



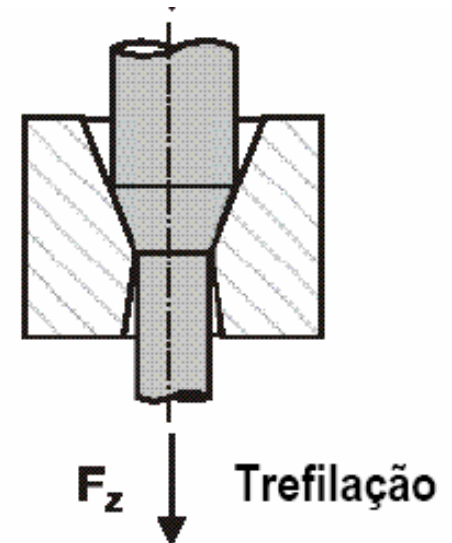
PROCESSO DE TREFILAÇÃO

TREFILAÇÃO

O QUE É?

A trefilação é uma operação em que a matéria-prima é estirada através de uma matriz em forma de canal convergente (FIEIRA ou TREFILA) por meio de uma força tracionadora aplicada do lado de saída da matriz.

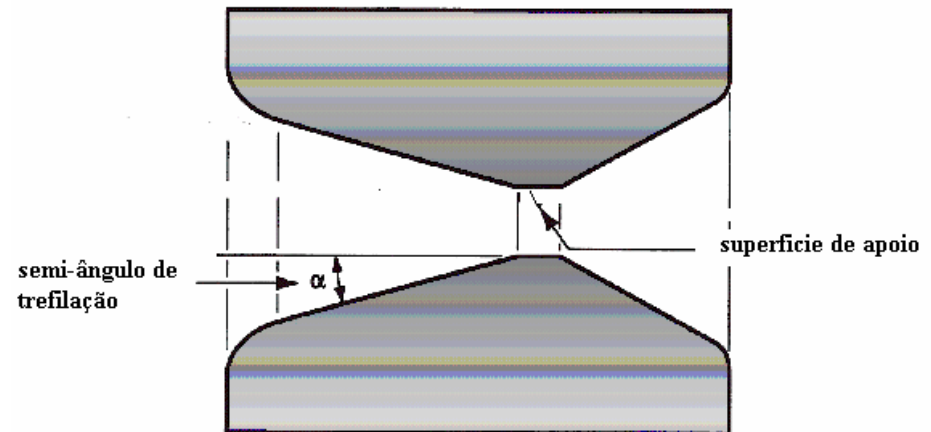
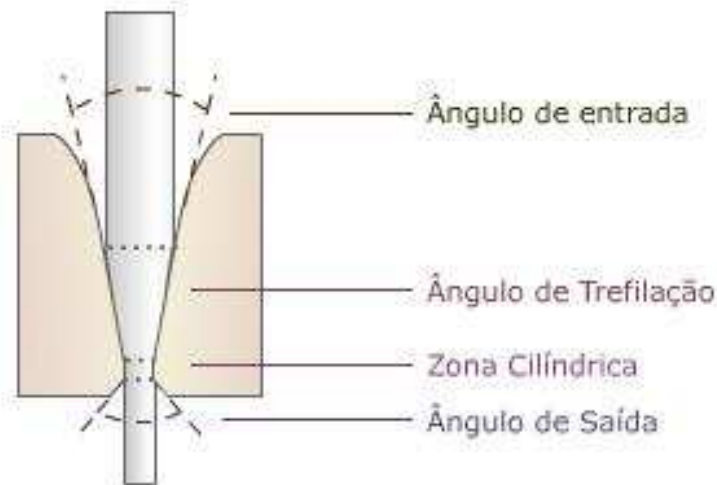
O escoamento plástico é produzido pela combinação da força tracionadora com as forças compressivas provenientes da reação da matriz sobre o material.



DISPOSITIVO BÁSICO: A FIEIRA

A fieira é o dispositivo básico da trefilação, e compõe todos os equipamentos trefiladores. Sua geometria é dividida em quatro zonas:

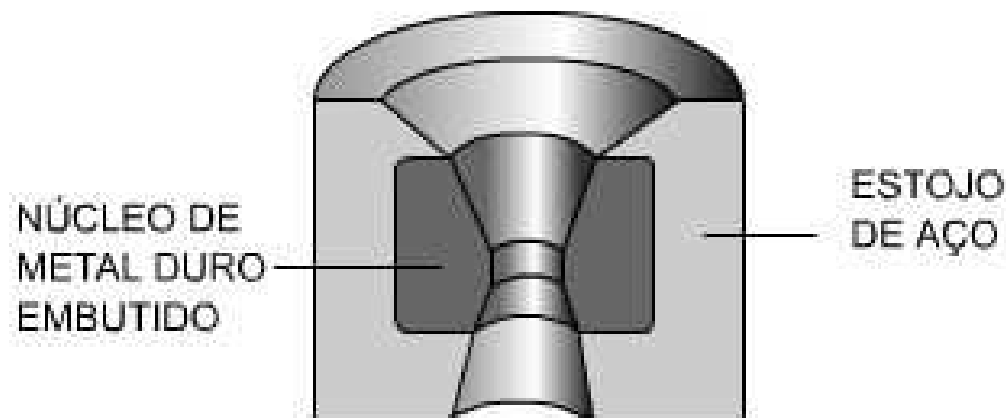
- de entrada
- de redução (α = semi-ângulo de trefilação)
- de calibração (zona cilíndrica)
- de saída



MATERIAL DA FIEIRA:

O material é escolhido conforme as exigências do processo (dimensões, esforços) e o material a ser trefilado. Os materiais mais utilizados são:

