

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

*Este exemplar corresponde a redação final
da tese de mestrado, defendida por Frederico
Ozanan Neves e aprovada pela Comissão Julga-
dora em 21/08/1989*

Mim.

TESE DE MESTRADO
LUBRIFICAÇÃO HIDRODINÂMICA
APLICADA À TREFILAÇÃO

Autor: Frederico Ozanan Neves

Orientador: Dr. Ettore Bresciani Filho

Aprovado por:

Mim.

Prof. Dr. Ettore Bresciani Filho

Cecilia Amelia de Carvalho Zavaglia

Prof.^a Dra. Cecilia Amelia de Carvalho Zavaglia

Itamar

Prof. Dr. Itamar Ferreira

Campinas, 21 de agosto de 1989

RESUMO

Neste trabalho estuda-se as variações da força de trefilação e do coeficiente de atrito, como função da velocidade na trefilação de fios de cobre ETP. São estabelecidas as condições para a redução da força de trefilação e do atrito entre o fio e a fileira, com base na velocidade de trefilação, nas propriedades mecânicas do metal do fio, na viscosidade do fluido e nas condições superficiais do fio.

ABSTRACT

This work presents a study of the wire drawing force and friction coefficient variations as function of drawing speed in ETP copper wire drawing. Conditions of reductions of drawing force and friction in wire die are established with regard to drawing speed, mechanical properties of wire metal, fluid viscosity and surface finished wire.

AGRADECIMENTOS

No ensejo do término deste trabalho, desejamos agradecer às seguintes pessoas:

Prof. Dr. Ettore Bresciani Filho, pela orientação e constante incentivo, sem os quais não poderíamos realizar este trabalho;

Prof. Newton Damásio de Paula Santos, ex-Diretor da FEI/FUNREI, pela confiança depositada, que nos permitiu a realização deste aperfeiçoamento;

Prof. Sérgio Tonini Button, pela amizade e pelas inúmeras discussões sobre o tema e pelo constante apoio;

Prof.^ª Dra. Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia, pela amizade e pelo apoio que nos dispensou ao longo desta jornada;

Prof. Reynaldo Fernandino, Chefe do Departamento de Mecânica da FUNREI, por nos conceder as condições necessárias para o término deste empreendimento;

Prof. Marcos Sávio de Souza, pela amizade e compreensão em nosso convívio diário e pelo incentivo, sem os quais este trabalho seria de todo impossível;

Srs. Laerte e Luis, da oficina mecânica do Departamento de Materiais da FEC, pelos inúmeros trabalhos de apoio técnico realizados.

Extendemos ainda esses agradecimentos a todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram decisivamente para a realização deste trabalho.

Para minha filha,
minha esposa,
meus pais.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Objetivos	1
1.2 - Justificativa	1
1.3 - Descrição do trabalho	2
1.4 - Referências bibliográficas	4
CAPÍTULO 2 - DETERMINAÇÃO TEÓRICA DA FORÇA DE TREFILAÇÃO	5
2.1 - Descrição do processo	5
2.2 - Variáveis da trefilação	6
2.3 - Mecânica da trefilação	8
2.3.1 - Trabalho de deformação homogênea	8
2.3.2 - Trabalho redundante	8
a) Campo triangular de velocidade	10
b) Campo esférico de velocidade	11
2.3.2.1 - Determinação do trabalho redundante	13
a) Superfície trapezoidal plana	13
b) Superfície esférica	14
2.3.3 - Redução	15
2.3.4 - Determinação da força de trefilação	16
2.3.4.1 - Método da energia uniforme	16
2.3.4.2 - Método da divisão em elementos	18
2.3.4.3 - Método do limite superior	19
2.3.5 - Variação das propriedades mecânicas do metal do fio	23
2.4 - Referências bibliográficas	26
CAPÍTULO 3 - DETERMINAÇÃO TEÓRICA DO COEFICIENTE DE ATRITO	27
3.1 - Introdução à tribologia	27
3.1.1 - Condições mecânicas das superfícies	28
3.1.2 - Camadas superficiais	30
3.1.3 - Lubrificação e lubrificantes	31
a) Composição dos lubrificantes	32

b) Polaridade, reatividade e estrutura	32
c) Reologia e viscosidade	32
d) Contaminação	33
3.1.3.1 - Regimes de lubrificação	33
a) Regime de filme espesso	34
b) Regime de filme fino	34
c) Regime de lubrificação mista	35
d) Regime de lubrificação limite	36
3.2 - Teoria do atrito	37
3.2.1 - Leis do atrito	37
a) Teoria da soldagem	38
b) Teoria do crescimento das junções a seco	39
3.2.2 - Determinação teórica do atrito na presença de lubrificantes	40
3.2.2.1 - Atrito de lubrificação limite	40
3.2.2.2 - Atrito de cisalhamento viscoso	41
3.3 - Modelagem da lubrificação hidrodinâmica na trefilação	42
3.3.1 - escoamento do fluido por uma cunha - Equação de Reynolds	42
3.3.2 - Previsão da espessura do filme na trefilação	46
a) Análise da zona de entrada	46
b) Análise da zona de deformação	48
c) Análise da zona de saída	48
3.3.3 - Simplificação para fluido refrigerante	49
3.3.4 - Previsões da teoria da lubrificação	49
3.4 - Referências bibliográficas	52
 CAPÍTULO 4 - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	 54
4.1 - Introdução	54
4.2 - Máquina trefiladora de laboratório	54
4.3 - Ferramentas utilizadas	55
4.4 - Lubrificantes	57
4.5 - Metais trefilados	58
4.6 - Dispositivo de medição de forças	60
4.6.1 - Calibração do dispositivo	64
4.7 - Descrição dos ensaios	67
4.8 - Referências bibliográficas	70

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO	71
5.1 - Introdução	71
5.2 - Força de trefilação x velocidade de operação	71
5.2.1 - Resultados analíticos da força de trefilação	71
5.2.1.1 - Variação da tensão média de escoamento	73
5.2.2 - Resultados experimentais da força de trefilação	73
5.3 - Velocidades teóricas dos regimes de lubrificação	83
5.4 - Discussão dos resultados obtidos	84
5.4.1 - Força de trefilação x velocidade	84
5.4.2 - Coeficiente de atrito x velocidade	86
5.4.3 - Eficiência da lubrificação	87
5.5 - Referências bibliográficas	90
 CAPÍTULO 6 -- CONCLUSÕES	 91
 BIBLIOGRAFIA REFERIDA	 93
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA MAS NÃO REFERIDA	96
 APÊNDICES	 97
A.1 - SIMBOLOGIA	98
A.2 - ÍNDICE DE FIGURAS	101
A.3 - ÍNDICE DAS TABELAS	102
A.4 - ÍNDICE DOS GRÁFICOS	104

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - Objetivos

Os objetivos do presente trabalho são, fundamentalmente, dois. Em primeiro lugar, visa-se estudar as velocidades de trefilação, as condições mecânicas da superfície do metal do fio e as propriedades físicas do fluido lubrificante que, em conjunto, conduzam a um regime de lubrificação hidrodinâmica. Esse estudo se traduz em um modelo que permite prever, em função dessas variáveis, a ocorrência do regime de lubrificação desejado. Em segundo lugar, visa-se confirmar esse modelo teórico com os resultados obtidos de uma série de testes experimentais.

1.2 - Justificativa

Este trabalho se insere nos estudos que vêm sendo realizados pelo grupo do Laboratório de Mecânica Fina da UNICAMP e que buscam o domínio da tecnologia de fabricação de fios finos e ultrafinos de materiais não ferrosos. A aplicação para esses produtos se dá na indústria eletrônica, como elementos de ligação nos circuitos integrados e transistores.^[1]

A indústria eletrônica já domina, no que se refere ao processo de fabricação, a produção de fios ultrafinos de cobre. Entretanto, a tecnologia de produção de equipamentos de fabricação desses fios ainda não foi dominada por nossa indústria.

O Laboratório de Mecânica Fina projetou e construiu duas

máquinas de trefilar, de laboratório, para a produção de fios finos e ultrafinos de cobre, ouro e alumínio.

A primeira dessas máquinas construídas destina-se à fabricação de fios finos, cujos diâmetros, variam de 1 mm a 0,055 mm. Essa máquina é do tipo "tandem" e dispõe de três porta-fieiras em linha. A segunda destina-se à trefilação de fios ultrafinos, chegando-se ao diâmetro final de 0,025 mm e possui apenas um porta-fieiras. O reduzido número de porta-fieiras dessas máquinas faz com que o número de etapas de processamento para a redução desde o diâmetro superior (1 mm) até o diâmetro mínimo (0,025 mm) seja excessivamente grande para uma aplicação industrial.

No presente, no laboratório, desenvolve-se o projeto e a construção de uma máquina de trefilar do tipo cônica, com dez suportes de fieiras, o que reduzirá enormemente o número de etapas para a redução citada e, conseqüentemente, o tempo de processamento. Além disso o projeto inclui velocidades da ordem de 20 a 40 m/s, aliás, mais próximas das velocidades efetivamente praticadas no meio industrial. Esse projeto inclui ainda o controle da operação por microprocessador que monitorará a velocidade de operação e a força de trefilação, com ajustes em tempo real.

Este trabalho se justifica na medida em que o conhecimento das relações entre a velocidade de operação e a força de trefilação é de suma importância para a consecução dos padrões de controle da operação, permitindo, caso o regime de lubrificação hidrodinâmica seja alcançado, que a operação transcorra em velocidades mais elevadas. Reduz-se ainda os riscos de ruptura dos fios, com economia de energia, tempo e desgaste das matrizes.

1.3 - Descrição do trabalho

No capítulo 2 desta dissertação faz-se uma revisão

bibliográfica da mecânica da conformação aplicada à trefilação de metais em matrizes cônicas convergentes e discute-se os equacionamentos teóricos mais comumente empregados para obtenção da força de trefilação.

No capítulo 3 faz-se uma revisão das teorias do atrito e da teoria da lubrificação. Com base nessas teorias, um modelo do comportamento do fluido lubrificante na entrada, na saída e na zona de deformação do metal nas matrizes cônicas convergentes é apresentado, juntamente com as hipóteses para a definição dos diversos regimes de lubrificação possíveis nesse tipo de conformação.

No capítulo 4 faz-se uma descrição dos equipamentos e dispositivos empregados nos testes experimentais, bem como apresenta os resultados das medições das diversas variáveis do processo de trefilação envolvidas neste trabalho. Descreve, ainda, as técnicas empregadas nos testes experimentais.

O capítulo 5 apresenta os resultados experimentais obtidos para a força de trefilação como função da velocidade de operação. O coeficiente de atrito, obtido com base na mecânica da conformação e nas teorias do atrito e da lubrificação, é também avaliado com função da velocidade de operação. Segue-se, nesse mesmo capítulo, a discussão dos resultados à luz das teorias apresentadas nos capítulos 2 e 3.

O capítulo 6 apresenta as conclusões a que se foi possível chegar nesse trabalho.

1.4 - Referências bibliográficas

- [1] CARVALHO, C. A. e BRESCIANI F.^o, E. - Máquina de Trefilar, de Laboratório, para fios metálicos finos. Anais do XXXIV Congresso Anual da ABM, 1979, pg. 295 - 297.

CAPÍTULO 2

DETERMINAÇÃO TEÓRICA DA FORÇA DE TREFILAÇÃO

2.1 - Descrição do processo

O processo denominado trefilação é aquele no qual um fio metálico é deformado plasticamente ao passar através de uma ferramenta denominada fleira, quando tracionado axialmente. A fleira tem o perfil do produto desejado e o fio, ao passar através dela, tem o seu diâmetro reduzido e o seu comprimento aumentado. [2]

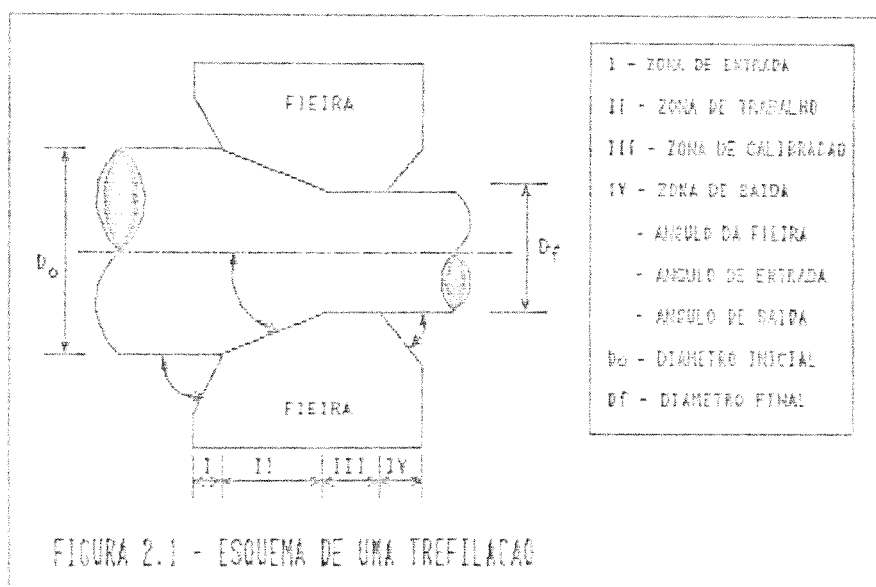
Compõem o perfil de uma fleira os seguintes elementos: [3]

- a) ângulo de entrada (2β);
- b) cone de entrada, que direciona o fio (I);
- c) cone de trabalho, onde o fio é deformado (II);
- e) zona cilíndrica, onde o fio é calibrado (III);
- f) ângulo de saída (2γ) e
- g) ângulo de trabalho (2α).

A figura 2.1 representa a trefilação e nela são mostrados os elementos que compõem o perfil de uma fleira. Para cada material há um perfil adequado quanto aos ângulos de trabalho, de entrada e de saída. O comprimento da zona cilíndrica varia de 0 a 2 diâmetros e o ângulo de trabalho, comumente chamado ângulo da fleira, varia de 0 a 25 graus. [4,5]

A trefilação é um processo estacionário, isto é, independente do tempo. é, também, um processo dito a frio porque nele as temperaturas desenvolvidas não alcançam as temperaturas de

recristalização do metal do fio. Com isto, ocorrem mudanças nas propriedades dos metais devido ao encruamento, sendo aumentado os seus limites de escoamento e de resistência à tração e diminuído o alongamento. Em certos casos é necessário fazer-se um recozimento intermediário quando o metal atingir níveis de encruamento demasiado elevado.



2.2 - Variáveis da Trefilação

Na análise da trefilação as principais dificuldades no equacionamento do esforço de conformação dizem respeito às variáveis cuja medição é muito dependente das dimensões do fio (principalmente no caso de fios finos e ultrafinos) e das elevadas velocidades de trabalho. As variáveis de trefilação podem ser classificadas em quatro grupos, a saber:

- 1 - Variáveis de matéria prima, envolvendo a natureza e as propriedades mecânicas do metal do fio e a forma do fio;
- 2 - Variáveis de materiais auxiliares, envolvendo a composição e as propriedades físicas e reológicas do fluido lubrificante;
- 3 - Variáveis de processamento, envolvendo a redução, o atrito, o regime de lubrificação, os esforços, a temperatura e a

velocidade de operação;

- 4 - Variáveis de produto final, compreendendo a natureza do metal do fio trefilado, as propriedades mecânicas e elétricas do metal do fio e a forma do fio.

A força de trefilação é equacionada como primeira variável dependente das demais. Neste estudo são mais enfatizadas as seguintes variáveis:

- a natureza do metal do fio, principalmente a composição química, pois dela depende a formação da película lubrificante por adsorção;
- as propriedades mecânicas do metal do fio, tais como a tensão de escoamento e o alongamento. A tensão de escoamento é determinante da força de trefilação e da pressão na interface fio/fieira e, portanto, da capacidade de se gerar e manter uma película lubrificante nessa interface;
- a forma do fio. A geometria do fio determina o estado de tensões e o modo de deformação. A rugosidade do fio determina a espessura mínima da película lubrificante a fim de que uma completa separação entre o metal em deformação e a fieira seja possível; [6]
- a natureza do lubrificante, principalmente sua composição, pois dela depende a capacidade do fluido de se adsorver ao metal para formação e manutenção da película lubrificante;
- as propriedades físicas e reológicas do lubrificante. Das propriedades físicas, a mais importante é a viscosidade do fluido, pois é fator determinante na formação da película lubrificante. A reologia do lubrificante determina o tipo de lubrificante em uso e o seu comportamento sob variação da pressão, da temperatura e do cisalhamento de suas moléculas. [7,8]

Um estudo mais detalhado dessas variáveis e das demais é

apresentado neste capítulo e no seguinte.

2.3 - Mecânica da trefilação

Qualquer tentativa de se tentar equacionar a força de trefilação deve considerar que esta é dependente do trabalho requerido no processo. Tradicionalmente têm sido considerado três componentes do trabalho total (W) requerido na trefilação: [93]

- a) Trabalho de deformação homogênea (W_h)
- b) Trabalho redundante (W_r)
- c) Trabalho devido ao atrito (W_a)

Nos passos seguintes, far-se-á uma análise mais detalhada dos itens a e b. A determinação do trabalho devido ao atrito requer o conhecimento das condições na interface entre o metal e a ferramenta, o que será objeto de análise no capítulo 3.

2.3.1 - Trabalho de deformação homogênea

O trabalho de deformação homogênea corresponde a energia mínima para reduzir plasticamente a seção transversal de um fio. Se o empescocamento não ocorresse, o fio poderia ter seu diâmetro reduzido uniformemente por uma tração longitudinal. O Trabalho requerido neste caso seria:

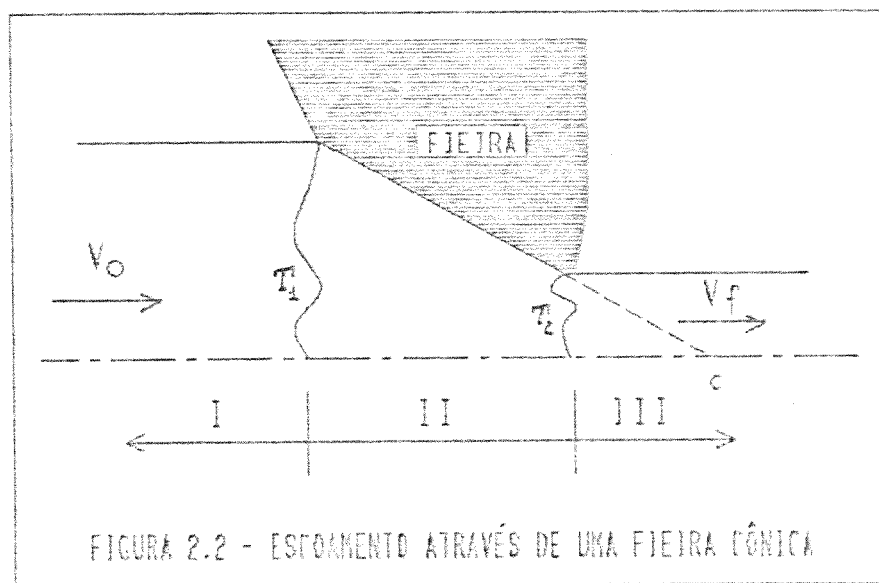
$$W_h = \int_{\epsilon_0}^{\epsilon_1} \sigma_0 d\epsilon$$

onde σ_0 é a tensão de escoamento do material do fio e ϵ é a deformação verdadeira.

