

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

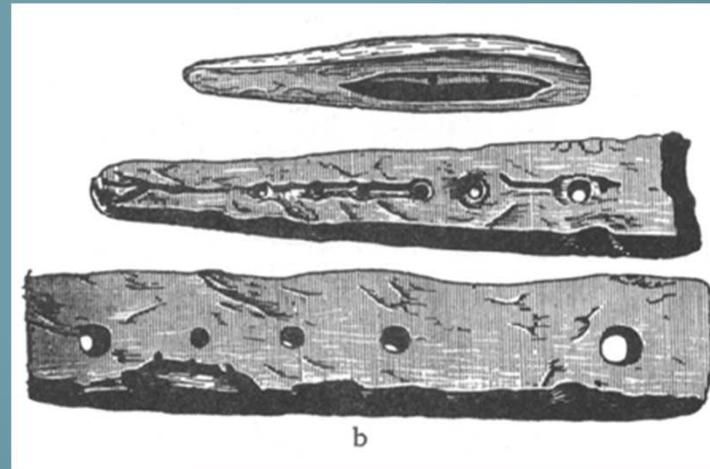
# Trefilação

# Definições

- Produto com seção transversal sólida ou oca é puxado através de uma matriz
- Velocidade de saída do produto final pode ser da ordem de km/min
- Geometria da fieira determina dimensões finais
- Deformação é obtida por processos de tração e compressão

# Histórico

- Um dos processos de conformação mais antigos de que se tem notícia datando do século IV a.C.



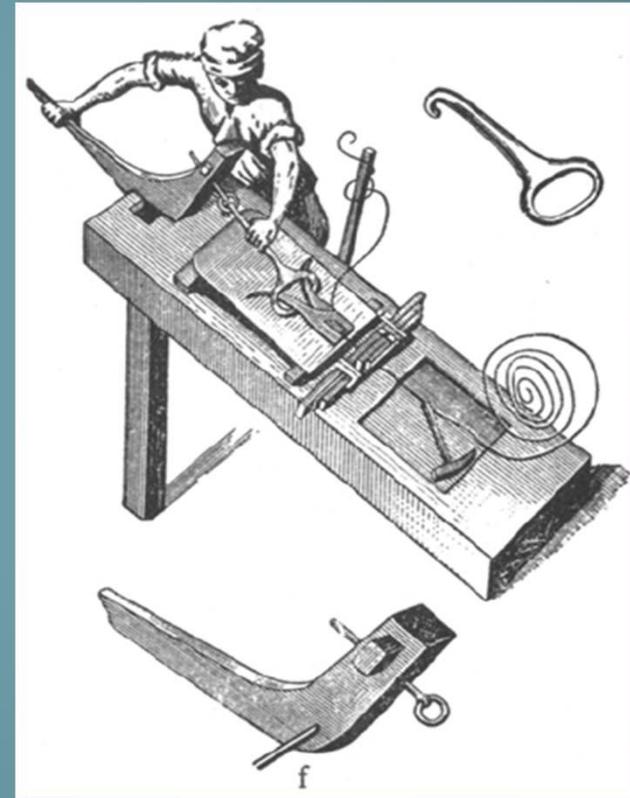
# Histórico

- Relatos confiáveis de trefilação de metais não ferrosos datam dos primeiros séculos d.C.
- Produção de ferro por trefilação começou no século XII ou XIII d. C.



# Histórico

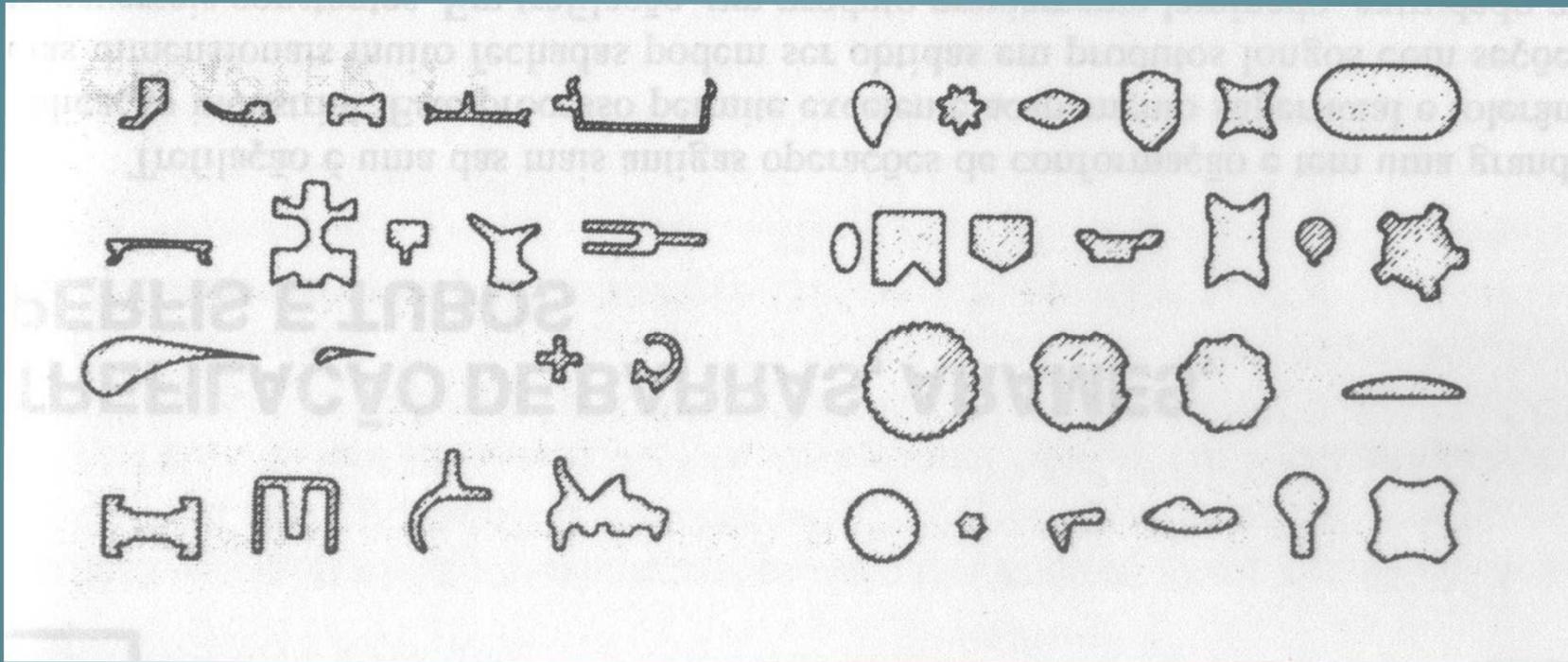
- A bancada de trefilação permitia o trabalho com materiais mais resistentes que o cobre e o latão, porém, com baixa produtividade.
  - O material era preso no anel, e o anel preso à alavanca.
  - A cada puxada da alavanca, o material avançava 7-10 cm.



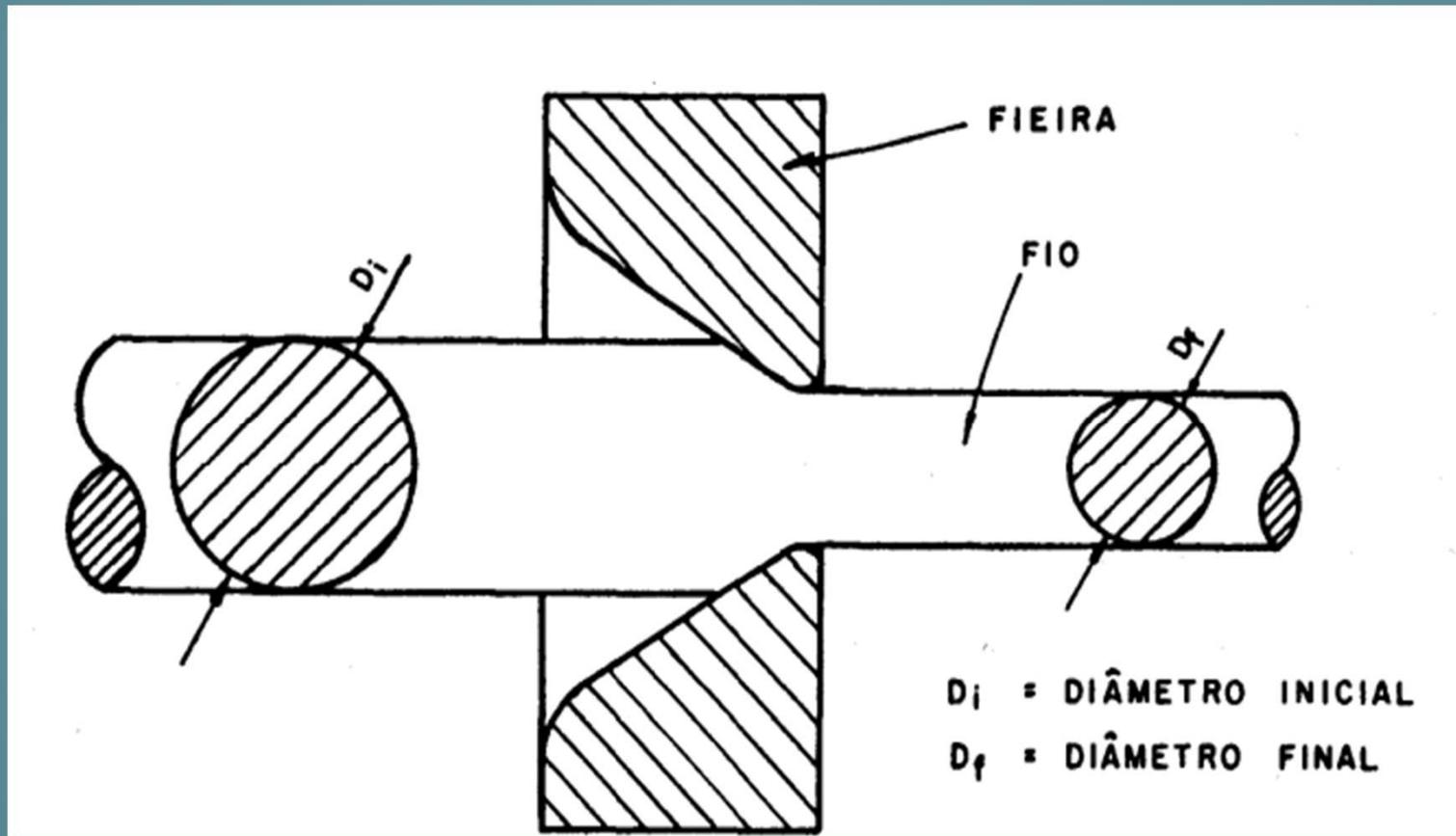
# Características

- Esforços
  - Tração – aplicado na direção axial do fio e de origem externa
  - Compressão – Compressão exercido pelas paredes da fieira
  - Processo é considerado de compressão indireta, devido à natureza dos esforços

