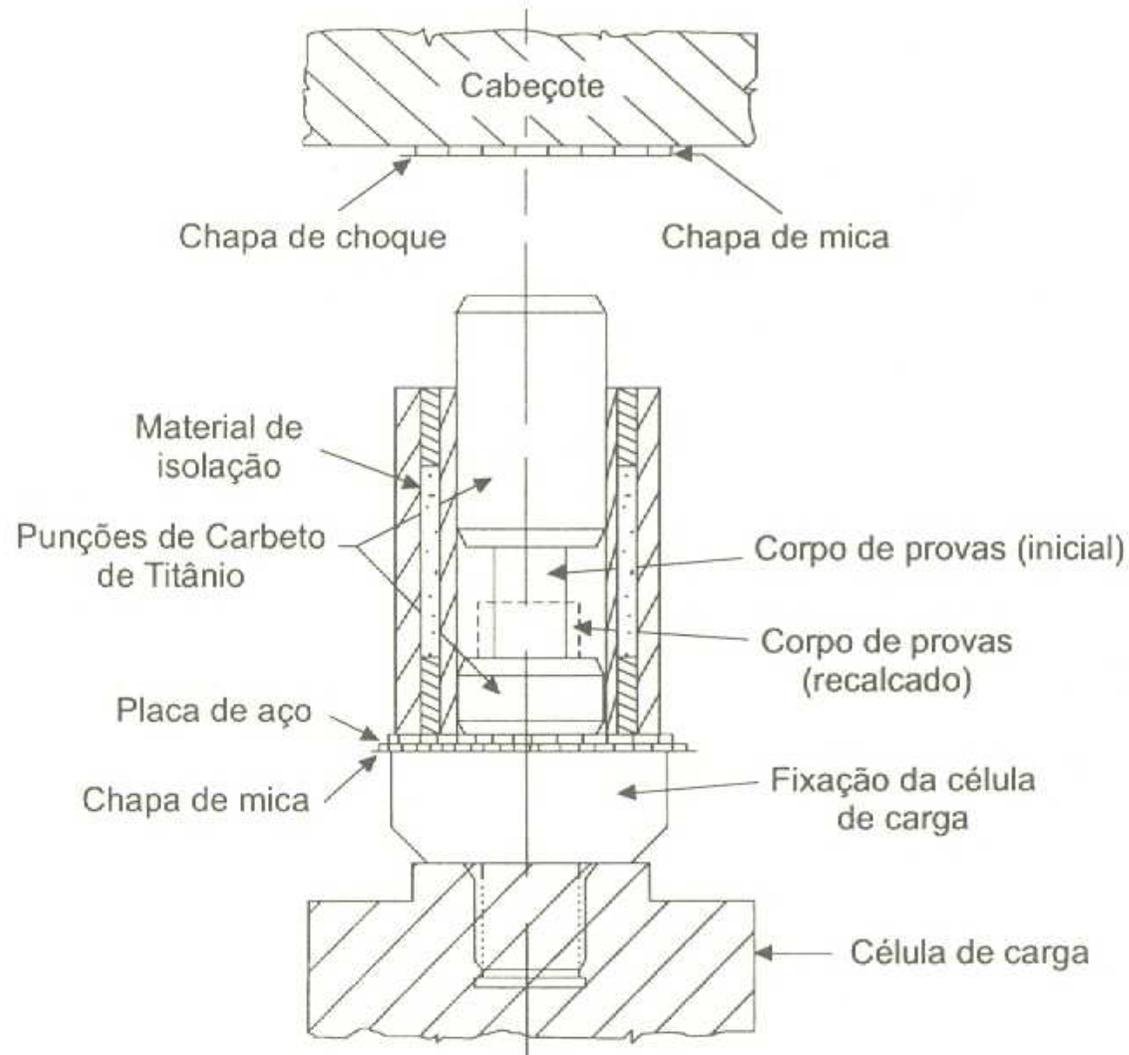
$$A = A_0 e^{\bar{\varepsilon}}$$

$$\dot{\bar{\varepsilon}} = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dt} = \frac{dh}{h dt} = \frac{v}{h}$$

Ensaio de compressão



Ensaio de compressão



Ensaio de compressão

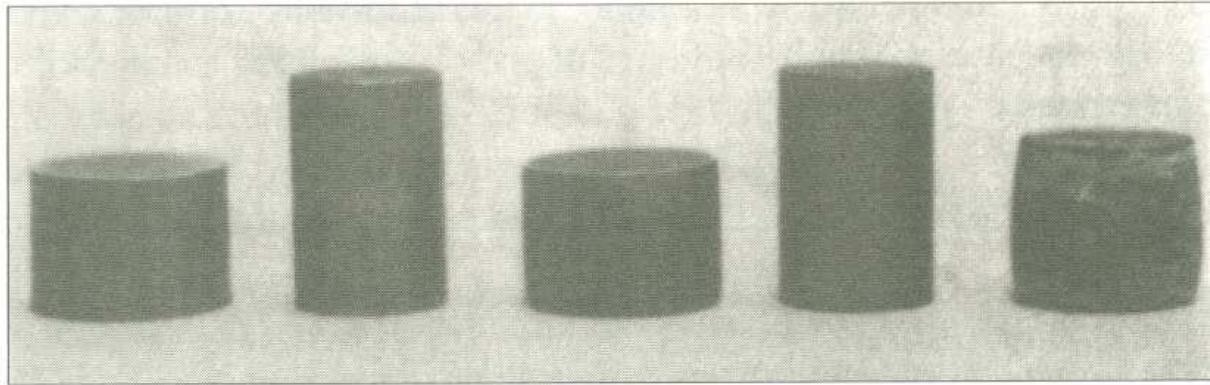
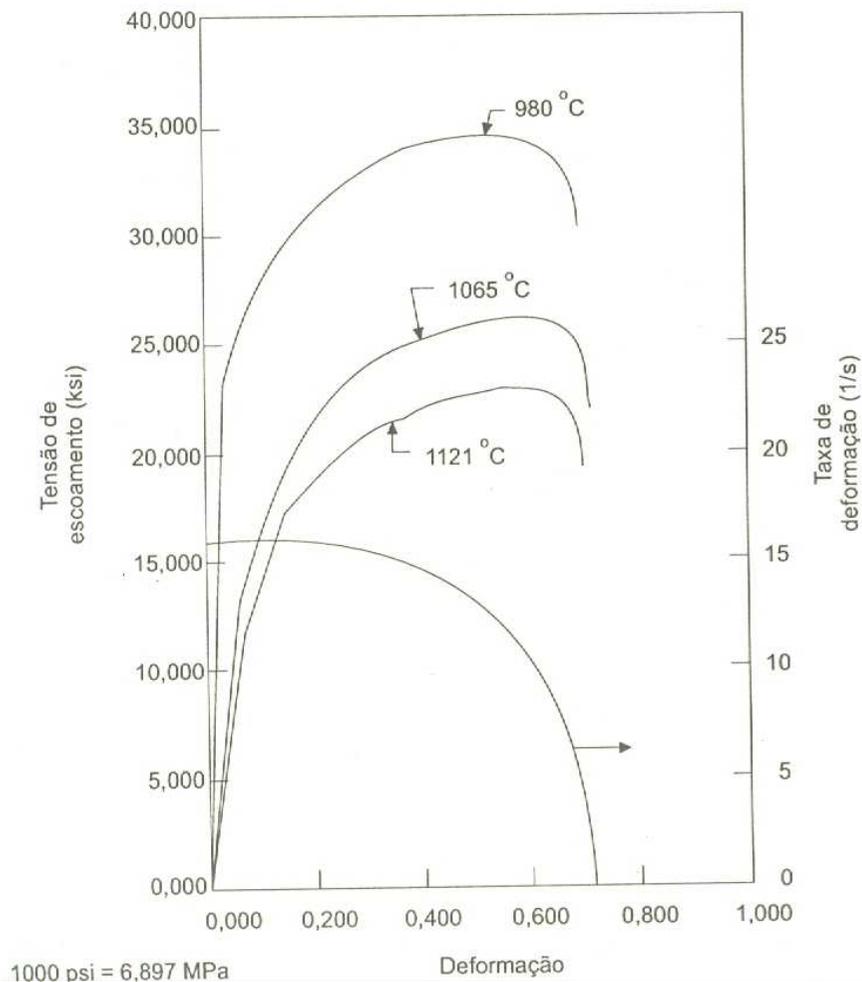
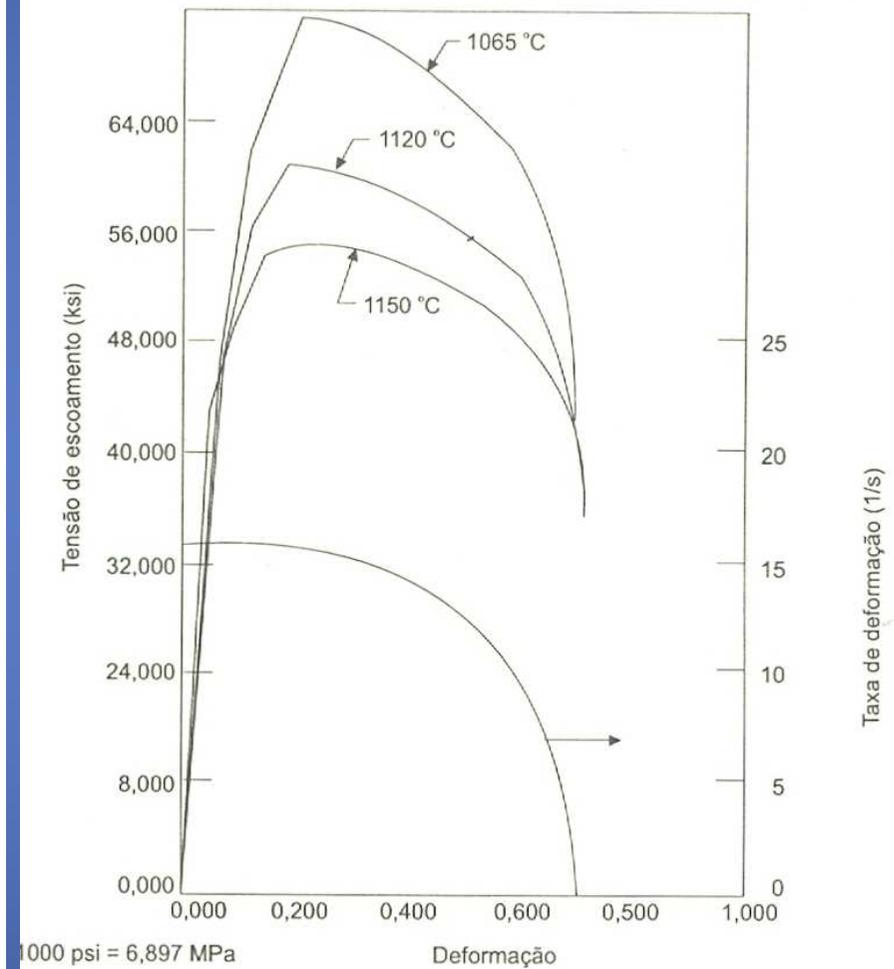


