

APLICAÇÕES

Capítulo Quatro: Trefilação

- 1. Introdução**
- 2. Processo e equipamentos de trefilação**
- 3. Escoamento na trefilação**
- 4. Tensões e deformações atuantes**
- 5. Análise térmica**
- 6. Cálculo do esforço de trefilação**
- 7. Bibliografia**
- 8. Exercícios**





Capítulo Quatro: Trefilação

4.1 - Introdução

Os primeiros capítulos se destinaram a rever os conceitos básicos a respeito de:

- Tensões e deformações – conceito, relações, critérios de escoamento e limite de conformação;
- Variáveis metalúrgicas – fatores que influenciam as relações entre as tensões e as deformações nos processos de conformação;
- Métodos de cálculo – como podem ser obtidos os esforços de conformação a partir das condições de operação do sistema.

Nos capítulos seguintes, serão vistos cada um dos processos de conformação: uma descrição sumarizada, características mecânicas e operacionais do processo, distribuições de tensões e deformações, correlacionamento destas e cálculo/dimensionamento dos esforços de conformação.

Esta discussão será iniciada pelo processo de trefilação, que é um dos processos mais antigos e importantes para a conformação plástica dos metais. O leitor pode perceber também, pelo conteúdo dos capítulos anteriores, que é um processo relativamente simples de se estudar matematicamente, haja vista o número de exemplos e deduções de cálculos envolvendo a trefilação que estão contidos na bibliografia e refletidos nestas notas de aula.

Estas notas não objetivam discutir a fundo os equipamentos e prática operacional do processo em si, mesmo porque, nos dias de hoje, os equipamentos estão em constante evolução e porque existem à disposição referências na internet e trabalhos recentemente realizados pelos próprios alunos da disciplina que contêm descrição de alguns equipamentos/processos. Serão vistas as informações sobre o processo e sobre os equipamentos apenas as necessárias para dar fundamento às análises de tensões e deformações importantes para a disciplina.

4.2 – Processo e equipamentos de trefilação

As operações de trefilação envolvem o “puxamento” (tracionamento) de uma barra, fio ou arame através de uma matriz que lhe oferece um certo tamanho, geometria e acabamento. Uma parte significativa da conformação do metal é causada por esforços resultantes de compressão pelo pressionamento da material contra a matriz, conforme comentado no item 3.1.

O método de aplicação de carga e o arranjo da matriz dependem, principalmente, da relação área da seção reta / comprimento do material a ser trefilado. A figura 4.1 ilustra três possíveis maneiras de se realizar o processo de trefilação em barras, arames e fios, respectivamente.

Adicionalmente, as máquinas de trefilar podem ser classificadas segundo três critérios:

1. modo de aplicação do esforço de trefilação;
2. sistema de lubrificação utilizado;
3. dimensões (área seção reta ou diâmetro) dos produtos trefilados.

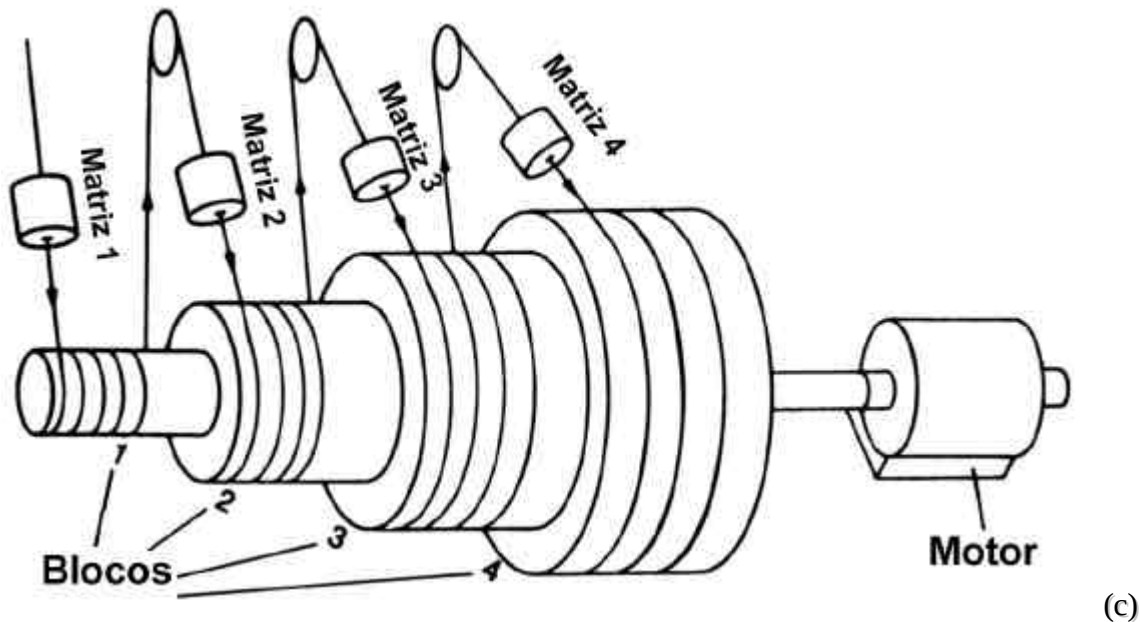
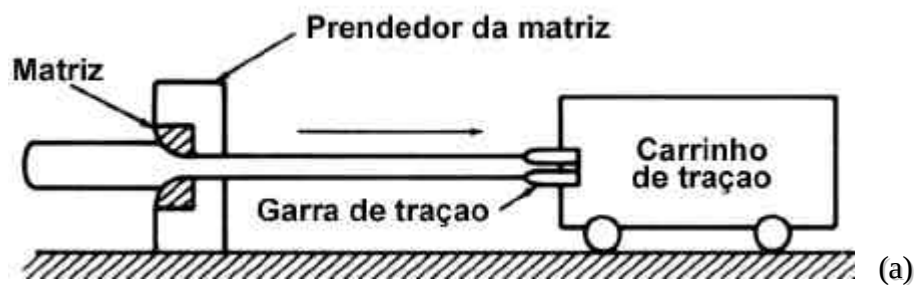