2.3.2 - Trabalho redundante

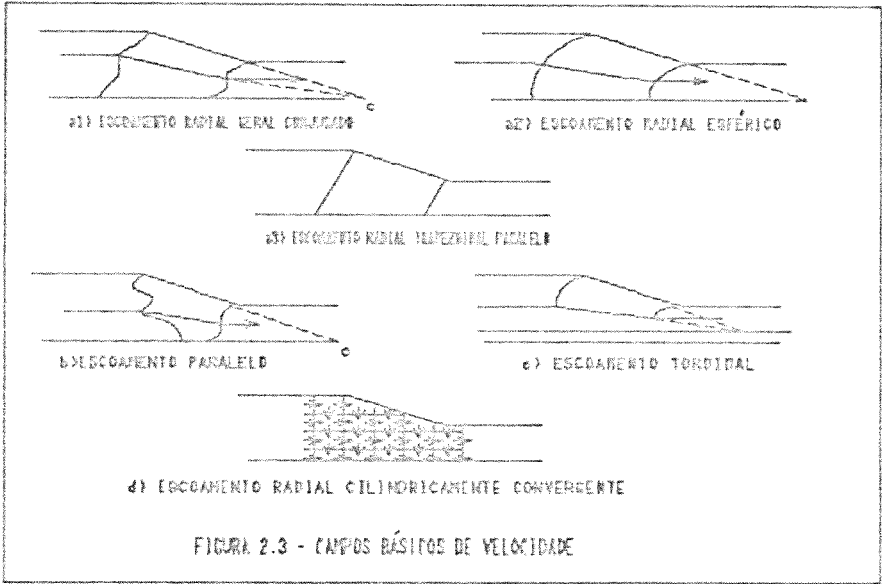
A figura 2.2 representa o escoamento através de uma fiera cônica. Antes de encontrar a fiera, o fio se move

paralelamente ao eixo de simetria com velocidade V_0 . Ao deixar a fieira, o fio também se move paralelamente ao eixo de simetria, porém com velocidade V_f . No interior da zona de trabalho (II), o fio tem sua velocidade progressivamente aumentada de V_0 para V_f . Os pontos materiais na superfície do fio, na zona de trabalho, se movem em direção ao ápice C. O mesmo ocorre com os pontos situados sobre o eixo de simetria. Pode-se esperar que, na zona de trabalho, qualquer ponto se mova em direção ao ápice C. Existem, portanto, dois lugares geométricos que definem a zona de deformação e onde os pontos materiais têm o módulo e a direção de suas velocidades alterados. Estes lugares geométricos são denominados superfícies de descontinuidade da velocidade e são denotados por T. Não há, em princípio, nenhuma maneira de se determinar nem a forma e nem a posição exata destas superfícies. Diversas formas têm sido propostas e algumas delas são mostradas na figura 2.3. [10]



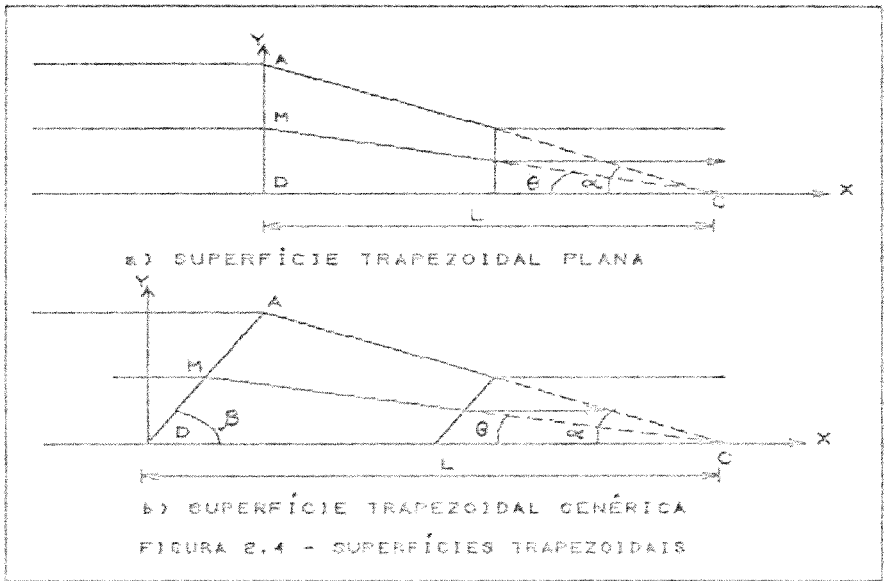
O trabalho redundante é aquele necessário para que o material atravessasse as superfícies de descontinuidade e não contribua para a mudança de forma. Para se determinar o trabalho redundante é necessário admitir-se a existência de uma das superfícies de descontinuidade mostradas na figura 2.3. Cada tipo de superfície

conduz a um campo de velocidade cinematicamente admissível. Discutiremos aqui os casos do campo esférico e do campo triangular de velocidades.



a) Campo triangular de velocidade

O campo triangular de velocidade é aquele definido por uma superfície trapezoidal, ocorrendo um caso particular quando $\beta=90^\circ$ (Figura 2.4a)



Considere-se incompressível o material do fio. Sendo assim, a velocidade em qualquer ponto dentro da zona de trabalho pode ser expressa por

$$V_x = V_0 \left(\frac{r_0}{r_x} \right)^2$$

onde V_x = velocidade em um ponto x genérico
 V_0 = velocidade do fio na entrada da fieira
 r_0 = raio inicial do fio
 r_x = raio do fio em um ponto x genérico.

Da figura 2.4b, é possível extrair-se as seguintes relações:

$$L' = \frac{L \sin \beta}{\sin(\beta + \theta)}$$

$$r_0 = L' \sin \theta = \frac{L \sin \beta \sin \theta}{\sin(\beta + \theta)}$$

$$r = (L - x) \operatorname{tg} \theta$$

$$V = V_x \cos \theta$$

$$V = V_0 \left[\frac{L \sin \beta \cos \theta}{(L - x) \sin(\beta + \theta)} \right]^2 \cos \theta$$

Sendo $V_x = dx/dt$, a expressão pode ser integrada no intervalo $x=0$, $t=0$ a x,t , fornecendo:

$$x^3 - 3Lx^2 + 3L^2x - 3V_0L^2t \left(\frac{\sin \beta \cos \theta}{\sin(\beta + \theta)} \right)^2 \cos \theta = 0$$

As raízes desta equação determinam as linhas de escoamento para o campo triangular de velocidade. Na figura 2.6a mostram-se as linhas de escoamento para o caso particular de $\beta=90^\circ$. Note-se que não se considerou o encruamento e nem o atrito entre fio e fieira.

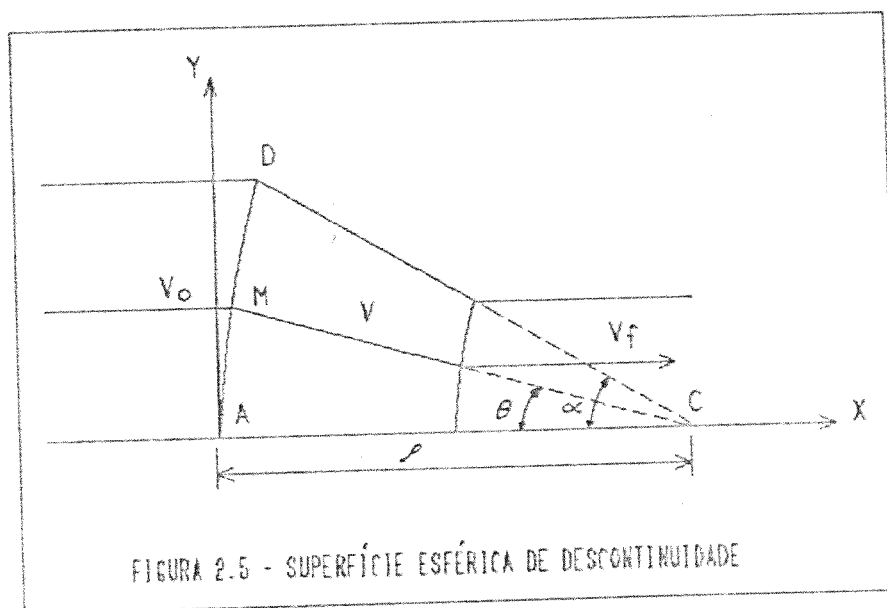
b) Campo esférico de velocidade

As superfícies esféricas de descontinuidade determinam

o campo esférico de velocidade. De acordo com a figura 2.5, estabelecem-se as seguintes relações:

$$r_o = \rho \sin \theta$$

$$r = (\rho - x) \operatorname{tg} \theta$$



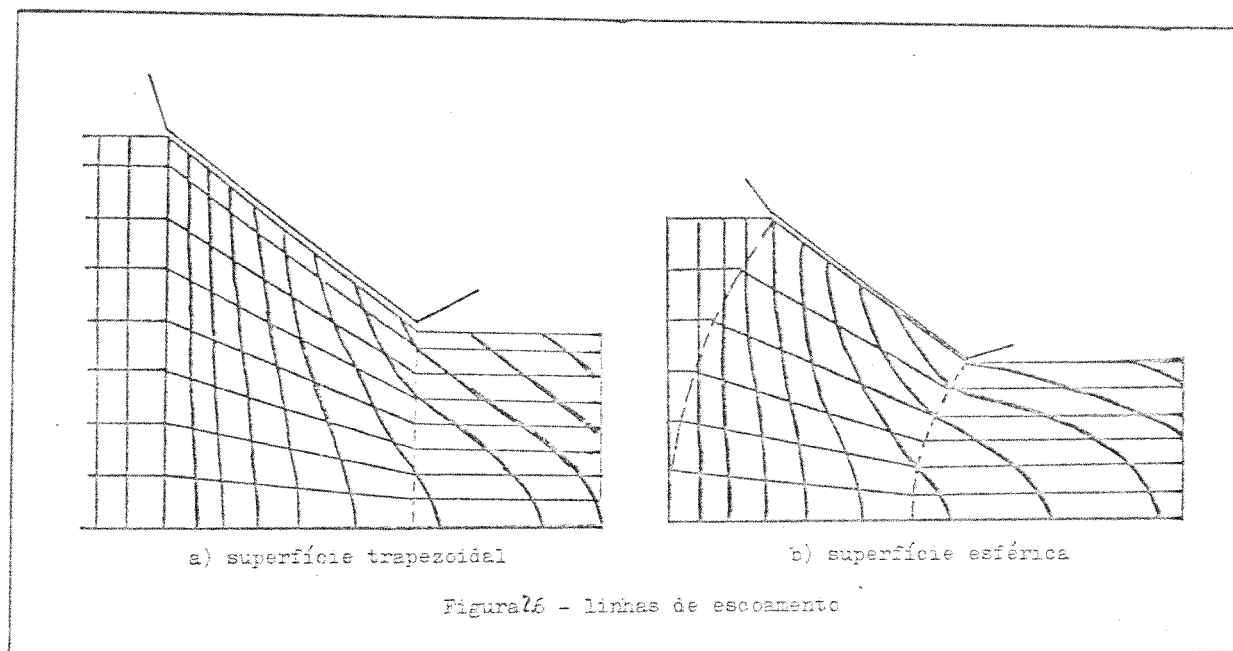
De acordo com a hipótese de incompressibilidade do material do fio, vale a expressão:

$$V = V_o \left(\frac{r_o}{r} \right)^2 \cos \theta = V_o \left(\frac{\rho}{\rho - x} \right)^2 \cos^3 \theta$$

Sendo $V = dx/dt$, a expressão pode ser integrada no intervalo $x=0, t=0$ a x, t , fornecendo:

$$x^3 - 3\rho x^2 + 3\rho^2 x - 3tV_o\rho^2 \cos^3 \theta = 0$$

As raízes desta equação determinam as linhas de escoamento para o campo esférico. A figura 2.6b mostra as linhas de escoamento para este campo, sem considerar o atrito e o encruamento.



2.3.2.1 - Determinação do trabalho redundante

Uma vez determinado o campo de velocidade cinematicamente admissível, o trabalho redundante será aquele necessário para fazer com que o material atravessasse as superfícies de descontinuidade. Nos passos seguintes analisamos os casos em que o material atravessa uma superfície triangular (trapezoidal plana, $\beta=90^\circ$) e uma superfície esférica.

a) Superfície trapezoidal plana

As condições de escoamento são as apresentadas na figura 2.4a. Para continuidade do escoamento, as componentes da velocidade normais à linha AMD devem ser as mesmas dos dois lados. Desta forma, para mudar a direção, o material é submetido a uma descontinuidade da velocidade igual a $V \operatorname{tg} \theta$, tangencial à linha AMD. A taxa de trabalho é dada por [10]

$$W = \int U \, dF$$

onde $dF = \tau \, dA$, $dA = 2\pi r \, dr$ e $U = V \operatorname{tg} \theta$

Mas,

$$\operatorname{tg} \theta = r/L$$

Então

$$W = \int_0^r \frac{2\pi\tau V r dr}{L} = \frac{2\pi\tau V r^3}{3L}$$

A taxa de trabalho externo é $W_e = Q_r V \pi r^2$, onde Q_r é a contribuição para a tensão de trefilação devido ao trabalho redundante para atravessar a linha AMD. Então,

$$Q_r = \frac{2 r \tau}{3 L} = (2\tau \operatorname{tg} \alpha)/3$$

b) Superfície esférica

No campo esférico (figura 2.5), a componente de descontinuidade da velocidade é $V \sin \theta$ e $dr = 2\pi r ds$, onde ds é a largura de intercessão do limite esférico. Se ρ é o raio da superfície, então $r = \rho \sin \theta$ [10] e

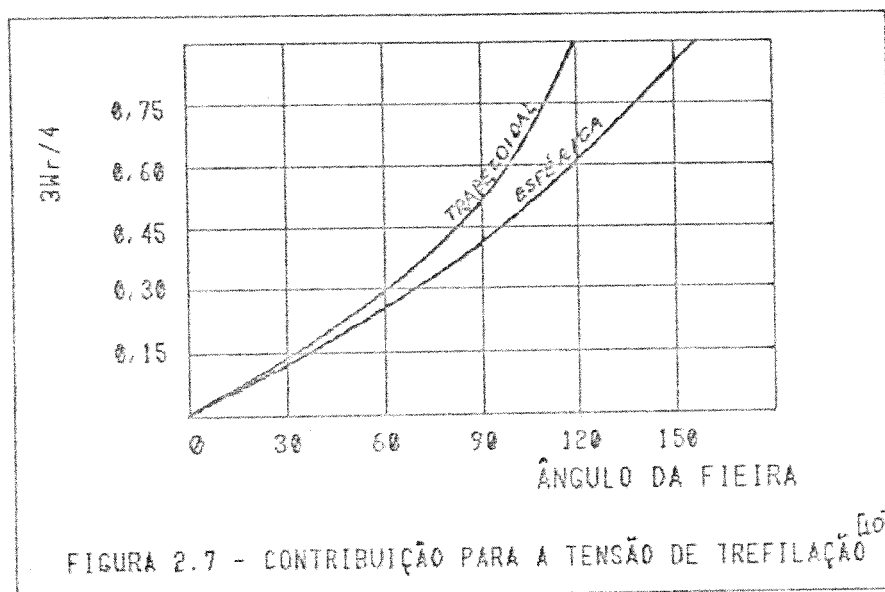
$$W = 2\pi\tau V \rho^2 \int_0^\alpha \sin^2 \theta d\theta$$

$$W = \pi\tau r^2 V \left[\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cotg \alpha \right]$$

A contribuição para a tensão de trefilação devido ao trabalho redundante para atravessar a linha AMD, será

$$Q_r = \tau \left[\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cotg \alpha \right]$$

A figura 2.7 mostra a contribuição para a tensão de trefilação devido ao trabalho redundante para atravessar a superfície de descontinuidade em função de 2α . [10] Como na trefilação os ângulos são geralmente pequenos, as duas superfícies são similares do ponto de vista de contribuição para a tensão de trefilação.



2.3.3 - Redução

Antes de passarmos à determinação da força de trefilação, convém introduzir o conceito de redução. Em trefilação, a redução consiste na deformação necessária para levar o fio de uma forma inicial a outra permanentemente. A redução pode ser expressa em função da seção transversal do fio, do raio da seção transversal ou do alongamento que o fio sofre. [3]

A redução em área, denominada β , é obtida pela expressão

$$\beta = 100 \left[\frac{A_o - A_f}{A_f} \right]$$

A redução em diâmetro, denominada δ , é obtida por

$$\delta = 100 \left[\frac{r_o - r_f}{r_o} \right]$$

O alongamento, denominado λ , é obtido por

$$\lambda = 100 \left[\frac{L_f - L_o}{L_o} \right]$$

Estas expressões se relacionam entre si através das seguintes:

$$\lambda = 100 \beta / (100 - \beta)$$

$$\beta = 100 \lambda / (100 + \lambda)$$

$$\delta = 100 (1 - \sqrt{\beta/\lambda})$$

A deformação verdadeira é obtida por $\epsilon = \ln (L_f/L_o)$ e esta se relaciona com as demais por

$$\epsilon = \ln [(100 - \lambda)/100]$$

2.3.4 - Determinação da força de trefilação

A trefilação pode ser tratada como um processo quasi-estacionário ou de movimento constante. Isto significa que a tensão e a taxa de deformação não variam para um determinado ponto referido a um sistema de coordenadas, o que simplifica sobremaneira a análise de tensões e deformações. Os itens seguintes apresentam os métodos analíticos mais comumente empregados na determinação dos esforços na trefilação.