Figura 4.8 Corpos de prova de compressão uniforme antes e depois da deformação (da esquerda para a direita: AISI 1018, INCO 718, Ti-6Al-4V).

Ensaio de compressão



Inox 403



Waspaloy 403

Teste do anel

- Compressão de um corpo de provas em forma de anel com faces planas aplicando uma redução conhecida.
- Mudança nos diâmetros do anel indicam as condições de atrito
 - Atrito grande – diâmetro interno do anel diminui
 - Atrito pequeno – diâmetro interno do anel aumenta.

Teste do anel

- Pode ser também usado para obtenção da curva tensão-deformação se o atrito for conhecido



Ensaio de torção

- Usados para obtenção de dados de tensão de escoamento para grandes deformações
- Usa-se quando se devem conhecer as propriedades mecânicas do material em processamento em que ocorre grande deformação relativa
- Amostra: tubo com entalhe
- Deformação com velocidade conhecida

Ensaio de torção

$$\tau = \frac{T}{2\pi r^2 t}$$

$$\gamma = \frac{r\Psi}{l}$$

$$\tau = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}}$$

$$\gamma = \int d\gamma = \sqrt{3} \int d\bar{\epsilon} = \sqrt{3}\bar{\epsilon}$$

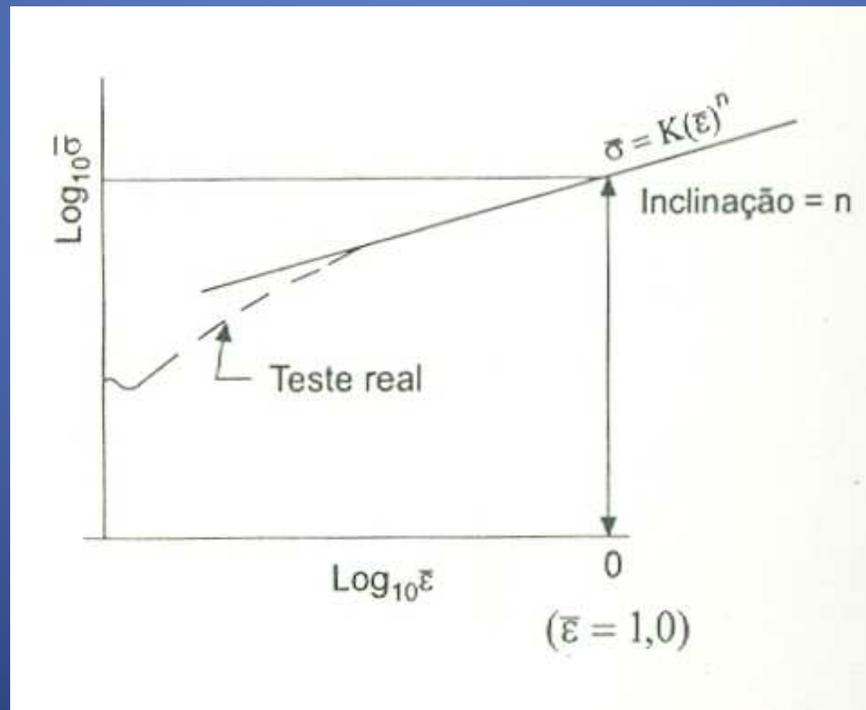
Representação de dados de tensão de escoamento

- Em baixas temperaturas, muitos materiais não têm suas propriedades afetadas por baixas taxas de deformação
- Relação tensão-deformação pode ser descrita por uma equação exponencial

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n$$

Representação de dados de tensão de escoamento

- Para baixas deformações, há um desvio entre os dados reais e os dados previstos pela equação



Representação de dados de tensão de escoamento

$$\text{Ludwik: } \bar{\sigma} = a + b(\bar{\epsilon})^c$$

$$\text{Voce: } \bar{\sigma} = a + (b - a)\left(1 - e^{-c\bar{\epsilon}}\right)$$

$$\text{Swift: } \bar{\sigma} = c(a + \bar{\epsilon})^n$$

$$\bar{\sigma} = C(\dot{\bar{\epsilon}})^m$$

Estados de tensão complexos e critérios de escoamento

- Em um estado multiaxial de tensões, a deformação depende de uma combinação delas
- Critérios para deformação:
 - Tresca – Tensão de cisalhamento para a deformação
 - Von Mises – Energia de distorção para a deformação

Critério de Tresca

- escoamento do material ocorre quando a máxima tensão de cisalhamento τ atinge um valor crítico k
- k é a tensão de escoamento em cisalhamento do material

Critério de Von Mises

$$\left\{ \frac{1}{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \right] \right\}^{1/2} = \bar{\sigma}$$

$$\left\{ \frac{3}{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_m)^2 + (\sigma_2 - \sigma_m)^2 + (\sigma_3 - \sigma_m)^2 \right] \right\}^{1/2} = \bar{\sigma}$$

Tensões principais x taxas de deformação

- λ depende da direção de fluxo, da temperatura, da deformação e da taxa de deformação

$$\dot{\epsilon}_1 = \lambda(\sigma_1 - \sigma_m)$$

$$\dot{\epsilon}_2 = \lambda(\sigma_2 - \sigma_m)$$

$$\dot{\epsilon}_3 = \lambda(\sigma_3 - \sigma_m)$$

$$d\epsilon_1 = \frac{3}{2} \frac{d\bar{\epsilon}}{\bar{\sigma}} (\sigma_1 - \sigma_m)$$