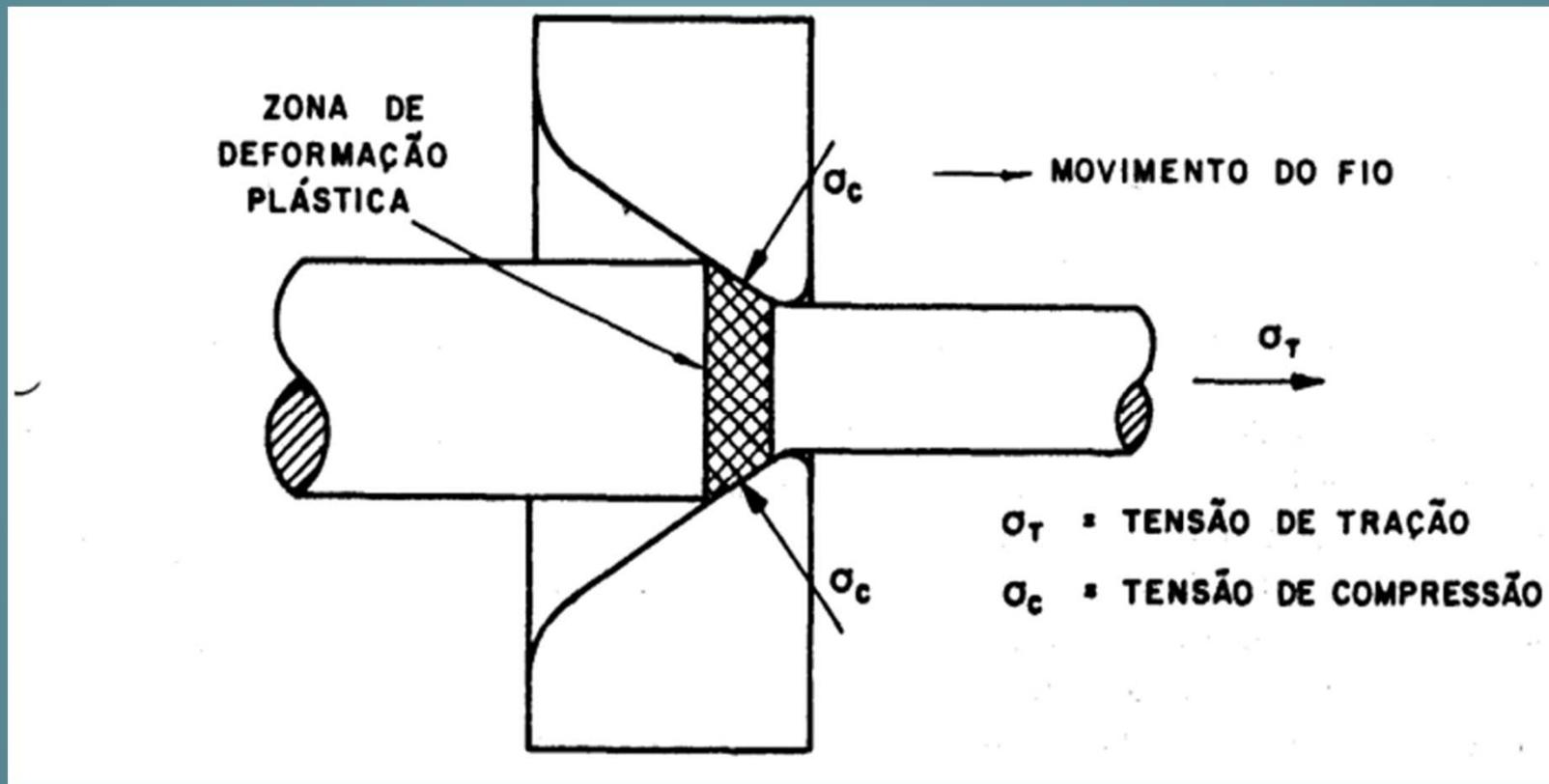
# Perfis



# Características



# •Características



# Características

- Volume permanece constante ao longo do processo
- Portanto:

$$L_f = L_i \frac{A_i}{A_f} = L_i \left( \frac{D_i}{D_f} \right)^2$$

# •Características

- Normalmente feita a frio
  - Boa qualidade dimensional (tolerâncias bastante fechadas)
  - Boa qualidade superficial
  - Boa qualidade geométrica
- Propriedades podem ser alcançadas pelo controle adequado da redução de área e lubrificação

# Características

- Trefilação de barras e arames são similares
- Material é limpo e eliminam-se detritos, carepas e impurezas superficiais
- Lubrificação com produtos alcalinos (como cal) ajuda a neutralizar eventuais resíduos de decapagem química
- Barras podem ser trefiladas em bancadas
- Arames podem ser feitos por sucessivas fieiras e enrolados em carretéis entre os passes.

# Características

- Redução varia entre 10% e 50%
- Reduções maiores são para maiores diâmetros e passes iniciais
- Reduções menores são para menores diâmetros e passes finais
- Menor redução permite aumento da vida da fieira
- Fieiras circulares são rodadas em intervalos regulares para uniformizar o desgaste
- Desgaste de fieira é crítico no último passe, devido aos requisitos de dimensão e superfície

# Calor

- Uma quantidade considerável de calor é gerada durante o processo
- Geração de calor é maior em arames de pequeno diâmetro
  - Alta relação superfície/volume
  - Alta velocidade de processo
- Arame recém-saído da fieira tem grandes gradientes de temperatura

# Energia e tensões na trefilação

- Se a magnitude da tensão na saída da fieira é maior do que o limite de escoamento, cria-se um gargalo ou o arame se rompe
- Método da divisão do material em tiras para análise numérica é aplicado levando-se em conta o comprimento total de material trefilado.

# Energia e tensões na trefilação

- Energia para deformação homogênea (considerando todo o comprimento trefilado)

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

- $\sigma$  é o limite de escoamento médio do material na zona de deformação, e pode ser aproximado pela média de entrada e saída

# Índice de eficiência

- Expressão da deformação homogênea fornece a Energia no processo ideal.

$$(\sigma_{tref})_{real} = \frac{(\sigma_{tref})_{ideal}}{\eta_{def}}$$

# Energia e tensões na trefilação

- Cálculos são baseados em
  - Área da superfície de contato metal/matriz
  - Tensão de escoamento
  - Fator de atrito



# Energia e tensões na trefilação

$$dE_f = (\tau_f \pi D \Delta S dz) / (\cos \alpha)^2$$

$$dA = \pi D dz \tan \alpha$$

$$\Delta S = \Delta Vol / A$$

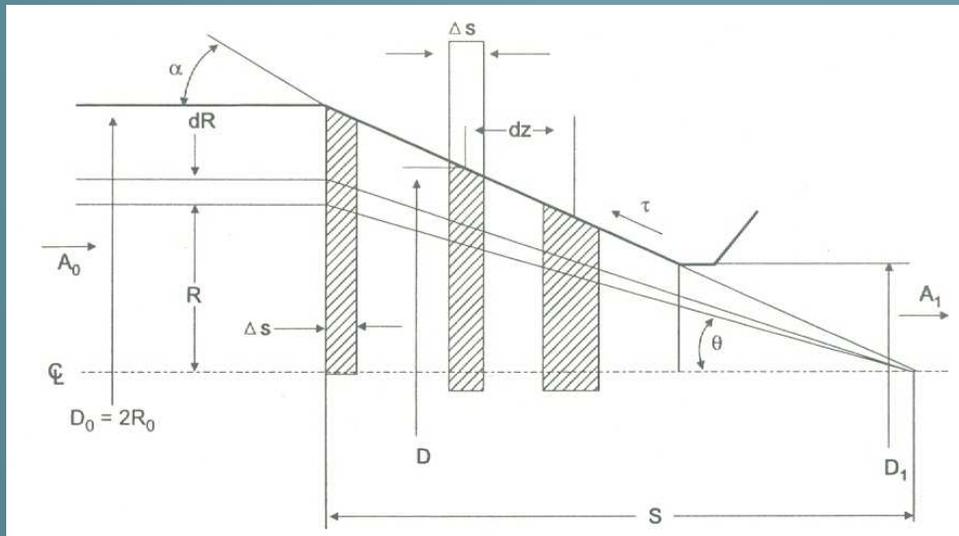
$$dE_f = \tau_f \frac{\Delta V_{ol}}{A} dA \frac{I}{\cos \alpha \sin \alpha}$$

$$E_f = V_{ol} \tau_f \ln \left( \frac{A_0}{A_f} \right) \frac{I}{\cos \alpha \sin \alpha}$$

# Energia e tensões na trefilação

- Energia de deformação de cisalhamento
- Na entrada e na saída da fieira, a deformação do material muda de acordo com o ângulo  $\theta$

$$dVol = 2\pi R dR \Delta S$$



$$dE_{s\theta} = \tan \theta dV_{of} \tau_{\theta}$$

# Energia e tensões na trefilação

- Os ângulos costumam ser menores do que  $15^\circ$ , portanto  $\text{sen}x=x$ .  
(em radianos)

$$\tan\theta = \theta = R/S$$

$$\tan\alpha = \alpha = R_0/S = D_0/2S$$

$$\Delta E_{s0} = \int_0^{R_0} \tau_0 R 2\pi R \Delta S dR / S =$$

$$= 2\pi \Delta S \tau_0 R_0^3 / (3S) =$$
$$= 2\Delta V_{o1} \alpha \tau_0 / 3$$

- No plano de saída, a equação é análoga

$$\Delta E_{s1} = 2\Delta V_{o1} \alpha \tau_1 / 3$$

# Energia e tensões na trefilação

- A energia total é obtida pela multiplicação do volume trefilado pela soma das energias de cisalhamento por unidade de volume:

$$\begin{aligned} E_s &= \frac{2}{3} \Delta Vol \alpha (\tau_0 + \tau_1) \frac{Vol}{\Delta Vol} = \\ &= \frac{2}{3} Vol \alpha (\tau_0 + \tau_1) \end{aligned}$$