Figura 4.1 – Processos de trefilação: (a) trefilação típica de barras; (b) trefilação típica de arames¹ e (c) trefilação de arames, adaptado de Dieter (1988).

¹ Sarilho, segundo Houaiss (Dicionário da língua portuguesa), é qualquer dispositivo rotativo para enrolar ou desenrolar coisas flexíveis tais como cordas, mangueiras, cabos elétricos, cabos de aço, correntes, etc. No contexto seria uma espécie de carretel que, além de enrolar o arame, introduz a força de trefilação no meio.



Conforme já sugerido pela figura 4.1, produtos que possuem seções transversais grandes ou geometrias de perfis mais complexas, não podem ser bobinados (o raio de curvatura iria induzir tensões residuais nas fibras mais externas do material ou deformar o perfil). Nestes casos utilizam-se os chamados bancos retos de trefilação, ilustrado esquematicamente em 4.1.a. e mostrado em maiores detalhes na figura 4.2.

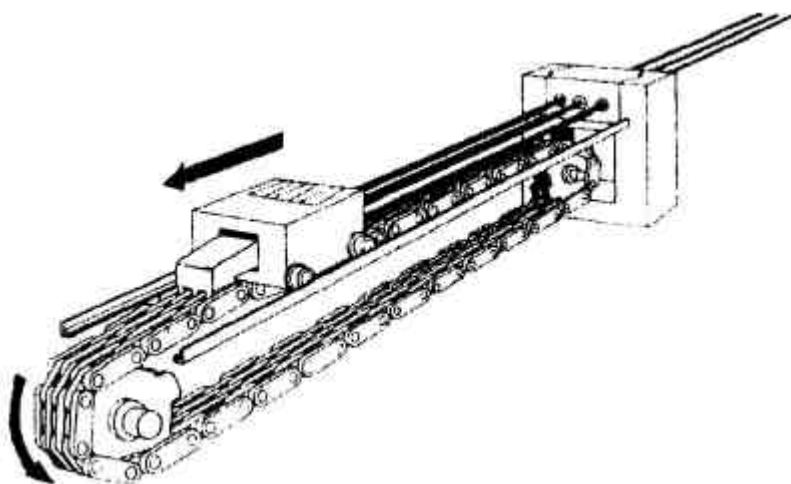


Figura 4.2 – Desenho esquemático de um banco reto para a trefilação de barras, Button (2002).

Materiais de menores secção retas, conforme sugerido pela figura 3.1, tais como: arames, tubos e fios, pode-se utilizar máquinas de trefilar compostas por um sarilho (ou cabrestante, aneal tirante, etc.) que induz por agarramento e rotação o esforço de trefilação. Nestes casos, podem se utilizados grandes comprimentos de material e em velocidades maiores, de modo que podem ser utilizados para a trefilação de materiais bem compridos e com boa produtividade.

Neste sentido, existem dois tipos de máquina:

- máquina de trefilar sem deslizamento (figura 4.3) – comumente utilizada para trefilar aço, após cada fieira existe um tambor que acumula o fio, cada tambor trabalha de maneira independente;
- máquina de trefilar com deslizamento (figura 4.4) – neste caso, o fio é tracionado, através de cada fieira, por um tambor (ou sarilho) ao redor do qual este fio dá um certo número de voltas e em cuja saída o fio prossegue a outra fieira; neste processo o fio desliza lateralmente no anel do tambor.