Potencia e energia de deformação

- A energia mecânica consumida no processo se transforma principalmente em calor.
- Energia de deformação:

$$W = Vol \int_{t_0}^{t_1} (\sigma_1 \dot{\epsilon}_1 + \sigma_2 \dot{\epsilon}_2 + \sigma_3 \dot{\epsilon}_3) dt$$

$$W = Vol \left(\int_0^{\epsilon_1} \sigma_1 d\epsilon_1 + \int_0^{\epsilon_2} \sigma_2 d\epsilon_2 + \int_0^{\epsilon_3} \sigma_3 d\epsilon_3 \right)$$

Deformação efetiva

- É necessário relacionar o comportamento do material em condições multiaxiais com as condições uniaxiais

Atrito na conformação

- Fluxo de metal é causado pela pressão transmitida da matriz para o material
- Atrito entre matriz e metal influencia diretamente o fluxo do metal e a formação de defeitos

Lubrificação

- 3 tipos de lubrificação
 - Condição a seco
 - Condição Hidrodinâmica
 - Condição de contorno

Condição a seco

- Não existe lubrificação na interface
- Oxidação na matriz e no metal atuam como camada de separação
- Atrito é alto
- Laminação a quente de chapas e lingotes
- Extrusão de alumínio sem lubrificação

Condição Hidrodinâmica

- Espessa camada de lubrificante presente
- Atrito é governado pela viscosidade do lubrificante e velocidade relativa entre matriz e metal
- Viscosidade dos lubrificantes cai rapidamente com a temperatura
- Na maioria dos casos de conformação em alta velocidade, ocorre apenas em situações especiais em que a temperatura na interface é baixa

Condição de Contorno

- Situação mais comum
- Aumento de temperatura na interface e pressões altas de conformação não permitem a obtenção de condição hidrodinâmica
- A maior parte do que se sabe de lubrificação nos processos de conformação é empírico.

Lubrificantes

- O que se espera do lubrificante:
 - Diminuir o atrito entre a peça e a matriz
 - Prevenir a aderência e soldagem da peça à matriz
 - Possuir boas propriedades de isolamento, para diminuir a transferência de calor entre peça e matriz
 - Ser inerte nas condições de trabalho, evitando reações com a matriz, com a peça, e entre elas

Lubrificantes

- O que se espera:
 - Não ser abrasivo, evitando desgaste nas superfícies
 - Não conter componentes poluentes ou venenosos, não havendo produção de gases nocivos
 - Facilidade de aplicação e de remoção
 - Custo que não inviabilize o processo

Lubrificação e tensão de cisalhamento

- Na maioria dos casos, a lubrificação é o fator mais importante
- Para avaliar um lubrificante, é preciso descrever o atrito na interface numericamente, por meio de um coeficiente.
- Tensão de cisalhamento na interface

$$\tau = \sigma_n \mu$$

ou

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

Fator de cisalhamento em atrito

- $m = 0,05-0,15$ – Forjamento a frio de aços, ligas de alumínio, cobre, usando sabão fosfatado ou óleo
- $m = 0,2-0,4$ – Forjamento a quente de aços, ligas de cobre a alumínio, usando lubrificantes à base de grafite

Fator de cisalhamento em atrito

- $m = 0,1-0,3$ – Forjamento a quente de ligas de titânio e ligas de alta resistência, usando lubrificante à base de vidro
- $m = 0,7-1,0$ – ausência de lubrificantes – laminação a quente de placas e lingotes e extrusão não lubrificada de alumínio

Fator de atrito

- No caso de conformação a quente, devem-se considerar os efeitos térmicos – resfriamento do metal e da matriz, e transferência de calor entre eles.
- Os testes de lubrificação a quente devem ser realizados de maneira a incluir os efeitos lubrificantes e efeitos térmicos

Testes de lubrificação a quente

- O corpo de prova e a matriz devem estar à mesma temperatura da operação real
- O tempo de contato entre peça e ferramenta deve ser próximo ao da situação real de processo
- A razão entre a área do componente deformado e a área da peça antes da conformação deve ser semelhante à da condição real de processo
- A velocidade relativo entre metal e matriz deve ser semelhante à da condição real de processo.

Determinação de lubricidade

- O teste mais usado para esse fim é o teste do anel.
- Mudança do diâmetro interno é um indicativo simples do atrito na superfície.
- Para medir o atrito, a força necessária para deformar o material e seu limite de escoamento não precisam ser conhecidos

Determinação de lubricidade

- A porcentagem de redução de diâmetro interno é comparada com valores calculados para vários fatores de atrito ou fatores de cisalhamento em atrito
- Os valores de redução de altura e de diâmetro interno em amostras de dimensão padrão são comparados com curvas de calibração construídas para cada tipo de amostra.

Determinação de lubricidade

- As amostras são descritas em termos de dimensões: (DE : DI : E)

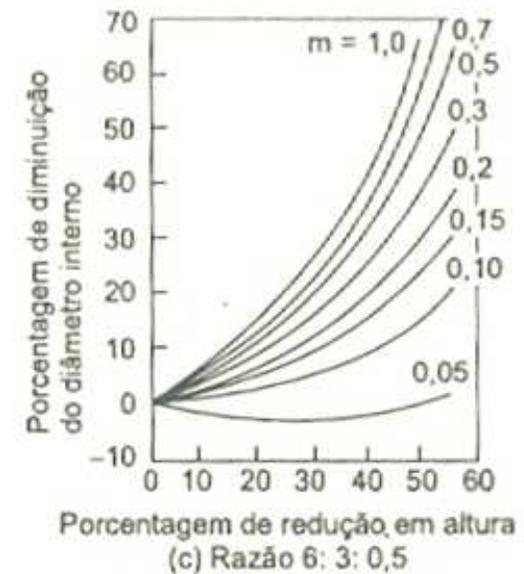
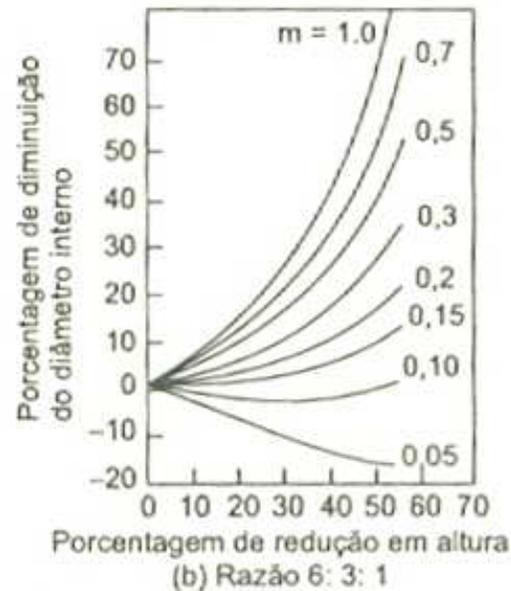
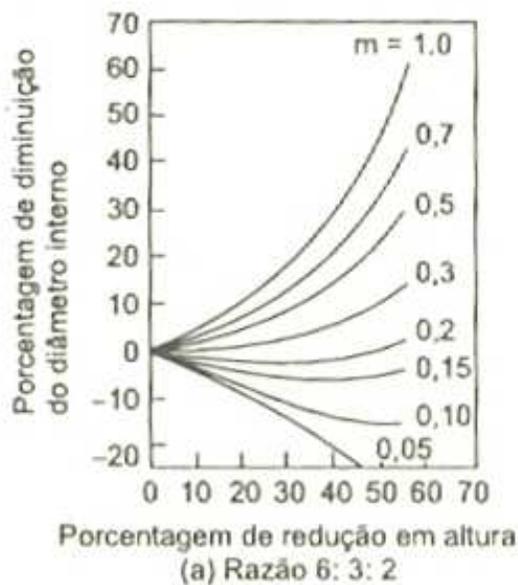


Tabela 6.1 Valores de fator de cisalhamento, m , obtidos em testes com anéis, realizados numa prensa mecânica (temperatura da matriz $\approx 145\text{ }^{\circ}\text{C}$ com acabamento superficial de $Ra \approx 2,45\text{ }\mu\text{m}$).