- Se um valor médio de  $\sigma$  for usado:

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

# Energia e tensões na trefilação

A Energia total é

$$E = E_{dh} + E_f + E_s$$

E a tensão será a a divisão da energia consumida pelo volume total trefilado

$$E = (E_{dh} + E_f + E_s)/vol$$

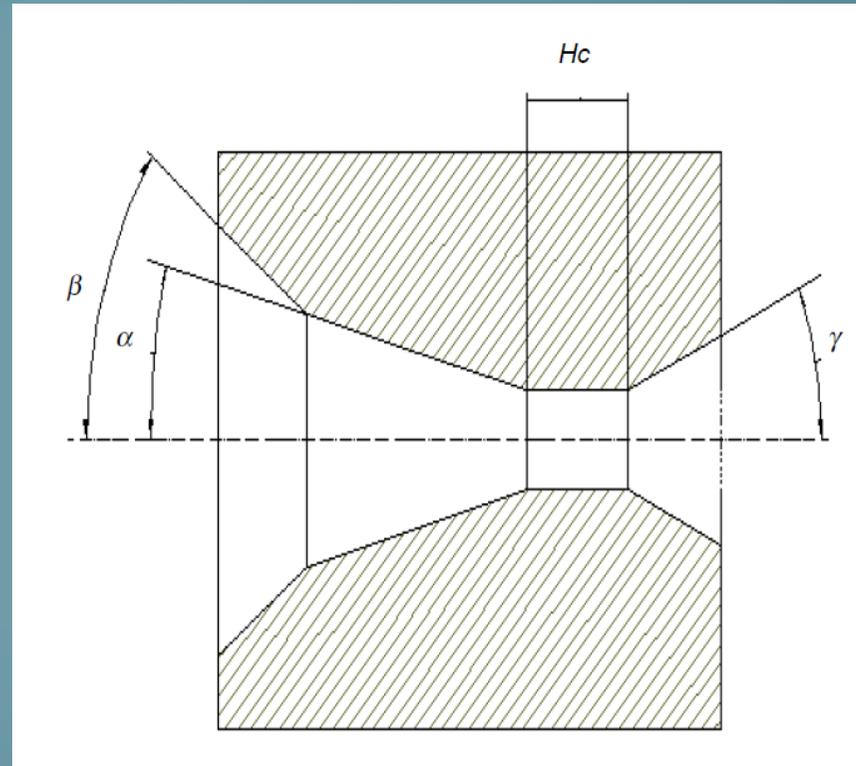
O fator de atrito na trefilação tem sido encontrado entre 0,02 e 0,06

# Efeito da tensão de recuo

- Em trefilação de múltiplos passes, existe uma tensão no arame entre dois passes
- A tensão de saída fica maior
- A tensão radial agindo na superfície da fieira é menor
- Aumento de temperatura por atrito também é reduzido
- Tempo de vida da fieira deve aumentar

# Ferramenta

- Região de entrada (definida por  $2\beta$ )
- Região de trabalho (definida por  $2\alpha$ )
- Região de calibração (Hc)
- Região de Saída ( $2\gamma$ )

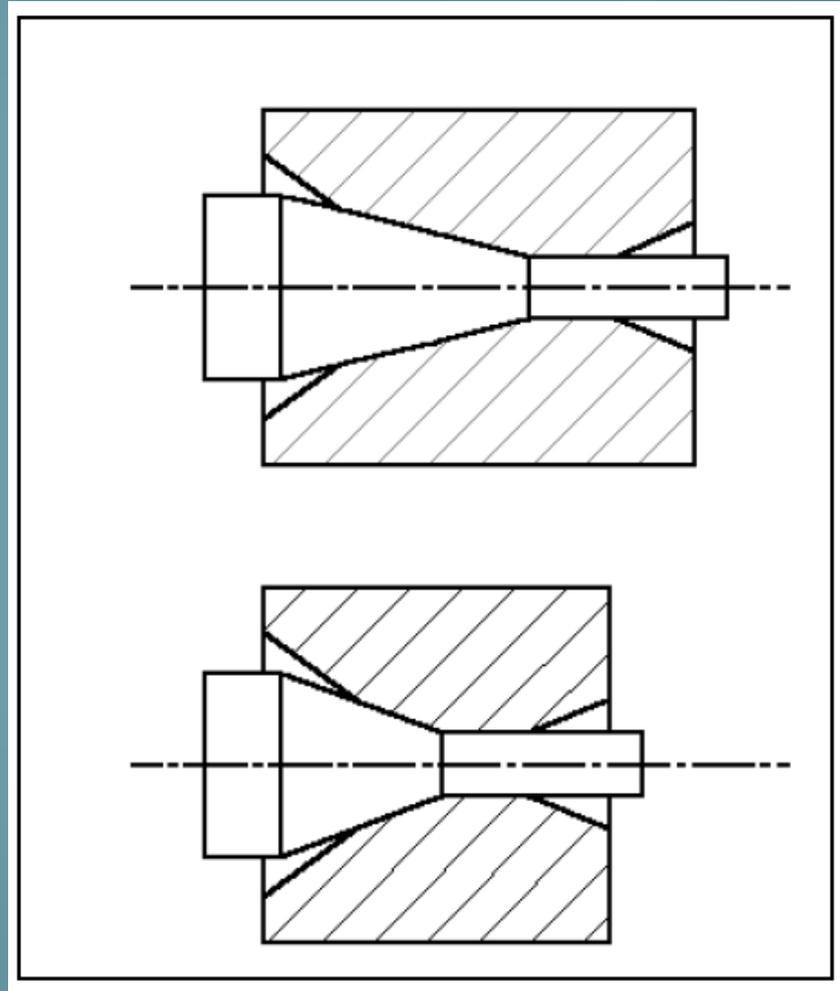


# Ferramenta

- Região de entrada: guia a entrada de matéria-prima
- Região de trabalho – executa deformação plástica por escoamento convergente
- Região de calibração – define geometria e dimensões do produto
- Região de saída – onde ocorre o retorno elástico do material

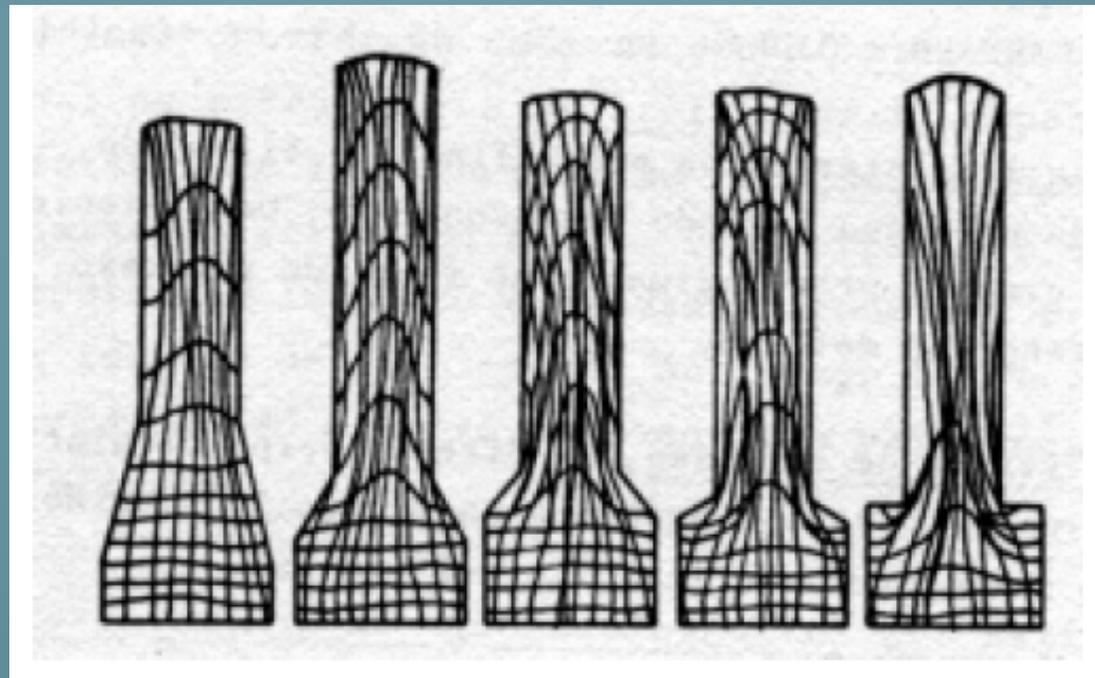
# Ferramenta

- Influência do ângulo de trabalho sobre o atrito
- Ângulos  $2\alpha$  menores implicam em maior comprimento da região de trabalho para uma mesma redução de área.