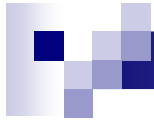
- ☐ Carbonetos sinterizados (sobretudo WC – Widia)
- ☐ Aços de alto C revestidos de Cr (cromagem dura)
- ☐ Aços especiais (Cr-Ni, Cr-Mo, Cr-W, etc.)
- ☐ Ferro fundido branco
- ☐ Cerâmicos (pós de óxidos metálicos sinterizados)
- ☐ Diamante (p/ fios finos ou de ligas duras)





PRODUTOS MAIS COMUNS

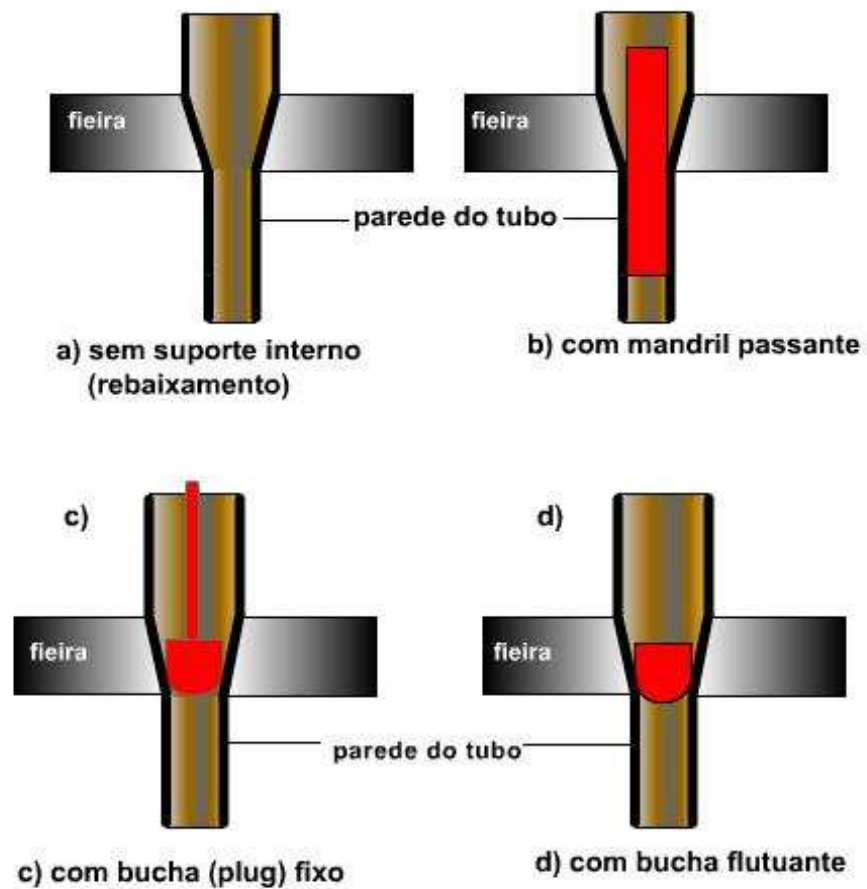
Barras	$\varnothing < 25\text{mm}$	
Arames	Comuns	Grossos: $\varnothing = 5...25\text{mm}$
		Médios: $\varnothing = 1,6...5,0\text{mm}$
		Finos: $\varnothing = 0,7...1,6\text{mm}$
	Especiais	$\varnothing < 0,02\text{mm}$
Tubos	Trefilados de diferentes formas	



VANTAGENS

- O material pode ser estirado e reduzido em secção transversal mais do que com qualquer outro processo;
- A precisão dimensional obtida é maior do que em qualquer outro processo exceto a laminação a frio, que não é aplicável às bitolas comuns de arames;
- A superfície produzida é uniformemente limpa e polida;
- O processo influi nas propriedades mecânicas do material, permitindo, em combinação com um tratamento térmico adequado, a obtenção de uma gama variada de propriedades com a mesma composição química.