Material	Temperatura do corpo de provas, $^{\circ}\text{C}$	Fator de cisalhamento (m)	Tempo de contato	Relações do anel (a)	Sistema de lubrificação
6061 Al	426	0,4	0,038	6:3:0,5	(b)
	426	0,31	0,047	6:3:1	(b)
	426	0,53	0,079	6:3:2	(b)
Ti-7Al-4-Mo	955	0,42	0,033	3:1,5:0,25	(c)
	955	0,42	0,044	3:1,5:1	(c)
	1750	0,7	0,056	3:1,5:0,25	(c)
403 SS	982	0,23	0,029	3:1,5:1	(c)
	982	0,24	0,039	3:1,5:1	(c)
	982	0,34	0,047	3:1,5:1	(c)
	1065	0,28	0,06	3:1,5:1	(c)
	1120	0,35	0,06	3:1,5:1	(c)
Waspaloy	1150	0,18	0,06	3:1,5:1	(c)
	1065	0,28	0,06	3:1,5:1	(c)
	1150	0,35	0,06	3:1,5:1	(c)
Ti-6Al-4V	927	0,3	0,06	3:1,5:1	(c)
	955	0,46	0,06	3:1,5:1	(c)
	1093	0,18	0,06	3:1,5:1	(c)
Inconel 718	1150	0,33	0,06	3:1,5:1	(c)
	955	0,27	0,06	3:1,5:1	(c)
	982	0,27	0,06	3:1,5:1	(c)
Ti-8Al-1Mo-1V	1120	0,4	0,06	3:1,5:1	(c)
	370	0,37	0,06	5:3:1	(b)
	426	0,31	0,06	5:3:1	(b)

(a) Dimensões dos anéis em polegadas, DE: E; (b) pré-cobertura "Caustic" + cobertura de grafite "Dag 137" (Acheson) sobre o corpo de provas e spray de grafite Deltaforge 43 (Acheson) na matriz; (c) cobertura à base de vidro moído Deltaforge 347 (Acheson) nos corpos de prova e grafite Deltaforge 43 (Acheson) na matriz.

Temperaturas na Conformação

- Aproximadamente 90-95% da energia fornecida é transformada em calor.
- Em algumas operações feitas em alta velocidade, o aumento de temperatura pode ser de centenas de graus.

Destino do calor gerado

- Uma parte fica no material deformado
- Uma parte vai para a ferramenta
- Uma parte vai para a parte ainda não deformada do material
- Uma pequena parte vai para o lubrificante

Geração e transferência de calor

- Magnitude e distribuição de temperatura depende de:
 - Temperatura inicial do metal e da matriz
 - Geração de calor por deformação e atrito
 - Transferência de calor para a matriz e o meio

Geração e transferência de calor

- Em processos de matriz fechada, a perda para o meio pode ser negligenciada
- Temperatura média

$$\theta_A = \theta_S + \theta_D + \theta_F - \theta_T$$

Aumento de temperatura pela deformação

$$\theta_D = \frac{A \bar{\sigma} \dot{\epsilon} \Delta t}{c \rho} \beta = \frac{\bar{\sigma} \Delta \bar{\epsilon}}{J c \rho} \beta$$

- A: fator de conversão de unidades
- β = fração de energia de deformação transformada em calor (normalmente 0,95)
- c: capacidade térmica do material
- ρ : massa específica do material

Aumento da temperatura por atrito

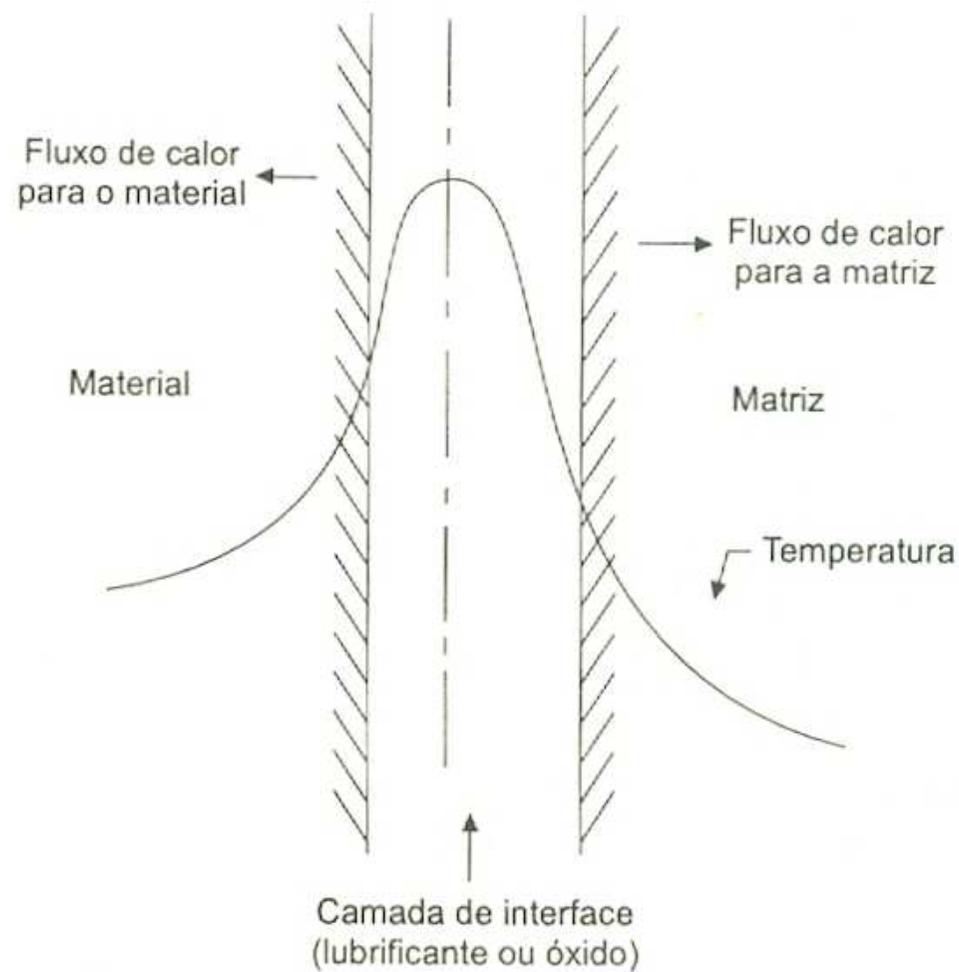
$$\theta_F = \frac{A f \bar{\sigma} v F \Delta t}{c \rho Vol_a}$$

- f : fator de atrito
- v : velocidade
- Vol_a : volume sujeito ao aumento de temperatura

Aumento de temperatura

- Normalmente ocorre um gradiente de temperatura.
- Temperaturas são normalmente altas na interface, e decrescem para o interior do material e da matriz,

Temperatura na interface metal/matriz



Aumento de temperatura

- Para muitas aplicações, é suficiente estimar uma temperatura média, negligenciando os gradientes
- O material pode ser considerado fino, sendo resfriado entre duas matrizes
- $-c\rho Vol_a d\theta = \alpha F (\theta - \theta_1) dt$

Transferência de calor entre metal e matriz

- A integração da equação do fluxo de calor entre metal e matriz fornece

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

Variação de temperatura

- A variação de temperatura do material ao longo do processamento é descrita pela soma das três equações

$$\theta_a = \theta_D + \theta + \theta_F$$

$$\theta_A = \theta_S + \frac{\bar{\sigma} \Delta \bar{\varepsilon}}{Jc\rho} \beta + \frac{A f \bar{\sigma} v F \Delta t}{c\rho Vol_a} + \theta_I + (\theta_0 - \theta_I) \exp\left(\frac{-\alpha t}{c\rho h}\right)$$