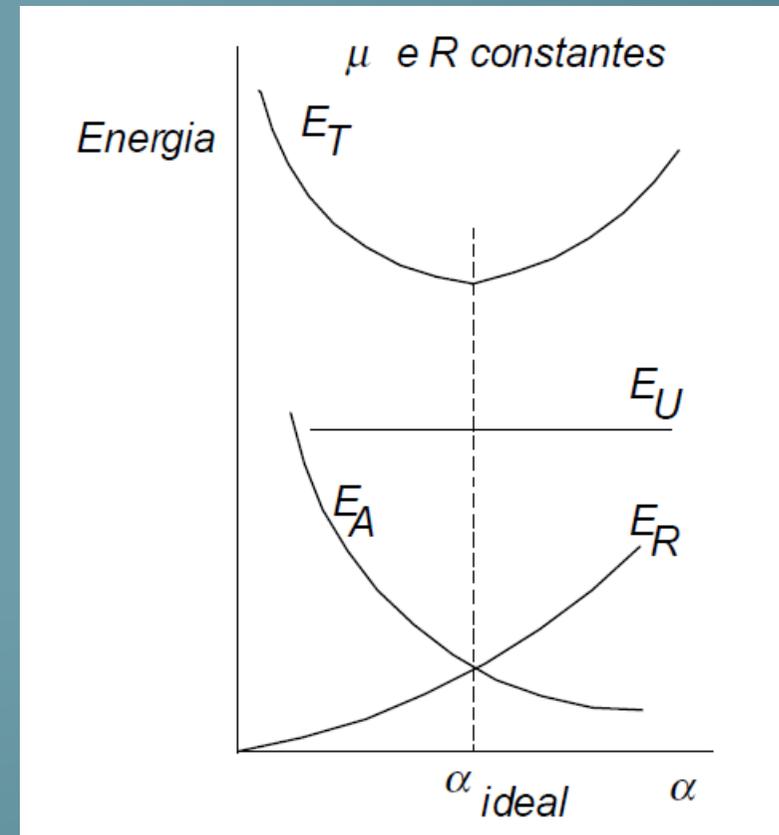
# Ferramenta

- Influência do ângulo de trabalho sobre o cisalhamento do material



# Ângulo ótimo de fieira

- O ângulo ótimo é aquele em que se obtém a menor tensão de trefilação.
- $E_U$  = energia de def. uniforme
- $E_A$  = energia dissipada por atrito
- $E_R$  = Energia de cisalhamento

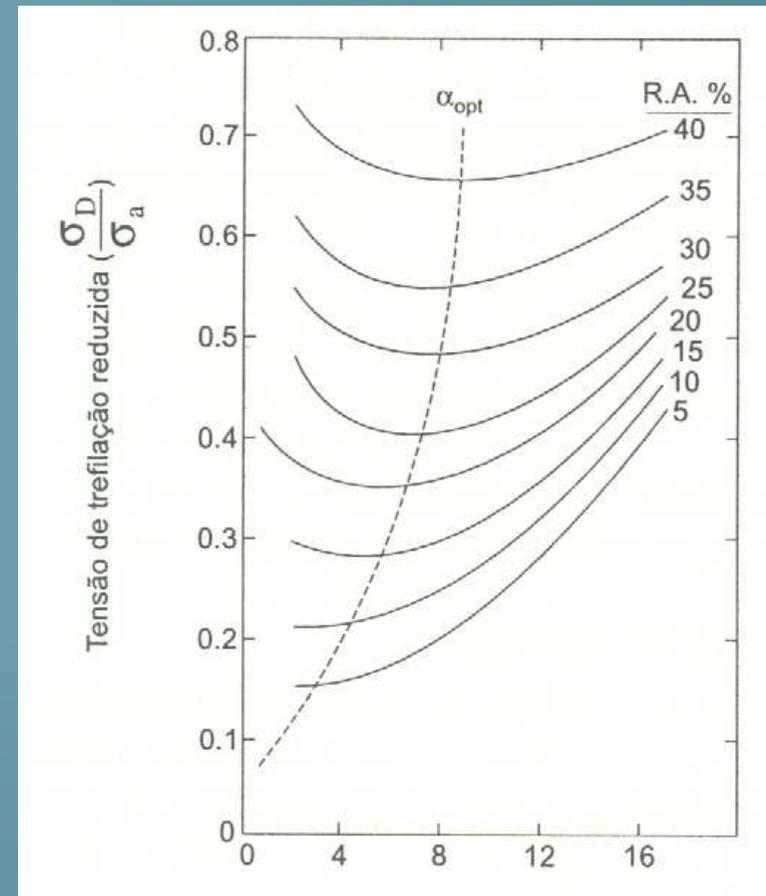


# Ângulo ótimo de feira

- A energia total de trefilação depende da redução de área, e o ângulo ideal também dependerá deste fator
- Quanto maior a redução de área, maior o ângulo ótimo da feira
- Isso ocorre porque o gasto energético com atrito é muito maior do que o do trabalho redundante, e sua diminuição tem maior impacto na energia total.

# Ângulo ótimo de fieira

- Quanto maior a redução de área, maior o ângulo ótimo



# Análise térmica da trefilação

- O aumento da temperatura por conta da deformação pode ser calculado pela expressão:

$$\Delta T = \sigma_{f,m} \ln \frac{A_i}{A_f} \left( \frac{1}{c\rho} \right)$$

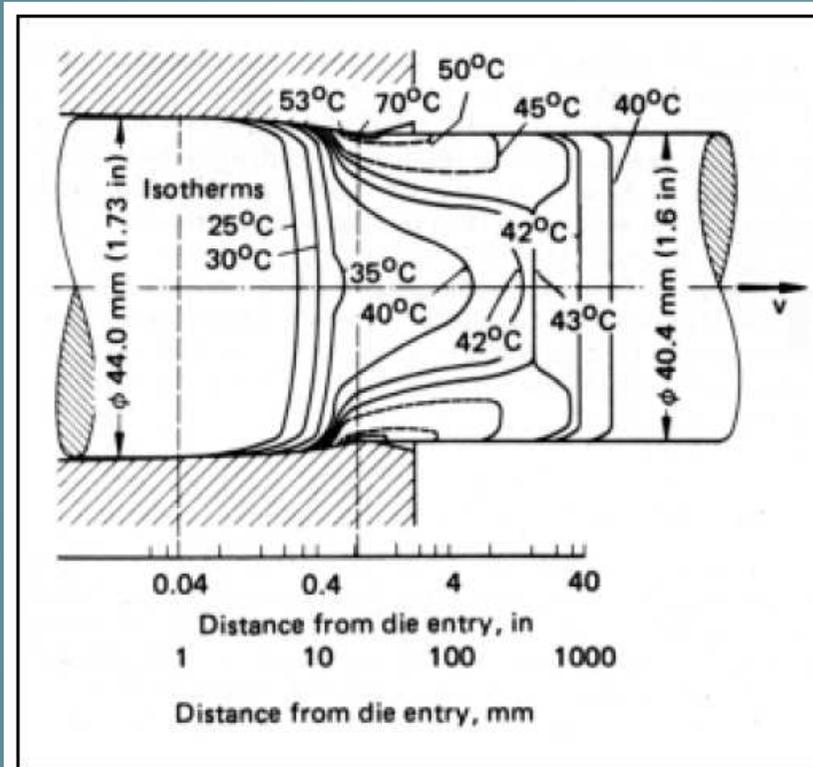
- $\sigma_{fm}$  = tensão média de escoamento
- $c$  = calor específico
- $\rho$  = densidade do material trefilado

Expressão não leva em conta o efeito da velocidade

# Análise térmica da trefilação

- Aumento da velocidade de trefilação reduz a transferência de calor entre o metal e a matriz (diminui o tempo de contato)
- Porém, causa também diminuição da eficiência do lubrificante e aumento da geração de calor por atrito.
- A temperatura no produto trefilado depende da região analisada e do tempo de processo

# Análise térmica da trefilação



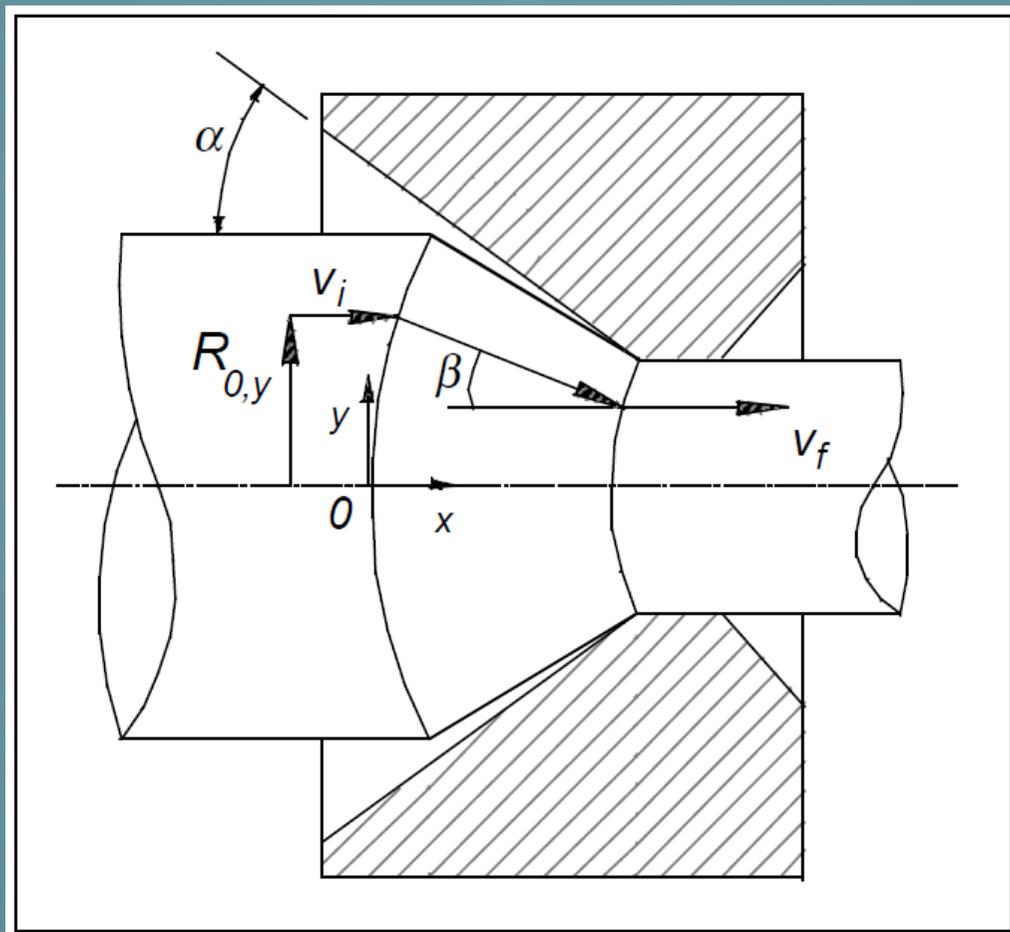
Material: AISI 1010  
Lubrificante: óleo  
 $R = 16\%$   
 $2\alpha = 12^\circ$   
 $v = 6,7$  m/min

# Análise térmica da trefilação

- Considerando o efeito da velocidade, o aumento da temperatura passa a ser:

$$\Delta T = \frac{1}{c\rho} \int_0^t \sigma_f \dot{\epsilon} . dt$$

# Análise térmica da trefilação



# Análise térmica da trefilação

- Para uma barra cilíndrica, o tempo de contato em uma posição  $x$  pode ser calculado como

$$t_{(x)} = \frac{x}{v_{(x)}}$$

- Sendo que

$$x = \frac{D - D_f}{2 \tan \beta}$$

$$v_{(x)} = v_i \left( \frac{D_i}{D} \right)^2$$

# Análise térmica da trefilação

- A taxa de deformação será dada por:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{2 \ln \left( \frac{R_{o,y}}{R_{x,y}} \right)}{t_{(x)}}$$