MÉTODOS DE TREFILAÇÃO DE TUBOS



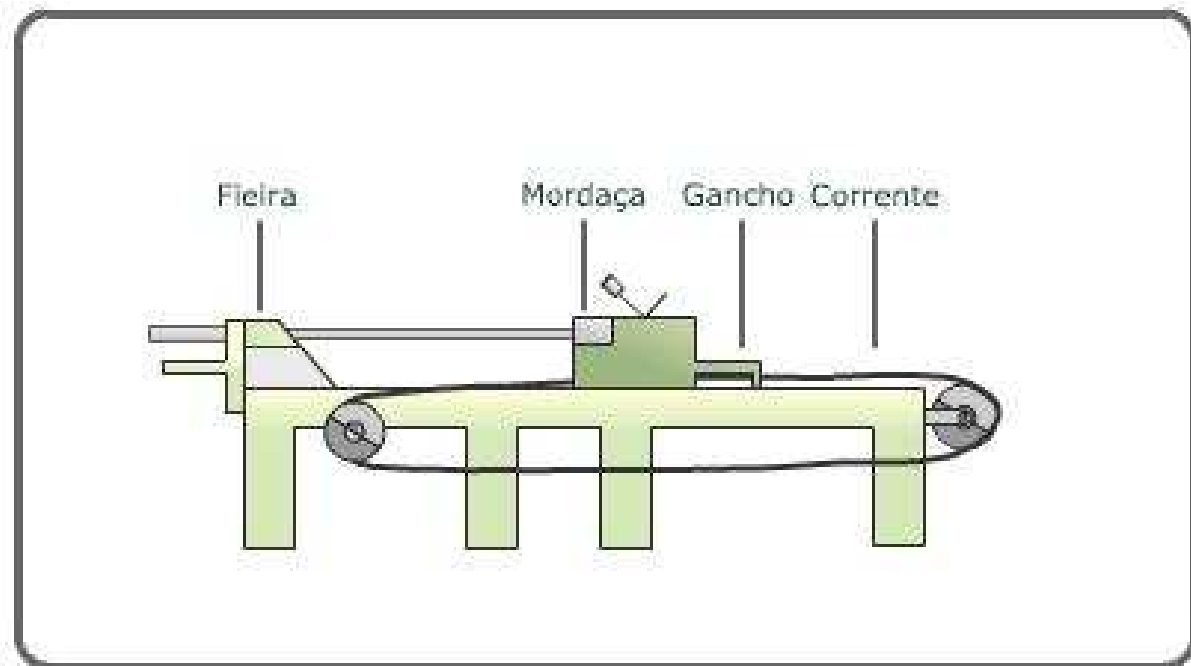
EQUIPAMENTOS

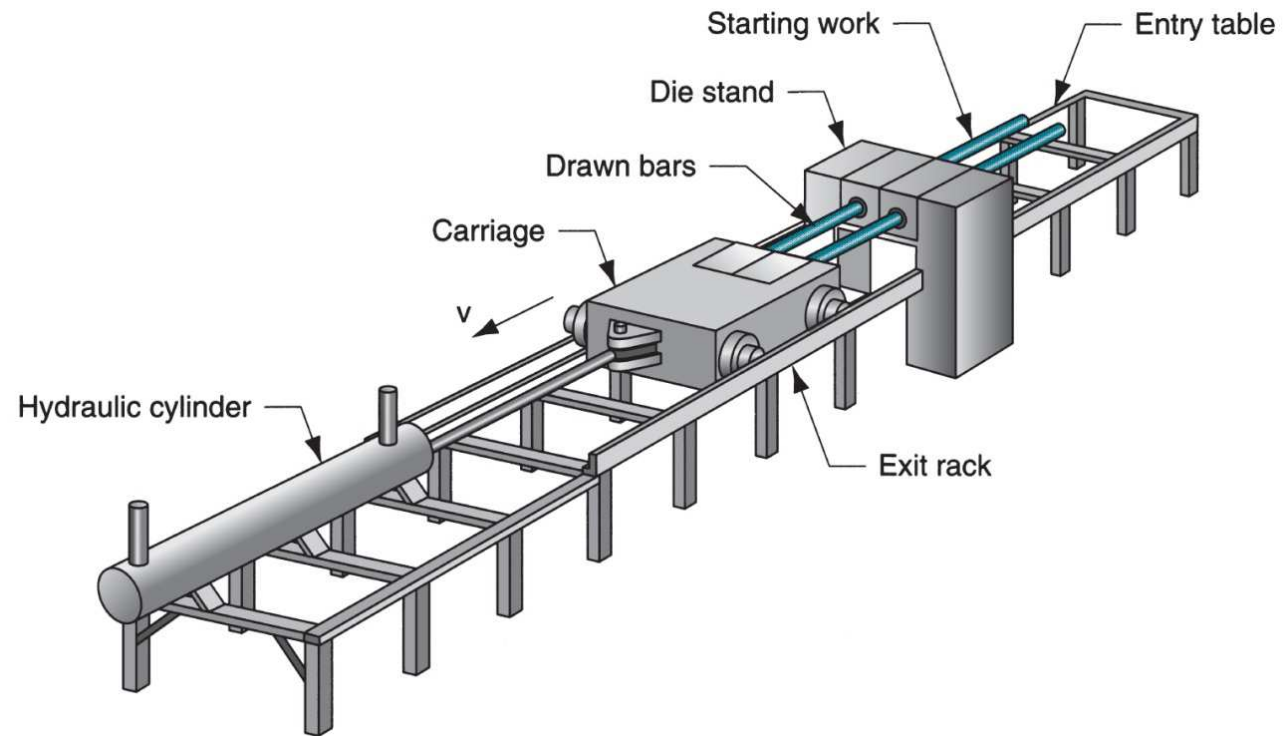
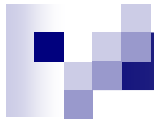
Classificam-se em dois grupos:

- BANCADAS DE TREFILAÇÃO – Utilizadas para produção de componentes não bobináveis, como barras e tubos.
- TREFILADORAS DE TAMBOR – Utilizadas para produção de componentes bobináveis, ou seja, fios e arames.

BANCADA DE TREFILAÇÃO

Na figura ao lado pode-se observar o aspecto esquemático de uma bancada de trefilação, com os respectivos componentes.

