

*D. S. Gomes*  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

*— 11 dez 2003*

## **Equacionamento e alternativas para o processo de trefilação dos metais.**

**Marcio Chertman  
Rodrigo Kenji Tatizawa**

**Orientador: Edson Gomes**

**São Paulo  
2003**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Equacionamento e alternativas para o processo de trefilação dos  
metais.**

**Trabalho de formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Graduação em  
Engenharia**

**Marcio Chertman  
Rodrigo Kenji Tatizawa**

**Orientador: Edson Gomes**

**Área de Concentração:  
Engenharia Mecânica**

**São Paulo  
2003**

**DEDALUS - Acervo - EPMN**



31600010624

**FICHA CATALOGRÁFICA**

Chertman, Marcio

Equacionamento e alternativas para o processo de trefilação dos metais,  
por M. Chertman e R.K. Tatizawa. São Paulo : EPUSP, 2003.  
40P.

Trabalho de formatura – Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Trefilação 2. Tubos bi-metálicos
3. Alternativas de trefilação I. Tatizawa, Rodrigo K. II.  
Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento  
de Engenharia Mecânica III. t.

## **Índice**

1. Introdução.....	1
2. Uma breve história do desenvolvimento da trefilação de metais.....	2
3. Desenvolvimento de lubrificantes para trefilação.....	5
4. Desenvolvimento dos materiais para ferramenta.....	6
5. Ferramentas de tração.....	7
6. Considerações teóricas.....	8
6.1. Equacionamento do processo de trefilação.....	8
6.1.1.Fios e barras.....	8
6.1.2.Tubos.....	12
6.1.3.Redução de diâmetro.....	13
7. Trefilação axissimétrica do tubo bi-metálico (Análise de Energia).....	14
7.1.Trefilação com passo curto.....	14
7.2.Trefilação de parede fina com pistão flutuante.....	18
8. Desenvolvimentos incomuns e recentes na trefilação.....	23
8.1.Trefilação Hidrodinâmica.....	24
8.2.Trefilação de Perfis.....	25
8.3.Trefilação a altas temperaturas.....	27
8.4.Trefilação Ultra-sônica.....	29
8.4.1.Efeito do Volume.....	30
8.4.2Efeito da Superfície.....	32
8.4.3.Trefilação ultra-sônica de tubos.....	34
9. Gráficos.....	36
10. Quadro Comparativo.....	39
11. Conclusão.....	40
12. Bibliografia.....	41

# EQUACIONAMENTO E ALTERNATIVAS PARA O PROCESSO DE TREFILAÇÃO DOS METAIS

## 1. Introdução

Na engenharia sempre existiu uma busca constante por materiais com propriedades mecânicas otimizadas, que sejam capazes de atender a solicitações impostas pelos projetos. Dentro deste contexto, apareceram várias formas de usinagem e conformação de materiais que além de darem forma, permitem que o material atinja determinadas características de dureza, resistência, entre outras.

Este projeto trata-se do equacionamento, modelagem matemática e de alternativas de processos de trefilação, que é um processo mecânico que confere ao material precisão dimensional e melhores propriedades mecânicas.

A trefilação ocorre pelo tracionamento de uma barra, fio ou tubo através de uma matriz com secção transversal sempre menor que a peça trabalhada, ocasionando uma redução em área e um aumento no comprimento. O número de passes na trefilação, geralmente está entre um e dezenove e as reduções de área podem ir de 5% a 40% por passe.

O material na máquina de trefilar é puxado através das fieiras de metal duro. Devido às intensas deformações, tanto o material trefilado como as fieiras, devem ser constantemente resfriados.

O fio-máquina, que é a matéria-prima para trefilação, é o arame laminado a quente e ao longo das etapas de trefilação, que ocorre abaixo da temperatura de recristalização, o material é

encruado à medida que a redução de área aumenta, ou seja, sua resistência mecânica cresce e sua ductilidade é reduzida, devido à deformação plástica,

O tratamento térmico (recozimento) utilizado é de grande importância e deve ser bem controlado para atingir as ductilidades ideais, que é fator primordial no caso da trefilação, pois é a propriedade que indica a capacidade do material sofrer grandes deformações permanentes numa determinada direção, sem ocorrer ruptura. Representa a maior ou menor possibilidade do material ser alongado. Esse tratamento deve ser feito em fornos com campânulas protetoras para que não haja presença de oxigênio ou de outros gases contaminantes.

## **2. Uma breve história do desenvolvimento da trefilação de metais**

Provavelmente os egípcios foram os primeiros a trefilar fios para criar fios de ouro finos que poderiam ser tecidos com outras fibras para fazer “roupas de ouro”. Existem evidências, que pepitas de ouro foram marteladas para virar pratos ou lâminas. Das folhas, longas e estreitas fatias ou tiras de ouro eram cortadas e subsequentemente trefiladas ao serem puxadas através de um buraco numa pedra. Acredita-se que as matrizes eram feitas raspando-se um buraco num seixo duro usando cunhas, areia e sebo. Portanto, a forma geométrica da zona de deformação parecia um venturi. Para trefilar as fatias de ouro pelo seixo, a parte final era apontada a marteladas, lubrificada com sebo, presas pelos dedos ou alicates e puxadas. Assim, tendo produzido fios de diâmetro uniforme e superfície acabada a partir de tiras finas retangulares cortadas, faltava pouco

para trefilar de forma ainda mais fina a partir de fios já trefilados, percebendo dessa forma todas as vantagens que tal deformação adicional iria gerar.

No quinto século Antes de Cristo, os persas eram capazes de trefilar fios de bronze com diâmetro de cerca de 0.022 pol (0.55 mm) usando formas de ferro; isso indica que eles sabiam que era desejável temperar o bronze, a importância do ferro como material de estampa e o significado de etapas seqüenciais. Não existe certeza de que eles sabiam que a forma da zona de deformação afetava a força da trefilação. Mais tarde, nas ruínas de Pompéia, um cabo de bronze de 9 pés (3 m) foi recuperado, com aproximadamente 9 mm de diâmetro. Ele era composto de três tranças e cada trança continha 15 fios de metal.

Perto do fim do primeiro milênio DC, a trefilação de tiras estava sendo praticada na Europa pelo então novo método de puxar a tira através de rolos sem acionamento com rotação livre. Acredita-se que os primeiros laminadores manuais, trefilavam pequenas quantidades de metais preciosos no formato de lâminas, método usado em monastérios no Reino Unido ao redor de 1050. Mais tarde, fios finos e pesados passaram a ser estirados manualmente ou com a força da água, guindaste, cabrestante ou mecanismos de manivela e balanço. Novamente, não é evidente que esses trabalhadores do metal percebiam que o formato da zona de deformação era crítico para um estiramento sem defeito.

O processo de tubo-penetratura, isto é, o estiramento de um tubo por meio de uma matriz sem a ajuda de uma ferramenta interna, aconteceu no século XIX seguindo a produção primária de tubos de comprimento curto ao mesmo tempo sem emenda e soldados. Rapidamente tornou-se necessário controlar tanto o furo quanto o diâmetro externo e, para esse fim, o centro da zona de deformação era preenchido com um batoque ou mandril. Isso permitiu uma

operação sink-draw ou “close-pass” modesta na qual, idealmente, o furo não era reduzido em diâmetro. O estiramento-profundo de invólucro de cartuchos de latão foi criado em 1876. (Invólucros de cartuchos, que são essencialmente tubos curtos integralmente acabados, eram feitos puxando-se o metal sobre um mandril ou furando-se através de uma sucessão de matrizes. Já se tinha muita consciência da importância do perfil da matriz e da seqüência de passagem.) Já que o processo de fazer tubos primariamente sem emendas por punctionamento rotatório foi desenvolvido em 1885, a trefilação de tubos de aço não era largamente praticada até o fim do século XIX. A extrusão a quente de tubos de cobre necessitava de uma expansão na capacidade de trefilar tubos numa ampla variedade de ligas de cobre para satisfazer o crescimento industrial e o mercado doméstico.

Um significante desenvolvimento posterior no processo de trefilar tubos aconteceu na época da Segunda Guerra Mundial quando “pistões flutuantes” foram usados pela primeira vez. Até aquele instante, tubos de extensão reta eram trefilados na bancada de trefilar que permitia o uso de mandris ou “pistões fixos”, mas a Segunda Guerra Mundial forneceu uma matriz cônica ao processo, o que permitiu que o pistão flutuante permanecesse em sua posição correta devido às forças que agem em cima dele, e fosse possível obter paredes com espessuras ainda mais reduzidas o que representa uma grande vantagem econômica. Outra vantagem do pistão flutuante é que isso facilita a lubrificação.