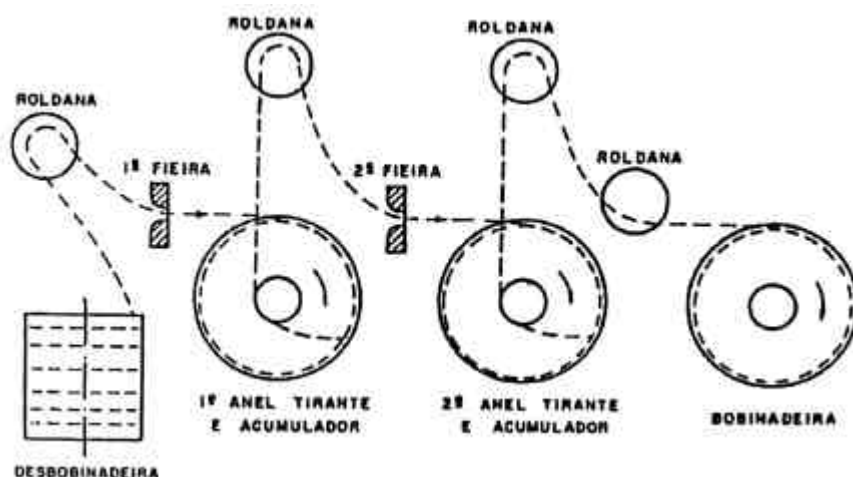


Figura 4.3 – Representação esquemática de um equipamento de trefilação que funciona se deslizamento, Button (2002).

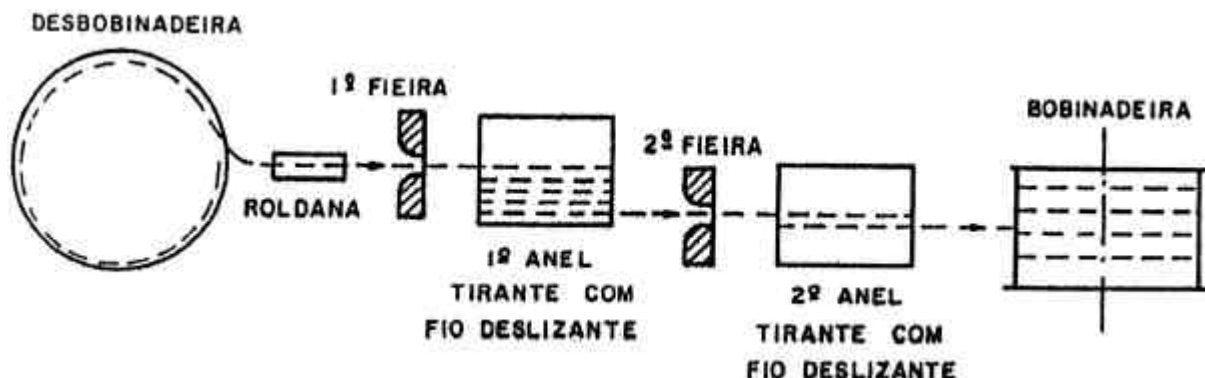


Figura 4.4 – Representação esquemática de um equipamento de trefilação com deslizamento.

Equipamentos do tipo mostrado na figura 4.1.a e 4.2 trabalham trefilando materiais com até 30m de comprimento, mas em velocidades de até 50m/minuto ($\approx 0,8\text{m/s}$) e com capacidade de até 100 toneladas. Máquinas cônicas industriais para fabricação de fios capilares de cobre) trabalham com velocidades na faixa de 25 a 40m/s e alongamentos de 18 a 20%.

As máquinas de trefilar também podem ser classificadas no que diz respeito ao processo de lubrificação empregado no processo de trefilação:

- máquinas de lubrificação sólida – nestas máquinas, a fieira é montada em um recipiente que contém o lubrificante sólido;
- máquinas de lubrificação líquida por imersão – a fieira permanece imerso no líquido refrigerante e lubrificante;
- máquinas com lubrificação por aspersão – a fieira recebe um jato de líquido refrigerante e lubrificante.

Finalmente as máquinas podem ser classificadas de acordo com o tamanho (diâmetro) do produto que geram:

1. máquinas de barras redondas ($\varnothing > 5,00\text{mm}$) - são mais robustas que as demais, além disso, tais máquinas permitem grandes reduções de seções retas ($> 70\%$), as forças de trefilação alcançam valores acima de 1 tonelada e as velocidades são da ordem de 2m/s.
2. máquinas para fios grossos ($2,00 < \varnothing < 5,00\text{mm}$) – apresentam comumente anéis tirantes individualizados, mas trabalham em velocidades superiores.
3. máquinas para fios médios ($0,50 < \varnothing < 2,00\text{mm}$) – estas máquinas são do tipo com deslizamento, dotada de cones (figura 4.1.c), utilizando o sistema de lubrificação por imersão, como também o sistema de aspersão.
4. máquinas para fios finos ($0,15 < \varnothing < 0,50\text{mm}$) – são máquinas muito semelhantes às anteriores, mas com a diferença que as velocidades de trabalho são superiores.
5. máquinas para fios capilares ($\varnothing < 0,51\text{mm}$) – estas máquinas devem ter uma elevada precisão e isentas de vibrações mecânicas, controle da tensão de bobinamento (não confundir com tensão de trefilação), as velocidades de trabalho podem atingir, como já mencionado, 40m/s.