Variação de temperatura

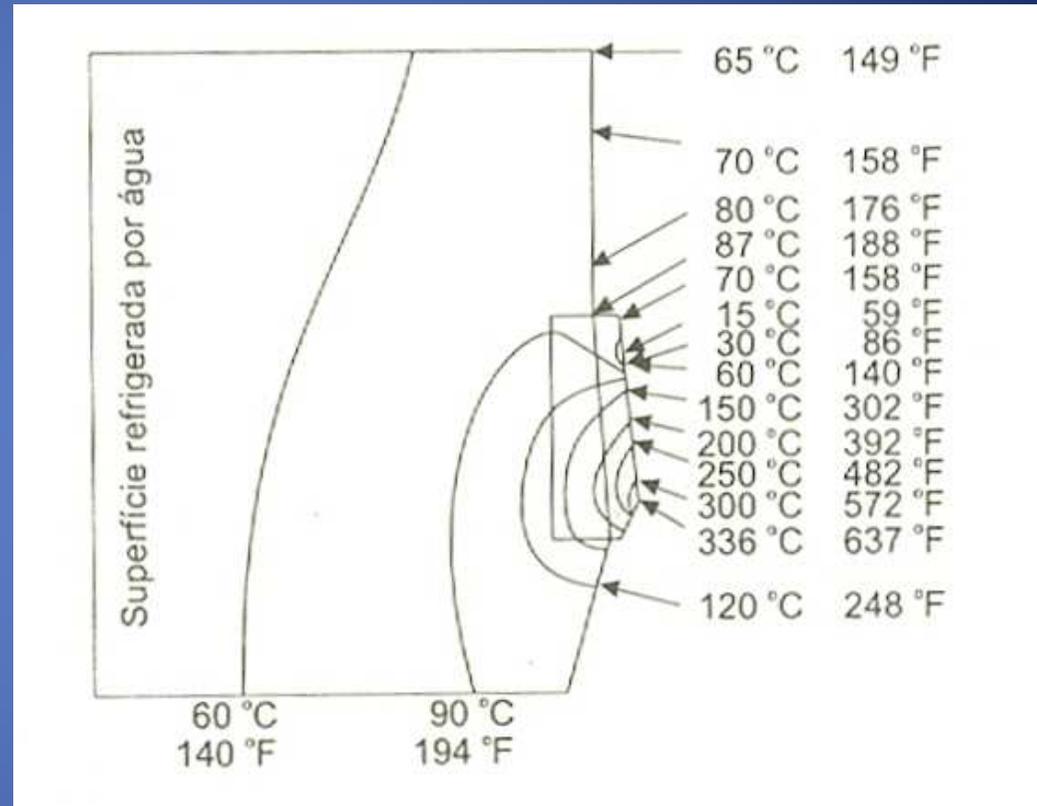
- O aumento de temperaturas em operações como forjamento é bastante distinto do observado em trefilação, laminação ou extrusão (processos contínuos)
- A deformação se dá em tempos muito curtos
- O contato com a ferramenta é curto
- Resfriamento pode ser bastante lento após remoção da peça

Variação de temperatura

- Em processos contínuos, o fluxo de metal é praticamente constante
- O contato de material com a ferramenta é contínuo, e há um aumento cumulativo da temperatura da ferramenta
- Impacto na vida da ferramenta e qualidade do material.

Operações quase contínuas

- Trefilação
- Aço médio carbono, fieira com inserto de carbeto de silício; velocidade: 426 m/min; redução: 12%

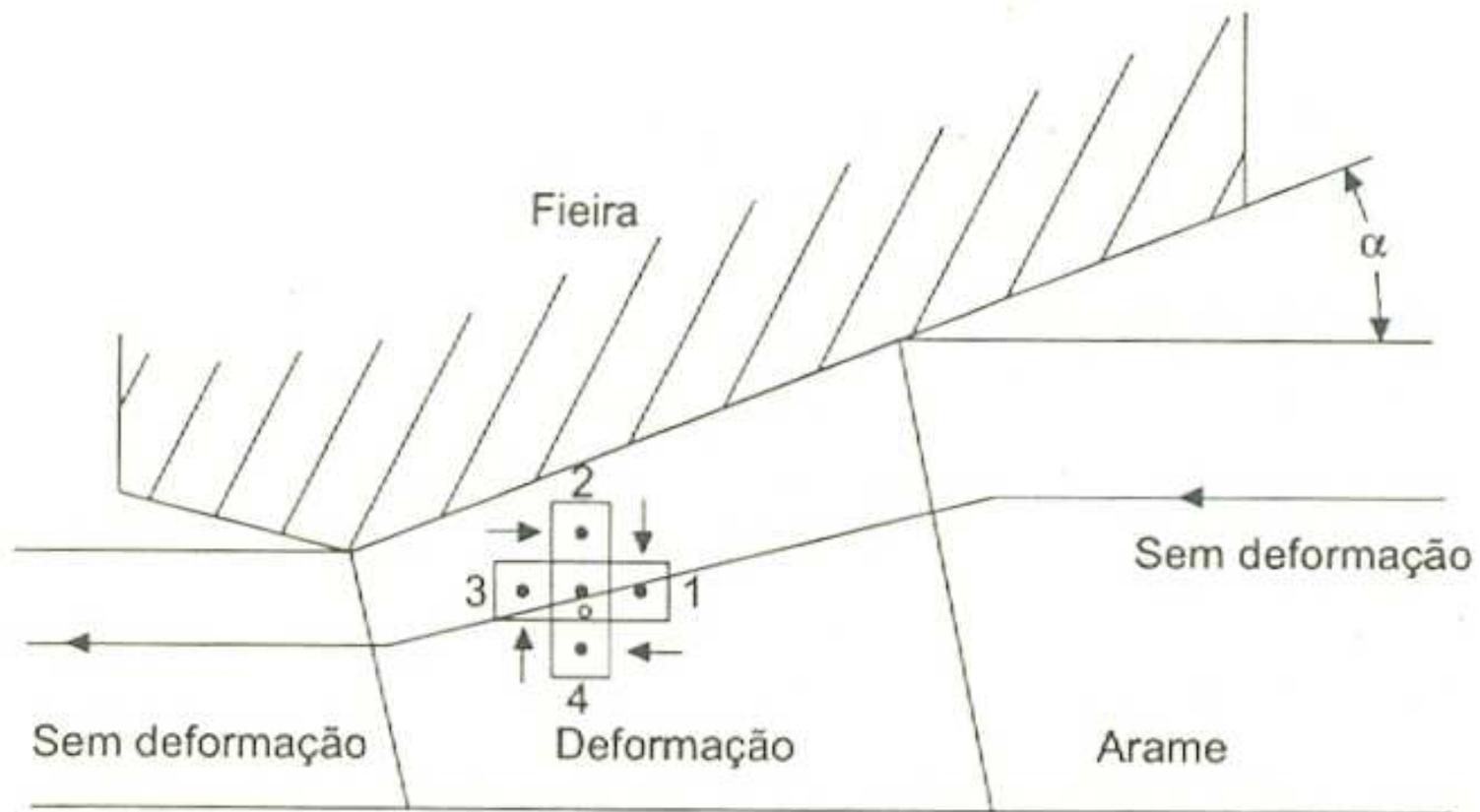


Transferência de calor

- Parte do calor gerado fica no material, e outra parte é transferida para a ferramenta.
- Deve-se determinar simultaneamente o calor gerado, transportado e transmitido