2.3.4.1 - Método da energia uniforme

Neste método desprezam-se o trabalho redundante e o trabalho de atrito, ou seja, a forma e a natureza do contato. O estado de tensões é determinado por tensões longitudinais (p) e por tensões circunferenciais (q), ou seja, compressões radiais. O sistema $p, -q, -q$, pode ser transformado em $p + q, 0, 0$ e $-q, -q, -q$, caracterizando um sistema hidrostático, o qual se sabe não afetar a deformação.

Usando o critério de Tresca,

$$p + q = \sigma_o$$

Então,

$$\sigma_1 = \sigma_o \quad \text{e} \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

O trabalho de deformação uniaxial será

$$\frac{W}{V} = \int_{\epsilon_o}^{\epsilon_f} \sigma_o d\epsilon$$

O encruamento pode ser considerado através de $\sigma_o = f(\epsilon)$.
Considerando uma tensão de escoamento média ($\bar{\sigma}_o$) a expressão resultará

$$\frac{W}{V} = \bar{\sigma}_o \int_{\epsilon_o}^{\epsilon_f} d\epsilon$$

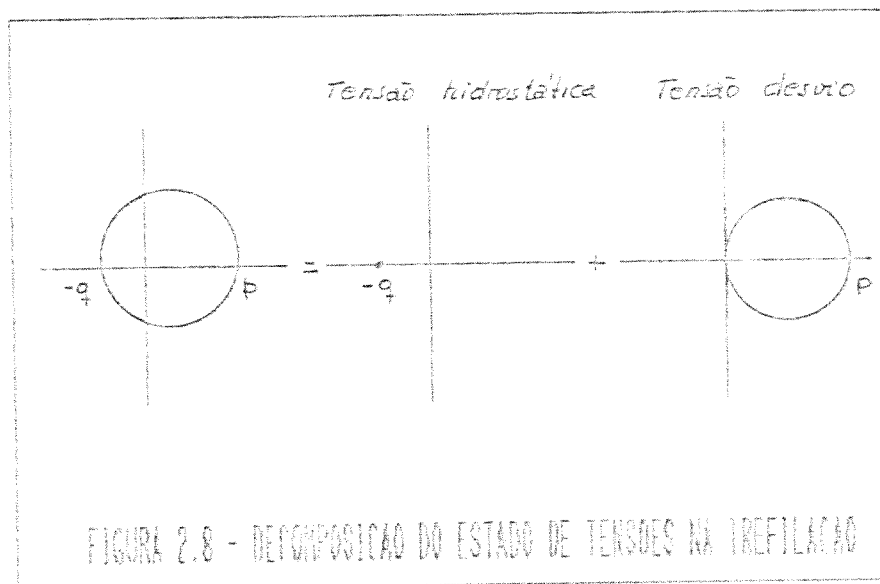
$$d\epsilon = dL/L$$

Assim, $W = V \bar{\sigma}_o \ln (L_f/L_o)$

O trabalho externo é $W = F \cdot L_f$

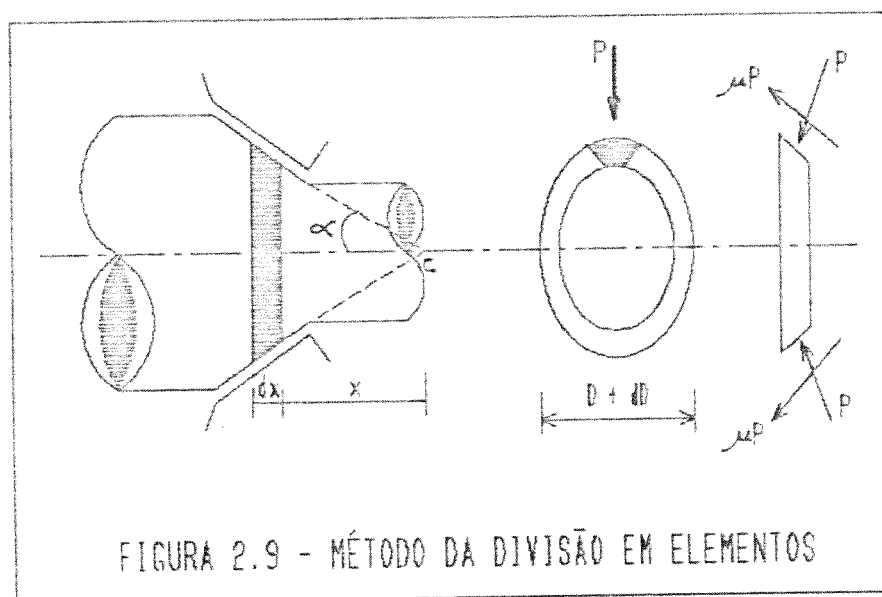
A força de trefilação, então, será

$$F = A_f \bar{\sigma}_o \ln (L_f/L_o)$$



2.3.4.2 - Método da divisão em elementos

Este método é melhor que o anterior porque considera o trabalho de atrito e o trabalho de deformação homogênea. Contudo, não leva em consideração o trabalho redundante. A determinação da tensão de trefilação se faz através dos seguintes passos, de acordo com a figura 2.9: [3]



- 1 - Isola-se um elemento diferencial dentro da zona de deformação;
- 2 - Estabelece-se o equilíbrio estático das tensões;
- 3 - Supõe-se que as tensões sobre as superfícies transversais do corpo livre são normais, uniformemente distribuídas e sem componentes de cisalhamento;
- 4 - Considera-se a simetria cilíndrica;
- 5 - Considera-se que para um deslocamento dx há um incremento de tensão $d\sigma_x$;
- 6 - Dentro da zona de deformação, há uma tensão normal p e uma tensão cisalhante $\tau = \mu p$;
- 7 - Estabelece-se o equilíbrio na direção longitudinal, obtendo-se uma equação diferencial;
- 8 - Aplica-se o critério de Tresca;

Integrando-se a equação diferencial, obtém-se

$$\sigma_t = \bar{\sigma}_0 \left[\frac{1+B}{B} \right] [1 - (1-r)^B]$$

onde $B = \mu \cotg \alpha$.

Esta expressão foi primeiramente desenvolvida por Sachs e apresenta ótimos resultados comparados a resultados experimentais, quando se trata de pequenos ângulos de fiação. Entretanto, para ângulos maiores, os resultados apresentam sérias distorções que se devem ao crescimento do trabalho redundante.

2.3.4.3 - Método do limite superior

O método do limite superior é o que melhores resultados tem apresentado, apesar de suas limitações, e considera o trabalho redundante, o trabalho de atrito e o trabalho de deformação homogênea. O método baseia-se no teorema do limite superior, o qual afirma que, quando um corpo escoar, o trabalho das forças externas é menor ou igual ao trabalho das forças associadas a qualquer campo de velocidade cinematicamente admissível no corpo. Esta abordagem sempre fornece uma superestimativa da força necessária para causar o escoamento de um material de von Mises. [9,12,13,15]

O método do limite superior assume um modelo de deformação, em deformação plana, consistindo de zonas rígidas onde o material é cisalhado ao longo de certas linhas. Estas linhas são projeções das superfícies de descontinuidade da velocidade. A adoção de zonas rígidas implica que todo o material dentro da zona de deformação tem a mesma velocidade e que todo o trabalho é feito para atravessar as linhas de descontinuidade da velocidade. [3]

A determinação da tensão de trefilação se faz de acordo com os seguintes passos: [3,9,12,14]

1 - Estabelece-se um campo de velocidade cinematicamente admissível (Figura 2.10) que atenda as condições de contorno e se aproxime do escoamento real. O campo de velocidade adotado aqui é o esférico.

2 - Determina-se a potência interna ($\dot{W}_L$), devido à deformação

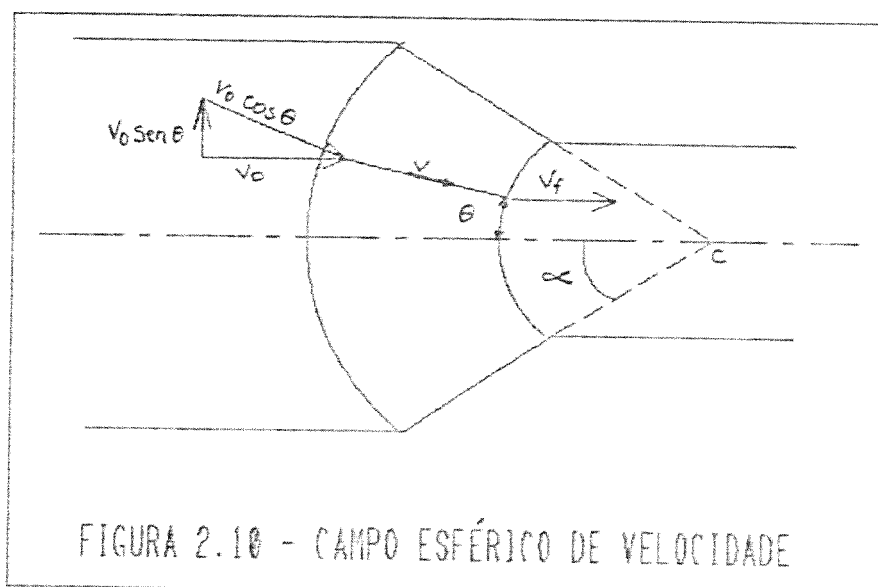
plástica, para o campo cinemático adotado. A potência interna se divide em duas parcelas, uma devido ao escoamento homogêneo dos pontos com velocidade contínua e outra devido ao escoamento dos pontos através das superfícies de descontinuidade.

3 - Determina-se a potência externa ($\dot{W}_e$).

4 - Estabelece-se a relação $\dot{W}_i \geq \dot{W}_e$.

As seguintes hipóteses também são necessárias:

- a) O material do fio é um material de von Mises, isto é, rígido-plástico, isotrópico, contínuo e homogêneo;
- b) Aplica-se o critério de Tresca;
- c) A fieira é um corpo perfeitamente rígido;
- d) A perda de energia se dá por atrito e por descontinuidade da velocidade;
- e) O modelo de atrito é:
 - $\tau = \mu \sigma$ (atrito de Coulomb)
 - $\tau = m \tau_0$ (atrito de lubrificação limite)



Os resultados obtidos são os seguintes:

Atrito de Coulomb e α grande

$$\sigma_t = \bar{\sigma}_o \left\{ \sigma_{xb} + 2 f(\alpha) \ln \left(\frac{r_o}{r_f} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} \cotg \alpha \right] + 2\mu \left[\cotg \alpha \right. \right. \\ \left. \left. \left(1 - \ln \left(\frac{r_o}{r_f} \right) \right) \ln \left(\frac{r_o}{r_f} \right) + L/r_f \right] \right\} / (1 + 2\mu L/r_f)$$

Atrito de lubrificação limite e α grande

$$\sigma_t = \bar{\sigma}_o \left\{ \sigma_{xb} + 2 f(\alpha) \ln \left(\frac{r_o}{r_f} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} \cotg \alpha \right] + \left[1 - \right. \right. \\ \left. \left. m \ln \left(\frac{r_o}{r_f} \right) \right] \right\} / mL/r_f$$

Atrito de Coulomb e α pequeno

$$\sigma_t = \bar{\sigma}_o \left\{ \sigma_{xb} + 2 \left[1 + \frac{\mu}{\sin \alpha} \left(1 - \ln \left(\frac{r_o}{r_f} \right) \right) \ln \left(\frac{r_o}{r_f} \right) \right] + 2\mu L/r_f + \right. \\ \left. 4\sin \alpha / 3\sqrt{3} \right\} / (1 + 2\mu L/r_f)$$

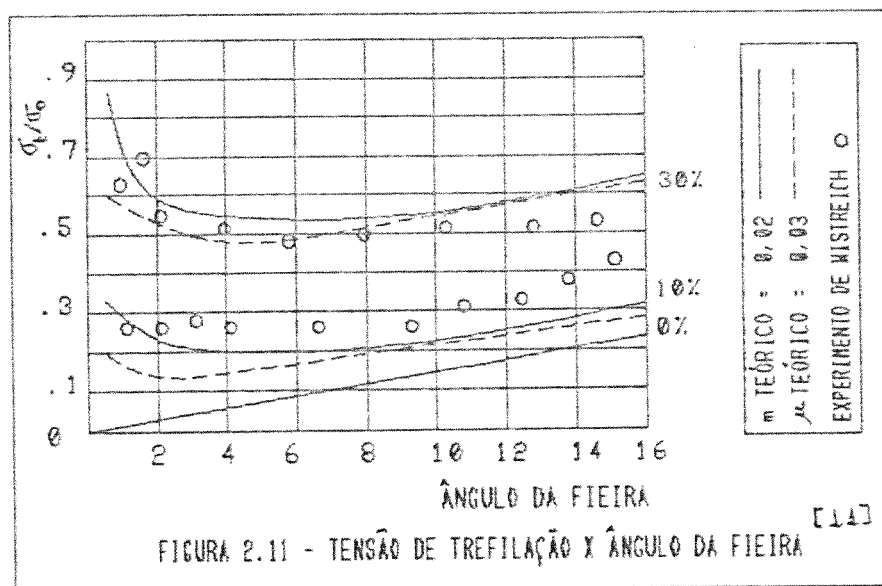
Atrito de lubrificação limite e α pequeno

$$\sigma_t = \bar{\sigma}_o \left\{ \sigma_{xb} + 4\sin \alpha / 3\sqrt{3} + 2 \left[\frac{m}{\sqrt{3} \sin \alpha} + 1 \right] \ln \left(\frac{r_o}{r_f} \right) - \frac{2 mL}{\sqrt{3} r_f} \right\}$$

onde

$$f(\alpha) = \frac{1}{\sin^2 \alpha} \left\{ 1 - (\cos \alpha) \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha} + \right. \\ \left. \frac{1}{132} \ln \left[\frac{1 + \sqrt{\frac{11}{12}}}{\sqrt{11/12} \cos \alpha + \sqrt{1 - 11 \sin^2 \alpha / 12}} \right] \right\}$$

A solução pelo teorema do limite superior tem sido empregada com frequência e será a que empregaremos neste trabalho. A figura 2.11 apresenta a comparação dos resultados teóricos obtidos pelo método do limite superior, considerando atrito de Coulomb (μ), e atrito de lubrificação limite (m), com resultados experimentais obtidos por Wistreich.^[13] O material trefilado foi cobre eletrolítico e a figura mostra uma boa concordância entre os valores.



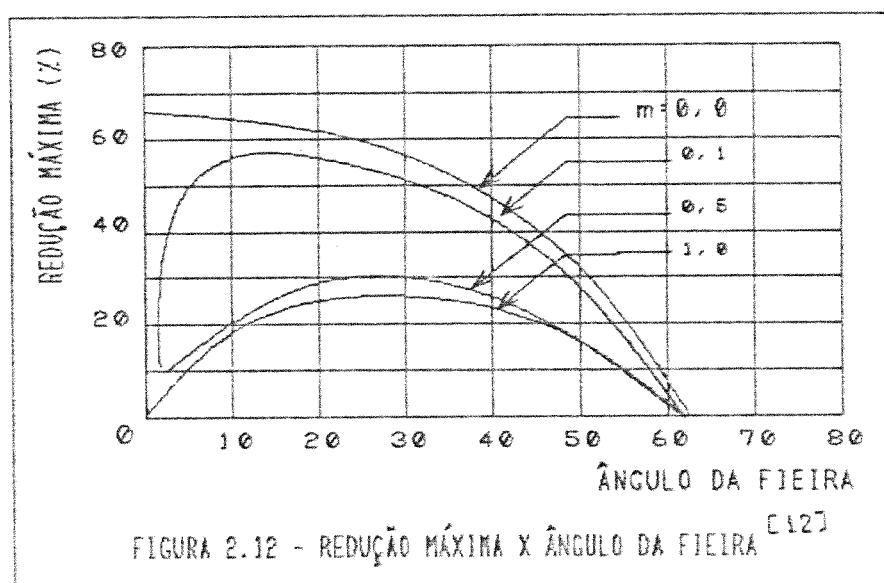
De acordo com a solução proposta, é possível prever-se a máxima redução admissível. Quando se considera a trefilação, a tensão de trefilação não pode exceder a tensão de escoamento do material, isto é:

$$\sigma_t / \sigma_0 \leq 1$$

Desta forma a expressão da tensão de trefilação pode ser rearranjada para fornecer a máxima redução admissível. Tomando-se a equação 2 por exemplo, temos

$$\left[\frac{r_o}{r_f} \right]_{\max} = \exp \left[\frac{\frac{\sigma_{xb}}{\sigma_o} + 1 - \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cotg \alpha \right) + mL/r_f}{2 f(\alpha) + m \cotg \alpha \sqrt{3}} \right]$$

As características desta expressão são apresentadas na figura 2.12. A curva inicia-se em uma redução zero ($r_o/r_f = 1$), quando $\alpha = 0$, aumentando quando o ângulo também aumenta, para diversos valores do atrito. A máxima redução ocorre para um ângulo genérico α e, então, diminui para qualquer incremento no ângulo, reduzindo-se a zero em $\alpha \cong 63^\circ$. As maiores reduções são possíveis quando o atrito é nulo e o pico ocorre em $\alpha = 0$. Quanto maior o valor do atrito, menor a máxima redução possível e maiores os ângulos nos quais ela ocorre. Note-se que para $\alpha \leq 0$ ou $\alpha \geq 70^\circ$, nenhuma redução é possível.



2.3.5 - Variação das propriedades mecânicas do metal do fio

Os metais, ao se deformarem, sofrem encruamento, ou seja, aumentam o limite de resistência ao escoamento. Ao longo da zona de deformação na fieira, esse efeito se manifesta e deve ser

considerado no equacionamento da força de trefilação. Diversas expressões tem sido propostas para a relação tensão x deformação dos metais e a mais comumente utilizada é a seguinte: [15]

$$\sigma_o = k \epsilon^n$$

onde k é uma constante e igual ao valor da tensão para $\epsilon = 1$. ϵ é a deformação logarítmica e n é o coeficiente de encruamento do metal. Na prática é comum considerar-se um valor médio para a tensão de escoamento obtido da seguinte forma:

$$\bar{\sigma}_o = \frac{1}{\epsilon_f - \epsilon_o} \int_{\epsilon_o}^{\epsilon_f} k \epsilon^n$$

onde ϵ_o = deformação inicial, ϵ_f = deformação final e $\bar{\sigma}_o$ = tensão média de escoamento.