# Exemplo

- *Calcular o aumento de temperatura na trefilação de uma barra de aço AISI 1015 que tem diâmetro inicial de 25 mm e passa por redução de área de 10%, desconsiderando o efeito da velocidade e considerando  $c = 483 \text{ J/kg}$ ,  $\sigma = 280 \text{ MPa}$  e  $\rho = 7860 \text{ kg/m}^3$ .*
- *Para o exemplo anterior, recalcular o aumento de temperatura para um elemento de volume posicionado em  $r_{0,y} = 8 \text{ mm}$ , considerando que a velocidade inicial é igual a  $10 \text{ m/s}$  e o ângulo de trabalho igual a  $16^\circ$ .*

# Definição do número de passes

- Para minimizar os efeitos de encruamento, e a necessidade de recozimentos intermediários, é preferível fazer passes sequenciais de pequenas reduções
- A redução de seção no fio é limitada pela condição em que o fio atinge seu valor máximo de limite de escoamento

# Definição do número de passes

- Para se determinar a redução máxima, utiliza-se uma regra pratica que a tensão de trefilação não deve ser maior do que 80% da tensão de escoamento do material trefilado

$$\sigma_{tref} < 0,8.k \ln \left( \frac{A_i}{A_f} \right)^n$$

# Definição do número de passes

- A necessidade de recozimento também é determinada por uma regra prática que estabelece que a tensão de escoamento na saída da fieira não pode ultrapassar 80% do limite de resistência do material

$$\sigma_{esc} < 0,8 \cdot \sigma_{res}$$

# Definição do número de passes

- Exemplo 1: A partir da redução total e da redução por passe, determinar o número de passes
- Determinar qual é o número de passes para realizar uma redução de área de 90% em passes de 7% de redução
  1. Calcular a deformação total  $\varepsilon_t$  (sempre baseada na redução de área)

$$\varepsilon_t = \ln \left( \frac{A_0}{A_f} \right)_{total} = \ln \left( \frac{A_0}{0,1A_0} \right) = \ln \left( \frac{1}{0,1} \right) = 2,302$$

1. Calcular a deformação de um passe individual

$$\varepsilon_p = \ln \left( \frac{A_0}{A_f} \right)_{passe} = \ln \left( \frac{A_0}{0,9A_0} \right) = \ln \left( \frac{1}{0,9} \right) = 0,105$$

# Definição do número de passes

- Dividir  $\varepsilon_t$  por  $\varepsilon_p$
- Arredondar para o número inteiro acima

$$NP = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_p} = \frac{2,302}{0,105} = 21,85$$

Portanto,  $NP = 22$

# Definição do número de passes

- Exemplo 2: A partir da redução total e do número de passes, determinar a redução por passes
- Determinar qual é o número de passes para realizar uma redução de área de 90% em 15 passes
  1. Calcular a deformação total  $\varepsilon_t$  (sempre baseada na redução de área)

$$\varepsilon_t = \ln \left( \frac{A_0}{A_f} \right)_{total} = \ln \left( \frac{A_0}{0,1A_0} \right) = \ln \left( \frac{1}{0,1} \right) = 2,302$$

2. Dividir a deformação total pelo número de passes obtendo  $\varepsilon_p$ :

$$\varepsilon_p = \frac{2,302}{15} = 0,154$$

# Definição do número de passes

- Lançar o valor calculado de  $\varepsilon_p$  na equação da deformação por passe:

- $\varepsilon_p = \ln \left( \frac{A_0}{A_f} \right)_{\text{passe}} \quad 0,154 = \ln \left( \frac{A_0}{A_f} \right)_{\text{passe}}$

- $e^{0,154} = \left( \frac{A_0}{A_f} \right)_{\text{passe}}$

- $\left( \frac{A_f}{A_0} \right) = \frac{1}{1,166} = 0,85$

- Portanto, a redução de área será de 15%

# Produtos trefilados

- Produtos de seção transversal circular:
  - Barras: diâmetro  $> 5$  mm
  - Fios grossos (Aramés):  $5$  mm  $>$  diâmetro  $> 2$  mm
  - Fios médios:  $2$  mm  $>$  diâmetro  $> 0,5$  mm
  - Fios finos:  $0,50$  mm  $>$  diâmetro  $> 0,15$  mm
  - Fios capilares: diâmetro  $< 0,15$  mm

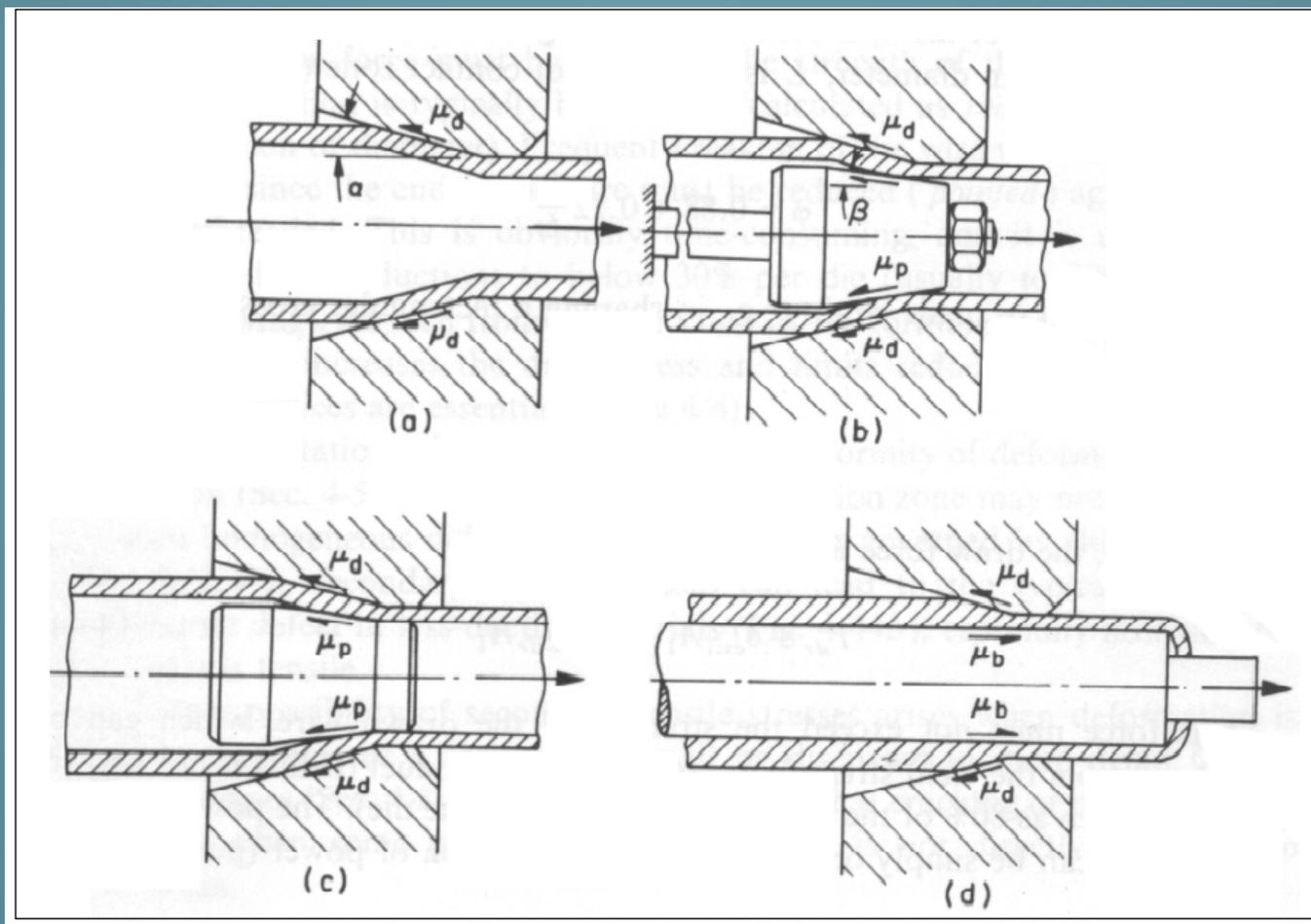
# Produtos trefilados

- Tubos
  - Trefilação de tubos sem costura
    - Extrudados a quente
    - Laminados
  - Trefilação de tubos com costura

# Produtos trefilados

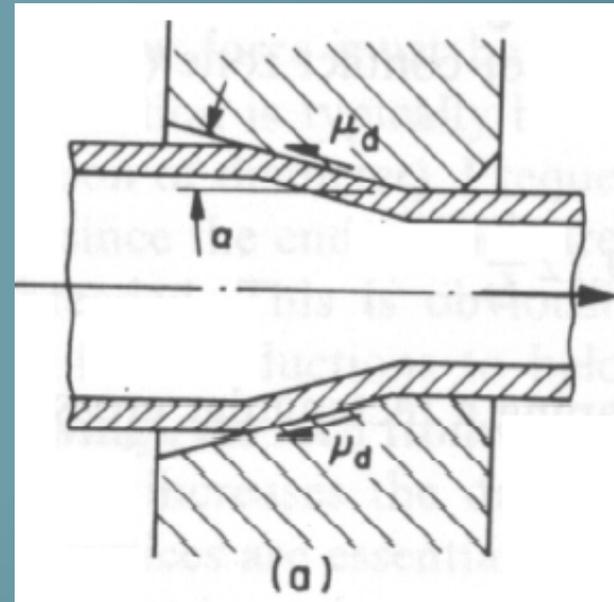
- Tubos:
  - Indústria automobilística
  - Indústria de máquinas e equipamentos
  - Aplicações em construção civil
- Trefilação de tubos tem como objetivo obter produtos com melhor acabamento superficial e tolerâncias dimensionais, paredes mais finas e perfis mais regulares