Para a extração de fios, tiras, ou até mesmo tubos, se criou a necessidade de deformar a ponta com uma martelada e através de um furo nessa extremidade, prender com algum mecanismo apropriado de modo que o material seja puxado pela matriz. Esse processo de deformação provoca um endurecimento do material, o que permite uma resistência maior ao tracionamento sem que haja um

deslizamento ou ruptura na secção responsável pelo deslocamento do material trefilado. Mas o problema é que isso causa uma perda de rendimento pois a secção deformada não pode ser reaproveitada. E isso é mais crítico quando o diâmetro do tubo é muito grande, ou o material é valioso. Outra forma de fixação do material é prender este com um pino que possua uma rigidez elástica elevada e fixar o pino no mecanismo de tração, podendo ser retirado no final do processo.

### **3. Desenvolvimento de lubrificantes para a trefilação**

Desde os tempos mais antigos na história do processo de trefilação era sabida a necessidade de ter o material lubrificado, não só pela redução no esforço de tracionar o material como também pela minimização do desgaste tanto do tubo ou barra, quanto da matriz.

Sabe-se que o sebo era usado como um dos primeiros tipos de lubrificantes para a trefilação, e apesar de ainda ser usado ocasionalmente, os estudos da química de lubrificação se desenvolveram de tal forma que os lubrificantes podem ser especificados de acordo com o material a ser trabalhado, a velocidade e temperatura de processo, tensões superficiais, topografia da superfície e tipos de deformação. A principal função de um lubrificante é separar a ferramenta do material trefilado de maneira controlada. Entre outras exigências estão reduzir as forças de deformação, taxa de desgaste e consequentemente reduzir custos. A falha da película de separação pode resultar num esforço maior localizado e pode ocorrer uma concentração de tensão e maior desgaste da ferramenta.

À medida que os processos e materiais de usinagem foram se desenvolvendo, as gorduras animais, ou sebo, foram se tornando inadequados para a função de superfície de separação e começaram a ser misturados com piche, carvão pulverizado e grafita. Com o

passar do tempo, os rendimentos e as tensões no processo se tornaram maiores e os estudos da lubrificação conseguiram desenvolver lubrificantes com melhores propriedades e que conseguem manter a coesão mesmo quando estão sob altas tensões e temperaturas. Podem ainda ser adicionadas ao lubrificante substâncias como o ácido fosfórico ou seus derivados, que além de melhorar o rendimento mecânico fornece uma ligação química maior.

Após o processo de extração do material trefilado o lubrificante deve ser cuidadosamente removido, pois além de poder reagir com os forros da fornalha, podem causar corrosão do material. Hoje existem inibidores nos lubrificantes que são muito eficientes em evitar a corrosão.

#### **4. Desenvolvimento dos materiais da ferramenta**

As matrizes antigamente eram manufaturadas dos compostos naturais de silício e dos seixos das rochas ígneas. Atualmente elas são feitas de compostos de silícios e carbono, que oferecem uma resistência muito alta, dureza, inércia e resistência ao choque térmico. Na indústria de fio e tubos de pequeno diâmetro é extenso o uso de diamantes naturais e sintéticos como matriz nas trefiladoras.

Com o passar do tempo, foi aumentando a demanda por matrizes com materiais cada vez mais duros, e como resultado foram desenvolvidas matrizes de carboneto de cromo e tungstênio sinterizados e fundidos. Adicionalmente as superfícies foram endurecidas por deposição de cromo ou de tratamentos térmicos e químicos como nitretização.

As matrizes de carboneto de tungstênio e diamante são as mais utilizadas atualmente, mas compostos complexos de silício, alumínio, oxigênio e nitrogênio estão ganhando espaço no mercado por serem

quimicamente inertes aos lubrificantes em grandes intervalos de temperatura.

## 5. Ferramentas de tração

Uma matriz simples pode consistir em um orifício em um disco circular, mas uma matriz moderna assemelha-se a um cilindro composto onde a região interna é cercada por um suporte ou anel apropriado devidamente apertado. Esse ajuste é produzido por uma interferência significativa entre o diâmetro externo da matriz e o diâmetro interno do suporte. O objetivo desse ajuste é criar uma tensão de compressão do aro externo para impedir a fratura.

Até recentemente as matrizes eram projetadas seguindo as equações para o cilindro o que vem se mostrando sem aplicabilidade quando as matrizes são curtas em relação ao diâmetro. Nesse tipo de equacionamento a tensão radial do material trefilado é equacionada com analogia à tensão hidrostática, onde são negligenciadas as tensões de cisalhamento. Não são levadas em consideração também as tensões causadas pelos momentos das forças causados pelas dobras do material, e a pressão de encontro entre as matrizes e as peças da bancada de tração.

O desenvolvimento de métodos numéricos e programas de elementos finitos permitirão que o projeto e cálculo de matrizes para extração das peças trefiladas sejam mais refinados, reduzindo-se custos e materiais.

## 6. Considerações teóricas

As análises teóricas podem ser divididas em duas categorias.

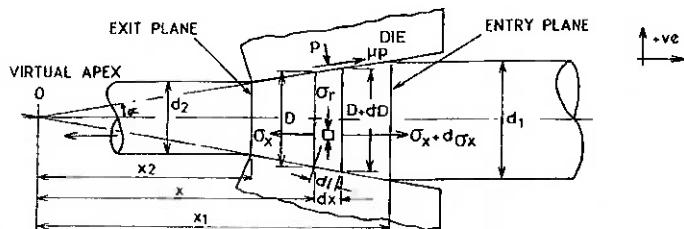
Análise de equilíbrio de forças e análise de energia.

O equilíbrio de forças, apesar de precederem o método de energia são mais simples, são exatos e satisfatórios para aplicações industriais, desde que os valores relevantes de tensão, rendimento e fricção sejam conhecidos. Essa análise supõe a ausência de trabalho que não é essencial à mudança de forma. Nesse tipo de equacionamento são admitidas algumas hipóteses, como o não encruamento do material durante a deformação. Supõe-se também que os planos perpendiculares ao eixo central permanecem normais a ele durante todo o processo. Admite-se também um coeficiente de fricção constante.

A análise de energia é mais detalhada e é mais indicada quando um detalhamento maior, e um cálculo mais preciso são necessários. Esses cálculos são feitos igualando os trabalhos externos aos trabalhos internos. A solução desse tipo de análise pode ser obtida através de linhas de tensões através de métodos numéricos e elementos finitos, onde podemos ter a deformação em cada ponto.

### Equacionamento do processo de trefilação

- Trefilação de fios e barras



(Fig.1)

*Equilíbrio no eixo Horizontal:*

Resultante das forças internas:

$$(\sigma_x + d\sigma_x) \frac{\pi}{4} (D + dD)^2 - \sigma_x \frac{\pi}{4} D^2$$

Resultante das forças externas:

$$\left( \mu p \cdot \pi D \cdot \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \sin \alpha + \left( \mu p \cdot \pi D \cdot \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \cos \alpha$$

Relacionando essas equações temos:

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

*Equilíbrio Radial:*

Resultante das forças internas:

$$-\sigma_x \mu D dx$$

Resultante das forças externas:

$$-p\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \cdot \cos \alpha + \mu p \frac{dx}{\cos \alpha} \cdot \pi D \cdot \sin \alpha$$

Relacionando essas equações temos

$$\sigma_r = -p [1 - \mu \tan \alpha] \quad (2)$$

Considerando que o termo ( $\mu \tan \alpha$ ) é bem pequeno temos:

$$\sigma_r = -p$$

Os critérios de Von Misses e Tresca nos fornecem a expressão:

$$\sigma_x + p = Y \quad (3)$$

Substituindo as equações anteriores temos:

$$Dd\sigma_x = 2 dD [ B\sigma_x - Y(1 + B) ]$$

Onde  $B = \mu \cotan \alpha$

Considerando  $B$  e  $Y$  constante, rearranjando e integrando:

$$B\sigma_x - Y(1 + B) = CD^{2B} \quad (4)$$

Assumindo a constante de integração (tensão no início) igual a zero temos então:

$$C = -\frac{Y(1 + B)}{d_1^{2B}}$$

logo,

$$\frac{\sigma_x}{Y} = \frac{1+B}{B} \left[ 1 - \left( \frac{D}{d_1} \right)^{2B} \right] \quad (5)$$

O parâmetro utilizado na indústria para a redução de área é:

$$r = \frac{A_1 - A_2}{A_1}$$

onde  $A_1$  e  $A_2$  são as áreas de entrada e saída da peça trefilada respectivamente.

Assim temos:

$$\left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2 = \frac{1}{1-r}$$

Substituindo em (5) temos:

$$\sigma_{x2} = \alpha_d = \frac{Y(1 + B)}{B} [ 1 - (1 - r)^B ]$$

Desconsiderando os atritos temos:

$$\sigma_{x2} = \alpha_d = Y \ln \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2$$

Expressando em termos de redução de área ( $r$ ):

$$\sigma_d = Y \ln \left( \frac{1}{1-r} \right)$$

e para o limite       $\sigma_d = Y$

temos então :  $r = 63\%$

Mas esse limite foi obtido desconsiderando os atritos e o ângulo do cone de usinagem. Se considerarmos esses valores, que para efeitos práticos podemos adotar  $\mu=0,05$  e  $\alpha=15^\circ$ , além das imperfeições dos materiais, porosidades e variações na secção transversal devemos estabelecer um limite de redução de área de no máximo 50%.