Outra forma de se considerar um valor médio da tensão de escoamento é tomar-se a média aritmética da tensão de escoamento antes e após ocorrida a deformação, ou seja:

$$\bar{\sigma}_o = \frac{\sigma_{o2} + \sigma_{o1}}{2}$$

onde σ_{o1} = tensão de escoamento antes da deformação e σ_{o2} = tensão de escoamento após ocorrida a deformação.

Outro efeito a ser considerado é o da taxa de deformação, ou seja a variação do limite de resistência ao escoamento com a velocidade de deformação. A curva da tensão de escoamento x taxa de deformação pode ser matematicamente representada pela seguinte expressão:

$$\sigma_o = k (\dot{\epsilon})^m$$

onde k é uma constante, igual ao valor da tensão para $\dot{\epsilon} = 1$ e m = coeficiente de sensibilidade à taxa de deformação.

A taxa de deformação é obtida pela seguinte expressão:

$$\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt$$

onde ϵ é a deformação logarítmica ($\epsilon = 2\ln(r_o/r_f)$) e t o tempo em segundos.

2.4 - Referências bibliográficas

- [2] BRESCIANI F.^O, E. - "Tribologia na Conformação Plástica". Monografia, Unicamp/EPU SP, Campinas/SP, 1986.
- [3] BRESCIANI F.^O, E. e outros. "Conformação Plástica dos Metais". Unicamp, Campinas, 1985, vol. 1 e 2.
- [4] EDER, K. - "History and new trends in wire drawing dies". Wire Ind. vol. 48, nov., 1981, pp. 797-801.
- [5] Catálogo S/a PHILIPS DO BRASIL. Informações sobre o produto comercial -Fleiras de diamante. pp. 1 - 7.
- [6] WILSON, W. R. D. - "Workpiece surface roughening in a hydrodynamically lubricated metal forming process". J. Lub. Tech., ASME, Jan, 1977, pp. 10-14.
- [7] BAIR, S. e WUNER, W. O. - "Shear strenght measurements of lubricant at high pressure". J. Lub. Tech., july, 1979, vol. 101, pp. 251-257.
- [8] BAIR, S. e WUNER, W. O. - "Some observations in high pressure rheology of lubricant". J. Lub. Tech., july, 1979, vol. 104, pp. 357-364.
- [9] AVITZUR, B. - "Study of flow through conical converging dies". Wire Industry, vol. 49, June, 1982, pp. 449-455.
- [10] PUGH, D. - "Redundant work and friction in hydrostatic extrusion of pure aluminium and an aluminium alloy". J. Mech. Eng. Science, vol. 6, n. 4, 1964, pp. 362-370.
- [11] AVITZUR, B. - "Study of flow through conical converging dies". Wire Industry, vol. 49, july, 1982, pp. 503-509.
- [12] AVITZUR, B. - "Study of flow through conical converging dies". Wire Industry, vol. 49, aug, 1982, pp. 614-618.
- [13] WISTREICH, J. G. - "The fundamentals of wire drawing". Metallurgical Review, vol. 3, m. 10, 1958, pp. 97-142.
- [14] AVITZUR, B. - "Analysis of wire drawing and extrusion through conical dies of large cone angles". J. eng. Ind., ASME, vol. 86, nov, 1964,, pp. 78-81.
- [15] DIETER, G. E. - "Metalurgia Mecânica". Guanabara Dois, 1981, Rio de Janeiro.

CAPÍTULO 3

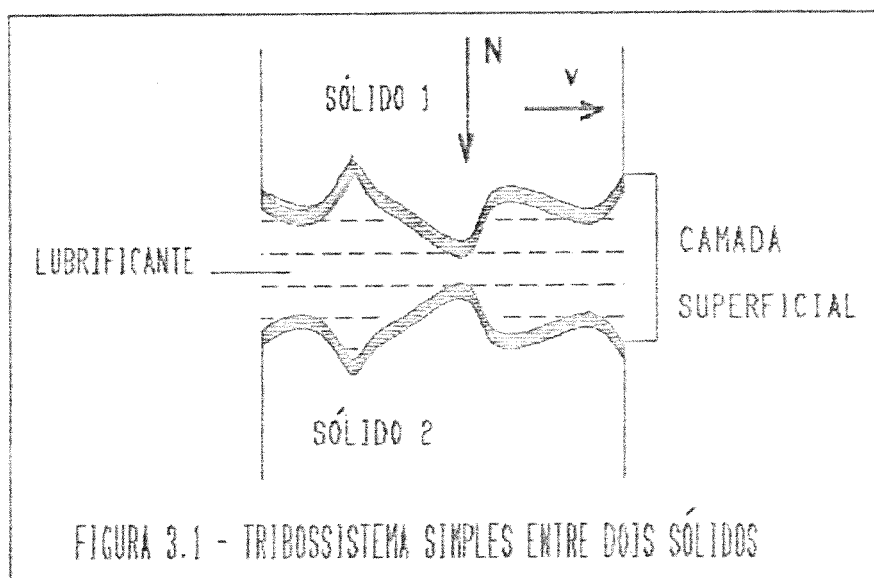
DETERMINAÇÃO TEÓRICA DO COEFICIENTE DE ATRITO

3.1 - Introdução à tribologia

Tribologia é a ciência que trata da interação das superfícies sólidas com movimento relativo entre si. A consequência imediata desta interação é o desgaste, que contribui para diminuir a vida útil dos elementos, seja através da mudança de forma, aparência ou integridade estrutural. [16]

A tribologia procura sistematizar e organizar as informações relacionadas ao atrito, lubrificação e desgaste. O conjunto destas informações constitui o tribossistema. Os dados que compõem um tribossistema cobrem:

- a natureza dos sólidos em contato
- as condições mecânicas das superfícies
- as camadas superficiais formadas por adsorção ou reação
- os filmes interpostos entre as superfícies
- a velocidade relativa entre as superfícies
- as forças aplicadas
- a temperatura



A figura 3.1 é uma representação esquemática de um tribossistema. Obviamente, um tribossistema pode ser muito complexo, envolvendo movimento relativo de fluidos em relação aos sólidos. Os fluidos podem ainda conter volumes discretos de sólidos ou gases, os quais interagem com as superfícies sólidas limitantes.

3.1 .1 - Condições mecânicas das superfícies

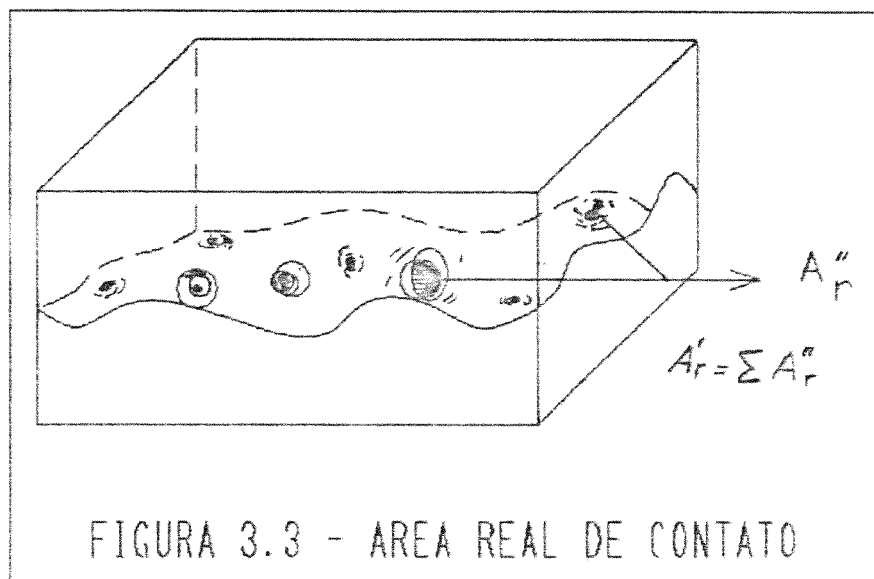
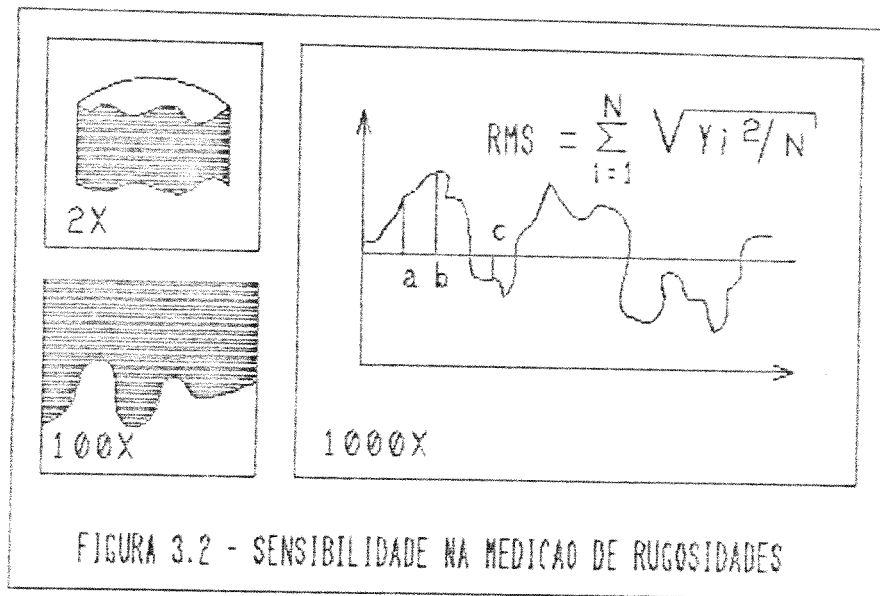
Quase todas as aplicações de materiais requerem a conformação ou a usinagem de uma forma para outra. As condições das superfícies derivam dos processos de preparação, qualquer que seja este. A microestrutura da superfície e da camada imediatamente inferior, os filmes provenientes da reação ou adsorção e a geometria da superfície são partes das condições superficiais.

Uma superfície real é tipicamente irregular, consistindo de saliências e reentrâncias. Por volta da metade deste século, uma variedade de métodos de medida destas irregularidades foram propostos. Os principais instrumentos utilizados têm sido o microscópio ótico, o microscópio eletrônico e o rugosímetro. Este último tem sido particularmente útil na compreensão e no desenvolvimento de medições quantitativas da forma das superfícies.

A figura 3.2 representa a sensibilidade de percepção das irregularidades superficiais em múltiplas escalas e exemplifica o cálculo da rugosidade média quadrática (RMS). Note-se que a linha média é traçada de forma que a soma das áreas de picos e vales acima e abaixo dela sejam iguais.

Como as superfícies são irregulares, os corpos quando entram em contato tocam-se apenas pelos picos das asperezas. A partir desta constatação, pode-se definir uma área real de contato (A_r) - soma das áreas microscópicas dos pontos efetivamente em contato - em contrastação com uma área aparente de contato (A_a) - definida

pelas dimensões macroscópicas do corpo. A figura 3.3 representa a relação entre a área real e a área aparente de contato.



Estudos feitos por Bowden e Tabor^[17] levam a concluir que a área real de contato é proporcional à carga aplicada às superfícies, segundo a relação $A_r \propto P^{2/3}$, se os membros do sistema se deformam elasticamente. A níveis de tensões maiores, que permitem deformações plásticas, a relação passa a ser diretamente proporcional, isto é, $A_r \propto P$.

Apesar dos esforços, ainda não foi possível a determinação direta da área real de contato e, por isso, a análise permanece ainda no campo das hipóteses.

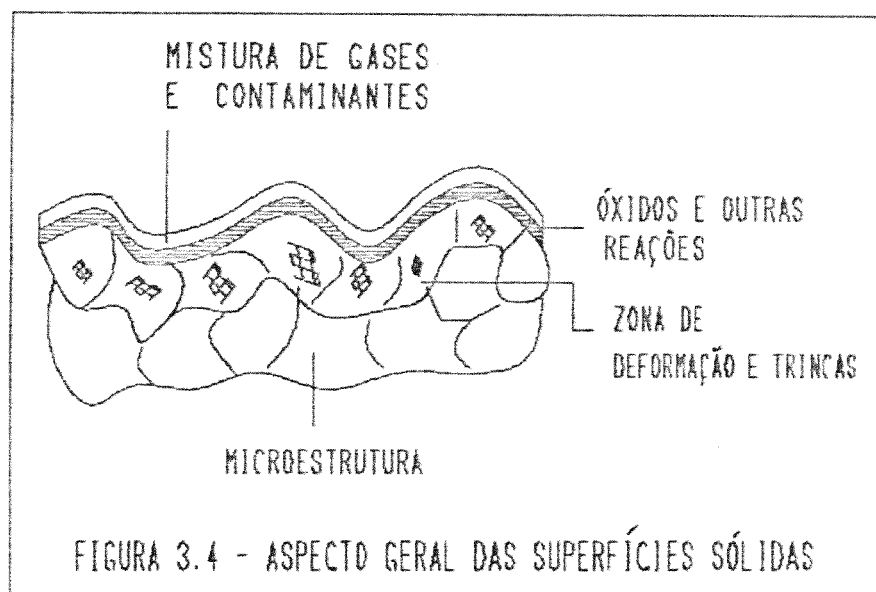
3.1.2 - Camadas superficiais

Uma superfície recentemente preparada somente terá a composição da subcamada superficial em condições muito especiais, ou seja, quando preparada em atmosfera inerte ou em baixa pressão. Em geral os constituintes da atmosfera reagem com a superfície formando lâminas física ou quimicamente adsorvidas ou outras reações tais como óxidos.

Uma superfície exposta ao ar forma compostos sobre os quais uma mistura heterogênea pode se formar, acumulando ainda gases atmosféricos. A menos que cuidados muito especiais sejam tomados, o manuseamento pode depositar outros contaminantes, como a gordura animal. Muito comumente uma superfície apresenta-se tal como mostrado na figura 3.4.^[18]

Essas camadas, em princípio, funcionam como lubrificante, impedindo o contato metal-metal. Contudo, dependendo da dureza do contaminante, partes eventualmente desintegradas podem agir como abrasivo.

A presença de um filme interfacial é um fator importante em sistemas tribológicos. Entretanto, as condições de sua formação são bastante complexas e a compreensão da situação ainda é incompleta.



3.1.3 - Lubrificação e lubrificantes

A forma irregular das superfícies sólidas sugere um alto grau de interação entre corpos em contato que se movimentam relativamente um ao outro. Esta interação resulta em uma resistência ao movimento - o atrito. A presença de um filme contaminante na interface diminui esta resistência e é a base do conceito de lubrificantes.

Em tempos remotos, reconheceu-se que a aplicação de óleos e gorduras - animais ou vegetais - entre as superfícies facilitava o movimento entre elas.^[18] O advento dos óleos obtidos a partir do petróleo facilitou o desenvolvimento industrial dos lubrificantes.

Em se tratando da trefilação, não se cogita da operação isenta de um meio lubrificante. Sendo assim as propriedades e o comportamento dos materiais na interface devem ser estudados em função da composição e das propriedades do meio lubrificante.

a) Composição dos lubrificantes

As superfícies podem ser efetivamente lubrificadas por vários sólidos de baixa resistência ao cisalhamento. Os filmes podem ser formados a partir de óxidos ou outras substâncias, particularmente sólidos de estrutura lamelar dos quais os mais importantes são a grafita e o dissulfeto de molibdênio. O Chumbo também tem sido usado, bem como polímeros, cêra e sabões ésteres à base de sódio e cálcio. Entretanto, a maioria dos lubrificantes, em trefilação, são líquidos. Estes vêm principalmente da classe dos carboxilatos, produtos da reação de um sal metálico com um ácido orgânico. Os principais sais metálicos são à base de cálcio e sódio. [19]

b) Polaridade, reatividade e estrutura

Ácidos orgânicos são materiais polarizados, isto é, possuem um desbalanceamento em suas cargas moleculares. Isto significa que são capazes de se adsorverem fortemente à superfície do material, produzindo um alto ponto de fusão. [19]

O sabão de sódio tem mostrado reagir com o material produzindo sais de cálcio e ferro. Carboxilatos metálicos têm uma estrutura cristalina bem definida, nas quais os íons metálicos formam um arranjo lamelar bidimensional, com uma rede carbônica se estendendo de ambos os lados.

c) Reologia e viscosidade

O efeito da temperatura sobre a viscosidade é função da

composição do lubrificante. Os carboxilatos metálicos se submetem a várias mudanças de fase, diminuindo a viscosidade, antes de se decomporem ou fundirem. Alguns aditivos são capazes de alterar este inconveniente, proporcionando uma viscosidade efetiva alta, mesmo em condições mais severas de trefilação. [19]

d) Contaminação

O atrito entre a fieira e o fio é abrasivo e produz uma enormidade de partículas finas, em sua maior parte oriundas do material do fio. O lubrificante precisa remover tais partículas da área de trabalho. Uma vez que o lubrificante tenha arrastado tais partículas, a menos que ele seja filtrado, elas voltarão à interface fio-fieira, aumentando o desgaste e, eventualmente, retirando o produto do padrão. [19]

3.1.3.1 - Regimes de lubrificação

Como se vê, a lubrificação é de vital importância para a trefilação. A redução do atrito tem o efeito benéfico de reduzir a força de trefilação e, com isto, reduzir as tensões impostas à ferramenta, conseguindo-se equipamentos mais leves, mais baratos e eficientes. Um sistema bem lubrificado permite maiores reduções e, conseqüentemente, menos estágios até o produto final. Além disto, a lubrificação eficiente permite um produto de melhor qualidade, através da eliminação de defeitos superficiais, porquanto reduz o contato metal-metal ao mesmo tempo que evita tensões residuais e defeitos internos, promovendo uma deformação mais homogênea. A vida da ferramenta aumenta muito na presença de um filme lubrificante, pois previne-se o desgaste e facilita-se a retirada do calor gerado durante o processo. [20,21]

Em um dado processo de conformação podem ocorrer diferentes regimes de lubrificação. Cada regime é o resultado de fatores físicos ou químicos presentes no sistema. Pequenas mudanças do lubrificante, no material do fio, na velocidade, na temperatura,

na pressão, na geometria ou na rugosidade da ferramenta podem determinar a mudança de um para outro regime de lubrificação.