4.2.1 – Matrizes

Independentemente de como o processo de trefilação é levado a cabo, por um dos sistemas mostrados nas figuras 4.1 a 4.4, a parte principal do processo de trefilação é a matriz de trefilação, também conhecida como feira, para a trefilação de arames e fios. A figura 4.5 ilustra este elemento através de esquemas e fotos.

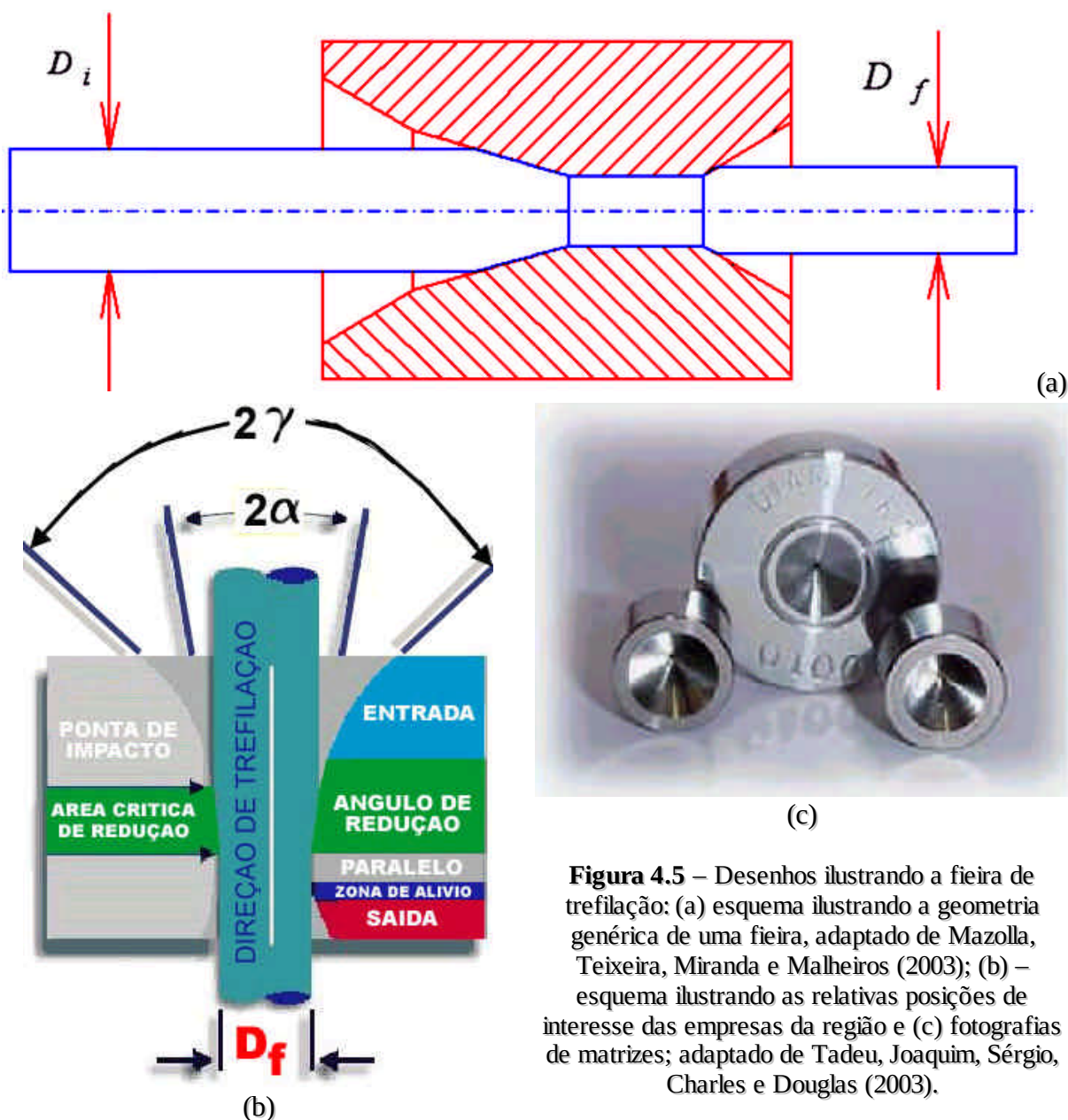


Figura 4.5 – Desenhos ilustrando a feira de trefilação: (a) esquema ilustrando a geometria genérica de uma feira, adaptado de Mazolla, Teixeira, Miranda e Malheiros (2003); (b) – esquema ilustrando as relativas posições de interesse das empresas da região e (c) fotografias de matrizes; adaptado de Tadeu, Joaquim, Sérgio, Charles e Douglas (2003).

Com base na figura 4.5.b, percebe-se que a feira pode ser dividida em 5 zonas diferentes de conformação mecânica.

- ZONA 1 – “Entrada” ou região de aproximação ou de entrada do material, compreendida pelo ângulo 2β . Promove a guia da barra ou fio de matéria prima para dentro da região de conformação mecânica. É por esta região que o lubrificante penetra para atuar na região de contato entre o metal conformado e a matriz, mais no interior da feira.