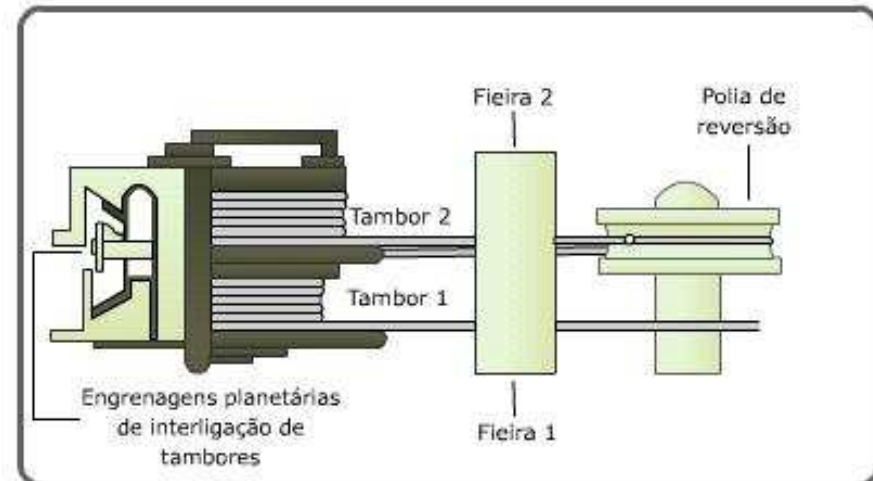
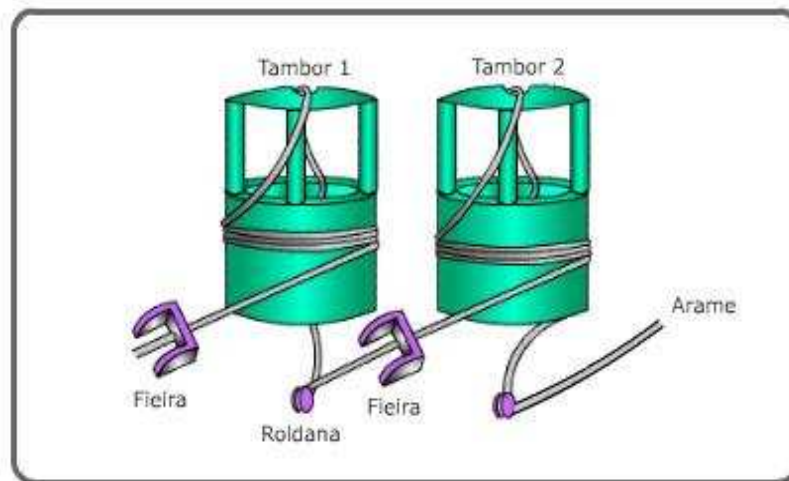




TREFILADORAS DE TAMBOR

Classificam-se em três grupos:

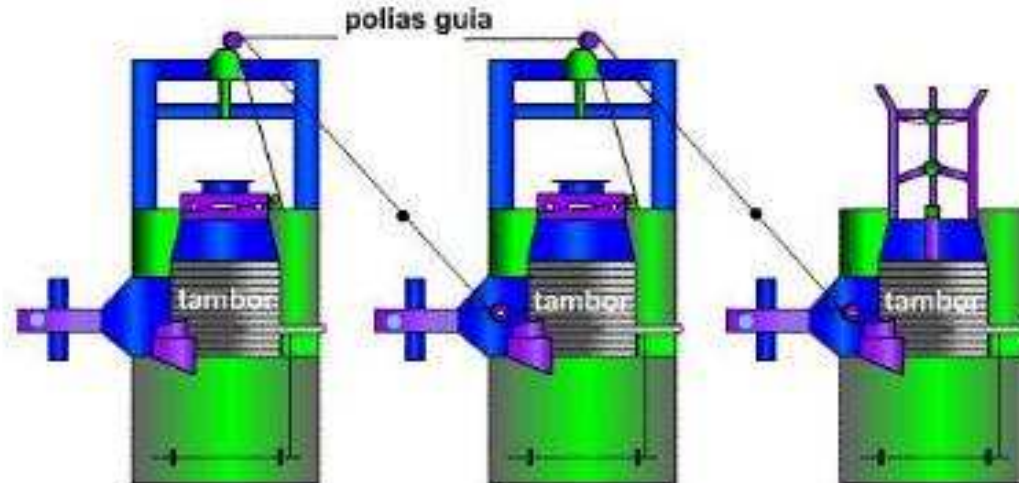
- Simples (um só tambor) – Para arames grossos
- Duplas – Para arames médios
- Múltiplas (contínuas) – Para arames médios e finos



Os elementos das máquinas de trefilação dependem das características de cada máquina. Existem entretanto componentes básicos que usualmente sempre estão presentes nas trefiladoras. Eles são:

- Carretel alimentador
- Porta-fieira
- Garra ou mordança para puxar a primeira porção do arame
- Tambor para enrolar o arame trefilado

Máquina de estiramento de arame do Sistema Acumulativo

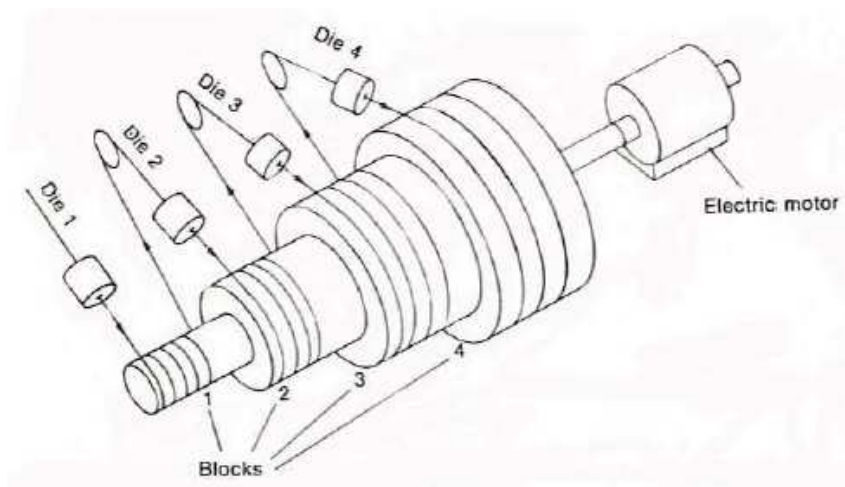
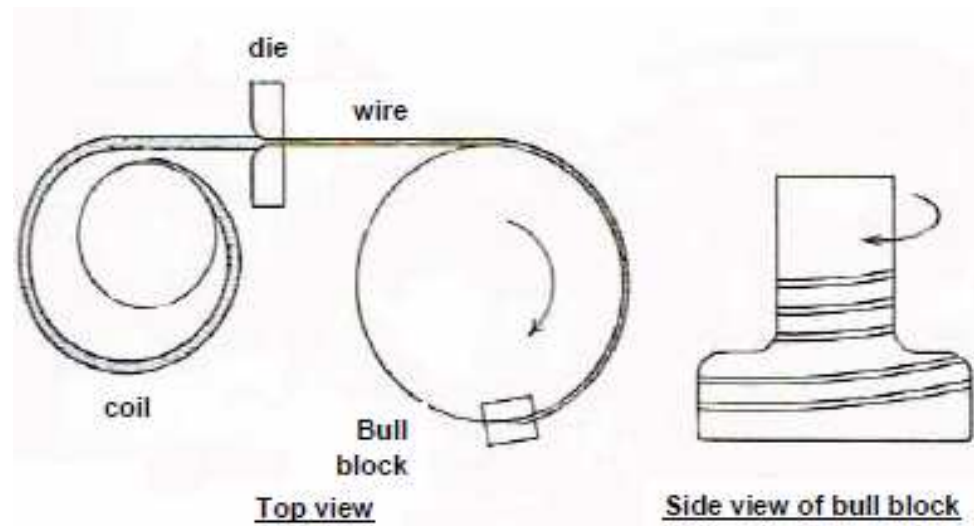