Wilson [22] aponta quatro regimes de lubrificação: regime de filme espesso, regime de filme fino, regime lubrificação mista e regime de lubrificação limite. O principal fator que determina o tipo de regime é a espessura do filme lubrificante relacionada à rugosidade das superfícies que interagem (Figura 3.5).

a) Regime de filme espesso

No regime de filme espesso, as superfícies estão separadas por um filme contínuo de lubrificante, o qual é muito mais espesso do que a rugosidade das superfícies envolvidas ou do que o tamanho molecular do lubrificante. Este regime ocorre sempre que a espessura do filme é maior do que nove vezes a rugosidade RMS das superfícies envolvidas. [22]

Nestas condições, o atrito é determinado pelas propriedades físicas do lubrificante (atrito de cisalhamento viscoso), sendo de pouca validade a idéia de um coeficiente de atrito constante. Uma vez que as superfícies estão separadas, o atrito devido ao cisalhamento do fluido diminui a possibilidade de desgaste das partes. Contudo o desgaste pode vir a ocorrer por erosão, por cavitação ou por presença de partículas estranhas no lubrificante.

No regime de filme espesso, a superfície da ferramenta tem pouca influência restritiva na deformação da peça. Como as superfícies estão separadas, a superfície da peça tende a deformar-se como uma superfície livre, aumentando a rugosidade. O aumento da rugosidade dá à peça conformada um aspecto fosco, o qual é frequentemente usado como indicador da presença do filme espesso. [19]

b) Regime de filme fino

Este regime é caracterizado pela presença de um filme

lubrificante com espessura da ordem de três a dez vezes a rugosidade RMS das superfícies. Neste regime existe o contato entre as asperezas da peça e da ferramenta em alguns pontos. Entretanto elas suportam uma porção ínfima da carga total entre as superfícies.

O comportamento do atrito é semelhante ao do regime de filme espesso, exceto quanto a influência da rugosidade sobre o atrito. O desgaste é muito pequeno. A rugosidade pode vir a aumentar, mas é também possível que diminua.

c) Regime de lubrificação mista

Quando a espessura do filme lubrificante cai abaixo de três vezes a rugosidade RMS das superfícies, grande quantidade das asperezas entram em contato e passam a suportar uma fração apreciável da carga total. O sistema estará então em regime de lubrificação mista.

Se o lubrificante for adequadamente escolhido, conterá compostos que reagirão quimicamente com as superfícies formando finas camadas de filme lubrificante. Mesmo que estas camadas sejam da ordem de algumas moléculas, elas evitarão o contato direto metal-metal, afastando a possibilidade de micro-soldagens e eventual cisalhamento das asperezas com todas as suas consequências.

A modelagem do atrito é muito difícil, pois deve considerar os diferentes tipos de processos atuando nos picos e vales. Nos vales o filme é relativamente espesso e a teoria da lubrificação de filme espesso modificada pode ser aplicada. Nos picos, porém, os efeitos físico-químicos são importantes e um tratamento com base somente na mecânica do contínuo tem sérias limitações.

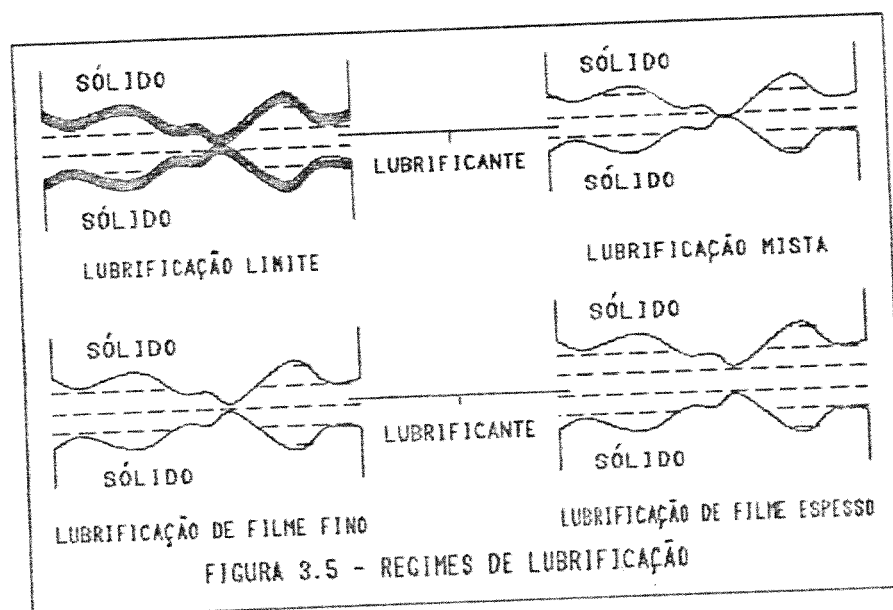
No regime de lubrificação mista a rugosidade superficial da peça tende a diminuir. Porém, se a camada lubrificante que recobre

as asperezas se romper, poderá ocorrer a soldagem entre as asperezas da peça e da ferramenta, seguida de quebra das mesmas, transferindo metal de uma para outra superfície. Nesse caso a rugosidade da peça certamente aumentará. O desgaste é, portanto, possível.

d) Regime de lubrificação limite

Se a carga total é suportada pelas asperezas em contato, o regime será o de lubrificação limite. A modelagem deste regime exige considerações sobre o mecanismo de deformação localizada das asperezas, bem como considerações de natureza físico-química da camada limite, sendo, portanto, muito mais difícil do que nos demais regimes.

A idéia de um coeficiente de atrito constante funciona melhor aqui do que nos outros regimes. Sob condições ideais, coeficientes de atrito da ordem de 0,1 podem ser obtidos, alcançando valores da ordem de 0,4 em condições mais adversas.



3.2 - Teoria do atrito

Quando um corpo desliza em relação a outro, surge uma resistência ao movimento. Tal resistência é denominada atrito. Em processos de conformação plástica ou usinagem há sempre uma preocupação com o controle do atrito porque este aumenta o desgaste, diminui a eficiência e exige maiores potências.

Em situações mais elementares de contato com movimento relativo, mostra-se que a força de atrito é proporcional à carga normal. Define-se, então, coeficiente de atrito como

$$\mu = \frac{F_a}{N}$$

Esta relação foi desenvolvida a centenas de anos e, para muitos propósitos, ainda é aceitável. Entretanto, pesquisadores modernos afastaram a idéia de um coeficiente de atrito constante.^[4] Mesmo o atrito devido ao movimento relativo de corpos em contato a seco é sensível a muitas influências.

3.2.1 - Leis do atrito

Duas leis clássicas descrevem o atrito em contatos elásticos. A primeira afirma que a resistência ao movimento é proporcional à carga e é devida a Leonardo da Vinci (1452-1519). A segunda, devida a Amontons (1699), afirma que a resistência ao movimento independe da área de contato. Coulomb (1781) fez a distinção entre atrito estático e atrito cinético, observando que a força necessária para iniciar o movimento era significativamente maior do que a necessária para mantê-lo. Esta observação levou à denominada "terceira lei", que aponta para a independência do atrito para com a velocidade de deslizamento.

Estas leis têm sido confirmadas experimentalmente em condições restritas. Convém observar também que as mesmas se referem a contatos a seco, isto é, sem a presença de um meio lubrificante, exceto contaminantes. Sob tais condições, ocorre a

deformação plástica das asperezas, devido a altas tensões localizadas e, possivelmente, ocorrerá também soldagem a frio. O trabalho de cisalhamento destas junções soldadas devido ao movimento tangencial, leva ao surgimento da força de atrito. A deformação e a fratura levam ao desgaste e à transferência de material entre as superfícies. [23] Este é o princípio geral mais comumente aceito nas modernas teorias do atrito. Alguns refinamentos foram propostos, entre eles a teoria da soldagem e a teoria do crescimento das junções a seco.

a) Teoria da soldagem

Foi desenvolvida por Bowden e Tabor, [24] em princípio para ser aplicada a corpos metálicos. Entretanto, sua aplicação tem se estendido a outros materiais. Esta teoria leva em consideração a área real de contato. No início do contato a carga real é suportada pela área real. À medida que a pressão localizada atinge o valor da tensão de escoamento do material mais mole, o metal deforma-se e as superfícies se aproximam, tocando-se em outros pontos além daqueles iniciais, aumentando a área real de contato.

Crendo-se que as junções se soldam nos pontos de contato, a força de atrito necessária para cisalhar estas junções será, no início,

$$F = \tau_m \cdot A_r$$

O coeficiente de atrito pode ser definido como:

$$\mu = \frac{F_a}{P} = \frac{A_r \tau_m}{A_r P_m} = \frac{\tau_m}{P_m}$$

onde τ_m é a tensão de cisalhamento do material mais mole e P_m é a pressão média de escoamento do material mais mole.

b) Teoria do crescimento das junções a seco

A teoria da soldagem não considera o efeito combinado da tensão normal e de cisalhamento. Para materiais dúteis aplicam-se os critérios de Tresca e de von Mises, que são:

$$\begin{aligned} p^2 + 3\tau^2 &= \sigma_0^2 & \dots\dots\dots (\text{Tresca}) \\ p^2 + 4\tau^2 &= \sigma_0^2 & \dots\dots\dots (\text{von Mises}) \end{aligned}$$

onde p é a tensão normal, τ a tensão de cisalhamento e p_0 é a tensão de escoamento. Não existe um tratamento rigoroso para junções tridimensionais, mas pode-se esperar que se possa utilizar uma expressão semelhante, do tipo

$$p^2 + \alpha\tau^2 = \sigma_0^2$$

A tensão de escoamento se relaciona com a tensão de cisalhamento no escoamento através de

$$\sigma_0^2 = \alpha\tau_0^2$$

A tensão normal p é definida como $p = A_r \sigma_0$.

Quando se aplica uma força tangencial, ocorre o cisalhamento das junções soldadas e as superfícies deslizam, fazendo com que novos pontos entrem em contato e aumentando a área real de contato (A'_r). Se a força P for mantida, então

$$P = A_r \sigma_0 = A'_r \sigma'_0$$

Como A_r' é maior que A_r , então σ_o' é menor que σ_o . Isto explica o fato do coeficiente de atrito cinético ser maior do que o coeficiente de atrito dinâmico.

3.2.2 - Determinação teórica do atrito na presença de lubrificantes

3.2.2.1 - Atrito de lubrificação limite

Tabor^[25] estendeu o modelo do crescimento das junções, analisando o efeito de um filme de lubrificante ou contaminante na interface das superfícies em contato.

Desde que o deslizamento ocorra, por efeito do escoamento do material, a tensão tangencial alcança o limite de cisalhamento do filme interfacial (τ_i). O critério de escoamento, nesta condição, pode ser escrito

$$p^2 + \alpha \tau_i^2 = \sigma_o^2 = \alpha \tau_o^2 \quad (1)$$

A tensão de cisalhamento da interface pode ser escrita como uma fração "m" da tensão de cisalhamento no escoamento do material mais mole, ou seja

$$\tau_i = m \tau_o \quad (2)$$

Reunindo (1) e (2), obtemos

$$P = \tau_i \sqrt{\alpha \left[\frac{1}{m^2} - 1 \right]}$$

O coeficiente de atrito vale $\mu = F_a/P$. Mas $F_a = A_r \tau_i$ e $P = A_r P$. Logo:

$$\mu = m \sqrt{1/[\alpha(1-m^2)]}$$

Note-se que:

- Para lubrificação de filme espesso, $m=0$ e $\mu=0$
- Se não houver lubrificação, m tende para 1 e μ cresce muito
- Para valores de m menores que 0,2, correspondente à transição do regime de lubrificação limite para regime de filme espesso, o termo $1 - m^2$ é aproximadamente igual a 1 e

$$\mu = \sqrt{m^2 / \alpha} = \sqrt{(m\tau_0)^2 / (\alpha\tau_0)^2} = \frac{\tau_i}{\sigma_0}$$

e o fluido passa a governar o atrito.

No caso de não haver lubrificação, o escoamento se dá em camadas subsuperficiais do metal mais mole e, neste caso, a tensão τ_i deve ser substituída pela tensão de cisalhamento do metal mais mole. Pelo critério de von Mises, $\sigma_0 = \sqrt{3} \tau_0$ e o coeficiente de atrito valerá

$$\mu = \tau_0 / \sigma_0 = 0,577$$

3.2.2.2 - Atrito de cisalhamento viscoso

Ocorre o atrito de cisalhamento viscoso quando existe um filme espesso ou fino separando as superfícies em questão. Sob tais condições, diz-se que o regime é de lubrificação hidrodinâmica. O modelo de atrito constante é inadequado para caracterizar este tipo de lubrificação.

A modelagem do atrito de cisalhamento viscoso faz uso do conceito de viscosidade, que afirma existir uma proporcionalidade entre a tensão de cisalhamento do meio fluido e a variação de velocidade em relação à espessura do meio fluido. A constante de proporcionalidade é definida como viscosidade dinâmica. Em termos matemáticos, fica assim expressa a relação:

$$\tau_i = \eta \frac{dv}{dy}$$

O coeficiente de atrito é expresso pela relação

$$\mu = \frac{\tau_i}{p}$$

e, portanto,

$$\mu = \frac{\eta}{p} \frac{dv}{dy}$$

Alguns pesquisadores têm feito tentativas experimentais buscando obter informações sobre o início e manutenção do regime hidrodinâmico. Christopherson e Naylor^[26] usaram um tubo de pressão acoplado à entrada da matriz de trefilação para provocar o regime hidrodinâmico. Nowak e Knych^[22] usaram uma câmara de pressão com o mesmo fim e a influência da velocidade sobre o regime foi analisada por Lancaster e Smith.^[27]

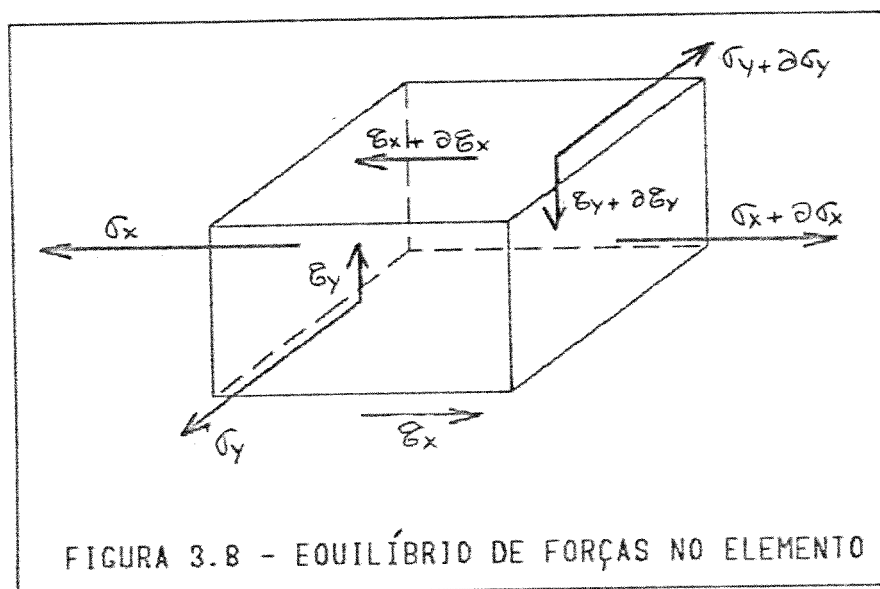
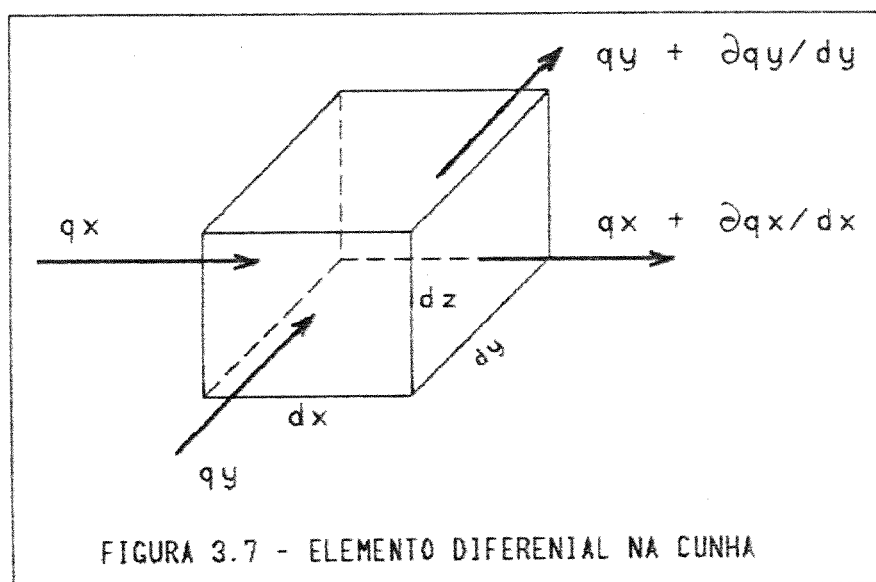
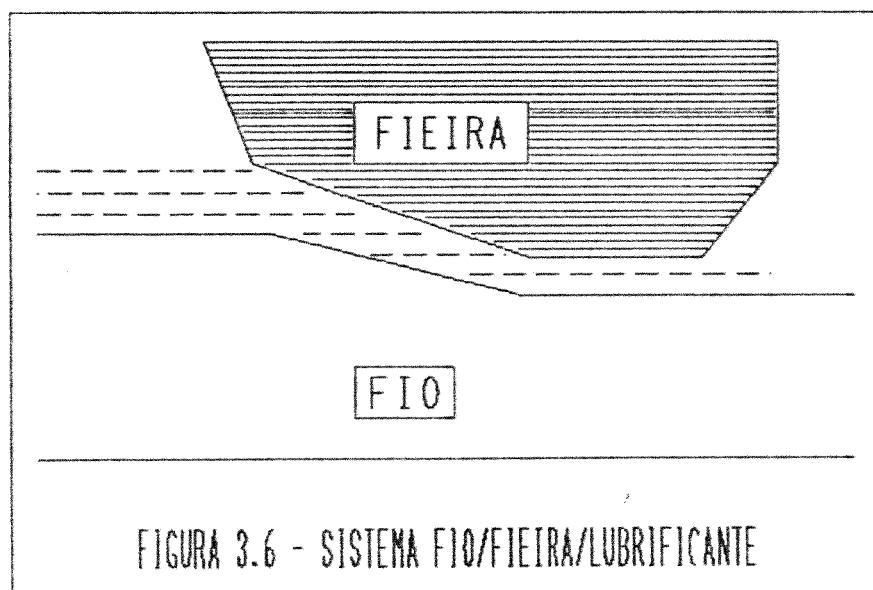
É óbvio que um regime de lubrificação hidrodinâmica é desejável do ponto de vista de redução do atrito e desgaste. Entretanto, qualquer regime pode ocorrer em um determinado processo. É, pois, importante que sejamos capazes de prever quando um ou outro ocorrerá sob diferentes condições. Uma vez que o fator decisivo é a espessura do filme lubrificante, um estudo do mecanismo pelo qual tais filmes são forçados na interface peça-ferramenta nos dará a chave para responder à questão sobre qual regime estará presente.