# Trefilação de tubos



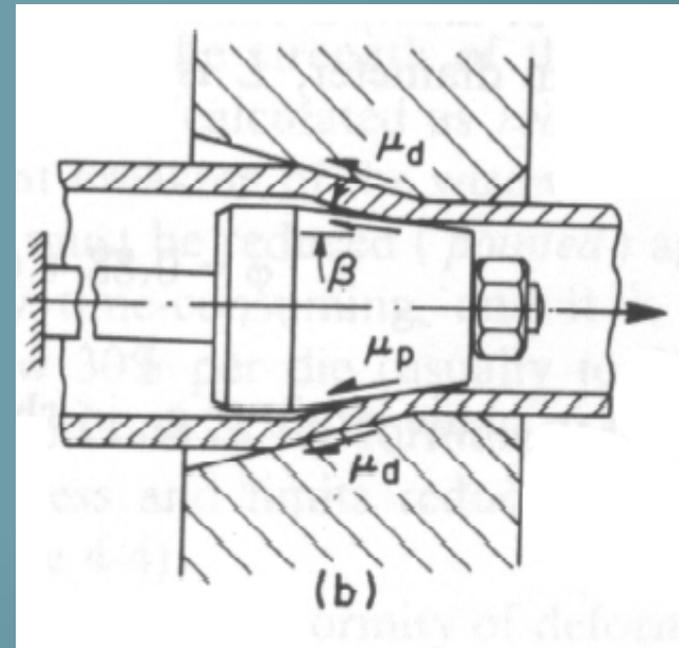
# Trefilação de tubos

- Sem mandril
  - Deformação no interior do tubo não é restrita
  - Há aumento da espessura de parede
  - Superfície interna fica mais irregular
  - Trabalho redundante é maior
  - Redução de área é limitada



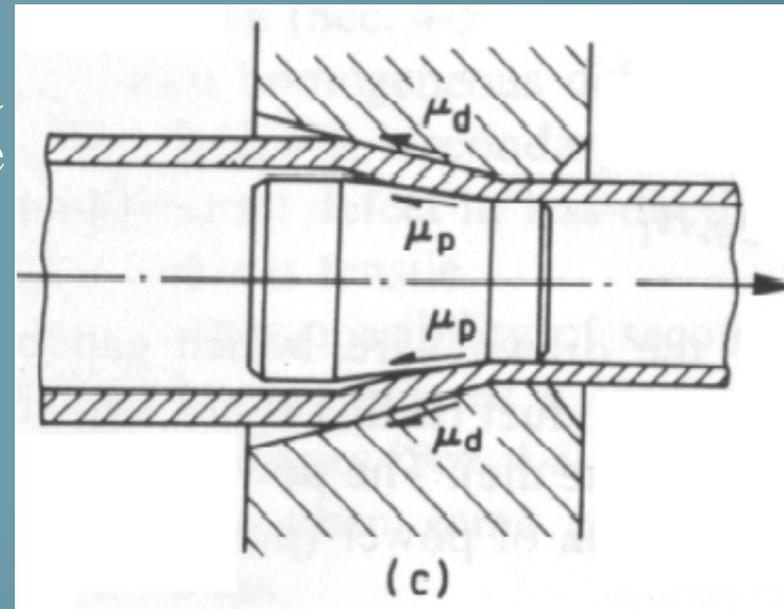
# Trefilação de tubos

- Com mandril estacionário
- Diâmetro interno e externo são modificados e controlados
- Mandril pode ser cilíndrico ou cônico
- Atrito mais intenso
- Redução de área normalmente não passa de 30%



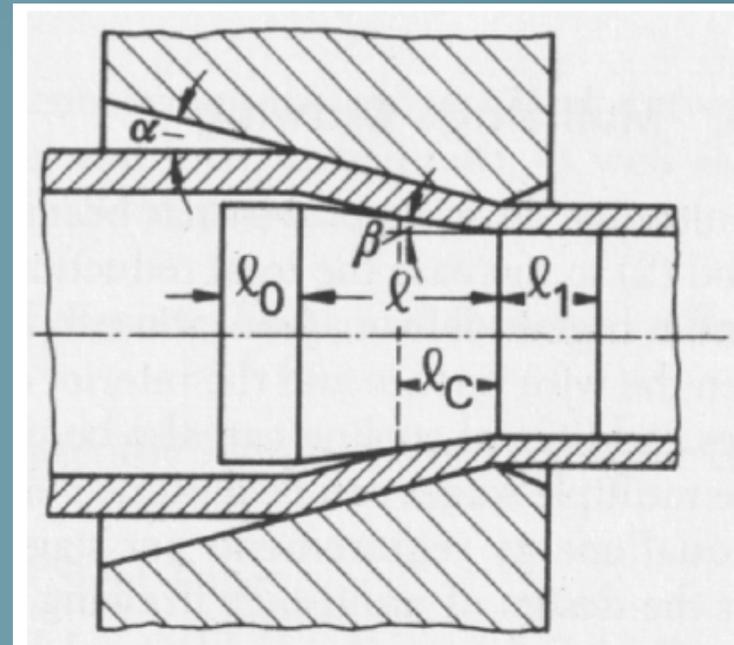
# Trefilação de tubos

- Mandril flutuante
- Processo para tubos longos que podem ser bobinados
- Evita-se o uso de hastes longas e a ocorrência de ressonância na haste
- É necessário um projeto adequado da lubrificação e da geometria das ferramentas
- Reduções de até 45% com forças menores do que no processo com haste



# Trefilação de tubos

- Mandril flutuante
- $L_0$  – região que guia o tubo pela fieira e impede que o mandril passe
- $L$  – região de trabalho, onde ocorre a deformação plástica ao longo de  $L_c$
- $L_1$  – região de calibração, definem a espessura da parede e seu diâmetro interno

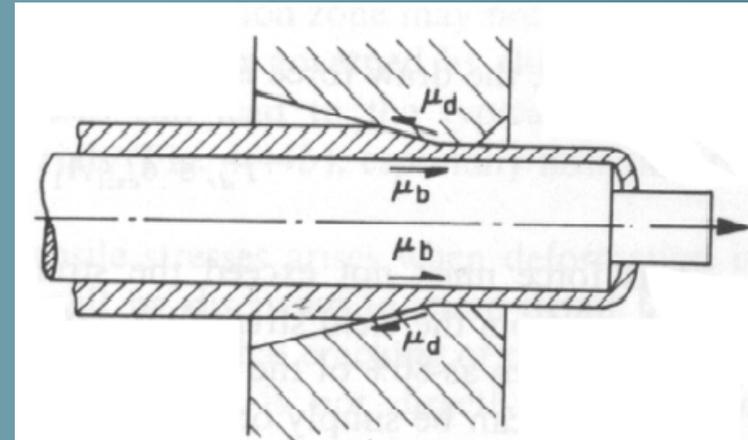


# Trefilação de tubos

- Redução mínima do diâmetro externo de 10%
- Ângulo de trabalho  $2\alpha$  próximo de  $10^\circ$
- Diferença entre o ângulo de trabalho  $2\alpha$  e o ângulo do cone do mandril  $2\beta$  deve ser maior do que  $4^\circ$ .

# Trefilação de tubos

- Mandril passante
- Tem o mesmo comprimento do tubo e é puxado com ele pela matriz
- Diâmetro interno é mantido constante
- Anula o atrito na parede interna
- Difícil retirar o mandril



# Trefilação de tubos

- Tensão na trefilação de tubos:

$$\sigma_{tref} = \sigma_{f.m} \frac{1+B'}{B'} \left[ 1 - \left( \frac{A_f}{A_i} \right)^{B'} \right]$$

$$B' = \frac{\mu_D + \mu_P}{\tan \alpha - \tan \beta}$$

- $\mu_D$  = coeficiente de atrito na matriz
- $\mu_P$  = coeficiente de atrito no mandril

# Trefilação de tubos

- Na trefilação com mandril passante, o atrito entre a fieira e o tubo é em direção à entrada da fieira, e o atrito entre o tubo e o mandril é em direção à saída, a fórmula fica:

$$B' = \frac{\mu_D - \mu_P}{\tan \alpha - \tan \beta}$$

- Dependendo dos coeficientes de atrito, B' pode ser zerado ou tornar-se negativo

# Trefilação de tubos

- Na trefilação de tubos sem mandril, pode-se considerar que as equações para barra redonda continuam válidas.