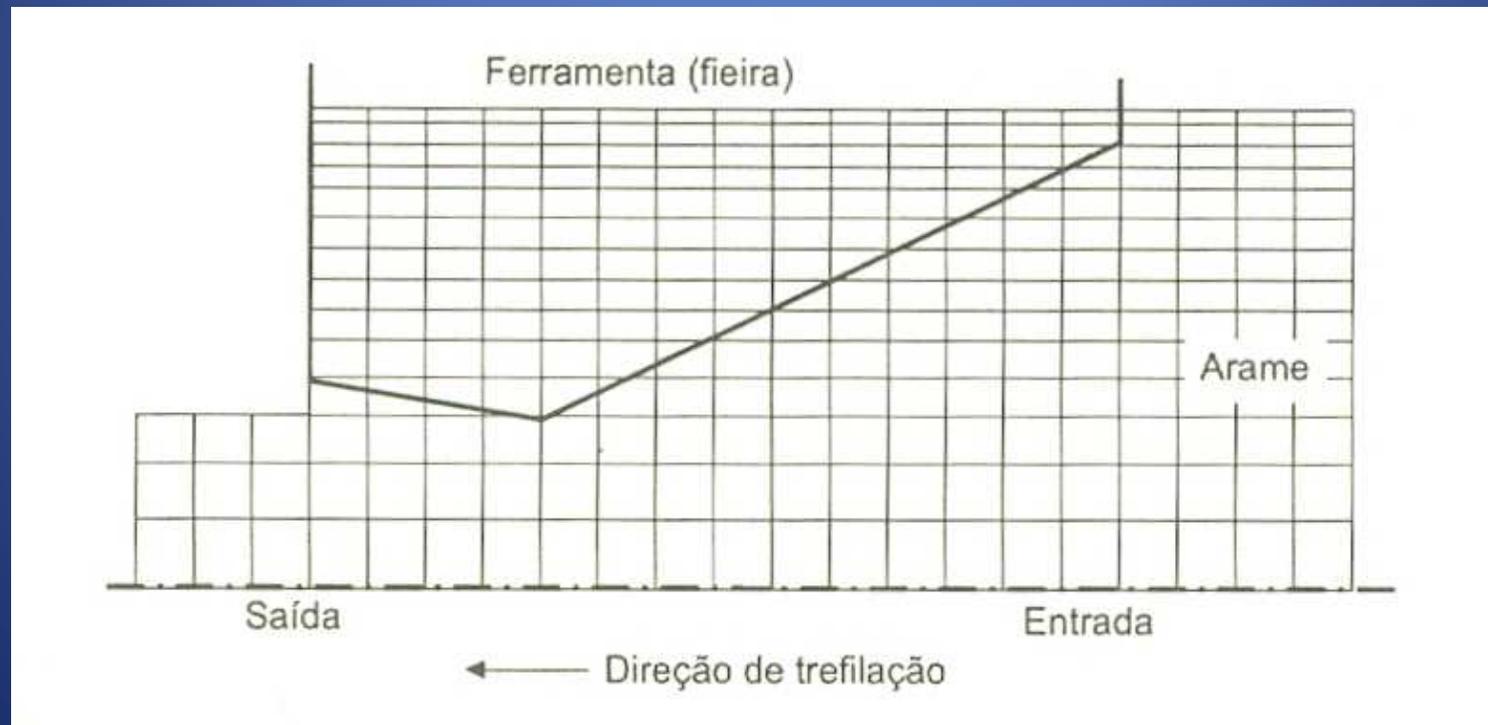
Transferência de calor

- Utilizam-se as equações que descrevem o aquecimento por deformação e atrito para calcular a temperatura no elemento 0
- Utilizam-se equações de transferência de calor para determinar a condução para os elementos 1-4

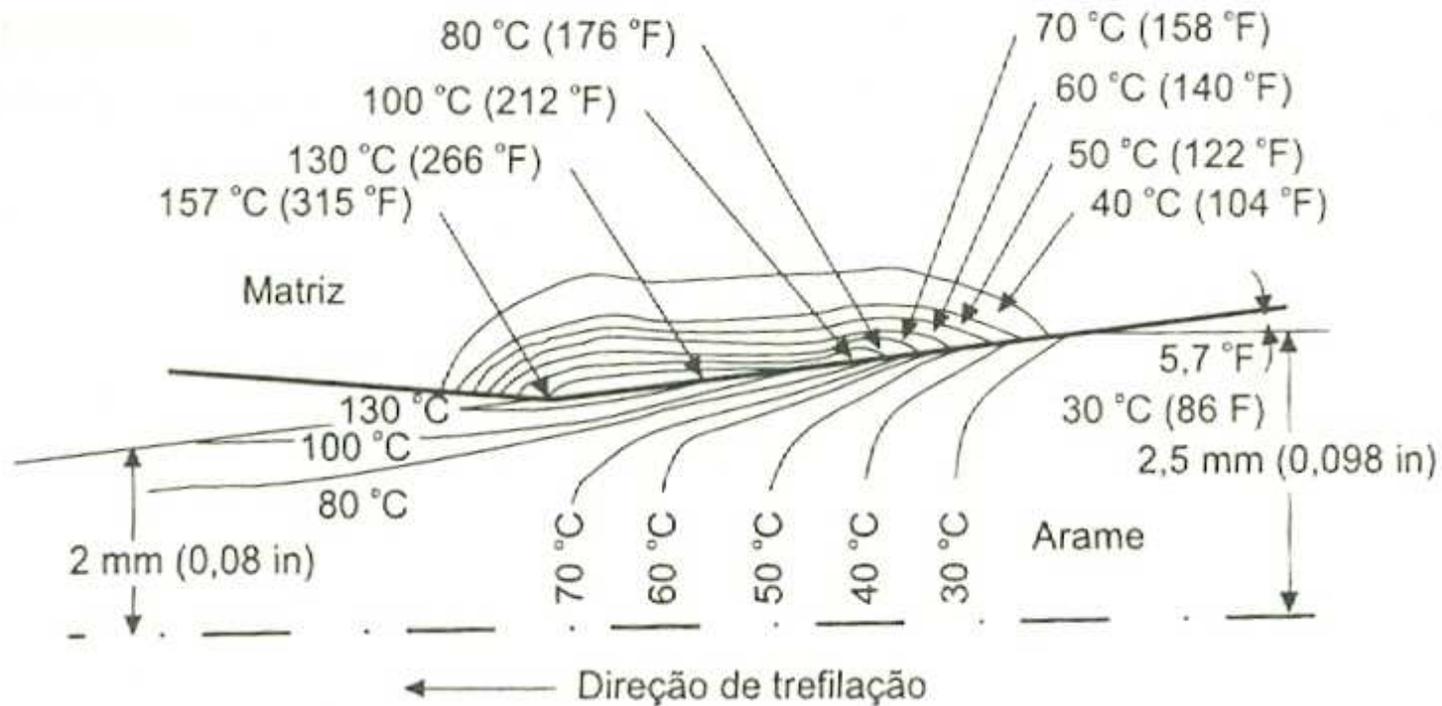


Transferência de calor

- Para cálculo da condução de calor, o material e a ferramenta são divididos em uma malha. O computador calcula a temperatura e o fluxo de calor para cada ponto.