Se acrescentarmos um esforço adicional na secção de entrada, na forma de um “puxão” temos um aumento na tensão axial do material trefilado mas em compensação temos uma diminuição da tensão radial e consequentemente um esforço menor sobre a matriz. Podemos perceber isso através do equacionamento que apresenta uma nova constante de integração:

$$C_1 = \frac{B}{d_1^{2B}} \left[ \sigma_{x_1} - Y \frac{(1+B)}{B} \right]$$

Substituindo temos:

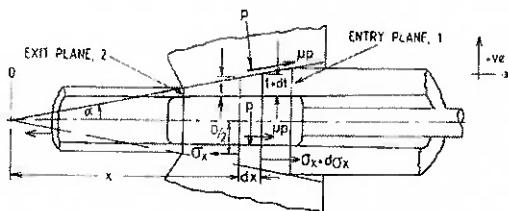
$$\sigma_{x_2} = \sigma_d = Y \frac{(1+B)}{B} \left[ 1 - \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^{2B} \right] + \sigma_{x_1} \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^{2B}$$

E temos a tensão radial:

$$\frac{p}{Y} = 1 - \frac{\sigma_x}{Y}$$

$$p = \frac{Y}{B} \left[ (1 + B) \left( 1 - \left( \frac{D}{d_1} \right)^{2B} \right) - 1 \right] - \sigma_{xI} \left( \frac{D}{d_1} \right)^{2B}$$

- Análise de equilíbrio de força para trefilação de tubos com paredes finas



(Fig.2)

Esse equacionamento segue o mesmo esquema da trefilação de fios, só que dessa vez devemos levar em consideração as tensões na face interna do tubo, assumindo o pistão interno como sendo rígido o suficiente para desconsiderar suas deformações.

A equação diferencial para o equilíbrio de forças fica:

$$\frac{dt}{t} = \frac{d\sigma_x}{c\sigma_x - K(1+c)}$$

onde  $c = 2\mu / \tan \alpha$  e  $K = 2Y/\sqrt{3}$

Integrando a equação temos a solução geral:

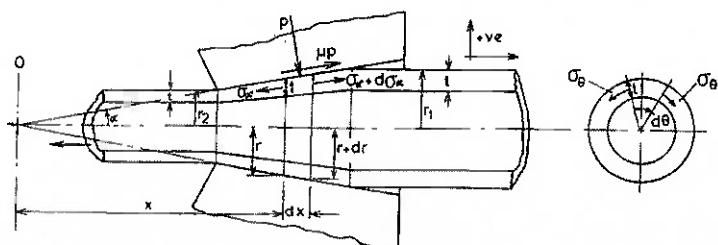
$$\left( \frac{t_1}{t_2} \right)^c = \frac{\sigma_1 c - a}{\sigma_2 c - a} ; \quad a = K(1+c)$$

Para a redução de área na trefilação de tubos temos:

$$r = 1 - [(\sigma_2 + a)/a]^{\frac{1}{c}} \quad \mu = 0,05 \text{ e } \alpha = 12^\circ$$

E considerando um encruamento com aumento de 20% nas tensões temos um  $r = 58\%$ . Para efeitos práticos ele não deve passar de 50%.

Redução de diâmetro de tubos.



(Fig.3)

Para a redução de diâmetro do tubo sem alteração da espessura da parede, podemos desconsiderar as tensões radiais, assim temos apenas as tensões angulares e axiais. Desenvolvendo as equações de equilíbrio chegamos a:

$$\sigma_a + r \frac{d\sigma_\alpha}{dr} = \sigma_\theta (1 + b)$$

onde  $b = \mu / \tan \alpha$

E usando o critério de Von Misses relacionando com a tensão na direção principal:

$$\frac{\sigma_{\alpha_2}}{\sigma_m} = \left[ 1 - \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^b \right] \left( \frac{1+b}{b} \right) + \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^b \cdot \frac{\sigma_{\alpha_1}}{\sigma_m}$$

## **7. A trefilação axissimétrica do tubo bimetálico**

A trefilação axissimétrica bi-metálica (isto é tubo na haste) e do tubo (isto é tubo no tubo) emprega uma análise do equilíbrio e análises de energia. As análises de energia esboçadas aqui são para a trefilação do tubo bi-metálico com mandril e do problema mais difícil da trefilação, o tubo bi-metálico com pistão flutuante.

Existem propostas um campo simplificado da linha de cisalhamento composto de linhas retas ao longo do qual as descontinuidades da velocidade agem; entre elas o metal se comporta como um corpo rígido. Assim temos a equação para a taxa de trabalho,

$$\dot{W}_p = \int_s \tau_s \cdot v \cdot ds.$$

O campo real da linha de cisalhamento, que é a solução ao problema de “repuxamento” do metal, é a configuração que dá a carga mínima.

### **Análise de energia para a trefilação com passo curto de tubos bi-metálicos de parede fina com mandril**

Enquanto o tubo é considerado ser de parede fina, é suposto que a deformação corresponda, na trefilação com passo curto, a uma deformação de tensão plana. Nesta análise a região da matriz é negligenciada. Um campo de velocidade cinematicamente admissível

e os hodógrafos correspondentes são ilustrados na Fig. 5. O trabalho plástico é dissipado por atrito nas interfaces externas e internas da ferramenta com o tubo e pelo cisalhamento nas descontinuidades da velocidade.

Quando todas as descontinuidades da velocidade forem linhas retas e a velocidade for constante ao longo de toda a descontinuidade, a soma da taxa de trabalho é dada por:

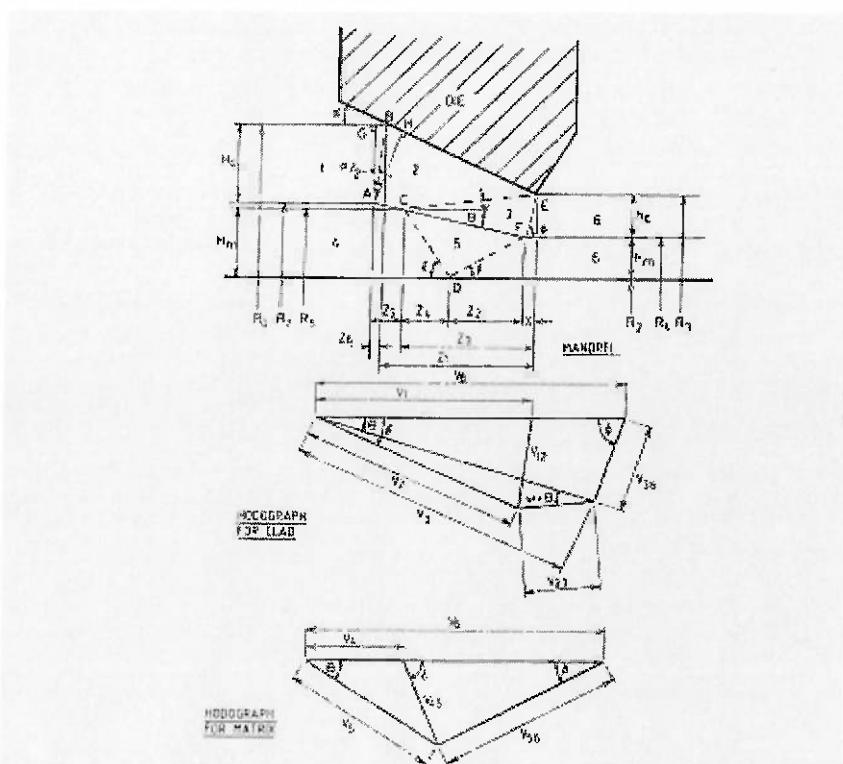
$$\dot{W}_p = \sum \tau_s v A \quad (6)$$

onde  $A$  é a área de superfície da descontinuidade da velocidade. O trabalho feito contra o atrito pode ser representado por  $\tau_s = mk$ , onde  $m$  é uma constante de atrito e  $k$  é a tensão de escoamento no cisalhamento do material da peça junto à interface da ferramenta ou certamente na interface do metal com a matriz com camada protetora. Assim, apropriadamente,

$$\dot{W} = mkVA.$$

A potência total dissipada pela força externa de tração por unidade de área é:

$$P_T = \sigma_x V_6 T \quad (7)$$



(Fig.5) Campo de velocidade e hodógrafos para mandril, trefilação de tubo bi-metálico.