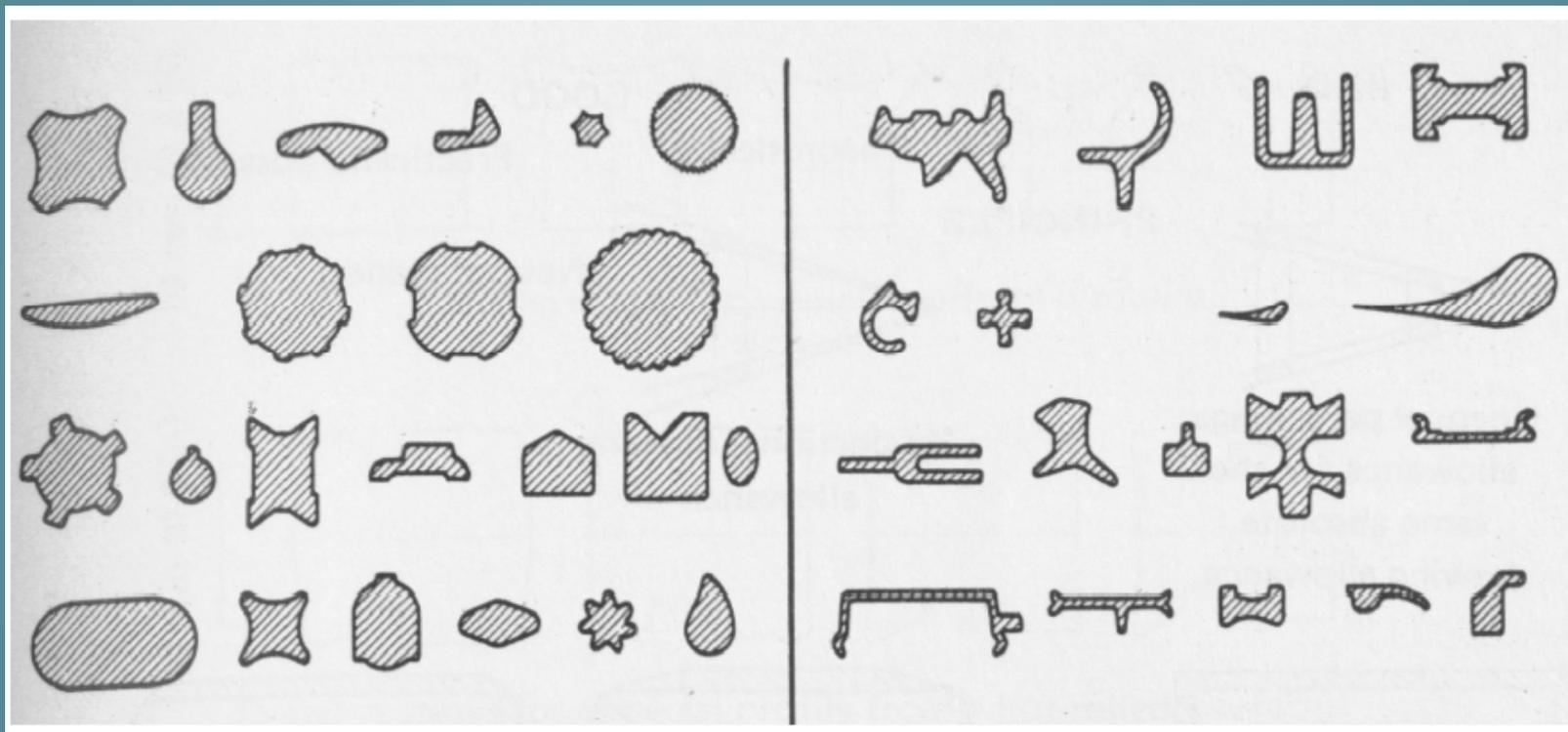
# Trefilação de perfis

- Obtenção de trefilados de boa qualidade dimensional (tolerâncias apertadas), qualidade geométrica e superficial
- Aços e ligas não ferrosas de alta resistência
- Mecanismo de deformação é essencialmente igual, mas a complexidade geométrica dificulta sua análise matemática

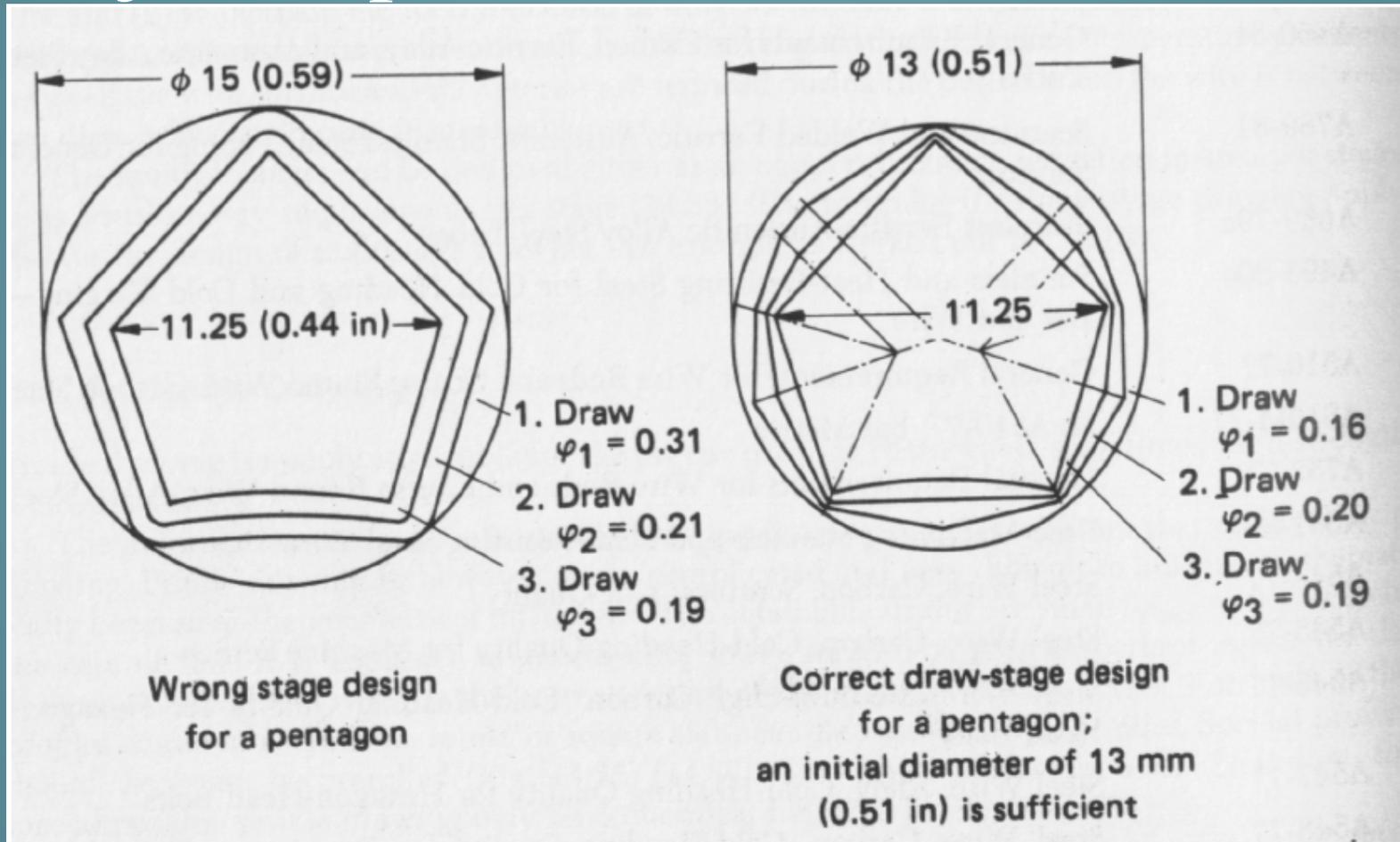
# Trefilação de perfis

- O projeto da geometria dos passes é o aspecto mais importante
- Podem-se usar barras laminadas, extrudadas ou trefiladas, com seções circulares, retangulares ou quadradas
- Alguns perfis dependem de barras laminadas já com perfis, encarecendo o processo.

# Trefilação de perfis



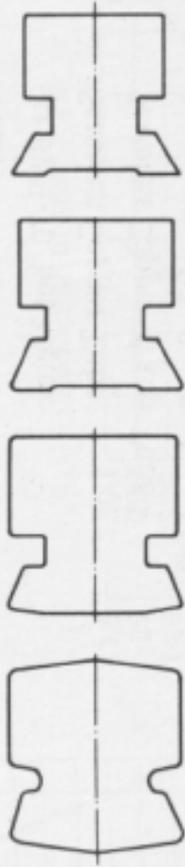
# Trefilação de perfis





10 mm (0.4 in)

Drawing stages for a pole shoe from a square



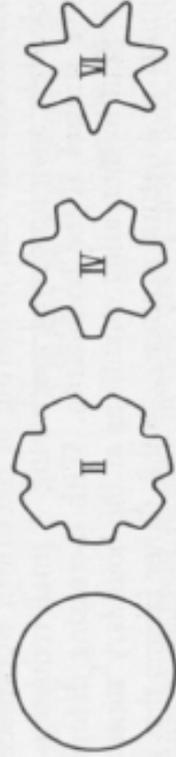
20 mm (0.8 in)

Drawing stages for a special profile from a hot-rolled preform



50 mm  
(2 in)

Drawing stages I, II, and III for a profile from a drawn preform



50 mm  
(2 in)

Drawing stages II, IV, and VI for a sprocket from a drawn preform

# Propriedades dos produtos trefilados

- Produtos longos e contínuos de diversas geometrias
- Possibilidade de controle de propriedades pela seqüência de processamento
- Especificação das propriedades depende das exigências da aplicação e da definição de material de partida, etapas de limpeza e acabamento superficial

Tipo de Aço	Porcentagem de carbono	Estado	Aplicações comerciais mais importantes
Baixo Carbono	0,08% a 0,20%	Sem tratamento térmico (isto é, no estado encruado)	Eletrodos de solda, pregos, pinos e peças conformadas a partir de arames. Resistência à tração variável de 500 a 1000 MPa
		Recozido ou Normalizado	Arames lisos e farpados, arames para telas, parafusos, rebites
Médio Carbono	0,20% a 0,50%	Recozido	Parafusos (posteriormente temperados e revenidos)
		Patenteado e Trefilado	Cabos, molas de pequena responsabilidade
Alto Carbono	0,60% a 1,00%	Sem tratamento térmico	Eléttrodos de solda, arruelas de pressão (posteriormente temperadas e revenidas)
		Patenteado e Trefilado	Cordas de piano, cabos para serviços pesados, tirantes e outras aplicações estruturais de responsabilidade, molas

NBR 8476-5999	DIN 2391-2393	Denominação	Explicação
TD	BK	Trefilado Duro	Nenhum tratamento térmico após a deformação a frio. Os tubos tem, por isso, pequeno poder de deformação, pelo qual não se assume nenhuma garantia.
TM	BKW	Trefilado Macio	Após o tratamento térmico segue uma leve redução de acabamento (trefilação a frio).
RB ou RD	GBK ou GZF	Recozido	Neste caso o tubo pode dentro de certos limites, ser deformado a frio (curvado, alargado etc.). Os tubos são recozidos em fornos com atmosfera protetora.
NB ou ND	NBK ou NZF	Normalizado	Após o recozimento, os tubos são mecânica ou quimicamente decapados. Os tubos são normalizados em fornos com atmosfera protetora, em temperatura acima da zona crítica.
			Após o tratamento, os tubos são mecânica ou quimicamente decapados.

# Lubrificação

- Lubrificação seca ou úmida
  - Úmida: o arame é imerso em um líquido lubrificante (óleo ou emulsão)
    - Todo o conjunto de fieiras pode estar imerso no lubrificante
  - Seca: o arame passa por uma caixa com lubrificante sólido (sabão, lubrificante em flocos) posicionada à frente da entrada da fieira.