3.3 - Modelagem da lubrificação hidrodinâmica na trefilação

Estamos interessados no escoamento de fluidos por uma cunha formada pelas superfícies da peça e da ferramenta, conforme representado na figura 3.6.

3.3.1 - Escoamento do fluido por uma cunha - Equação de Reynolds

A equação de Reynolds descreve suficientemente este escoamento. Para se chegar à equação, algumas hipóteses precisam ser assumidas.^[28,29] São elas:



(1) - A pressão é constante através da espessura do filme. Como o filme tem espessura da ordem de milésimos de milímetro, esta hipótese é aceitável.

(2) - A curvatura da superfície é muito grande em relação à espessura do filme. Não há componente de velocidade em relação à curvatura.

(3) - A velocidade do fluido nas adjacências do corpo é a mesma do corpo. Não há deslizamento.

(4) - O lubrificante é newtoniano, isto é, a tensão de cisalhamento do material da interface (τ_i) é proporcional à tensão normal (σ).

(5) - O escoamento é laminar.

(6) - A inércia do fluido é desprezível.

(7) - A viscosidade do fluido é constante através da espessura do filme.

A equação é obtida através dos seguintes passos:

1 - Isolar um elemento diferencial dentro da cunha, conforme figura 3.7.

2 - Estabelecer a equação de continuidade do fluxo para o interior e exterior do elemento diferencial. Admitir que não há escoamento na direção z (Figura 3.8). Obtem-se a equação diferencial:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

4 - Isola-se um elemento diferencial $dx dy dz$ e estabelece-se o equilíbrio das forças nas direções x e y., obtendo-se as equações diferenciais

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3.3)$$

4 - Substitui-se τ por $\eta \frac{dv}{dz}$ e por $\eta \frac{du}{dz}$, onde u e v são as velocidades nas direções x e y, respectivamente.

5 - Integram-se estas equações, de acordo com a hipótese (3), ou seja,

$$z = h, u = u_1 \text{ e } v = v_1$$

$$z = 0, u = u_2 \text{ e } v = v_2$$

obtendo-se as seguintes expressões:

$$u = \frac{z^2}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial x} + \left[\eta \frac{(u_1 + u_2)}{h} - \frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial x} \right] \frac{z}{\eta} + u_2 \quad (3.4)$$

$$v = \frac{z^2}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial y} + \left[\eta \frac{(v_1 + v_2)}{h} - \frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial y} \right] \frac{z}{\eta} + v_2 \quad (3.5)$$

6 - A integral, no intervalo de 0 a h, de udz é o fluxo na direção x e a integral, no mesmo intervalo, de $v dz$ é o fluxo na direção y.

7 - Derivando-se as expressões em relação a x e y, respectivamente, e substituindo os resultados na equação (3.1) obtém-se a equação completa de Reynolds, que é a seguinte:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right] = 6 \left[\frac{\partial}{\partial x} ((u_1 + u_2)h) + \frac{\partial}{\partial y} ((v_1 + v_2)h) \right]$$

Algumas simplificações podem ser feitas para a trefilação. São elas:

- a) substituir U no lugar de $u_1 + u_2$ e V no lugar $v_1 + v_2$;
- b) considerar que na trefilação em fieiras cônicas não há escoamento na direção y e, portanto, $\frac{\partial (Vh)}{\partial x} = 0$;
- c) considerar que a velocidade da superfície não varia e, portanto, u não é função de x. logo $\frac{\partial (Uh)}{\partial x} = \frac{U \partial h}{\partial x}$;
- e) considerar que não há gradiente de pressão na direção y, isto é, $\frac{\partial p}{\partial y} = 0$.

Com todas estas simplificações, a equação de Reynolds se reduz para:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{h}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right] = 6 \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3.6)$$

Esta última pode ser integrada e a equação resultante é a equação básica da lubrificação hidrodinâmica na trefilação.

$$h^3 \frac{dp}{dx} = 6\eta U h + C \quad (3.7)$$

3.3.2 - Previsão da espessura do filme na trefilação

Aplicando-se a equação (3.7) às condições da trefilação poderemos chegar a uma previsão da espessura do filme no processo. [30,31] Para isto, mais algumas hipóteses são necessárias:

- 1 - A fiação é rígida, com ângulo 2α .
- 2 - O material do fio é um material de von Mises.
- 3 - O escoamento é governado pelo critério de Tresca. A deformação se dá na presença de tensão uniaxial.
- 4 - Existe um estado cilíndrico de tensões em todo o fio.
- 5 - A deformação é uniforme e a velocidade da superfície do fio é inversamente proporcional ao quadrado do seu diâmetro.
- 6 - O lubrificante é newtoniano com viscosidade à pressão p expressa por $\eta = \eta_0 e^{\gamma p}$, onde η_0 é a viscosidade à pressão atmosférica e γ é o coeficiente de viscosidade-pressão.
- 7 - Existe a condição isotérmica.

a) Análise da zona de entrada

Para as condições geométricas expostas na figura 3.9, aplica-se a equação (3.7):

$$\text{Em } h_1 \implies \frac{dp}{dx} = 0$$

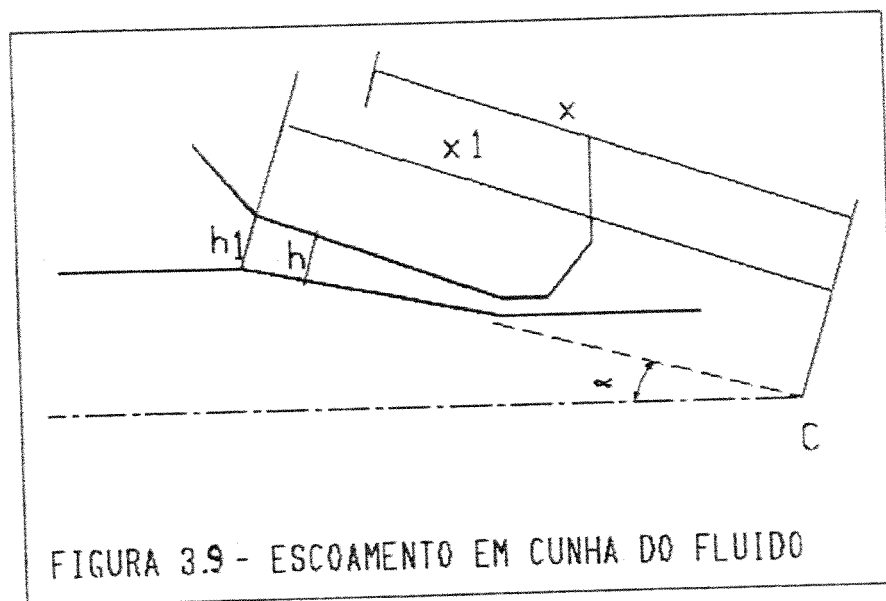
$$\text{Então } C = -6\eta U h_1 =$$

$$h^3 \frac{dp}{dx} = -6\eta U (h_1 - h) \quad (3.8)$$

Das relações geométricas da figura 3.9, mostra-se que

$dx = dh / \tan \alpha$. Sabendo-se que $\eta = \eta_0 e^{\gamma p}$, então a expressão (3.8) se transforma em

$$\frac{dp}{e^{\gamma p}} = - \frac{6\eta_0 U}{\tan \alpha} \left(\frac{h_1 - h}{h^3} \right) dh \quad (3.9)$$



A expressão (3.9) pode ser integrada para as seguintes condições de contorno:

1. $h \rightarrow \infty \dots p = 0$
2. $h = h_1 \dots p = p_0$

Pelo critério de Tresca $\sigma_0 = p_0$. A equação da espessura do filme na entrada da zona de deformação será

$$h_1 = \frac{3\eta_0 \gamma U}{\operatorname{tg} \alpha (1 - e^{-\gamma p})} \quad (3.10)$$

b) Análise da zona de deformação

O gradiente de pressão na zona de deformação é muito pequeno e pode ser negligenciado. Também, da hipótese 5, temos

$$\frac{U_1 d_1^2}{4} = \frac{U_2 d_2^2}{4}$$

$$d = f(x) \text{ expressa por } d = 2x \operatorname{sen} \alpha \text{ e } \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 = \left(\frac{x_1}{x_2} \right)^2$$

$$\text{Segue-se que } U = \left(\frac{x_1}{x_2} \right)^2 U_1$$

Como a quantidade de fluido que entra na zona de deformação é igual à quantidade de fluido que dela sai, então

$$d_1 h_1 U_1 = d h U$$

e mostra-se que $h = h_1 x/x_1$ (3.11)

c) Análise da zona de saída

Por um método semelhante à equação (3.8) da zona de entrada, chega-se a

$$h^3 \frac{dp}{dx} = -6\eta U_2 (h_2 - h) \quad (3.12)$$

Fazendo-se $d_1/d_2 = x_1/x_2 = D$, então:

$$U_1 = U_2/D^2 \quad \text{e} \quad h_2 = h_1 D$$

A equação (3.12) tem solução geral

$$e^{-\frac{6U_1\eta r h}{p}} = \frac{6}{\text{tg } \alpha} \left[\frac{1}{h} - \frac{2}{2h^2} \right] + C \quad (3.13)$$

Na saída da zona de trabalho, $h = h_2$ e $p = p_1$. Pelo critério de tresca, $p_1 = \sigma_0$. Com a condição de $h = h_3$ e $p = 0$, obtém-se

$$D^3 = h_*^2 + 2h_* + 1, \text{ onde } h_* = h_2/h_3. \quad (3.14)$$

A equação (3.14) fornece dois valores para h_3 , para uma dada condição de saída da zona de deformação. O valor que cai na faixa $0 < h_3 < h_2$ é a espessura do filme ao deixar a fiação.

3.3.3 - Simplificação para fluido refrigerante

Se o fluido lubrificante tem ação mais refrigerante do que lubrificante, como é o caso das emulsões de sabão usadas na trefilação, então a viscosidade do fluido se aproximará muito da viscosidade da água e não varia significativamente com a pressão. Neste caso, a viscosidade poderá ser considerada invariante. Adotando-se esta hipótese, a equação (3.10) se tornará

$$h_1 = \frac{3U_1\eta}{\sigma_0 \text{tg } \alpha}$$

As equações (3.11) e (3.14) se manterão as mesmas.

3.3.4 - Previsões da teoria da lubrificação

A expressão básica da lubrificação hidrodinâmica é a equação (3.10). Ela indica que a espessura do filme é governada pela carga aplicada, pela viscosidade do fluido e pela velocidade de deslizamento. O coeficiente de atrito (de cisalhamento viscoso)

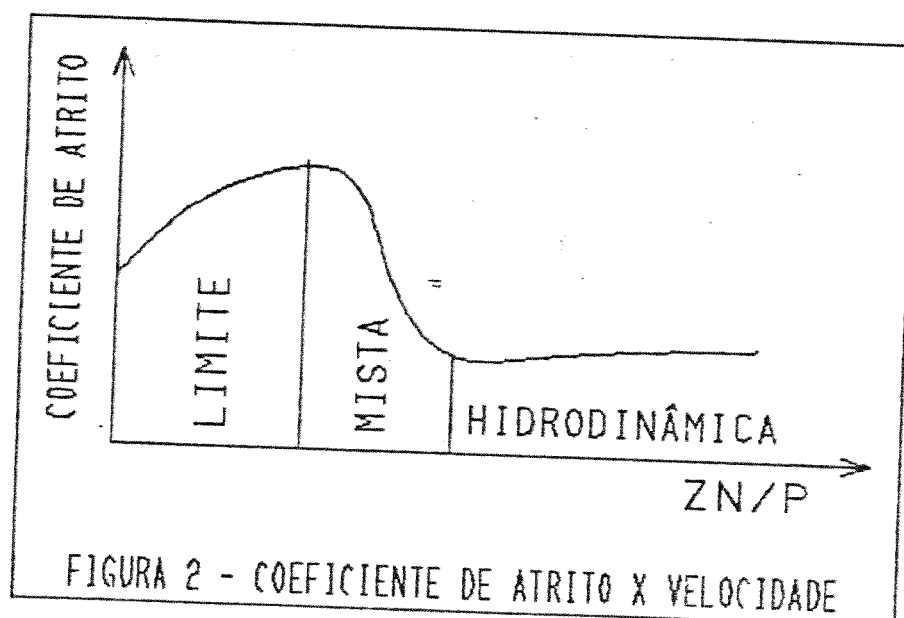
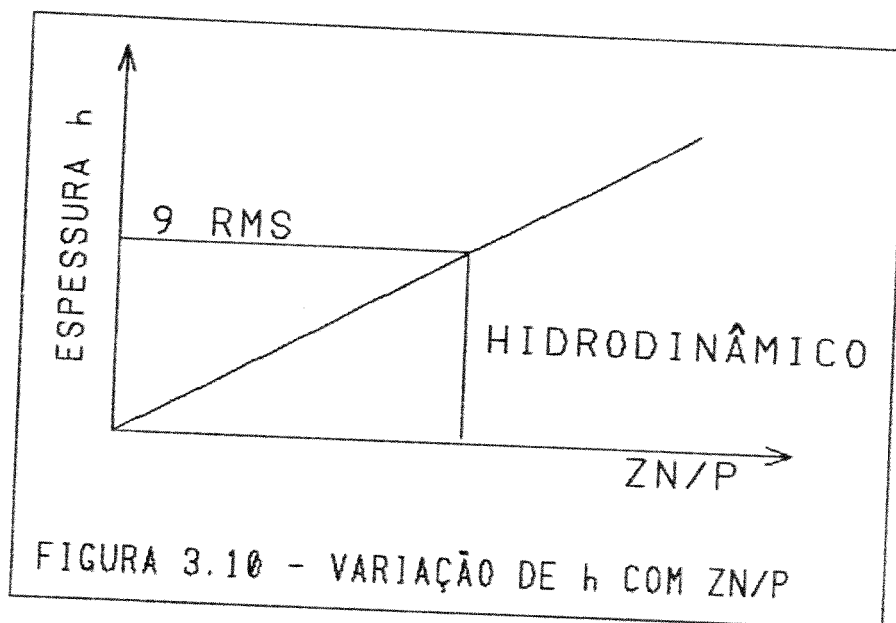
será governado pelos mesmos fatores. É costume utilizar-se da expressão adimensional ZN/P para agrupar estas variáveis, sendo Z a viscosidade, N a velocidade em RPM e P a carga por unidade de área. [22]

Trabalhos experimentais têm mostrado que as curvas de atrito e a espessura do filme contra o termo ZN/P são do tipo mostrado nas figuras 3.10 e 3.11, respectivamente.

Quando a velocidade e a viscosidade são suficientes para gerar e manter uma espessura de filme que separe completamente as duas superfícies em contato, o atrito é mínimo e esta será a combinação ótima de ZN/P . A partir daí inicia-se o regime de lubrificação hidrodinâmica. Neste ponto existe um regime elasto-hidrodinâmico, devido à acomodação elástica do material frente à pressão do fluido, no sentido de reduzir a viscosidade do fluido que tende a aumentar com o aumento da pressão. A valores mais baixos de ZN/P , a espessura do filme será insuficiente para separar completamente as superfícies e o atrito aumentará até o ponto em que passa a prevalecer um regime de lubrificação limite. Como já foi mencionado, não há um tratamento específico para o intervalo entre os regimes hidrodinâmico e lubrificação limite. O atrito, entretanto, pode ser modelado segundo a expressão

$$\mu = \beta\mu_l + (1 - \beta)\mu_h$$

onde β é a fração correspondente à área real de contato, μ_l é o coeficiente de atrito no regime de lubrificação limite e μ_h é o coeficiente de atrito no regime hidrodinâmico. Este modelo, contudo, não é muito útil visto que a fração β não é conhecida. A determinação de μ_l e μ_h pode ser feita indiretamente através de teste experimentais, medindo-se a força no limiar do regime de lubrificação limite e do regime hidrodinâmico de filme fino e aplicando-se uma das equações para a força de trefilação que considere o atrito. Obviamente, as limitações do modelo da mecânica da trefilação e os erros da medição das forças serão incluídos nos valores de μ_l e μ_h .



3.4 - Referências bibliográficas

- [16] BRESCIANI F.^O, E. - "Tribologia na Conformação Plástica". Monografia, Unicamp/EPUSP, Campinas/SP, 1986.
- [17] BOWDEN, F. P. e TABOR, D. - "The Friction and Lubrication of Solids". Part 2, 1964, Oxford, Claredon Press.
- [18] YUST, C. S. - "Tribology and Wear". International Metals Review, 1985, vol. 3, n. 3, pp. 141-154.
- [19] HARPER, S. - "Lubrication aspects of drawing non-ferrous wire". Wire Industry, 1976, aug, pp. 623-626.
- [20] BRESCIANI F.^O, E. e outros. "Conformação Plástica dos Metais". Unicamp, Campinas, 1985, vol. 1 e 2.
- [21] NOWAK, S. e KNISCH, T. - "Hydrodynamic drawing affects wire properties". Wire World Int., vol. 26, 1984, pp. 115-117.
- [22] WILSON, R. D. - "Friction and lubrication in bulk metal-forming process". J. Applied Metalworking, vol. 1, 1979, pp. 7-9.
- [23] RABINOWICZ, E. - "Friction and Wear of Materials". John Willey Sons, USA, 1966, pp. 125-167.
- [24] BOWDEN, F. P. e TABOR, D. - "The Friction and Lubrication of Solids". Part 2, 1964, Oxford, Claredon Press.
- [25] TABOR, D. - "Friction and Lubrication". J. Lub. Tech., ASME, 1981, n. 103, pp. 169-179.
- [26] CHRISTOPHERSON, D. G. e NAYLOR, H. - "Promotion of fluid lubrication in wire drawing". Proc. Int. Mech. Eng., vol. 169, 1965, pp. 643-653.
- [27] LANCASTER, P. R. e SMITH, B. F. - "High Speed Wire Drawing". Wire Industry, 1974, pp. 933-937.
- [28] CAMERON, A. - "Basic Lubrication Theory". London, Longman Group, 1970.
- [29] FANTINO, B. FRENE, J. e GODET, M. - "Reynolds Equation in Viscous Fluid Theory". J. Lub. Tech., july, 1972, p. 287.
- [30] WILSON, R. D. e WALOWIT, J. A. - "An isothermal hydrodynamic lubrication theory for hidrostatic extrusion and wire drawing with conical converging dies". J. Lub. Tech., 1971, pp. 69-74.