onde  $T$  é a espessura final do tubo trefilado. Naturalmente todos os termos na equação (6) são somados e igualados à equação (7), produzindo a expressão:

$$\frac{\sigma_x}{Y_e} = \frac{1}{T \cdot Y_e} \left\{ \begin{aligned} & \frac{2 \cdot k_c \cdot \sin \phi \sin(\theta + \omega) \tan \frac{\alpha}{2} H_c}{\sin(\phi + \theta) \sin(\alpha + \omega)} + \frac{k_c \cdot (R_3 - R_5) \sin \phi \sin(\alpha - \theta)}{\sin \omega \sin(\phi + \theta) \sin(\alpha + \omega)} \\ & + \frac{k_c \cdot h_c \cdot \sin \theta}{\sin \phi \sin(\theta + \phi)} + \frac{k_m \cdot H_m \cdot \sin \theta \sin \beta}{\sin \varepsilon \sin \varepsilon \sin(\theta + \beta)} + \frac{k_m \cdot h_m \cdot \sin \theta}{\sin \beta \sin(\theta + \beta)} \\ & + \frac{m_1 \cdot k_c \cdot (R_0 - R_3) \sin \phi \sin(\theta + \omega)}{\sin \alpha \sin(\phi + \theta) \sin(\alpha + \omega)} + m_2 \cdot k_m \cdot \left[ 1 - \frac{\sin \beta \sin(\varepsilon - \theta)}{\sin \varepsilon \sin(\theta + \beta)} \right] \cdot A_7 \\ & + m_3 \cdot k_i \cdot V_i \cdot \frac{(R_5 - R_4)}{\sin \theta} \end{aligned} \right\}$$

onde:  $A_7 = Z_3 - \frac{h_m}{\tan \beta} - \frac{h_c}{\tan \phi}$

$$\varepsilon = \tan^{-1} \left[ \frac{R_5 - R_2}{Z_4} \right]$$

$$\theta = \tan^{-1} \left[ \frac{R_5 - R_4}{Z_3 - x} \right] \quad \text{e} \quad x = \frac{h_c}{\tan \phi}$$

$$Z_3 = (R_0 - R_7) \tan \frac{\alpha}{2} + \frac{(R_0 - R_3)}{\tan \alpha} - \frac{(R_7 - R_5)}{\tan \alpha}$$

$$\omega = \tan^{-1} \left[ \frac{R_3 - R_5}{Z_3} \right]$$

$$Z_4 = Z_3 - Z_2 - x \quad \text{e} \quad Z_2 = \frac{h_m}{\tan \beta}$$

$$V_i = |V_3 - V_5| = \left[ \frac{\sin \phi}{\sin(\phi + \theta)} - \frac{\sin \beta}{\sin(\theta + \beta)} \right]$$

$$k_i = k_c \quad \text{quando} \quad k_c < k_n$$

$$\text{e} \quad k_i = k_m \quad \text{quando} \quad k_m < k_c$$

Para computar o valor inicial de  $\phi$ , o valor de  $\theta$  deve ser calculado e este é dado por

$$\tan \theta = \frac{R_5 - R_4}{z_3 - h_c \tan \theta} \quad \text{onde} \quad EFC("electronicfrequencycontrol") = 90^\circ$$

A otimização de  $R_4$ ,  $\phi$  e  $\beta$  para dar a tensão mínima de trefilação deve ser feita por métodos numéricos. Deve-se notar que o melhor valor de  $R_4$  dão as espessuras finais da camada protetora e da matriz.

### **Análise de energia para a trefilação de tubos bimetálicos de parede fina com pistão flutuante**

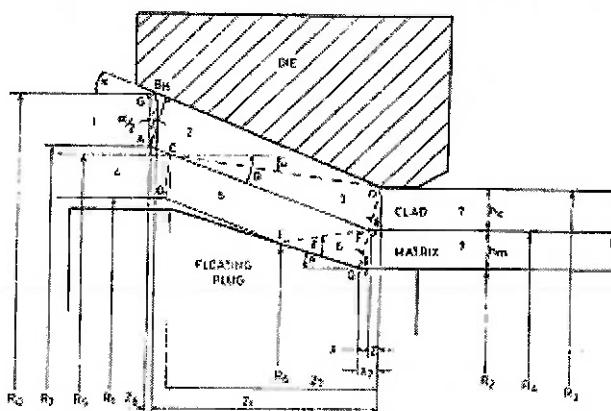
Um campo axissimétrico de velocidades admissível e seus hodógrafos correspondentes são mostrados nas Figs. 6 e 7. Como no exemplo anterior, o trabalho plástico é dissipado pelo atrito nas interfaces da ferramenta com a peça e pelo cisalhamento nas descontinuidades da velocidade e na interface da matriz com camada protetora. Adicionalmente, deve-se notar que um trabalho plástico adicional é dissipado na periferia com aumento de esforço na espessura nas regiões 2, 3,5 e 6 onde há um aumento na velocidade. As suposições são feitas de modo que: (i) não há mudança nas espessuras da camada protetora e da matriz na região de afundamento e (ii)  $k = \frac{Y}{2}$  onde  $y$  é

a tensão de escoamento média obtida pelo teste do recorte do plano de tensão de Watts e Ford.

Podemos também chegar na expressão:

$$Lu \leq \int_v \dot{\sigma} \dot{\varepsilon} dv + \int_s \tau_s V dS$$

onde  $L$  é a carga da deformação,  $u$  é a velocidade de repuxamento, o  $\dot{\varepsilon}$  é a taxa eficaz da tensão em um elemento de volume  $dv$ ,  $V$  é o deslizamento relativo ao longo da superfície  $S$ ,  $\dot{\sigma}$  é a tensão efetiva ou real e  $\tau_s = k$  é a tensão de escoamento no cisalhamento puro. A admissão do atrito é feita como antes, colocando  $\tau_s = mk$ . É o primeiro termo do lado direito da equação (9) que permite que o esforço na direção do versor angular seja acomodado.



(Fig. 6) Campo de velocidade trefilação de tubo com pistão flutuante

Assim

$$\dot{W} = \dot{v} \bar{\sigma} \bar{\epsilon}$$

onde

$$\bar{\sigma} = \sqrt{3k}$$

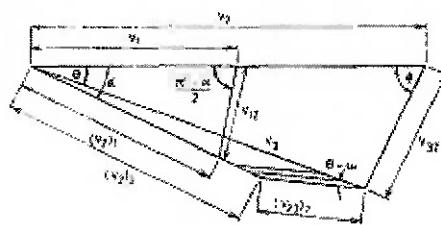
e

$$\bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} [\epsilon_r^2 + \epsilon_r \epsilon_\theta + \epsilon_\theta^2]^{\frac{1}{2}}$$

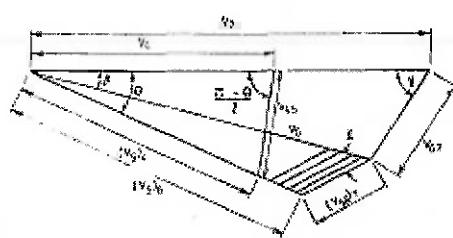
A potência total dissipada pela bancada de trefilação no processo de tubos bi-metálicos de parede fina com pistão flutuante é dado por:

$$\pi(R_3^2 - R_2^2) V_7 \sigma_x \quad (10)$$

e este é igualado à soma das potências dissipadas internamente.



HODÓGRAFOS PARA (LAD)



Hodógrafos para a Fig. 6

A seguinte equação é obtida:

$$\begin{aligned}
\frac{\sigma_x}{Y_e} = & \frac{1}{|R_3^2 - R_2^2| \cdot Y_e} \left\{ 2k_c(R_3^2 - R_4^2) \tan \frac{\alpha}{2} + \frac{2k_c R_3 (R_5 - R_3) \sin(\alpha - \theta) \sin \phi}{\sin \omega \sin(\alpha \pm \omega) \sin(\theta + \phi)} \right. \\
& + \frac{k_c (R_3^2 - R_4^2) \sin \theta}{\sin \phi \sin(\theta + \phi)} + 2k_m(R_4^2 - R_2^2) \tan \frac{\theta}{2} \\
& + \frac{2k_m R_4 (R_4 - R_6) \sin \gamma \sin(\theta - \beta)}{\sin(\gamma + \beta) \sin(\theta - \beta + \varepsilon) \sin(\varepsilon - \beta)} + \frac{k_m (R_4^2 - R_2^2) \sin \beta}{\sin \gamma \sin(\beta + \gamma)} \\
& + 2m_1 k_c \frac{R_0 (R_0 - R_3) (R_3^2 - R_4^2)}{(R_0^2 - R_2^2) \sin \alpha} + 2m_2 k_m \frac{\sin \gamma R_2 (R_6 - R_2)}{\sin \beta \sin(\gamma + \beta)} \\
& + 2m_3 k_i \frac{R_4 (R_5 - R_4)}{\sin \theta} \left[ \frac{\sin \phi}{\sin(\phi + \theta)} - \frac{\sin \gamma \sin \varepsilon}{\sin(\beta + \gamma) \sin(\theta - \beta + \varepsilon)} \right] \\
& + 2m_1 k_c R_3 + 2m_2 k_m R_2 P_1 \\
& \left. + 2k_c (R_3^2 - R_4^2) \ln \left[ \frac{R_0 + R_7}{R_3 + R_4} \right] + 2k_m (R_4^2 - R_2^2) \ln \left[ \frac{R_5 + R_1}{R_2 + R_4} \right] \right\} \quad (11)
\end{aligned}$$