A ponta do arame, depois de sair de uma matriz, é enfiada num olhal no topo do tambor, passando por polia de guia e para a matriz seguinte.

TREFILAÇÃO CONTINUA DE FIOS PESADOS



Máquina Rotativas





O PROCESSO PRODUTIVO

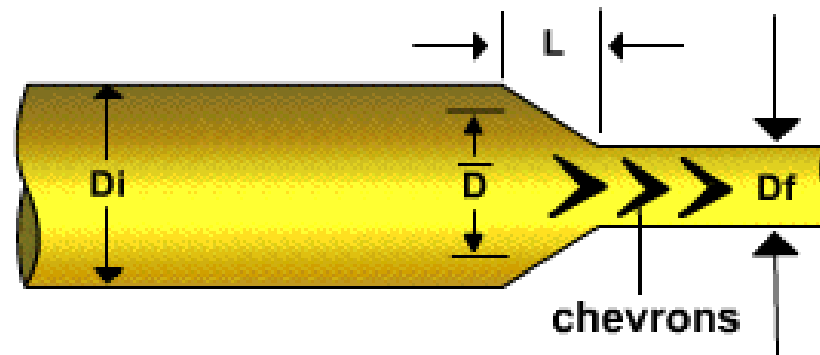
- Matéria-prima: Fio-máquina (vergalhão laminado a quente)
- Descarepação:
 - Mecânica (descascamento), dobramento e escovamento.
 - Química (decapagem): com HCl ou H₂SO₄ diluídos.
- Lavagem: em água corrente.
- Recobrimento: comumente por imersão em leite de cal Ca(OH)₂ a 100°C a fim de neutralizar resíduos de ácido, proteger a superfície do arame, e servir de suporte para o lubrificante de trefilação.
- Secagem (em estufa) - Também remove H₂ dissolvido na superfície do material.
- Trefilação - Primeiros passes a seco. Eventualmente: recobrimento com Cu ou Sn e trefilação a úmido.

DEFEITOS EM TREFILADOS

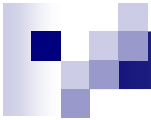
Podem resultar:

- de defeitos na matéria-prima (fissuras, lascas, vazios, inclusões);
- do processo de deformação.

Exemplo de defeito: Trincas internas em ponta de flecha ("chevrons") - veja figura abaixo



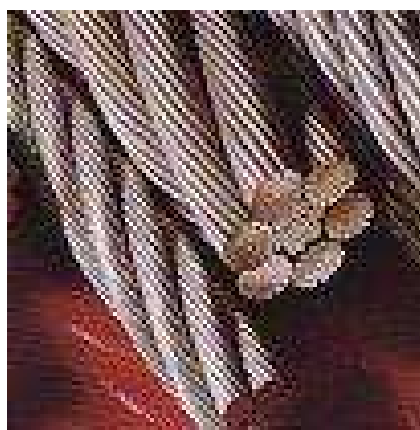
$$\bar{D} = \frac{D_i + D_f}{2}$$



TRATAMENTO TÉRMICO DE FIOS TREFILADOS

- **RECOZIMENTO:**
Indicação: principalmente para arames de baixo carbono
Tipo: subcrítico, entre 550 a 650°C
Objetivo: remover efeitos do encruamento.
- **PATENTEAMENTO:**
Indicação: aços de médio a alto carbono ($C > 0,25 \%$)
Tipo: aquecimento acima da temperatura crítica (região g) seguido de resfriamento controlado, ao ar ou em banho de chumbo mantido entre 450 e 550°C. A seguir, encruamento em trefila.
Objetivo: obter uma boa combinação de resistência e ductilidade, pela estrutura resultante de perlita fina ou bainita encruadas.

PRODUTOS TREFILADOS: FIOS DE AÇO



PRODUTOS TREFILADOS

CONDUTORES ELÉTRICOS

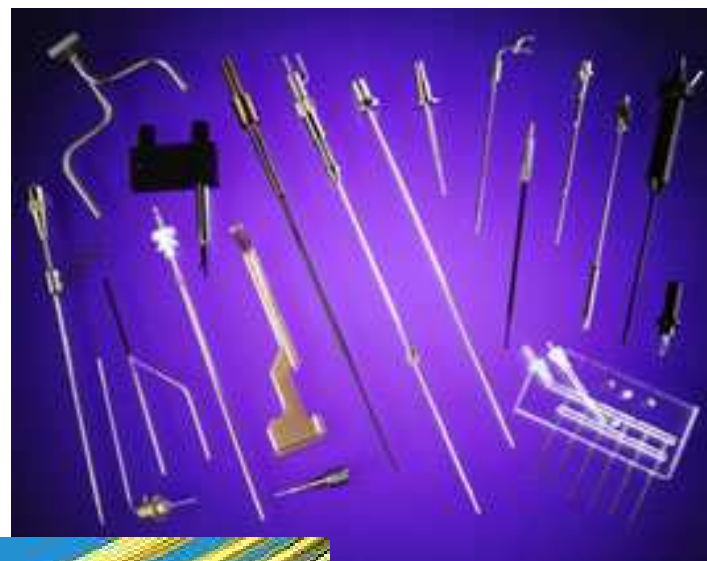


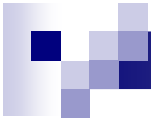
PRODUTOS TREFILADOS

TUBOS



MICROTUBOS





Parâmetros de Trefilação

■ Os mais importantes são:

- Quantidade de redução (r)

A = seção final

A_0 = seção inicial

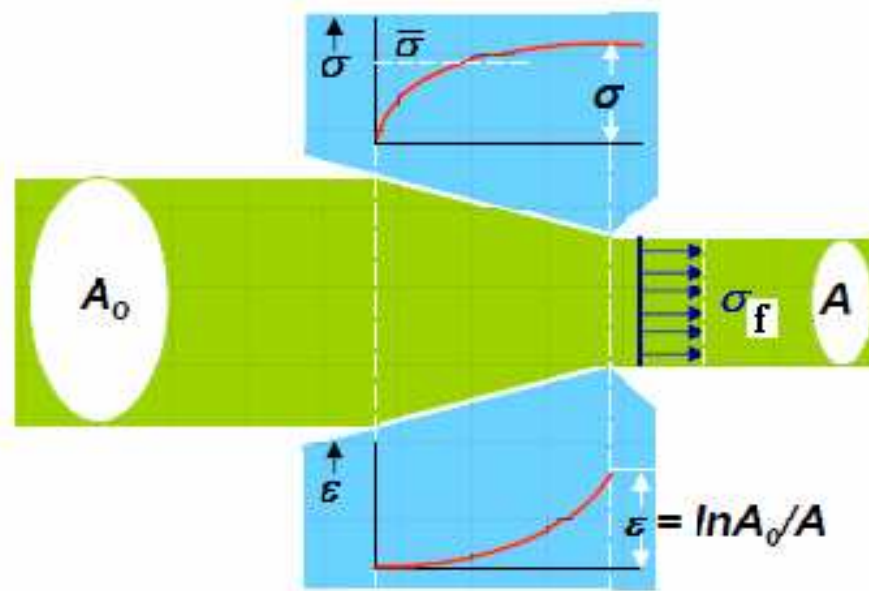
- semi-ângulo de trefilação (α)

- Lubrificação

- propriedades mecânicas do arame antes, durante e após redução

$$r = \left(1 - \frac{A}{A_0} \right) \times 100$$

Métodos analíticos de cálculo



Método da deformação homogênea

$$W = F.L = \sigma_f \text{vol} = \text{vol}.u$$

$$\sigma_f = u$$

$$\varepsilon = \ln \frac{A_0}{A} = \ln \frac{1}{1-r}$$

$$\sigma_f = \bar{Y} \cdot \ln \left(\frac{A_0}{A} \right)$$

ou

$$\sigma_f = \bar{Y} \cdot \ln \left(\frac{1}{1-r} \right)$$

σ_f = tensão frontal

$\bar{Y}$ = tensão de escoamento média

r = redução

Seção circular

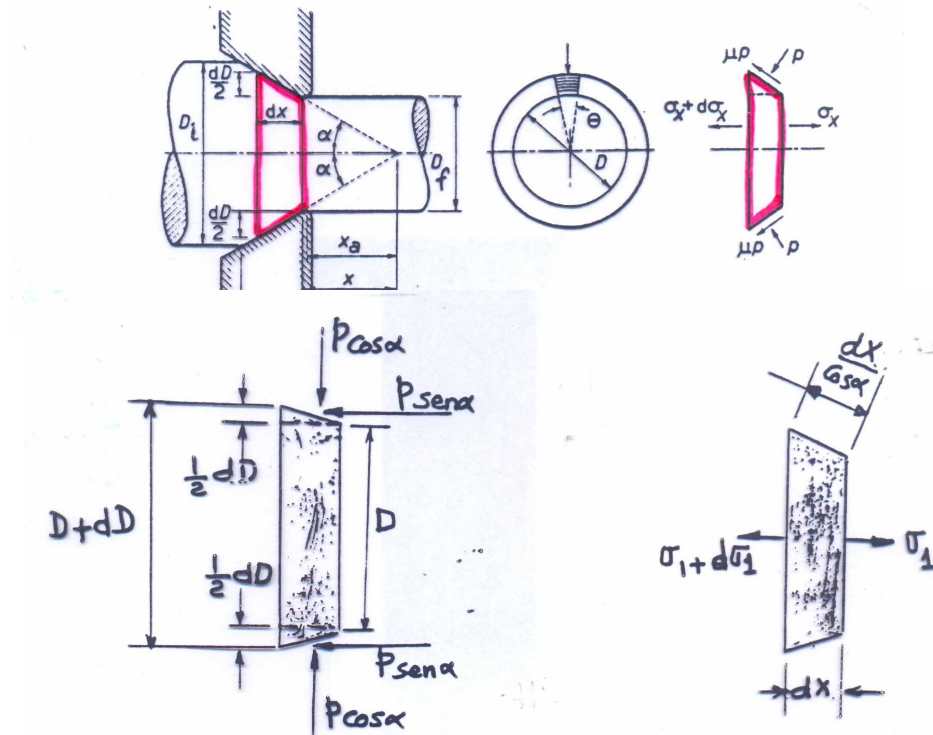
$$\sigma_f = \bar{Y} \cdot \ln \left(\frac{D_0}{D_f} \right)^2 = \bar{Y} \cdot 2 \ln \left(\frac{D_0}{D_f} \right)$$