- ZONA 2 – “Ângulo de redução” ou região de trabalho, onde ocorre a aproximação final do material e a deformação plástica na região definida como sendo “área crítica de redução”. A deformação plástica se dá de maneira convergente devido ao ângulo 2α .
- ZONA 3 – Região paralela, possui um comprimento H_c (não mostrado nas figuras), sendo a região responsável pela definição de geometria e das dimensões do produto trefilado
- ZONA 4 – Região de saída do material. Nesta região o material sofre uma pequena recuperação elástica, conforme sugerido pela figura 4.5.a. Representada pelo ângulo 2γ (não mostrado nas figuras 4.5).

Não é objetivo deste curso descrever em pormenores os tipos de feiras existentes, mas sim as suas principais características, que são:

- permitir a trefilação de grande quantidade de material sem que ocorra o seu desgaste;
- também ser possível trefilar material a maiores velocidades de modo a obter ganhos de produtividade;
- ser resistente de modo a ser possível adotar maiores reduções de seção por passada (quando possível);
- oferecer dimensões constantes para o material sendo trefilado;
- imprimir uma superfície lisa e brilhante de qualidade no material sendo trefilado, característica que não varie ao longo de sua vida útil;
- possuir longa vida útil.

O leitor deverá reparar que as características acima deverão ser alcançadas normalmente com um material que apresente uma elevada resistência mecânica e dureza. Tais características são obtidas com o uso de dois tipos de materiais:

- metal duro – para fios maiores do que 2mm (fios grossos e barras redondas) ou produtos trefilados de seções maiores (por exemplo: tubos);
- diamante (industrial) – para fios de diâmetro menor ou igual a 2mm (fios médios, finos e capilares) ou para produtos com perfis pequenos (reduzidos) e de elevada qualidade.

As feiras são montadas em suportes metálicos de aço ou latão de modo a contornar algumas das seguintes limitações no uso do metal duro e diamante industrial:

- custo elevado dos materiais que constituem a feira (metal duro ou diamante);
- melhorar a extração de calor na região de conformação mecânica do metal (ZONA 2);
- dar flexibilidade de troca de matrizes (feiras) quando for necessário mudar o esquema de produção para materiais de diferentes seções retas.

4.3 – Escoamento na trefilação

O processo de trefilação geralmente é levado a cabo “a frio”, ou seja, com temperaturas homólogas menores do que 0,5 (vide equação 2.10). Conseqüentemente o material trefilado dever-se-á apresentar na condição “encruado”, conforme mostrado na figura 2.13 (item 2.6). Muitas vezes esta situação é desejada para:

- aumentar a resistência mecânica (não há outro método adequado de aumentar a resistência mecânica do material);
- propiciar uma situação microestrutural mais adequada para tratamentos térmicos subseqüentes (normalização ou têmpera);
- a conjugação do encruamento mais intenso na superfície com a melhoria do acabamento desta aumenta sensivelmente a vida em fadiga do componente.

A trefilação realizada na temperatura ambiente (ou próximo disto) aumenta, sensivelmente a resistência mecânica por encruamento. Como exemplo, a tabela 4.1 apresenta uma série de dados para barras de aço trefiladas a frio. Este aumento de resistência mecânica (limite de escoamento e limite de resistência) porém acarreta também uma perda de ductilidade (capacidade de deformação plástica), além de geração de tensões residuais e distorção interna. Muitas vezes, especialmente para materiais mais resistentes, torna-se necessário um tratamento de alívio de tensões, conforme também pode ser visto na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Alguns dados de comparação entre barras de aço da série SAE 10XX laminados a quente com barras trefiladas a frio, Harvey (1999).

Aço	Diâmetro (mm)	Condição	σ_{ys} (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	Along (L0=50mm)	Redução de área (%)	Dureza (HB)
1006	19 a 32	Laminado a quente	170	305	30	55	86
		Trefilado a frio	285	340	20	45	95
1015	19 a 32	Laminado a quente	190	345	28	50	101
		Trefilado a frio	325	385	18	40	111
1025	19 a 32	Laminado a quente	220	400	25	50	116
		Trefilado a frio	370	440	15	40	126
1030	19 a 32	Laminado a quente	260	470	20	42	137
		Trefilado a frio	440	525	12	35	149
1045	19 a 32	Laminado a quente	310	565	16	40	163
	16 a 22	Trefilado a frio	585	655	12	35	187
	22 a 32		550	620	11	30	179
	32 a 50		515	585	10	30	170
	50 a 75		485	515	10	30	163
	16 a 22	Trefilado a frio em “baixa” temperatura + alívio de tensões	620	690	12	35	197
	22 a 32		585	655	11	30	187
	32 a 50		550	620	10	30	179
	50 a 75		515	585	10	25	170
	16 a 22	Trefilado a frio em “alta” temperatura + alívio de tensões	515	655	15	45	187
	22 a 32		515	620	15	40	179
	32 a 50		485	585	15	40	170
	50 a 75		450	550	12	35	163

O gráfico da figura 4.6 ilustra a variação nas propriedades mecânicas, traduzidas pelas curvas tensão versus deformação (reais), ocasionada pela trefilação de um arame de aço de teor de carbono muito baixo (0,0070%C). Nota-se que o limite de escoamento e de resistência aumenta à medida que aumenta a redução de área percentual por trefilação.