onde

$$\begin{aligned}
Z_3 &+ \frac{R_0 + R_5 - R_3 - R_7}{\tan \alpha} (R_0 - R_7) \tan \frac{\alpha}{2} \\
\omega &= \tan^{-1} \left[ \frac{|R_5 - R_3|}{Z_3} \right] \\
\theta &= \tan^{-1} \left[ \frac{R_5 - R_4}{Z_3 - x} \right] \quad \text{e} \quad x = \frac{h_c}{\tan \phi}
\end{aligned}$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left[ \frac{h_m}{Z} \right]$$

$$T_1 = \frac{H_m - (h_m + Z \tan \beta) \cos \theta}{\sin(\theta - \beta)} - \frac{Z}{\cos \beta}$$

$$R_6 = R_2 + T_1 \sin \beta$$

$$\varepsilon = \beta + \tan^{-1} \left[ \frac{R_4 - R_6}{T_1 \cos \beta + Z} \right]$$

$$x_2 = x + Z$$

Para acomodar o endurecimento provocado pelo esforço da camada protetora e da matriz, um valor médio da tensão de cisalhamento é usado para se obter o valor de  $k$  para cada metal. Nestas equações os ângulos  $\phi$  e  $\gamma$  e o raio  $R$  são os parâmetros que devem ser otimizados para dar a solução mínima do limite superior. Com o  $R_4$  calculado as espessuras finais da camada protetora e da matriz são conhecidas também. Outra vez, estes cálculos devem ser feitos usando métodos numéricos interativos.

## **8. DESENVOLVIMENTOS INCOMUNS E RECENTES NA TREFILAÇÃO**

Já que o tracionamento de longos comprimentos de fio de secção circular, haste, barra e tubo é reconhecido como um método barato da produção, muitos trabalhos são empreendidos de tempo em tempo para se estender o escopo desta forma de processamento. Na trefilação não vibratória, todo o trabalho é feito pela tensão de escoamento, desde que a matriz não se contraia ou expanda radialmente. Conseqüentemente, o limite do processo é alcançado quando a tensão no produto trefilado é igual à tensão de escoamento do metal que emerge da matriz. Para aumentar a redução de área de um passo é necessário reduzir a tensão de trefilação.

Reducir a tensão de trefilação, e subseqüentemente aumentar a redução de área, para aumentar a tensão de trefilação a seu valor original, permite que o número de passos seja reduzido. Uma redução no número de passos influencia significativamente o custo de trefilação, particularmente onde o recozimento e tratamentos preparatórios associados são uma exigência metalúrgica.

Os fatores que afetam a tensão de trefilação em uma dada redução de área e tensão de escoamento são: o coeficiente de atrito e o perfil da matriz. Assim, para reduzir o número de passos é necessário reduzir o atrito e usar a matriz de perfil mais eficiente.

## Trefilação Hidrodinâmica

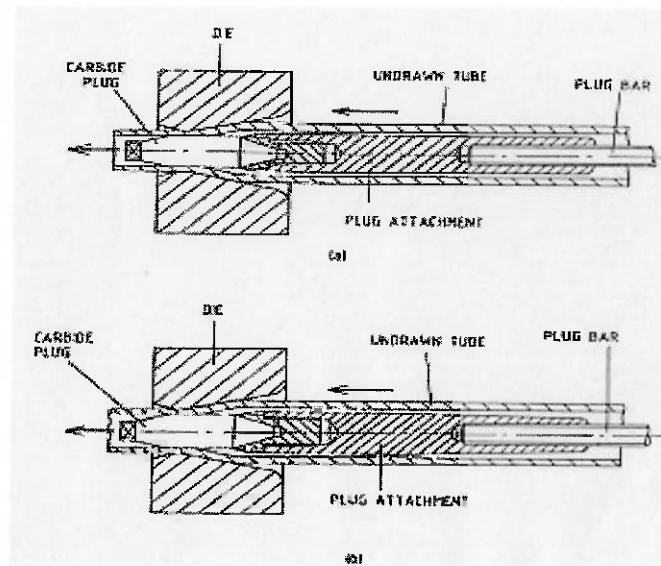
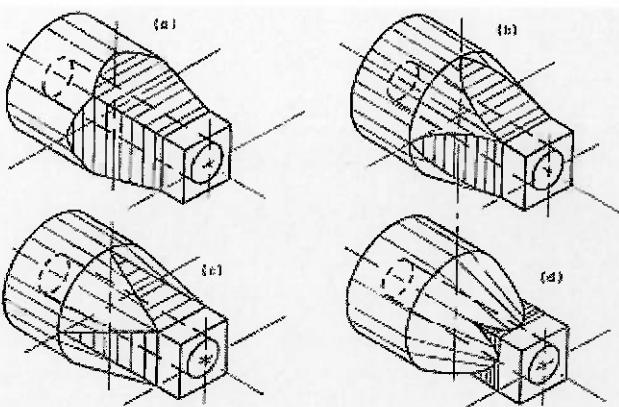


Fig. 8 Trefilação hidrodinâmica

Um desenvolvimento incomum na redução do atrito foi a invenção do tubo de Christopherson para a trefilação de fios. Nesta invenção um tubo é selado à matriz. O tubo embarca o lubrificante na superfície do fio em movimento. O tubo é de tal comprimento na entrada a matriz que, com a ação hidrodinâmica automática do fio e do lubrificante, há um aumento considerável na pressão da película do lubrificante. Isto resulta numa maior espessura da película do lubrificante e em uma redução no coeficiente de atrito. Mais tarde, esse conceito foi extendido à trefilação de tubos, utilizando a pressurização da película do lubrificante da matriz, como na trefilação de fios, e mais importante, fazendo a pressurização da película do lubrificante do pistão (Fig. 8).

## Trefilação de perfis



*Fig. 9 Aspectos genéricos das quatro formas básicas possíveis da zona de deformação da matriz para trefilação direta de tubo poligonal*

A otimização de perfis de matrizes para a trefilação axissimétrica de fios, hastas e tubos recebeu uma atenção contínua no campo de pesquisa desse tipo de usinagem. Entretanto, apenas recentemente uma consideração séria foi dada à otimização de perfis de matrizes apropriados para trefilar o material perfilado. Existem estudos de trefilação de barras de secção quadrada a partir de material de secção quadrada e foram produzidas análises da mecânica do processo baseado em conceitos de energia. Similarmente, foi relatado a trefilação direta de qualquer barra poligonal uniforme de secção redonda em um passo único, a partir da qual foi produzido uma teoria da energia mínima e o programa de computador correspondente para derivar o perfil o mais eficiente de matriz para a mudança de forma.

É axiomático desta aproximação trefilar secções em que a dissipação mínima de energia corresponda à força de trefilação mínima. Isto foi verificado experimentalmente para uma variedade de secções poligonais. Encontrou-se na prática que os perfis de energia mínimos da matriz minimizam também os defeitos devido à concentração de tensão e que os cantos das secções trefiladas são 'mais afiados'. Conseqüentemente, os métodos de 'tentativa e erro' de fabricar perfis de matriz para secções devem ser abandonados.

Atenção similar foi voltada para a derivação de perfis ótimos de matriz para a trefilação direta de tubo de secção circular para qualquer secção poligonal uniforme. Este problema é mais difícil de se resolver do que o problema da trefilação de barras correspondente desde que na trefilação de tal tubo, uma ferramenta indeformável seja presa dentro da zona de deformação que apresenta uma interface adicional com sua tensão de cisalhamento associada. Podemos usar a aproximação de energia mínima para resolver o problema da especificação do perfil da matriz que trefila de modo mais eficiente, por exemplo, tubo de secção quadrada diretamente do tubo de secção circular. O furo e a periferia exterior são ambos quadrados e a parede do tubo trefilado é de espessura uniforme, isto é, as diagonais do furo e da periferia exterior coincidem.

Um problema ainda mais difícil que foi investigado com sucesso por Muriuki e Sansome, é a trefilação direta de tubos de secção circular a um tubo cuja periferia exterior seja mudada a qualquer polígono uniforme enquanto o furo permanece circular. Muriuki com sucesso trefilou diretamente um tubo quadrado com um furo circular, do tubo circular num passo único em uma matriz o perfil de que tinha sido derivado usando uma teoria de energia mínima (veja Fig. 9).

O problema restante não solucionado neste tipo de trefilação de tubos é a trefilação direta de tubo de perfilado em que o furo é mudado na forma de uma secção circular a qualquer secção poligonal

uniforme, enquanto a circunferência externa permanece circular. A especificação da matriz ótima e dos perfis do pistão será baseada em uma análise de energia mínima e a otimização seguirá de um programa de computador desenvolvido.

## **Trefilação a Altas Temperaturas**

Por muitos anos fios de aço de liga, que são excessivamente difíceis ou caros de se trefilar a frio, foram trefilados em altas temperaturas. As dificuldades pré-eminentes são as ligas de aço da ferramenta utilizadas, por exemplo, na fabricação de brocas helicoidais. Um método freqüentemente usado de fabricação tem sido puxar o fio através de um banho de chumbo fundido, lubrificante de grafita e finalmente através de uma matriz de carboneto de tungstênio. Desenvolvimentos tecnológicos no aquecimento conduziram à substituição de banhos de chumbo por resistência elétrica ou aquecimento por indução e estes desenvolvimentos produziram um roteiro mais seguro e mais eficiente de produção.