Barras (estado plano de deformação)

$$\sigma_f = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{Y} \cdot \ln \left(\frac{A_0}{A} \right)$$

$\sigma_f \leq \sigma_e$ do material já trefilado

Método dos Blocos



Equação de equilíbrio na direção 1:

$$(\sigma_1 + d\sigma_1) \frac{\pi}{4} (D + dD)^2 - \sigma_1 \frac{\pi D^2}{4} + \frac{\mu p \cos \alpha \pi D dx}{\cos \alpha} + p \sin \alpha \left(\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) = 0$$



Dividindo por π , por D

$$\frac{\sigma_1 dD}{2} + \frac{Dd\sigma_1}{4} + \mu p dx + p dx \tan \alpha = 0$$

como $dx = \frac{dD}{2 \tan \alpha}$

$$\frac{\sigma_1 dD}{2} + \frac{Dd\sigma_1}{4} + \frac{\mu p dD}{2 \tan \alpha} + \frac{p dD}{2} = 0$$

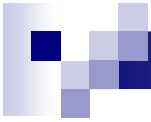
Multiplicando por 4

$$Dd\sigma_1 + 2dD[\sigma_1 + p(1 + \mu \cot \alpha)] = 0$$

para μ e α pequenos $\Rightarrow \sigma_2 = \sigma_3 = -p$

Usando Tresca

$$\sigma_1 + p = \bar{Y} \quad \text{Admitindo } \bar{Y} = \bar{Y} \quad \text{e constante}$$



$$p = \bar{Y} - \sigma_1$$

$$Dd\sigma_1 + 2dD[\sigma_1 + (\bar{Y} - \sigma_1)(1 + \mu \cot g\alpha)] = 0$$

considerando $B = \mu \cot g\alpha$

$$Dd\sigma_1 + 2dD[-\sigma_1 B + \bar{Y}(1 + B)] = 0$$

$$Dd\sigma_1 - 2dD[\sigma_1 B - \bar{Y}(1 + B)] = 0$$

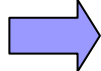
$$\frac{d\sigma_1}{\sigma_1 B - \bar{Y}(1 + B)} = 2 \frac{dD}{D}$$

Integrando e sabendo que B e Y são constantes

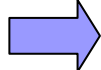


$$\frac{1}{B} \ln[B\sigma_1 - \bar{Y}(1+B)] = 2 \ln D + C$$

$$B\sigma_1 - \bar{Y}(1+B) = CD_B^2$$

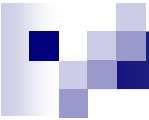
Para $D=D_0$  $\sigma_1 = 0$

$$C = -\frac{\bar{Y}(1+B)}{D_0^{2B}}$$

Para $D=D_f$  $\sigma_1 = \sigma_f$

$$B\sigma_f = \bar{Y}(1+B) + \left[-\bar{Y}(1+B) \left(\frac{D_f}{D_0} \right)^{\frac{2}{B}} \right]$$

$$\sigma_f = \bar{Y} \frac{(1+B)}{B} + \left[1 - \left(\frac{D_f}{D_0} \right)^{\frac{2}{B}} \right]$$



Solução Final

Fios:

$$\sigma_f = \bar{Y} \frac{(1+B)}{B} \left[1 - (1-r)^B \right]$$

ou

$$\sigma_f = \bar{Y} \frac{(1+B)}{B} \left[1 - \left(\frac{D_f}{D_0} \right)^{2B} \right]$$

$r = \text{redução}$

$B = \mu \cot g \alpha$

$\mu =$ coeficiente de atrito

Barras:

$$\sigma_f = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{Y} \frac{(1+B)}{B} \left[1 - (1-r)^B \right]$$



Cálculo de redução máxima

Considera-se: $\sigma_f = \bar{Y}$

$$\frac{\sigma_f}{\bar{Y}} = \frac{(1+B)}{B} \left[1 - (1-r)^B \right] = 1$$

Exercício: Obtenha a redução máxima possível para os seguintes casos:

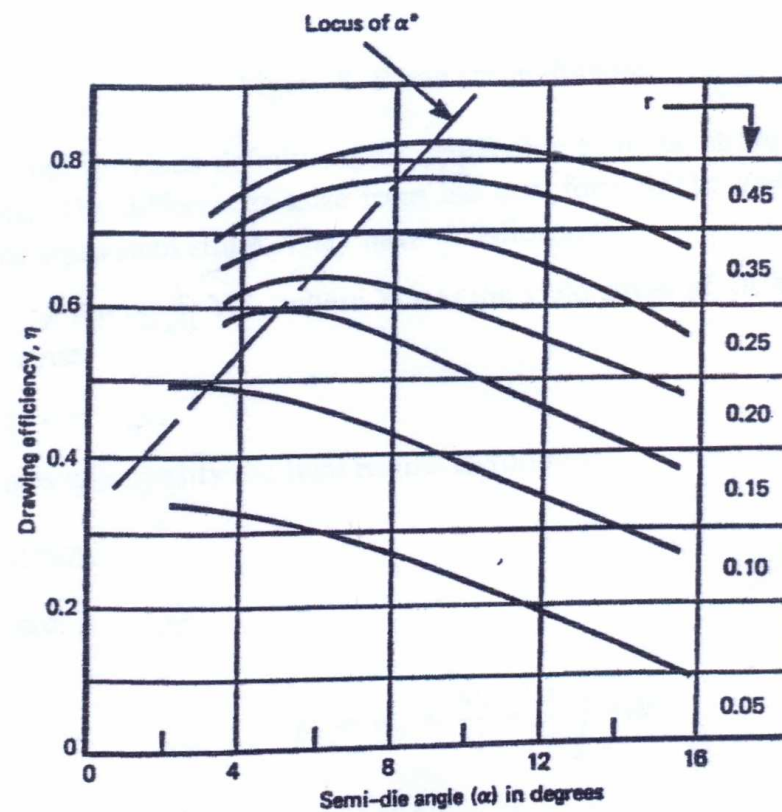
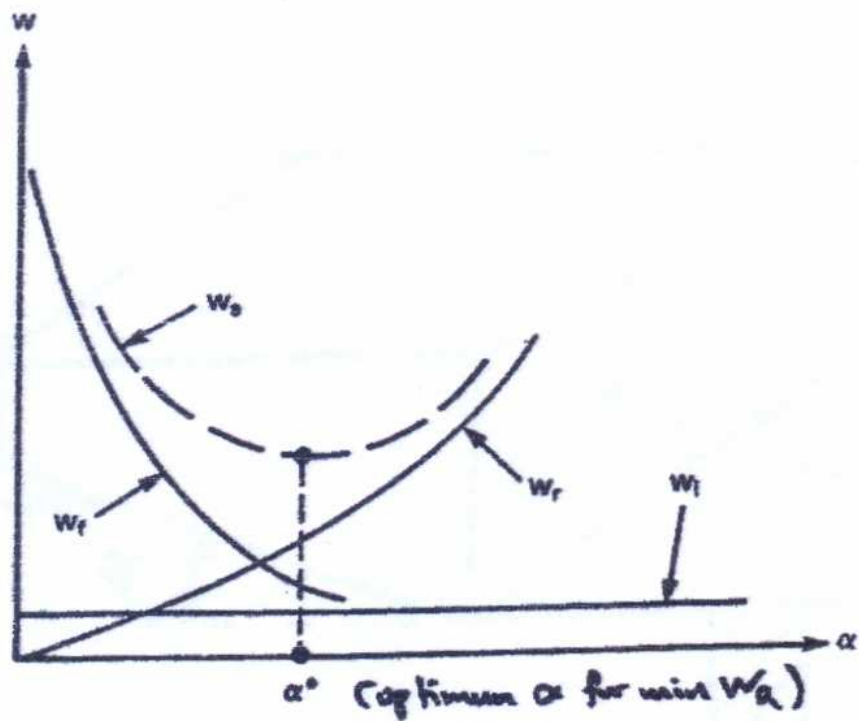
- a) Considerando somente o trabalho ideal (método da deformação homogênea);
- b) Admitindo $\mu = 0,05$ e $\alpha=10^0$

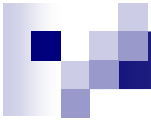
Eficiência η

$$W_R = W_i + W_f + W_r$$

$$\eta = \frac{W_i}{W_R}$$

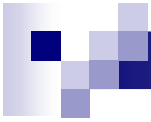
Normalmente $0,5 \leq \eta \leq 0,65$





Exemplo 1

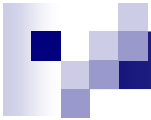
- Um material com uma curva tensão-deformação real representada por $\bar{\sigma} = 10000\bar{\epsilon}^{0,5} \text{ psi}$ é usado em um processo de trefilação de fios. Pede-se:
 - (a) considerando somente a deformação homogênea calcule a força de trefilação para reduzir um fio desse material de 0,2 in para 0,15 in.
 - (b) Assumindo que o trabalho devido ao atrito mais o trabalho redundante corresponde a 40% do trabalho ideal de deformação, estime a força real para trefilar o fio do item (a); calcule a máxima redução em área possível num único passe;



Exemplo 2

Uma placa de metal de 10 mm de largura e 0,5 mm de espessura é trefilada para 0,3 mm de espessura numa matriz cujo semi-ângulo é 10° . A tensão de escoamento média é 550 N/mm^2 e o coeficiente de atrito $\mu=0,08$.

- (a) Estime a carga de trefilação; —
- (b) se o trabalho total feito aparece na forma de calor , qual seria o aumento de temperatura da placa. Dado: $\gamma_{\text{metal}} = 8,8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$:
 $C = 400 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$.



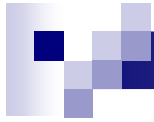
Exemplo 3

- a) Determine a força de trefilação necessária para produzir 20% de redução num fio de aço inox com 10 mm de diâmetro. Dado: $\alpha = 6^\circ$ e $\mu = 0,09$; $\bar{\sigma} = 1300\bar{\epsilon}^{0,3} MPa$
- b) Determine a máxima redução possível.
- c) Se o fio é trefilado a uma velocidade de 0,5 m/s, determine a potência requerida para produzir a deformação.

Exemplo 4

Uma tira de aço de 10 mm de largura e 0,4 mm de espessura é trefilada para 0,3 mm de espessura numa matriz cujo semi-ângulo é 12° , a uma velocidade de 2,0 m/s. A tensão de escoamento média é $250\sqrt{3}$ N/mm² e o coeficiente de atrito $\mu=0,1$.

- (a) Qual o trabalho total gasto para trefilar uma bobina de 50 kg. Dado $\gamma_{\text{aço}} = 7,8 \times 10^3$ kg/m³.
- (b) Se a eficiência do processo é 85%, qual a potência requerida e a energia consumida pela bobina;
- (c) Qual deve ser o imput de corrente do motor principal de 220V.



Referências Adicionais

- Dieter, G.E. Mechanical metallurgy, 1988, SI metric edition, McGraw-Hill, ISBN 0-07-100406-8.
- Edwards, L. and Endean, M., Manufacturing with materials, 1990, Butterworth Heinemann, ISBN: 0-7506-2754-9.
- Beddoes, J. and Bibbly M.J., Principles of metal manufacturing process, 1999, Arnold, ISBN: 0-470-35241-8.