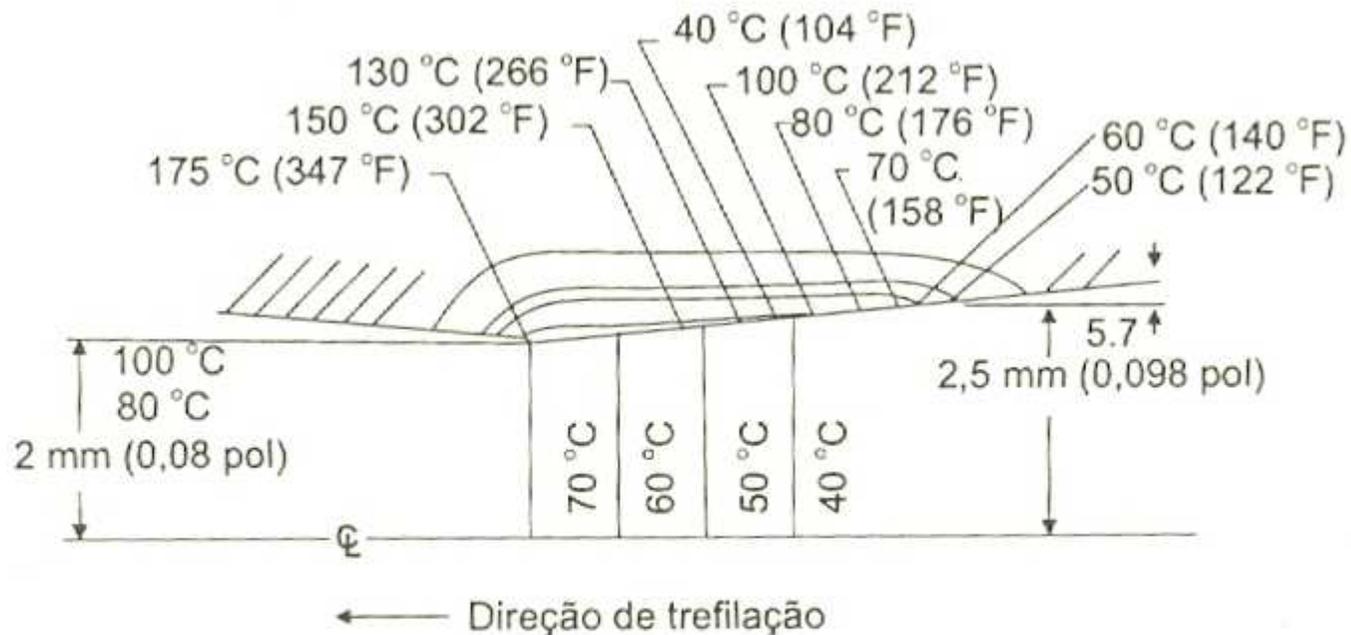


Transferência de calor



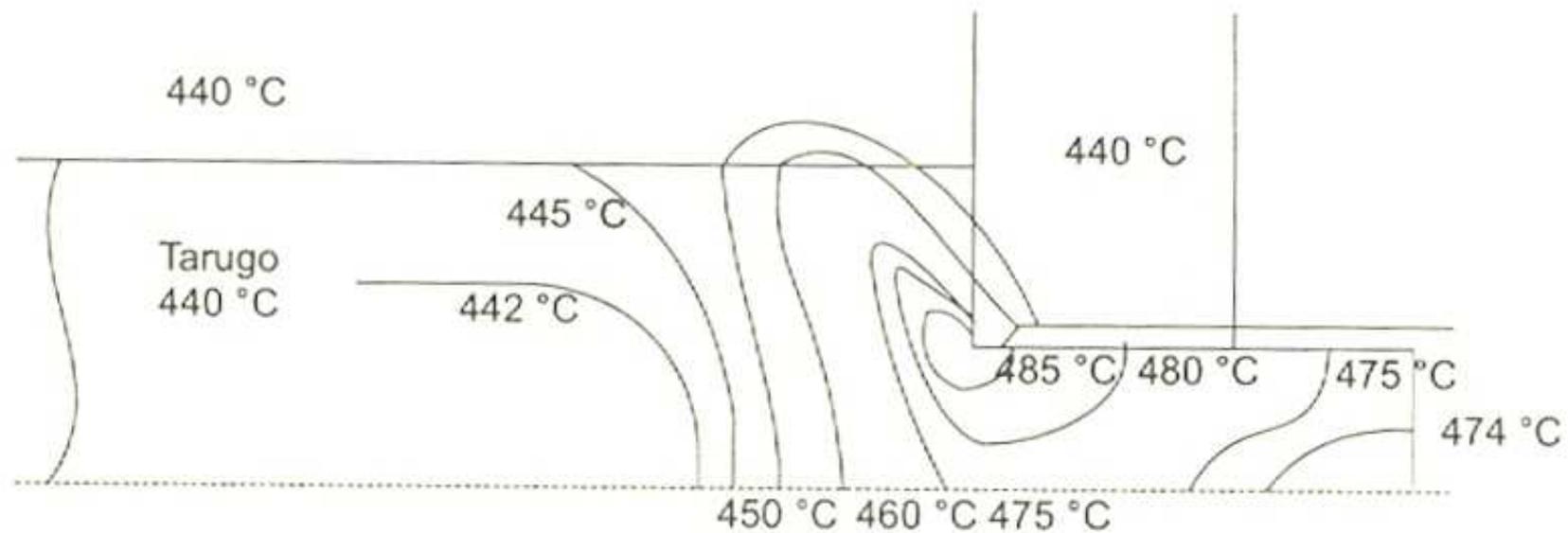
Temperaturas na trefilação de arame de aço de $d_0 = 5,0$ mm para $d_1 = 4,0$ mm a uma velocidade de 60 m/min numa matriz de aço.

Transferência de calor



Temperaturas na trefilação de arame de aço de $d_0 = 5,0$ mm para $d_1 = 4,0$ mm a uma velocidade de 120 m/min numa matriz de aço.

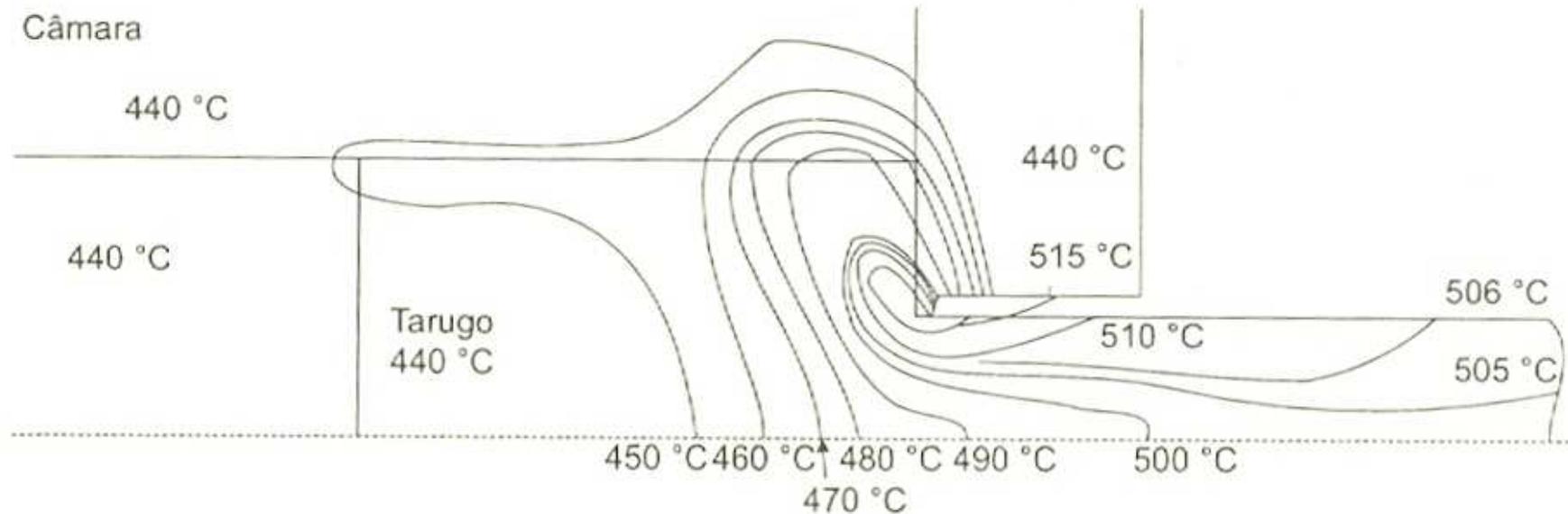
Transferência de calor



(a) Deslocamento do Punção = 19,05

Distribuição de temperaturas na extrusão de uma barra de liga de alumínio 5052 através de uma ferramenta plana (redução de 5:1, velocidade do punção de 1,88 m/min, diâmetro do tarugo de $\phi = 71$ mm; comprimento 142 mm; temperatura inicial da ferramenta e do tarugo 440 °C).⁽⁷⁻⁶⁾