Além disso, temperaturas mais altas e controladas, junto com uma redução significativa no comprimento do fio no aquecedor, resultaram em um aquecimento e método de processamento mais eficiente do que se aquecendo em um banho de chumbo. Desde que, no processo de trefilação, o fio tenha uma tensão de escoamento maior do que a tensão de trefilação, se faz necessário resfriar o fio imediatamente após emergir da matriz. Também, é muito desejável resfriar a matriz para remover algum calor devido a deformação e para se assegurar que a interferência entre o suporte da matriz e o carboneto de tungstênio não seja reduzida. Assim, sistemas de resfriamento foram desenvolvidos para reduzir rapidamente a temperatura do fio e resfriar eficientemente a matriz. Estes desenvolvimentos levaram a

uma reavaliação do processo de trefilação em alta temperatura e às considerações do tratamento térmico em série. Algumas ligas podem agora ser repetidamente trefiladas a quente, resfriadas e relubrificadas novamente, em processo em série contínuo. Este tipo de trefilação a alta temperatura reduz o custo de fabricação, desde que elimina os custos do recozimento fora de linha, desoxidação, limpeza, tratamento químico, secagem e transporte do e para o bloco principal. Também, as temperaturas podem ser selecionadas especificamente para o grupo particular de fio que está sendo trefilado para produzir as características metalúrgicas requeridas. Mais tarde, Loh e Sansome revisaram a trefilação de fios a alta temperatura e conduziram muitos testes em diversos materiais sobre um alcance de temperaturas. Loh desenvolveu também uma teoria que deriva contornos de temperatura na zona da deformação e permite que a tensão de trefilação a alta temperatura seja avaliada. Para o processo a ser industrialmente bem sucedido nas temperaturas mais altas, Loh usou as então recentes matrizes 'Syalon' disponíveis e uma combinação de grafita e lubrificantes de bissulfeto de molibdênio.

Grafita é um dos poucos lubrificantes a permanecer eficaz a temperaturas mais altas, enquanto que em temperaturas médias, não é tão eficiente quanto os lubrificantes baseados no bissulfeto de molibdênio. Conseqüentemente, um lubrificante duplo consistindo de bissulfeto de molibdênio e grafita tem propriedades adequadas para trefilação em temperaturas baixas e propriedades excelentes para a trefilação em alta temperatura.

Começar a trefilar em temperaturas elevadas requer cuidado especial visto que os primeiros poucos metros devem inevitavelmente ser trefilados a frio ou a morno. No começo, o ciclo de estado estacionário de aquecimento/resfriamento não foi estabelecido, mas é provável que a redução planejada seja maior do que aquela na qual

pode ser conseguida na trefilação a frio. Este problema é resolvido se estampando uma presilha mais longa do que a usual no fio. O primeiro diâmetro da presilha é menor do que a matriz, o segundo é maior, mas corresponde a uma redução que possa ser efetuada a frio, o terceiro diâmetro é o maior, mas é intermediário entre o diâmetro do fio não trefilado e o diâmetro da matriz. Esta última parte da presilha é a primeira a ser aquecida, mas desde que a redução devida a trefilação seja intermediária e a temperatura do fio não tenha alcançado um estado estacionário otimizado, trefilação a temperaturas não muito altas pode ser conseguida eficazmente na transição inicial entre trefilação a frio e trefilação a quente.

## **Trefilação Ultra-sônica**

Depois de uns vinte anos de pesquisa, é aparente que os metais podem ser deformados mais facilmente quando são vibrados do que é possível sem a vibração. Na ausência de um aumento na temperatura é aparente também que a peça não é amaciada pela vibração, assim as razões para uma redução na força requerida para causar deformação devem ser procuradas de outra forma além de uma redução na tensão de escoamento. Agora se acredita geralmente que há quatro explicações, ou mecanismos, que descrevem a redução observada nas forças de deformação. Estes quatro mecanismos podem ser divididos em duas categorias, ou seja, o volume e efeitos de superfície. Os dois fatores principais incluídos no efeito do volume são a superposição de mecanismo e o efeito da estampa. Os dois fatores principais incluídos no efeito da superfície são o efeito do vetor do atrito e a mudança no coeficiente de atrito.

## **O efeito do volume**

O mecanismo de superposição ocorre tipicamente na trefilação de fios quando a matriz é vibrada ao longo do eixo de trefilação. Enquanto a matriz se move para abaixo a tensão de trefilação é reduzida e enquanto o ciclo de vibração é terminado pelo retorno da matriz à sua posição para cima a tensão é aumentada. Entretanto, a tensão não pode superar o valor da tensão de trefilação sem o fio ser trefilado. Assim, uma tensão vibratória é sobreposta na tensão de trefilação de estado estacionário tal que idealmente a tensão de trefilação não excede a tensão não-vibratória original. Na prática, enquanto a matriz se move para baixo com o fio, a trefilação cessa; no curso reverso a trefilação recomeça quando a tensão no fio trefilado é suficientemente grande para exceder atrito adesivo e a tensão de trefilação de estado estacionário. Conseqüentemente, na oscilação longitudinal da matriz o mecanismo de sobreposição explica porque a tensão máxima excede a tensão de trefilação de estado estacionário e porque, também, a tensão média é menor do que a tensão de trefilação de estado estacionário. Deve-se notar que não há nenhum movimento relativo entre a matriz e o fio na tensão média e conseqüentemente não se pode ser sustentado que a tensão de trefilação é reduzida como conseqüência deste mecanismo sozinho.

O segundo fator principal na classe do 'efeito do volume' é o 'efeito da estampa'. Este efeito ocorre, por exemplo, quando uma matriz é vibrada radialmente, isto é, quando o diâmetro do orifício se expande e se contrai simultaneamente e uniformemente em todas as posições angulares em torno da matriz. Trabalho é realizado na

trefilação não-vibratória, pela força de trefilação que puxa a peça através da matriz. A matriz não realiza nenhum trabalho. Na trefilação vibratória a matriz se contrai e se expande de forma senoidal e na parte de contração do ciclo, trabalho plástico é realizado enquanto a tensão radial reduz o diâmetro da peça. Expressado de forma simples, usando o critério de Tresca:

$$\frac{\sigma_{axial} - (-\sigma_{radial})}{2} = \frac{Y}{2} = k \quad (12)$$

ou  $\sigma_a + \sigma_r = Y$ .

Visto que o lado direito da equação é dependente das propriedades da peça que é constante, e consequentemente se  $\sigma_r$  for aumentado  $\sigma_a$  deve diminuir de modo correspondente. Este efeito é extensamente usado na operação de estampa quando matrizes de oposição forjam uma peça radialmente, fazendo com que ela se alongue axialmente por deslocamento; a força na direção longitudinal aplicada pelo operador é insuficiente causar o alongamento. Na trefilação ultra-sônica, em que a matriz é vibrada radialmente na sua freqüência de ressonância, a matriz se comporta como um estampador elástico de alta freqüência; a taxa de trabalho realizada na direção da trefilação àquela realizada na direção radial é proporcional ao movimento relativo entre a matriz e a peça nas duas direções mutuamente perpendiculares. Assim, com uma velocidade de baixo rendimento, uma matriz radial numa freqüência ultra-sônica com uma saída de potência constante deforma a peça e a força axial se aproxima de zero, enquanto que com uma velocidade de alto rendimento a força axial se aproxima da força de trefilação convencional e a proporção do trabalho realizado pela matriz diminui. O efeito da estampa é particularmente útil na trefilação de tubos e no "repuxamento" profundo de recipientes.

## O efeito da superfície

O efeito do vetor do atrito ocorre em processos não-vibratórios de “repuxamento” de metais quando, por exemplo, o movimento relativo entre as ferramentas e a peça pode ser alterado para incluir um componente transversal. Se uma matriz for girada sobre seu eixo enquanto uma barra estiver sendo trefilada através dela, a componente do vetor de atrito resultante na direção da trefilação é reduzido enquanto a velocidade rotacional é aumentada. Similarmente na trefilação de tubos ultra-sônica, se o pistão no furo do tubo for vibrado axialmente, isto é, se o pistão vibrar longitudinalmente na direção da trefilação e se a amplitude da vibração for suficientemente grande, a força de cisalhamento na superfície do pistão inverterá e ajudará o movimento do tubo através da matriz. O pistão está assim se comportando como um pistão de alta velocidade; onde seu vetor velocidade para frente excede o vetor de velocidade do tubo que está sendo trefilado através da matriz. O pistão empurra o tubo através da matriz para a parte de seu ciclo vibratório quando o vetor de atrito age no sentido da trefilação. Idealmente, no curso reverso o vetor de atrito se opõe ao movimento do tubo sobre o pistão, como na trefilação convencional e assim naquela parte do ciclo não é nenhum auxílio. Entretanto, encontra-se na prática que há uma redução no coeficiente de atrito associado com o efeito do vetor de atrito e assim no curso reverso do pistão a força de cisalhamento é menor do que seria na trefilação convencional.