# Lubrificação

- Na trefilação com altas velocidades, a espessura do filme lubrificante diminui com o aumento da temperatura e pressão
  - Lubrificação passa de hidrodinâmica a lubrificação de contorno. Condições de lubrificação se deterioram
- Temperaturas mais altas estão na interface metal/matriz, e a temperatura máxima ocorre na saída da fieira, onde se dá o maior desgaste
- Refrigeração é essencial para melhorar as condições de lubrificação

# Lubrificação

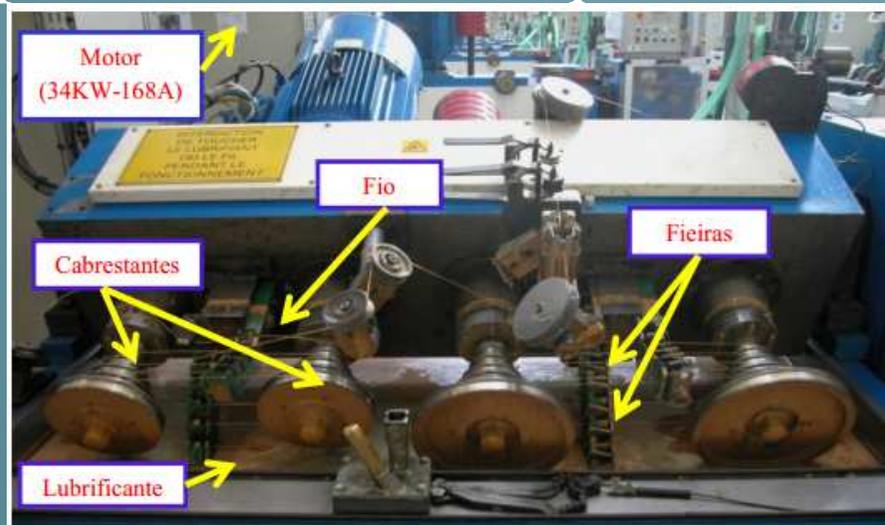
- Devem-se evitar produtos de origem mineral, a fim de evitar a formação de resíduos carbonosos no recozimento.
- Seleção do lubrificante é empírica, e é determinada pelo tipo de máquina, velocidade de trefilação, quantidade e fluxo de lubrificante disponível

# Lubrificação

- A formação de pó metálico em suspensão é crítica
- Esse pó não pode penetrar na fiação, pois pode causar danos superficiais
- Retirado por decantação ou filtração

# Lubrificação

- Aplicação pode se dar por duas formas:
  - Aspersão na região da fieira
    - O lubrificante é aplicado pouco antes da entrada no material na fieira, por spray ou fluxo simples
  - Imersão do fio ou ferramental no meio lubrificante, podendo imergir partes inteiras da máquina



# Lubrificação



# Lubrificação

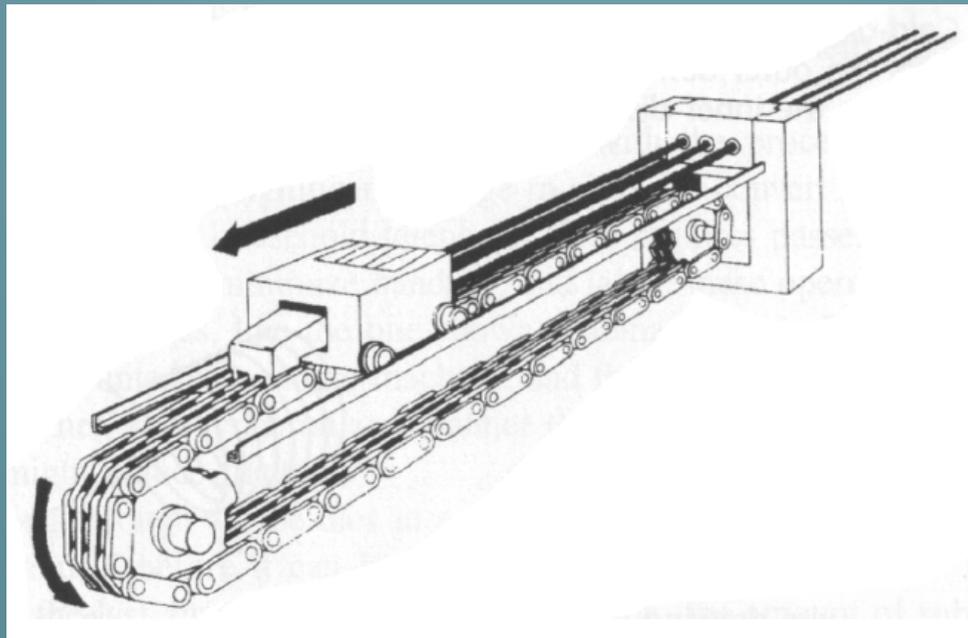
- Óleos vegetais:
  - Temperatura de trabalho não deve exceder 60°C
- Emulsões:
  - Temperatura de trabalho entre 38°C e 55°C
  - Deve-se evitar a formação de espuma
  - pH em torno de 8,5 a 9,5

# Equipamentos

- Classificação:
  - Quanto modo como exercem o esforço
  - Quanto ao sistema de lubrificação
  - Quanto ao diâmetro dos produtos

# Equipamentos

- Produtos que não podem ser bobinados ou devem ser fornecidos em barras, utiliza-se um banco de trefilação em que um carrinho puxa o produto



# Equipamentos

- Arames e fios de dimensões menores podem ser feitos em máquinas em que o produto é enrolado em um cabrestante, que traciona o produto em grandes velocidades, permitindo grande produtividade

# Equipamentos

- Classificação quanto ao esforço
  - Com deslizamento
    - Sistema de tração do fio – enrolado em um anel que o acumula após cada fieira
  - Sem deslizamento
    - Fio parte da bobina, passa pela primeira fieira e é enrolado em hélice e sai alinhado com a próxima fieira
    - O número de voltas depende da força de atrito necessária para tracionar o fio na fieira anterior
    - O anel seguinte faz o fio passar pela próxima fieira,

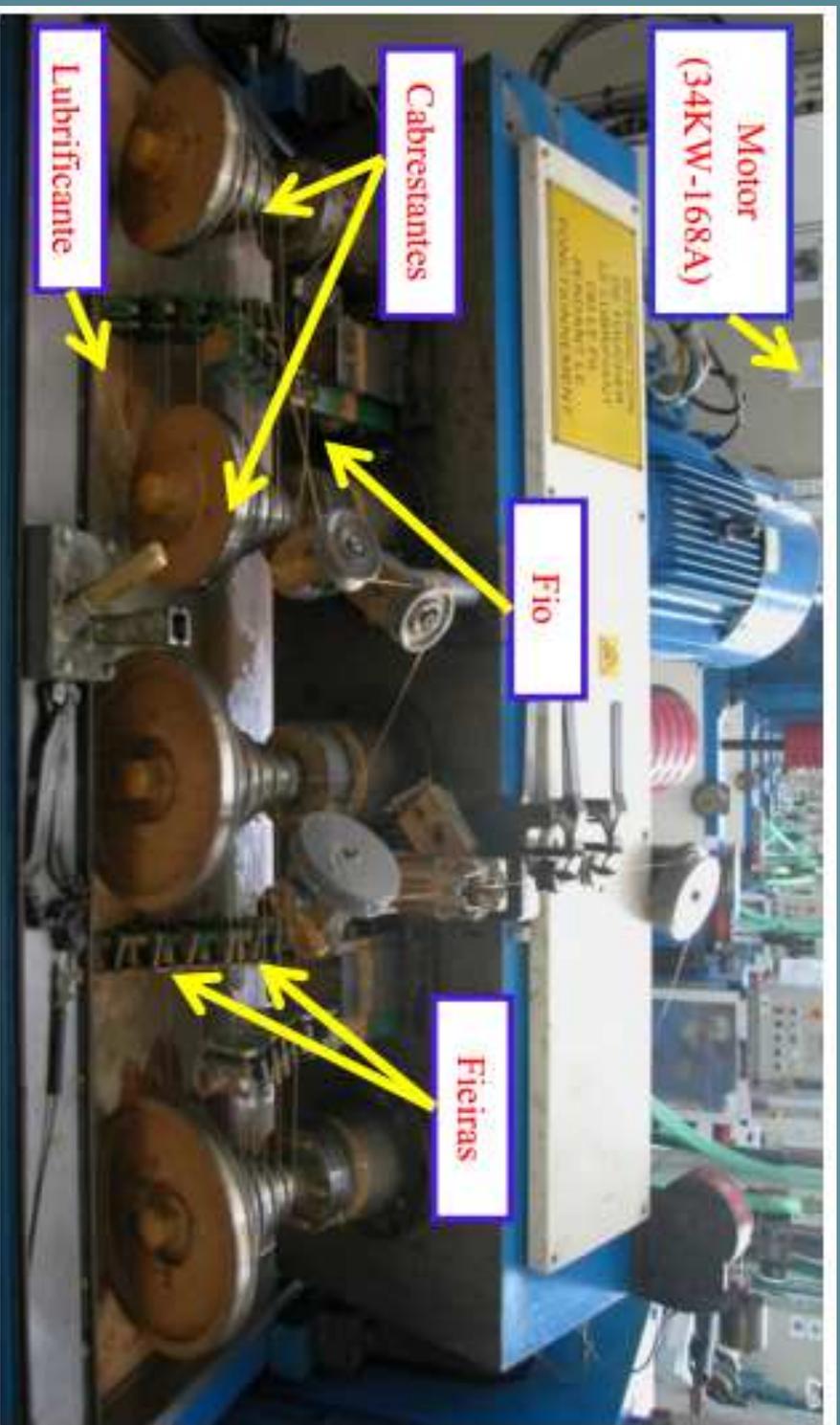
# Equipamentos

- Sistema de lubrificação
  - Máquinas com lubrificação sólida
  - Máquinas com lubrificação por imersão

# Equipamentos



# Equipamentos



TF – Paula Fernandes Lopes

# Equipamentos

- Classificação quanto ao diâmetro do produto
  - Para barras
  - Para fios grossos
  - Para fios médios
  - Para fios capilares

# Equipamentos

- Máquinas para trefilação de barras
  - Bastante robustas
  - Permitem grandes reduções
  - Poucas fieiras
  - Forças de trefilação podem ser da ordem de toneladas
  - Velocidades da ordem de 2 m/s

# Equipamentos

- Máquinas para fios médios e finos são sempre com deslizamento
- Pode chegar a 20 fieiras
- Normalmente lubrificadas por imersão, mas pode também ser por aspersão

# Equipamentos

- Máquinas para fios capilares
  - Sistemas mecânicos e de acionamento de alta precisão e isentos de vibrações
  - Tensão de bobinamento controlada individualmente
  - Provoca desgaste maior dos anéis e das ferramentas, exigindo revestimentos cerâmicos

# Defeitos de trefilação