Transferência de calor



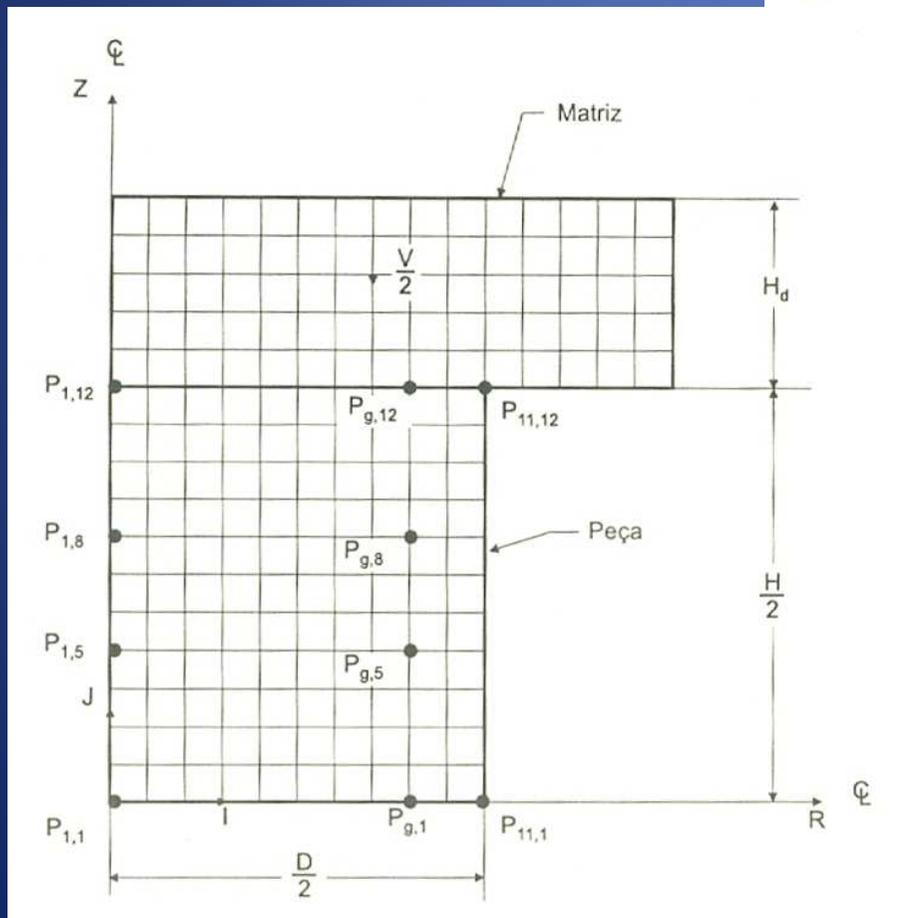
(b) Deslocamento do Punção = 93,98

Distribuição de temperaturas na extrusão de uma barra de liga de alumínio 5052 através de uma ferramenta plana (redução de 5:1, velocidade do punção de 1,88 m/min, diâmetro do tarugo de $\phi = 71$ mm; comprimento 142 mm; temperatura inicial da ferramenta e do tarugo 440 °C).⁽⁷⁻⁶⁾

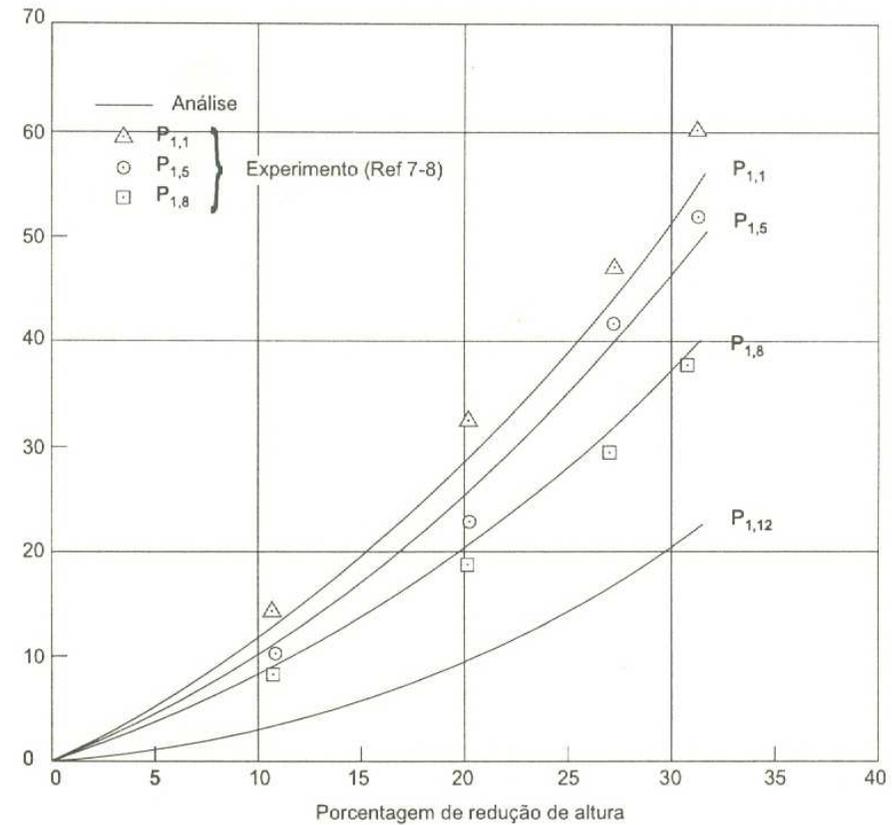
Conformação de peças

- O fluxo de metal é transitório
- Contato entre metal e matriz é intermitente
- Tempo de contato e natureza da transferência de calor influenciam significativamente a temperatura

Exemplo: recalque a frio de um cilindro



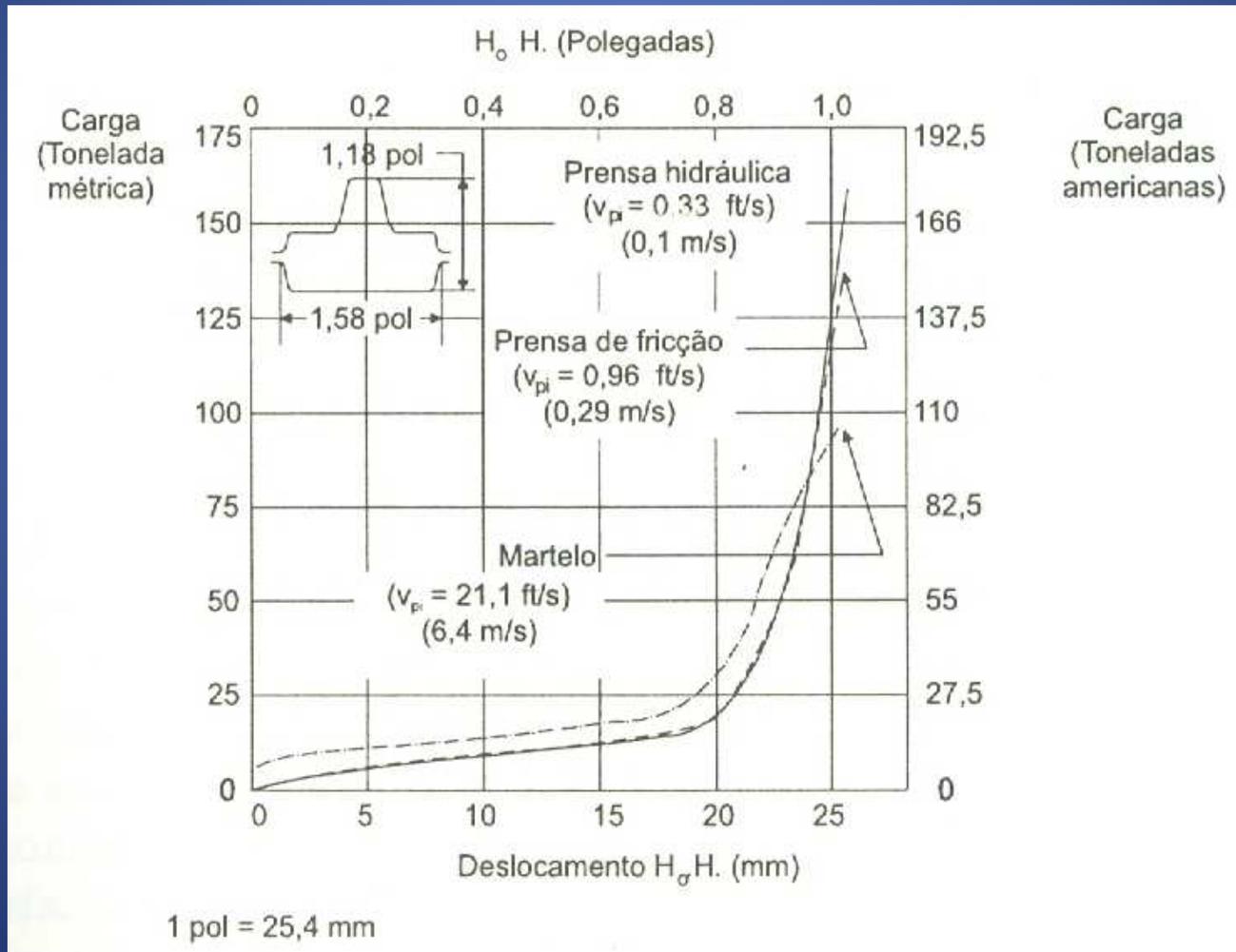
Aumento de temperatura (°C)



Conformação a quente

- Tempo de contato sob pressão entre material matriz é o mais importante fator que afeta a temperatura
- Devido às taxas de deformação e efeitos de temperatura, diferentes cargas são requeridas para a mesma operação em diferentes máquinas

Conformação a quente



Medição de temperatura

- Termopares de contato:
 - Resposta rápida
 - Exatidão
 - Mínima interferência com o fluxo de calor
 - Capacidade de suportar altas tensões de tensão normal e de cisalhamento
- Medidas ópticas