Uma redução no coeficiente de atrito entre as ferramentas e a peça é encontrada para ocorrer extensamente, quando as ferramentas ou a peça vibram com amplitude suficiente em

freqüências ultra-sônica ou mais elevada. Uma barra de comprimento ressonante, quando sujeitada a uma variação longitudinal senoidal da tensão, ressonará, isto é, a extremidade livre será um ventre de onda estacionária e haverá uma onda vertical na barra com posições nodal e antinodal (ventre) ao longo de seu comprimento. A onda vertical aparece como um resultado da entrada de uma onda de energia na qual cada pico de tensão de tração, ou na tensão de compressão, se propaga com a velocidade do som no meio. A barra, de modo correspondente, se tenciona longitudinalmente e lateralmente e consequentemente mudanças senoidais no diâmetro avançam ao longo da barra com a velocidade de som. A combinação do aparecimento de movimento da onda vertical e os movimentos da onda em propagação movem o lubrificante através da interface entre a barra e qualquer a ferramenta adjacente, assim, aumentando a espessura da película do lubrificante e reduzindo o coeficiente de atrito. Esta ação da vibração é conhecida como 'bombeamento do lubrificante'. Tem sido freqüentemente observado que o tubo trefilado desta forma é mais umectado com lubrificante do que no caso convencional. Acredita-se também que outros mecanismos reduzem o coeficiente de atrito entre a ferramenta e a peça e estes podem ser listados como:

- (1) Amolecimento das asperezas,
- (2) Aumentar a reatividade química dos lubrificantes e das superfícies,
- (3) Quebrar as soldaduras.

## **Trefilação ultra-sônica de tubos**

Embora muitos dos mecanismos descritos ocorram sobre uma gama de freqüências, freqüências ultra-sônicas são preferidas por minimizar o distúrbio no meio de trabalho; assim uma freqüência igual a 20 kHz é freqüentemente selecionada desde que ela combine a amplitude adequada com o distúrbio do meio mínimo. Dois sistemas de trefilação ultra-sônica são aplicados: (a) ativação do pistão e (b) ativação da matriz. No sistema de ativação do pistão o pistão é vibrado num modo axial em 20 khz. O pistão e a barra do pistão constituem um sistema ressonante com o antinodo da amplitude situado na extremidade livre do pistão. Assim o oscilador é ajustável na posição de permitir que a barra do pistão seja um número integral de comprimentos de onda médio no comprimento enquanto assegure-se que o pistão esteja localizado corretamente dentro da matriz na zona da deformação. Este sistema de trefilação ultra-sônica de tubos leva vantagem do efeito do vetor de atrito e de uma redução no coeficiente de atrito. Como o sistema de ativação da matriz, ele permite que metais de difícil trefilação sejam trefilados com uma redução na força de trefilação, com uma ‘melhora’ no acabamento superficial concentração de tensão reduzidas. Também, os tubos de parede muito fina podem ser trefilados com precisão e com um acabamento superficial de alta qualidade. O sistema de ativação do pistão pode ser usado na trefilação com pistão flutuante nos blocos principais, vibrando a matriz de um modo axial. Se o pistão é de um comprimento ajustado apropriado, ele vibrará solidariamente com a matriz. Estes meios de transferência de energia são muito convenientes, mas falta o avanço positivo ocorrendo quando a barra do pistão é movida.

No sistema de ativação da matriz de trefilação ultra-sônica de tubos, a matriz se comporta principalmente como um estampador elástico de alta freqüência; sendo, consequentemente, mais eficaz.

A consequência da vibração radial ultra-sônica da matriz é que o tubo é trefilado com reduções elevadas de área por passo e o resultado são superfícies internas e externas muito lisas. Não é incomum para a redução da área exceder 50% por passo ou para uma programação de trefilação de tubo em cinco passos convencional a ser reduzida a uma programação em três passos. O sistema radial de ativação da matriz é usado também para penetração de tubos, trefilação de tubos com pistão flutuante nas suas várias formas, trefilação com pistão fixo e de mandril e o sistema pode ser adicionado a blocos principais tão facilmente quanto a bancadas de trefilação. Uma outra consequência de trefilação de tubos ultra-sônica é que os procedimentos preparatórios que se seguem ao recozimento podem ser eliminados, assim o tubo, que geralmente seria resfriado após o recozimento com brilho, é trefilado ultrasonicamente após ter deixado a fornalha.

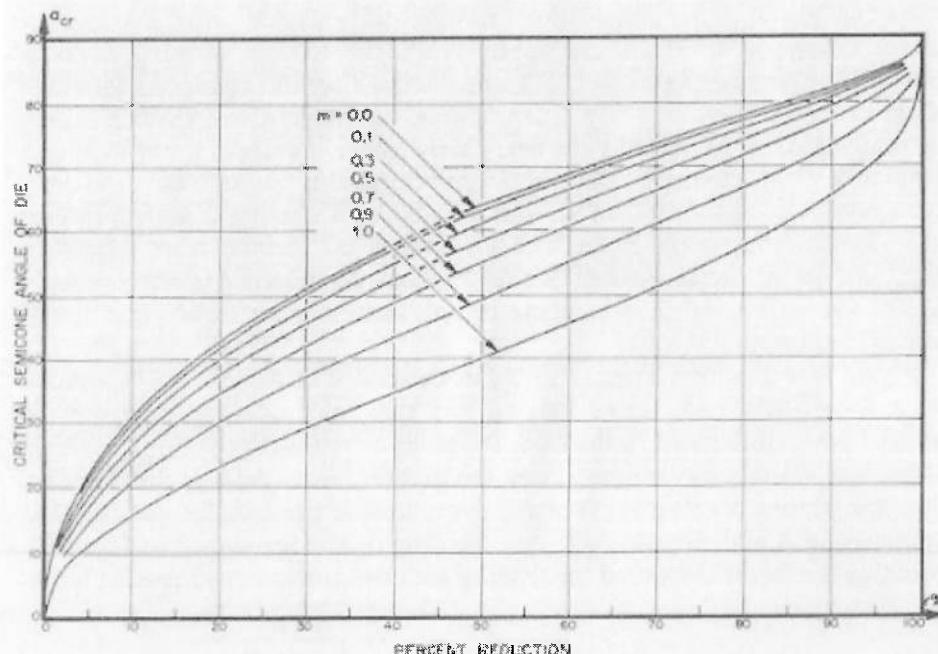
Resumindo, a vibração radial de uma matriz em uma freqüência ultra-sônica permite que:

- (1) A redução da área por passo a ser aumentada, freqüente e substancialmente, pela comparação com trefilação convencional,
- (2) 'Vibração' seja eliminada, ou minimizada,
- (3) Acabamento superficial seja 'melhorado' visivelmente,
- (4) Linhas de fraturas devido à concentração de tensões, matriz ou pistão sejam eliminadas ou minimizadas,
- (5) O número das passos necessários para produzir as dimensões finais a serem reduzidas por, talvez, 40%.
- (6) As operações intermediárias preparatórias sejam evitadas.

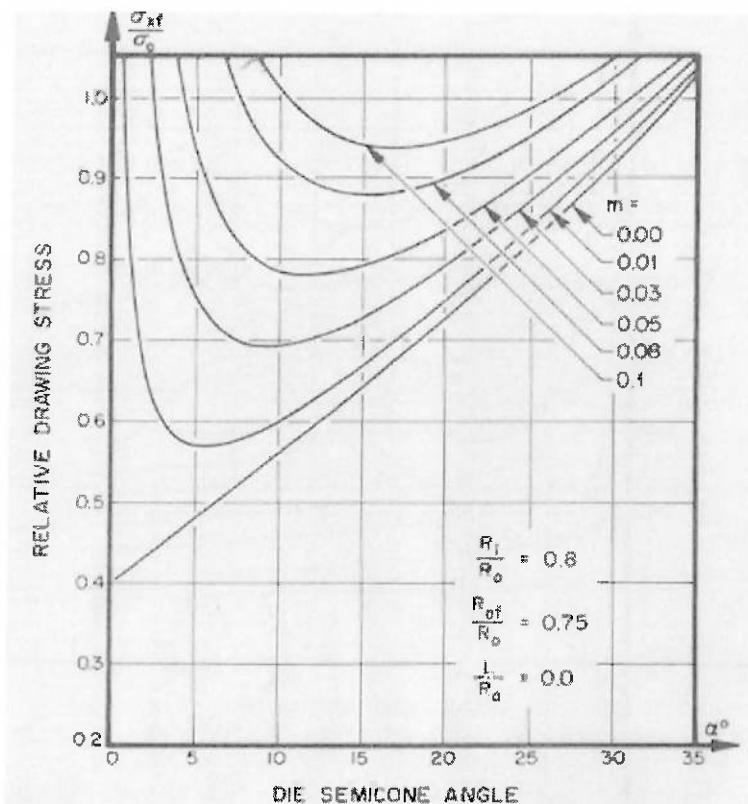
## 9. Gráficos

Grande parte do equacionamento desenvolvido no trabalho pode ser representada graficamente, facilitando as aplicações práticas da trefilação.