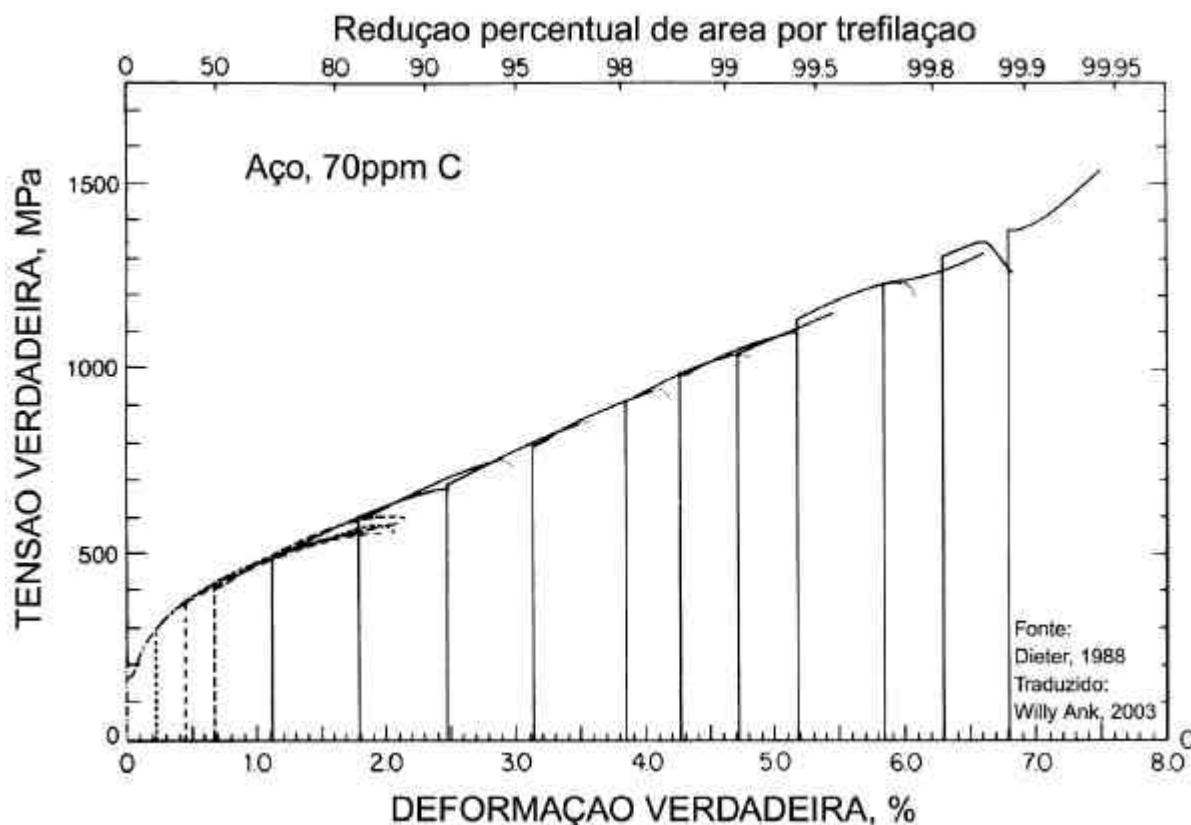


Figura 4.6 – Variação das propriedades mecânicas de um aço de baixíssimo teor de carbono (70ppm ou 0,0070%) com o grau de redução sofrido em trefilação a frio, adaptado de Dieter (1988).

O grau de encruamento será tanto maior quanto maior for o grau de redução no passe de trefilação, pois maiores serão as deformações redundantes no material (vide gráfico da figura 3.7) e, conseqüentemente, maior o encruamento. Por isso objetiva-se, ao trefilar um material que tenha responsabilidade ou requisitos de propriedades mecânicas (especialmente fadiga e corrosão), que este seja trefilado em vários passes e em menores reduções.

Mas mesmo no caso de pequenas reduções, quando a deformação introduzida é menor, deve-se lembrar que maiores serão os componentes de deformação por atrito (vide gráfico da figura 3.7). Este atrito é uma condição de carregamento e encruamento heterogênea (localizado na superfície), cujos efeitos devem ser analisados e considerados, especialmente quando é empregado um número maior de passes de trefilação.

À medida que o material é trefilado a frio, este encrua cada vez mais até um máximo, quando o limite de escoamento praticamente iguala-se ao valor do limite de resistência. Isto ocorre porque o limite de escoamento cresce mais rapidamente com o encruamento do que o limite de resistência.