[31] WILSON, R. D. - "Temporary breakdown of hydrodynamic lubrication during the initiation extrusion". J. Lub. Tech., 1971, pp. 69-74.

CAPÍTULO 4

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

4.1 - Introdução

De acordo com o descrito no capítulo três, a força de trefilação é função de uma grande gama de variáveis. Naquela oportunidade, as variáveis foram distribuídas em dois grupos, a saber:

- 1 - Parâmetros geométricos, reunindo ângulos, rugosidade, ovalidade, forma da ferramenta e do produto.
- 2 - Parâmetros operacionais, reunindo as propriedades mecânicas e físicas dos materiais da ferramenta e da peça, a velocidade, as propriedades do fluido lubrificante, a pressão, a força e a potência.

Para se verificar a influência da velocidade sobre a força de trefilação, adotou-se o procedimento de se manter constantes os parâmetros geométricos e os parâmetros operacionais, excetuando-se a velocidade, dentro de uma mesma série de testes. A fim de se verificar a capacidade do processo em gerar lubrificação hidrodinâmica, as propriedades do fluido foram alteradas, mantidos constantes os demais parâmetros, em séries diferentes de testes.

4.2 - Máquina trefiladora de laboratório

Os testes foram realizados em uma máquina trefiladora instalada no Laboratório de Conformação Mecânica Fina da UNICAMP, desenvolvida por Zavaglia,^[32] com a seguinte composição: três porta fleiras intercalados com três anéis tirantes e uma bobinadora. Possui quatro motores de corrente contínua, três deles

acoplados aos anéis tirantes e o último à bobinadora. Os motores são controlados por um sistema eletrônico, com controle individual de velocidade para cada motor e um controle geral para os três motores acoplados aos anéis tirantes.

A figura 4.1 representa o desenho geral da trefiladora.

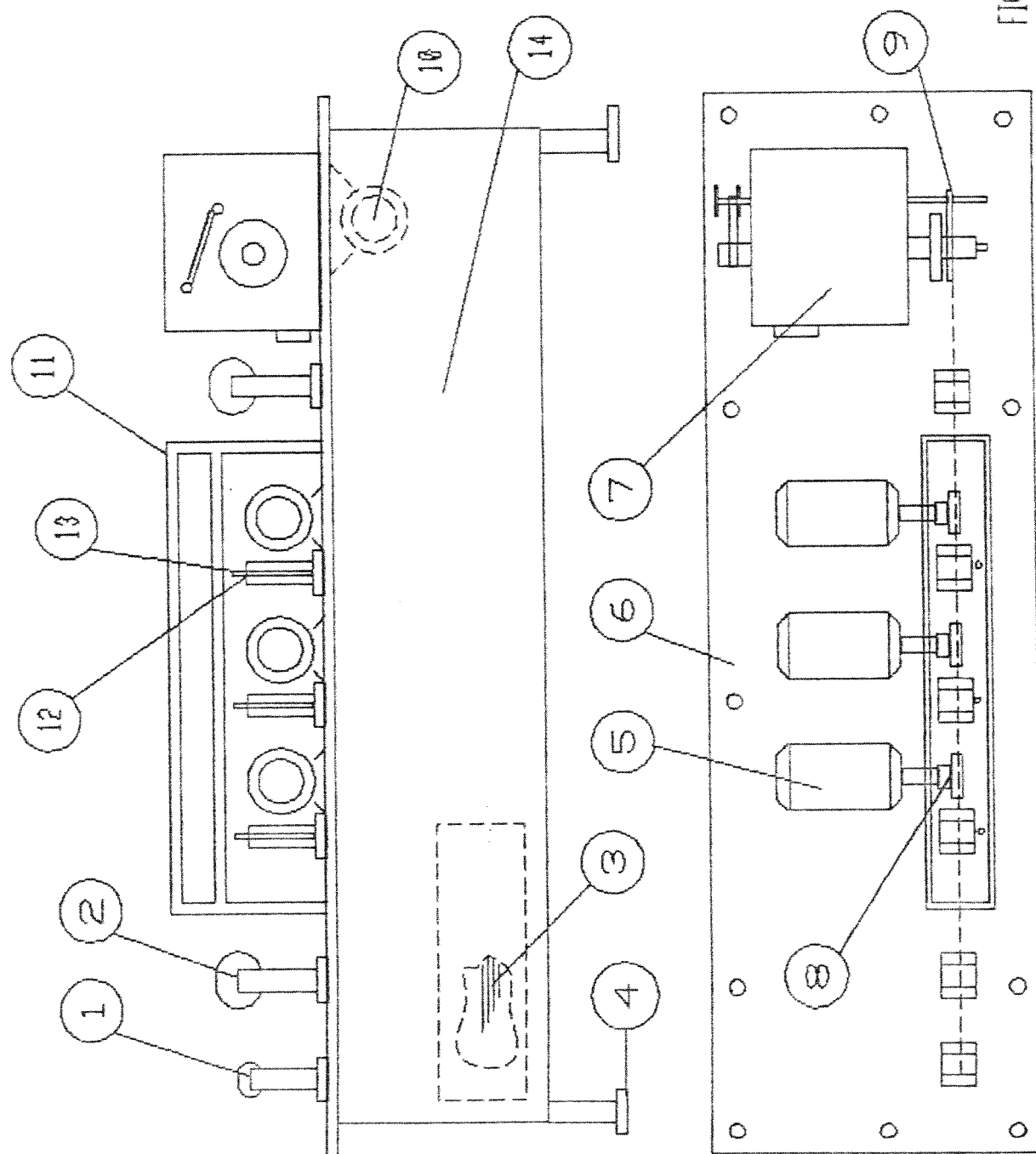
O sistema de lubrificação é constituído de uma bomba acionada por um motor de corrente alternada de 1/4 HP, com filtro para a retirada de impurezas e partículas metálicas arrastadas pelo lubrificante, e um reservatório de 30 litros de capacidade. O lubrificante é conduzido por um tubo de borracha e, através de três bicos direcionais flexíveis em cada extremidade, lubrificam as três fieiras.

O funcionamento da trefiladora é o seguinte: o fio é desenrolado de um carretel, passa por uma roldana direcional e é tracionado pelo primeiro anel tirante, passando pela primeira fieira, onde ocorre a primeira redução. A seguir o fio sofre mais duas reduções, de modo semelhante e é enrolado pela bobinadora em outro carretel. Para compensar o aumento de comprimento do fio após cada redução, o segundo motor gira em uma velocidade maior que o primeiro e menor que o terceiro. Após concluída a operação, as fieiras são substituídas por outras de diâmetros menores até que se complete a redução desejada.

Nos testes realizados neste trabalho, empregou-se apenas o terceiro porta fieiras, o terceiro motor e o sistema de bobinamento, ou seja, somente uma redução por passe.

4.1 - Ferramentas utilizadas

Para cada redução através de trefilação, tomou-se o cuidado de se empregar sempre a mesma ferramenta. As fieiras de fabricação da PHILIPS DO BRASIL S/A., são construídas do mesmo material e possuem as mesmas características geométricas, excetuando-se as bitolas, conforme mostra a tabela 4.1.



1. DESBOBINADORA
2. ROLDANA DIRECIONAL
3. SISTEMA DE LUBRIFICAÇÃO
4. ISOLADOR DE VIBRAÇÃO
5. MOTOR CC - 2 HP
6. MESA
7. BOBINADORA
8. ANEL TIRANTE
9. CARRETEL
10. MOTOR CC - 2 HP
11. SISTEMA DE PROTEÇÃO
12. SUPORTE DA FIEIRA
13. BICO DIRECIONAL DO ÓLEO
14. PAINEL DO SISTEMA ELETRÔNICO

FIGURA 4.1 - MÁQUINA TREFILADORA DE LABORATÓRIO

Tabela 4.1 - Especificações das fleiras empregadas

Especificações	Fleira 1	Fleira 2	Fleira 3
Diâmetro inicial (mm)	1,000	0,905	0,819
Diâmetro final (mm)	0,905	0,819	0,742
Ângulo de trabalho (2α)	10°	10°	10°
Ângulo de entrada (2β)	$35 \pm 5^\circ$	$35 \pm 5^\circ$	$35 \pm 5^\circ$
Ângulo de saída (2γ)	$35 \pm 5^\circ$	$35 \pm 5^\circ$	$35 \pm 5^\circ$
Redução em área (%)	18,1	18,1	18,0
Material da ferramenta	diamante	diamante	diamante

4.4 - Lubrificantes

Os testes foram levados a efeito primeiramente na ausência de qualquer tipo de lubrificante e, em seguida, na presença de dois tipos de lubrificantes diferentes. Um lubrificante, denominado daqui em diante de lubrificante 1, consistia de óleo solúvel, de baixa viscosidade à baixa concentração e que não apresentava variação de viscosidade com a pressão. O lubrificante utilizado foi o TREFIL 1269-P, fabricado por E. F. HOUGHTON DO BRASIL. É um lubrificante semi-sintético, de natureza gordurosa, que produz emulsões leitosas muito finas e semi-translúcidas, do tipo óleo em água. Por formar uma matéria coloidal, o lubrificante tem propriedades tixotrópicas. A tixotropia é a transformação puramente mecânica, isotérmica e reversível de uma matéria gelatinosa (gel) em solução (sol). Na determinação da viscosidade, a tixotropia manifesta-se pela diminuição contínua da viscosidade em paralelo com a destruição progressiva das estruturas. A viscosidade mais alta é a viscosidade do gel, ao passo que a menor é a viscosidade do sol. Para fugir a esta característica do óleo solúvel utilizado, procurou-se trabalhar com uma solução cuja formação de gel não influenciava em demasia a viscosidade dinâmica do fluido. Esta concentração se situou na faixa de 0 a 12% em água.

Um segundo tipo de lubrificante foi utilizado, que denominamos lubrificante 2. Esse lubrificante foi um óleo mineral, da série SAE 20, de fabricação da CASTROL S/A., marca TP - AWS 68.

As características dos lubrificantes estão na tabela 4.2. As viscosidades dos fluídos foram avaliadas através de um viscosímetro do tipo Hoppler, de fabricação da indústria alemã VEB MLW.

Tabela 4.2 - Características dos lubrificantes

Característica	Lubrificante 1	Lubrificante 2
Marca	Trefil	Castrol TP-Aws68
Tipo	Mineral-solúvel	Mineral
Viscosidade (27° C) (Pas)	7.10^{-3}	$1,8.10^{-1}$
Coefficiente de Viscosidade-pressão (m^2/N)	-----	7.10^{-8}

4.4 - Materiais Trefilados

A matéria prima empregada nos testes de trefilação foi cobre ETP, de produção da PIRELLI, Materiais Elétricos S/A., com diâmetro inicial 1,04 mm, no estado recozido, com a seguinte composição química:

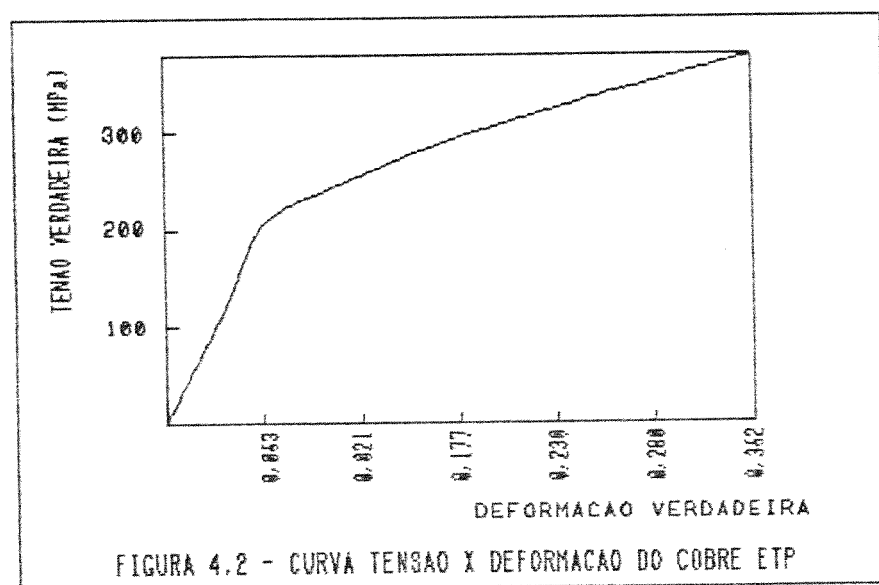
Elemento	Quantidade (máx)
Cu	99,9 %
O	0,02%
As	2 ppm
Ag	8 ppm
Fe	6 ppm
Sb, Ni, Pb, Te, Zn, Sn, Cd	< 6 ppm

Este material foi ensaiado à tração de acordo com a norma ASTM 5578/78, e os resultados obtidos foram os seguintes:

Tabela 4.3 - Resultados do ensaio de tração do fio de cobre ETP

Tensão de escoamento	Tensão média de escoamento	Velocidade do ensaio	Alongamento máximo
194 MPa	228 MPa	1 mm/min	48,3%
197 MPa	232 MPa	2 mm/min	43,5%
201 MPa	237 MPa	4 mm/min	41,3%

Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaios ISTRON, modelo ZZ-1898. Os ensaios foram realizados a diferentes velocidades a fim de se levantar a influência da velocidade de deformação sobre a resistência ao escoamento do material. Verifica-se que a taxa de deformação não influencia significativamente as propriedades mecânicas do metal quando deformado a frio. [34] Os ensaios foram levados a efeito à temperatura ambiente e foram realizados três ensaios para cada velocidade indicada. A figura 4.1 demonstra a curva tensão x deformação verdadeira para a velocidade de 1 mm/min.



Os ensaios foram realizados sob as seguintes condições:

- 1 - Controle: velocidade de avanço da trave
- 2 - Comprimento inicial do fio (L_0): 0,155 m
- 3 - Temperatura ambiente: 25° C
- 4 - Comprimento na ruptura: 0,23 m

A rugosidade do fio também foi avaliada. O equipamento utilizado nesta avaliação foi um rugosímetro da marca PERT-0 M. A rugosidade após três medições é apresentada na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Rugosidade superficial dos fios

Diâmetro (mm)	Lubrificante	Rugosidade (RMS)
1,040	-----	0,060
0,904	sem lubrificante	0,100
	lubrificante 1	0,055
	lubrificante 2	0,064
0,819	lubrificante 1	0,055
	lubrificante 2	0,067
0,742	lubrificante 1	0,057
	lubrificante 2	0,068

As amostras para medição da rugosidade superficial dos fios foram retiradas da parte final do material trefilado, de modo que correspondem ao produto obtido na velocidade máxima de trefilação durante os testes. Estas velocidades se encontram registradas nas tabelas 4.6 e 4.7.

4.6 - Dispositivo de medição de forças

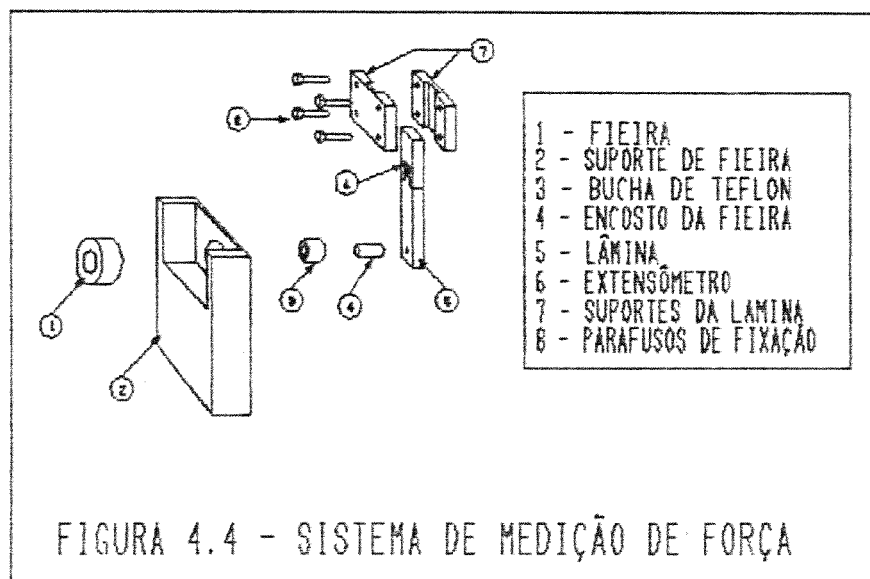
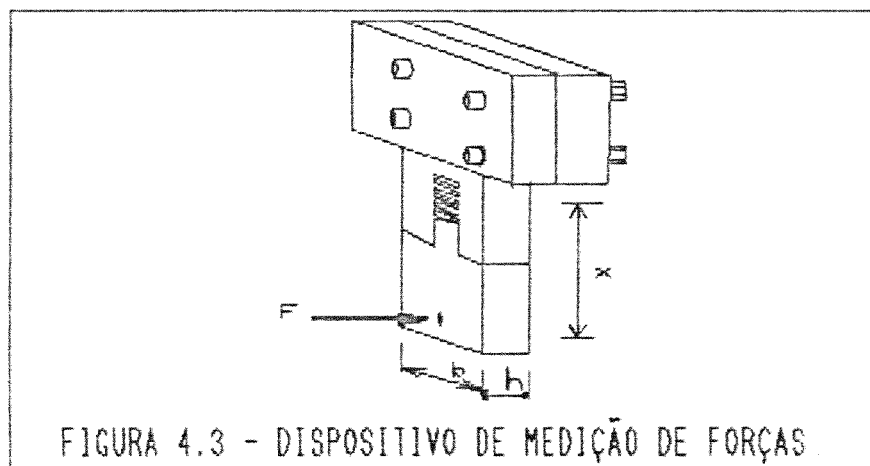
Para a medição das forças de trefilação, construiu-se um dispositivo de medição de forças.^[35] A figura 4.3 é uma representação esquemática do dispositivo de medição de forças.

O dispositivo funciona pela medição, através de extensômetros, da deformação proveniente da flexão de uma lâmina deslocada pela força de trefilação, conforme se representa na figura 4.4.

Sabe-se que a tensão em uma lâmina sob flexão é dada por

$$\sigma = \frac{Wc}{I}$$

onde W é o momento sofrido por um determinado ponto, I é o momento de inércia da seção transversal da lâmina e c é a distância da linha neutra à fibra considerada.



Para uma lâmina prismática,

$$I = \frac{bh^3}{12}, \quad c = \frac{h}{2} \quad \text{e} \quad W = F \cdot x$$

Logo,

$$\sigma = \frac{6Fx}{bh^2}$$

A deformação elástica de flexão é $\epsilon = \sigma/E$, logo $\epsilon = \frac{6Fx}{Ebh^2}$

A tensão de saída dos extensômetros montados em uma ponte de Wheatstone, com dois extensômetros ativos, pode ser calculada de acordo com a figura 4.5.