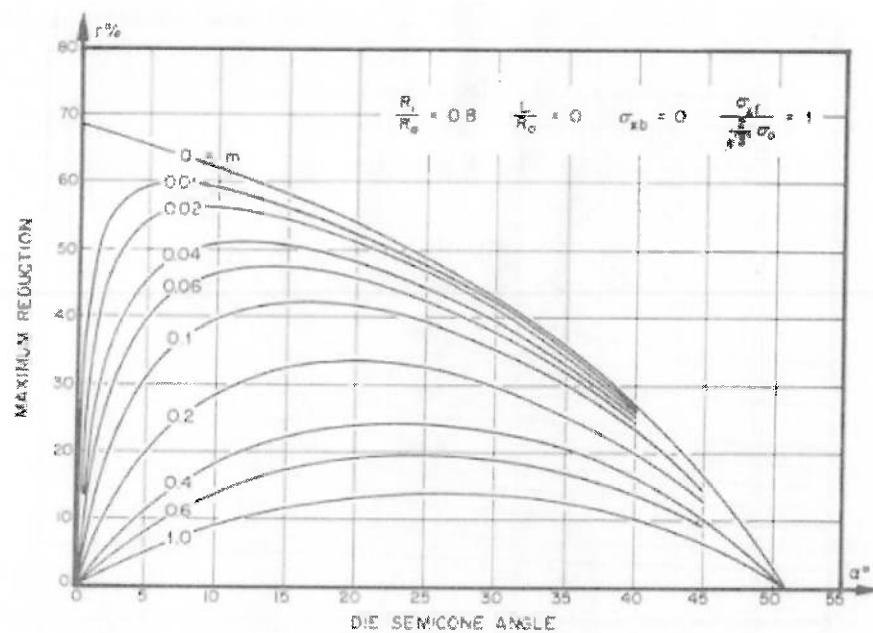
Nesse item apresentaremos alguns gráficos que nos permitem visualizar o comportamento de uma determinada grandeza em função de vários fatores e como os principais parâmetros envolvidos no processo se relacionam entre si.



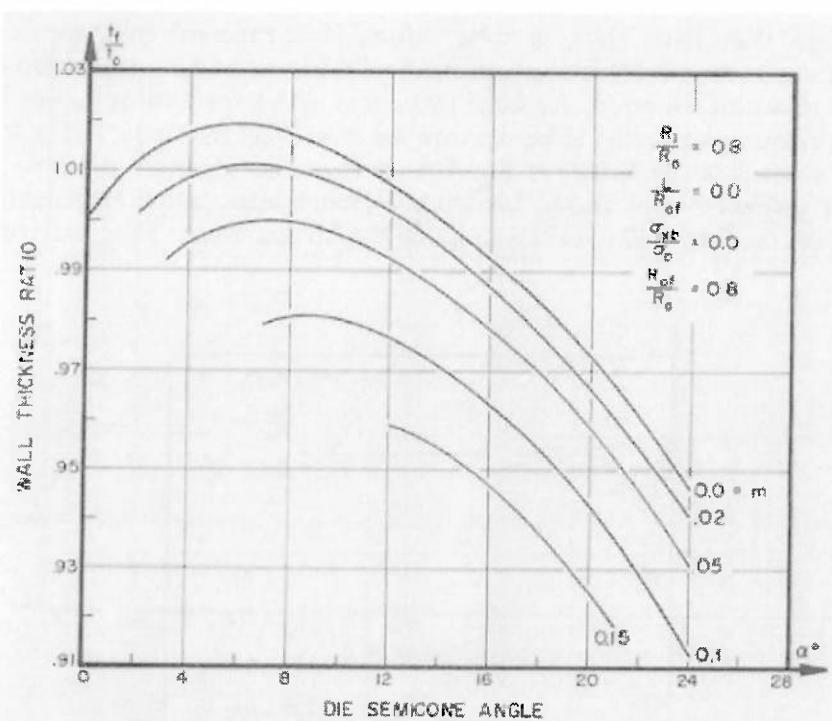
Ângulo crítico do semicône da matriz x Redução percentual de área



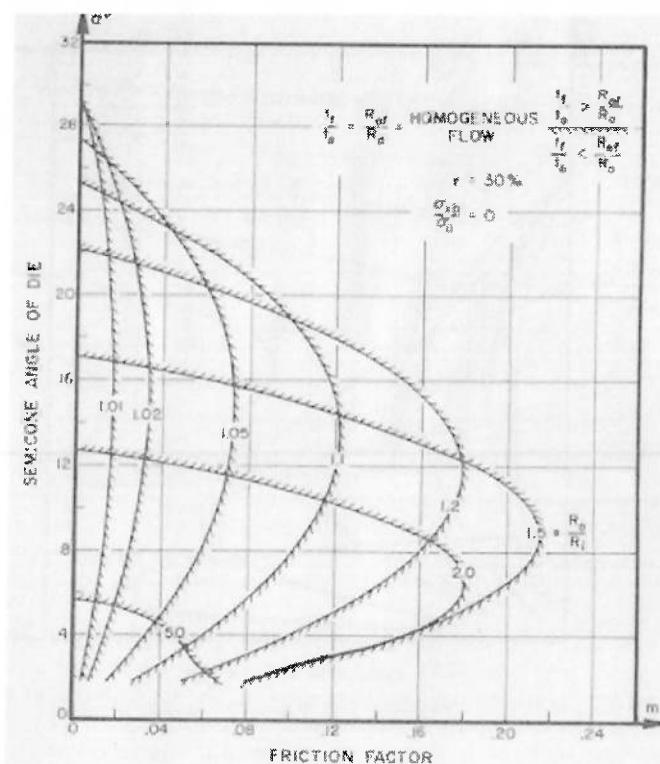
Tensão relativa de trefilação x Ângulo do semicone



Máxima redução x (Ângulo do semicone e fator de atrito)



Espessura da parede x Semicone/Fator de atrito



Angulo do semicone x Fator de atrito

## 10. Quadro Comparativo

Processo	Vantagens	Desvantagens
Tref. Ultrasônica	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Reduz o atrito</li> <li>-Melhora o acabamento superficial</li> <li>-Ativa uma melhor penetração do lubrificante na interface peça-ferramenta</li> <li>-Remoção de detrito e sujeira</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Problemas de ruído</li> <li>-Problemas de fadiga</li> <li>-Aplicação limitada</li> </ul>
Tref. Hidrodinâmica	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Queda no coeficiente de atrito <math>m</math></li> <li>-Maior vida útil da matriz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-O aumento da eficiência não é tão expressivo quanto na trefilação ultra-sônica</li> </ul>
Tref. a altas temperaturas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumenta a ductilidade do material</li> <li>- Permite um maior número de passes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O material pode ser contaminado por gases se não for bem protegido durante o tratamento térmico.</li> </ul>
Tref. de perfis	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Torna possível encontrar perfis que exijam menores esforços durante a trefilação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- É um processo sensível e qualquer variação durante o processo pode acarretar em uma grande concentração de tensão.</li> </ul>

## **11. Conclusão**

A trefilação é dentro da engenharia mecânica uma das áreas com grande perspectiva de crescimento no ramo de pesquisa tecnológica, uma vez que a quantidade de energia e material gasto nesse tipo de processo podem ser otimizados, atingindo-se maior eficiência e economia.

Neste trabalho foram apresentados equacionamentos e modelagens da deformação e trefilação dos metais. Essas equações, que são baseadas em análises de equilíbrio de força e energia fornecem uma boa representação matemática do processo, permitindo assim uma previsão mais precisa dos gastos e resultados.

Além do equacionamento, foram apresentadas novas alternativas de trefilação, que são objetos de grandes pesquisas, envolvem uma tecnologia mais avançada e estão ganhando espaço na indústria, mas que ainda dependem do equacionamento com base na análise de energia.

Para a fabricação de fios, barras e tubos, a trefilação ainda se mostra como sendo o processo mais barato, daí destacamos a importância de uma modelagem e equacionamento mais precisos.

## **12.Bibliografia**

Blazynski, T. Z. Metal forming: Tool Profiles and Flow,  
Macmillan Press Ltd, London, 1976

Winsper, C. E. and Sansome, D. H. The application of ultrasonic  
vibrations to the plug-drawing of tube, Metal Forming, (March 1971)

Blazynski, T. Z. Design of tools for deformation, Elsevier  
Applied Science Publishers, London and New York, 1987

Betzalel, Avitzur; Handbook of Metal-Forming Processes, John  
Wiley & Sons, Inc., 1983

Betzalel, Avitzur; Metal Forming – The Application of limit  
Analysis, Marcel Dekker, Inc., 1980