Pode-se notar este fato comparando-se os incrementos nos valores de limite de escoamento e resistência entre os aços (SAE 1006, 1015, 1025, 1030 e 1045) na condição “laminados a quente” (não encruados) e na condição “trefilado a frio”:



- incremento médio no limite de resistência: 10,9%;
- incremento médio no limite de escoamento: 701,7%.

Esta tendência está esquematizada no gráfico mostrado na figura 4.7. Obviamente o máximo de encruamento que se consegue introduzir em um material seria o equivalente ao encontro da curva da variação do limite de resistência com limite de resistência, ou aproximadamente o grau de encruamento no ponto “X” do gráfico da figura 4.7. Acima deste ponto, o limite de escoamento e o de resistência são praticamente iguais e qualquer deformação a mais no material será suficiente para fraturá-lo.

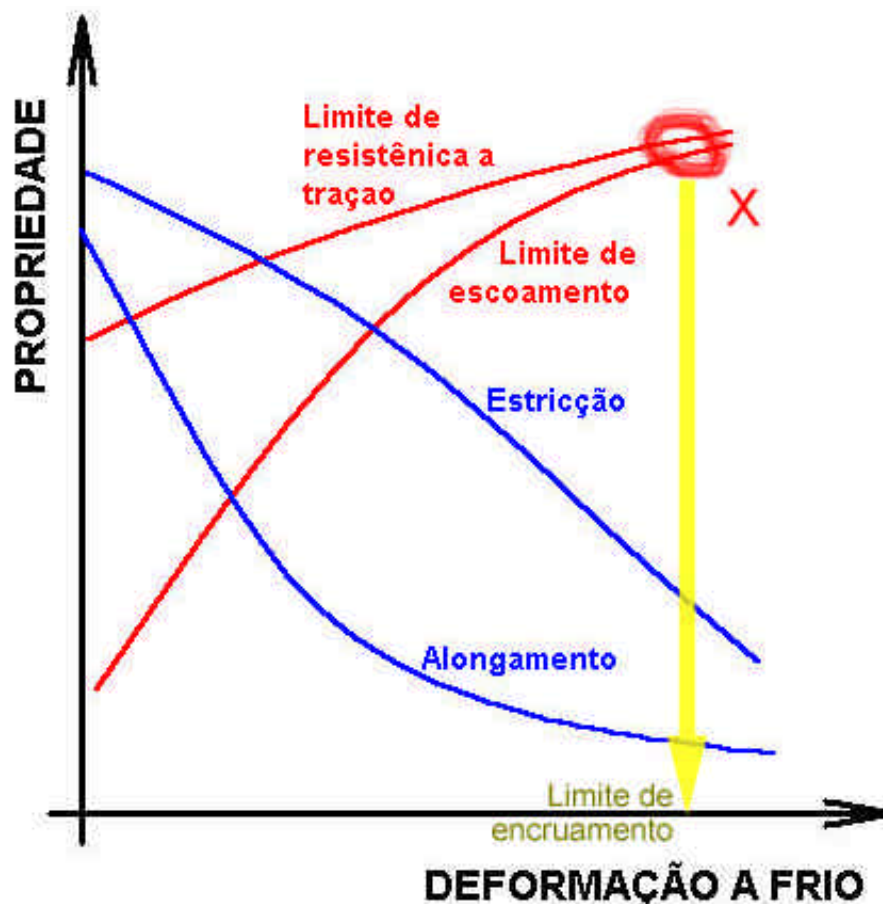


Figura 4.7 – Variação esquemática das propriedades mecânicas como o nível de encruamento dado no material.

Um critério para evitar que o processo de trefilação encrue exageradamente o material (levando à região X do gráfico da figura 4.7) seria dimensionar o processo de modo que a tensão de trefilação (σ_{Tref}) seja menor do que o limite de escoamento final do material após a trefilação ($\sigma_{ys Fim}$), de modo que:

$$\sigma_{Tref} \leq C \cdot \sigma_{ys Fim} \quad (4.1)$$

onde $C = 80\%$ (Shey em Button, 2002) ou $C = 75\%$ (Schaeffer, 1999)

Para deformar o material além do limite imposto pelo encruamento, deve-se lançar mão de tratamentos de recozimento do material. Este tratamento reduzirá o encruamento, tendendo-se a recuperar as propriedades mecânicas originais (vide item 2.1 e figura 2.5).

As deformações do processo podem ser obtidas pelas equações listadas a seguir (que são facilmente deduzíveis).

Deformação de engenharia (e) ou redução de área (r):

$$e = \frac{A_i - A_f}{A_i} = 1 - \left(\frac{D_i}{D_f} \right)^2 = r \quad (4.2)$$

Onde: A_i é a área da seção reta de entrada e A_f é a área da seção reta de saída. O cálculo é feito com inversão do sinal no numerador porque sempre ocorre uma redução de área (com esta inversão, o resultado de deformação será sempre positivo).

Deformação verdadeira (ϵ):

$$e = \ln \left(\frac{A_i}{A_f} \right) \quad (4.3)$$

Razão de trefilação (R):

$$R = \frac{A_i}{A_f} = \left(\frac{D_i}{D_f} \right)^2 \quad (4.4)$$

Nas operações comerciais de trefilação, a redução na área (R) citada por Dieter (1988) é da ordem de 20%. Valores um pouco maiores que este podem não provocar a fratura completa do material, mas podem induzir o surgimento de microfissuramentos ao longo do material devido a concentrações de tensão localizadas pelo efeito do atrito e pela heterogeneidade do metal conformado.

Deve-se lembrar, também, que o valor comumente utilizado na prática para definir a deformação do material é o primeiro (equação 4.2), porém o correto valor para ser aplicado nos cálculos (quando não for dito ao contrário) é o da deformação verdadeira, calculada pela equação 4.3.

Com base nas deformações presentes, pode-se calcular qual é a tensão de resistência que o material apresenta àquela deformação. Este cálculo é feito com base em relações matemáticas, como por exemplo àquelas mostras no item 1.7.2.2 (equações 1.24 a 1.27).

Neste sentido, a equação mais utilizada para definir a relação entre a tensão de escoamento e a deformação do material é a expressão de Holloman (equação 1.24):

$\sigma = K\epsilon^n$ (1.24)
--

Existem várias fontes de dados para os parâmetros “K-constante plástica de resistência” e “n-coeficiente de encruamento” na literatura, assim como de ensaios mecânicos realizados pelo prof. Alguns destes dados estão dispostos na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Alguns valores de “K” e “n” para ligas metálicas.

Liga	σ_{ys} (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	K (MPa)	n	Validade	Fonte
SAE 1015	285	385	630	0,116	$0,1 < \epsilon < 0,7$	Altan e Gegel (1983) in Button (2002)
SAE 1035	370	585	902	0,17	$0,1 < \epsilon < 0,7$	
AISI 304	215	505	1451	0,60	$0,1 < \epsilon < 0,7$	
Al 5454 O	115	250	344	0,137	$0,2 < \epsilon < 0,8$	
Cu CDA 110	217	338	452	0,328	$0,25 < \epsilon < 0,7$	
Aço (0,05%C)			530	0,26	n.d.	Helman e Cetlin (1983)
SAE 1010*			686	0,20	n.d.	
SAE 4135*			1010	0,17	n.d.	
Al 6061*			206	0,20	n.d.	
Al 6061			412	0,05	n.d.	
Cobre*			314	0,54	n.d.	
Latão 70/30*			892	0,49	n.d.	Dieter (1988)
SAE 4340*			640	0,15	n.d.	
Aço 0,6%C	Temp. + rev. A 540°C		1570	0,10	n.d.	
Aço 0,6%C	Temp. + rev. a 705°C		1230	0,19	n.d.	
Aço 0,6%C			1570	0,10	n.d.	Prof.
**	440	610	1000	0,18	$0,05 < \epsilon < 0,5$	
SAE 1010	325	430	720	0,195	$0,1 < \epsilon < 0,7$	

* - condição “recozido”.

** - Aço com composição diferenciada: 0,22%C; 1,5%Mn

4.4 – Tensões e deformações atuantes

As figuras 3.11 e 3.12 apresentam as tensões atuantes no processo de trefilação, sendo que a figura 4.8 é uma reprodução de figura 3.12.

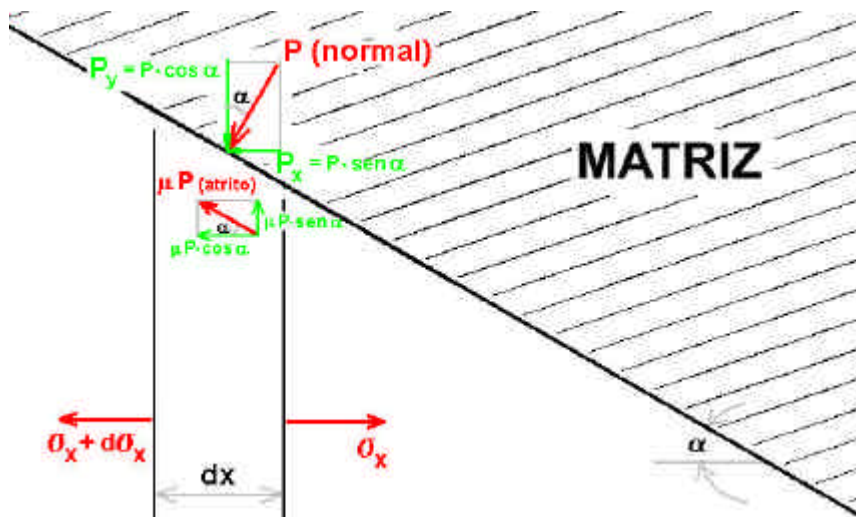


Figura 4.8 – Detalhamento das tensões e forças atuantes no elemento de volume de um processo de trefilação.