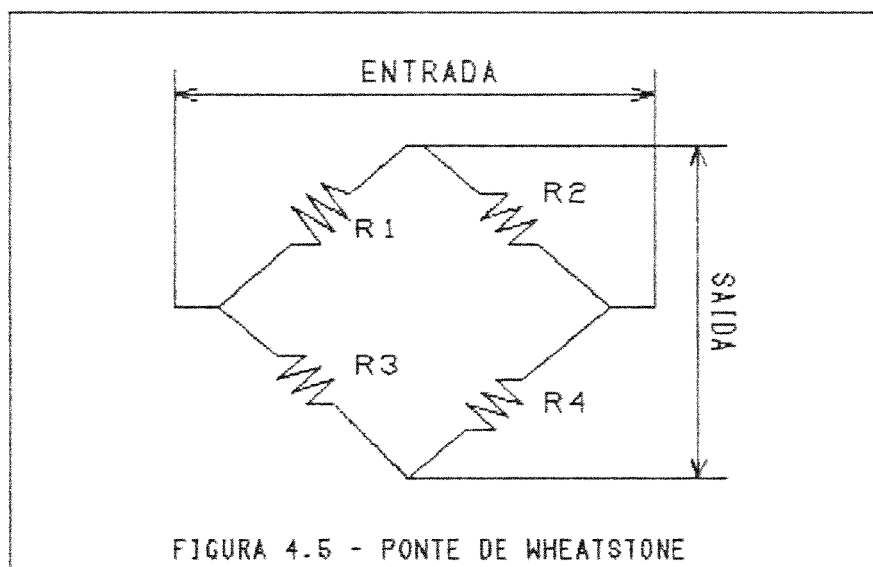


FIGURA 4.5 - PONTE DE WHEATSTONE

R_1 e R_2 são as resistências fixas de 600 ohms cada, que ficam no interior da ponte. A ponte empregada neste caso é de fabricação da PHILIPS, modelo PR 9307.

R_3 e R_4 são dois extensômetros de 120 ohms cada, que estão colados sobre a lâmina, um em cada face oposta da mesma.

A tensão de saída é

$$\Delta V = \frac{Vk}{4} (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4)$$

onde ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 e ϵ_4 são as deformações medidas pelos extensômetros. Como R_1 e R_2 são fixas, $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0$. Ainda temos $\epsilon_3 = -\epsilon_4$, porque R_3 e R_4 estão colados em lados opostos da lâmina. Então,

$$\Delta V = Vk\epsilon_3/2$$

$$\Delta V = \frac{3VkFx}{Ebh^2}$$

Foram empregados dois extensômetros de fabricação da KIOWA Electronics Instruments Co. Ltd., do tipo KFC 10-C1-11, com as seguintes características:

Resistência: 120 ohms

Fator de Resistência (k): 2,09

Diferença de potencial máxima: 4 V

A lâmina foi construída a partir de um aço mola com $E = 2,06 \cdot 10^5$ MPa e $\sigma_o = 960$ MPa. Adotou-se $b = 0,022$ m, $h = 0,002$ m e $F = 196,4$ N. Então,

$$\Delta V = 0,0271x \quad [V/m]$$

Admitimos $\Delta V = 200 \cdot 10^{-3}$ V, então $x = 0,074$ m.

Comprova-se, contudo, que a lâmina só permanece no regime elástico para uma força menor que 196,4 N, pois

$$\sigma = \frac{6Fx}{bh^2}$$

e $\sigma = 966$ MPa, que excede a tensão limite de escoamento do aço utilizado. Para evitar deformações indesejadas, a distância x foi reduzida para 0,06 m e, com isto, $\sigma = 73$ MPa.

4.6.1 - Calibração do dispositivo

O dispositivo foi calibrado já instalado na trefiladora, a fim de se considerar a influência do atrito entre a bucha e o encosto da fieira. A interface bucha/encosto da fieira foi lubrificada com o lubrificante 1. O esquema da calibração é mostrado na figura 4.6.

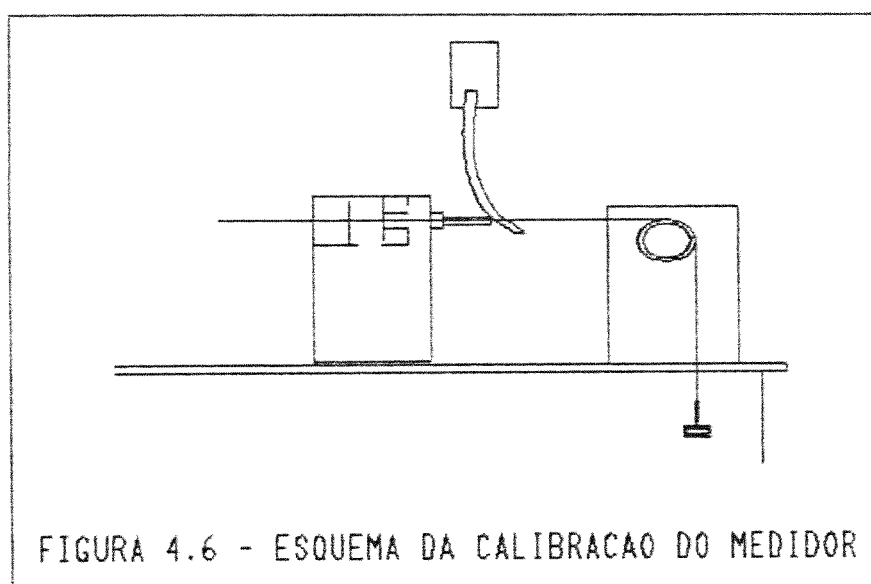


FIGURA 4.6 - ESQUEMA DA CALIBRACAO DO MEDIDOR

A calibração foi feita aplicando-se o método dos mínimos quadrados para se encontrar a equação que relaciona força x tensão de saída dos extensômetros. Os resultados obtidos desta calibração encontram-se na tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Força aplicada x Tensão de saída dos extensômetro

Força (N)	Leituras (mV)					
	L1	L2	L3	L4	L5	Ln
0	0	0	0	0	0	0
9,81	11	11	11	11	11	11
19,62	22	22	22	23	22	22,2
29,43	33	32	33	34	33	33,0
39,24	44	44	43	45	44	44,0
49,05	55	55	54	54	55	54,6
58,86	66	65	66	66	65	65,6
68,67	77	77	76	76	77	76,6
78,48	88	88	87	87	88	87,6
88,29	99	99	99	100	99	99,2
98,10	110	110	110	111	110	110,2
107,91	121	121	121	122	121	121,2
117,72	132	132	132	133	132	132,2
127,53	143	144	143	145	143	143,6
137,34	154	155	154	155	154	154,4
147,15	165	166	165	167	165	165,6

De acordo com Fillier^[38],

n = número de cargas aplicadas

i = número de leituras para cada carga

$$L_n = \left[\sum_{i=0}^i L_i \right] / i$$

$$\bar{L} = \left[\sum_{n=0}^n L_n \right] / n$$

$$\bar{F} = \left[\sum_{n=0}^n F_n \right] / n$$

e aplica-se $L_n = A + BF_n$

A e B são determinados resolvendo-se o sistema

$$\begin{cases} \sum L_n = A n + B \sum F_n \\ \sum L F = A \sum F_n + B \sum F_n^2 \end{cases}$$

$$\sum F_n = 1177,2000$$

$$\sum L_n = 1321,0000$$

$$\bar{F}_n = 73,5750$$

$$\bar{L}_n = 82,5625$$

$$\sum L_n F_n = 134012,4480$$

$$\sum F_n^2 = 119332,7640$$

$$\sum L_n^2 = 150499,3200$$

Resolvendo o sistema, obtemos

$$B = \sum L_n F_n / \sum L_n^2 = 1,123$$

$$A = \bar{L}_n - B \bar{F}_n = -0,0633$$

$$L_n = 1,123 F_n - 0,0633$$

A correlação pode ser calculada pela seguinte expressão:

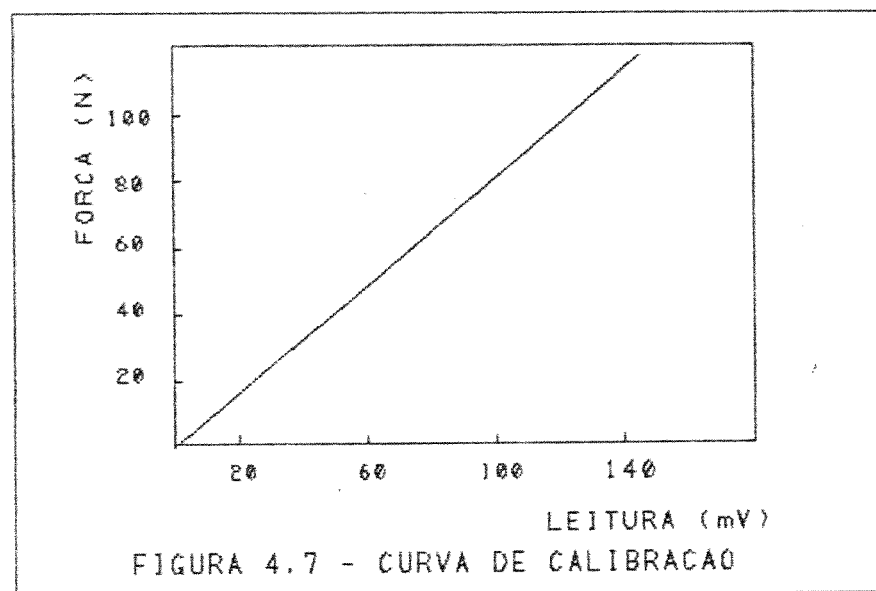
$$R = \frac{\sum [(F_n - \bar{F}_n) (L_n - \bar{L}_n)]}{\sqrt{\sum (F_n - \bar{F}_n)^2 \cdot \sum (L_n - \bar{L}_n)^2}}$$

O resultado obtido é $R = 1$, ou seja, correlação linear perfeita.

Para maior comodidade, encontramos a equação inversa que realciona a força aplicada x tensão de saída dos extensômetros e que é

$$F_n = 0,89407 L_n - 0,05637$$

A curva de calibração é mostrada na figura 4.7.



O dispositivo foi acoplado a um registrador gráfico a fim de facilitar a operação de controlar a velocidade e registrar a força de trefilação.

4.7 - Descrição dos testes

Os testes foram realizados na trefiladora "tandem" do Laboratório de Conformação Mecânica Fina do DEMA, FEC, UNICAMP. A trefiladora é dotada de três suportes de fieira. Para a tração do fio empregou-se um motor de corrente contínua de 1 cv. A velocidade máxima no eixo trator atingia 1300 rpm. Foi também utilizado um carretel de madeira de 0,06 m, acoplado ao eixo trator, de modo que a velocidade periférica de enrolamento do fio tracionado atingia, quando máxima, 7,7 m/s.

Os testes foram desenvolvidos em três séries. Na primeira série o fio foi trefilado na ausência de lubrificante. Na segunda e terceira séries, o fio foi trefilado na presença dos lubrificantes 1 e 2, respectivamente.

Na primeira série, o fio de 1 mm sofreu um passe pela fiação de 0,905 mm de diâmetro. Esta operação foi repetida duas vezes.

Na segunda série o fio foi trefilado de acordo como se vê na tabela 4.6. Cada operação foi repetida duas vezes.

Tabela 4.6 - Segunda série de testes

Diâmetro inicial mm	Diâmetro final (mm)	Velocidade (m/s)	número de operações	Lubrificante
1,000	0,905	0 - 5	2	1
0,905	0,819	0 - 7,3	2	1
0,819	0,742	0 - 7,6	2	1

Na terceira série o fio foi trefilado de acordo com a tabela a seguir.

Tabela 4.7 - Terceira série de testes

Diâmetro inicial mm	Diâmetro final (mm)	Velocidade (m/s)	número de operações	Lubrificante
1,000	0,905	0 - 7,6	3	2
0,905	0,819	0 - 7,6	3	2
0,819	0,742	0 - 7,6	3	2

Nos testes que envolveram a presença de lubrificantes, esta ficava totalmente imersa no fluido, de modo a garantir o perfeito fluxo de lubrificante requerido.

O controle da velocidade foi exercido através de um tacômetro digital de marca MITOTOYO.

De cada produto trefilado foram retiradas três amostras da sua parte final. A primeira amostra, de comprimento 1,5 m, destinou-se a ensaio de tração para verificação da tensão limite de escoamento do produto obtido. A segunda amostra, de comprimento 0,5 m, destinou-se a exames da rugosidade superficial

do produto. A terceira amostra, também de comprimento 0,5 m, destinou-se a exames micrográficos.

Os fios tiveram seus diâmetros medidos através de um micrômetro da marca MITOTOYO. Antes da medição, foram lavados com uma solução de NaOH a fim de retirar os resíduos superficiais de lubrificante remanescente.

4.8 - Referências bibliográficas

- [32] ZAVAGLIA, C.A.C. - "Contribuição ao estudo da trefilação de fios capilares de metais não-ferrosos". Tese de Mestrado, UNICAMP/FEC/DEM, 1970.
- [33] Catálogo S/a PHILIPS DO BRASIL. Informações sobre o produto comercial -Fieiras de diamante. pp. 1 - 7.
- [34] DIETER, G. E. - "Metalurgia Mecânica". Guanabara Dois, 1981, Rio de Janeiro.
- [35] CARVALHO, C.A., FERREIRA, I. e BRESCIANI F.^O, E. - "Dispositivo para determinação da força de trefilação de fios finos metálicos". Anais do V Congresso de Engenharia Mecânica, ABCM, 1979, pp. 201-210.
- [36] LEME, R.A.S. - Curso de Estatística. Rio de Janeiro, Ao livro Técnico, 1969.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

5.1 - Introdução

A geração ou não de uma camada de filme lubrificante capaz de separar completamente as superfícies do fio em deformação e da matriz é avaliada de acordo com a teoria exposta no capítulo 3 e através dos métodos indicados no capítulo 4.

A equação da força de trefilação aqui empregada é aquela obtida segundo o método do limite superior para pequenos ângulos e atrito de Coulomb, desenvolvida por Avitzur e discutida no capítulo 2.

Convém salientar que não se levou em consideração a variação da resistência ao escoamento em função da taxa de deformação visto que esta variação não é significativa, conforme bem o demonstra os dados relacionados na tabela 4.3.

5.2 - Força de trefilação x velocidade de operação

5.2.1 - Resultados analíticos da força de trefilação

A equação da força de trefilação, segundo o método do limite superior, é a seguinte:

$$\sigma_t = \bar{\sigma}_o \left\{ 2f(\alpha) \ln \left(\frac{r_o}{r_f} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cotg \alpha \right] + 2\mu \left[\cotg \alpha \left(1 - \ln \left(\frac{r_o}{r_f} \right) \right) \right. \right. \\ \left. \left. \ln \left(\frac{r_o}{r_f} \right) \right] + L/r_f \right\} / \left[1 + \frac{2\mu L}{r_f} \right]$$

Esta equação pode ser reduzida em face das seguintes constantes operacionais:

$$A = \ln \left(\frac{r_o}{r_f} \right) = 0,09985$$

$$\frac{r_o}{r_f} = 1,105$$

$$B = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cotg \alpha \right] + L/r_f = 0,4349$$

$$C = 2 \left[\cotg \alpha \left(1 - \ln \left(\frac{r_o}{r_f} \right) \right) \ln \left(\frac{r_o}{r_f} \right) \right] = 1,8128$$

$$L = 0,3 r_f$$

Então,
$$\sigma_t = \bar{\sigma}_o (A + B + \mu C) / (1 + 0,6\mu)$$

ou
$$\sigma_t = \bar{\sigma}_o (0,6346 + 1,1813\mu) / (1 + 0,6\mu)$$

utilizando-se o coeficiente de atrito $\mu = 0,1$, como comumente adotado na prática,^[37] as forças de trefilação podem ser calculadas em função de $\bar{\sigma}_o$ e do diâmetro do produto trefilado. Os resultados são apresentados na tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Força de trefilação calculada ($\mu = 0,1$)

Diâmetro final (mm)	Área final (mm ²)	Força (N)
0,905	0,64326	108,26
0,819	0,52682	88,65
0,742	0,43241	72,76

5.2.1.1 - Variação da tensão média de escoamento

O metal, após a deformação, sofre variação em suas propriedades mecânicas, ou seja, encrua. Os resultados dos ensaios de tração do produto trefilado são apresentados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Resultados do ensaio de tração do produto trefilado

Diâmetro inicial (mm)	Diâmetro final (mm)	σ_o (MPa)	$\bar{\sigma}_o$ (MPa)
1	-	206	237
1	0,905	221	264
0,905	0,819	253	287
0,819	0,742	311	307

De acordo com estes resultados, as forças de trefilação, segundo a expressão de Avitzur, com $\mu = 0,1$, estão indicadas na tabela 5.3:

Tabela 5.3 - Força de Trefilação calculada
Valores obtidos considerando-se a tensão de escoamento média (σ_o)

Diâmetro final (mm)	Área final (mm ²)	Força (N)
0,905	0,64326	111
0,819	0,52682	104
0,742	0,43241	99,18

5.2.2 - Resultados experimentais da força de trefilação

As tabelas seguintes mostram os resultados experimentais da força de trefilação medidas nas diversas séries de testes.

A tabela 5.4 mostra a força de trefilação medida para trefilar o fio de 1 mm de diâmetro, sem lubrificação, em função da velocidade de operação.

Tabela 5.4 - Força de trefilação x velocidade
(sem lubrificante) - Diâmetro final = 0,905 mm

Velocidade (m/s)	Força de trefilação (N)
0,01	135
1,26	142
2,00	150*

* Ao atingir a velocidade de 2 m/s o fio rompeu-se

Tabela 5.5 - Força de trefilação x velocidade
Lubrificante 2 - Diâmetro final = 0,905 mm

Velocidade (m/s)	Força de trefilação (N)
0	114
0,29	130
1,29	145
2,34	146
2,83	148
2,97	148
3,36	150
3,98	115
5,03	105

Tabela 5.6 - Força de trefilação x Velocidade
Lubrificante 1 - Diâmetro final = 0,905 mm

Velocidade (m/s)	Força de trefilação (N)
0	110
0,16	120
0,63	135
1,26	145
1,65	150
3,14	160*

* Rompimento do fio

Tabela 5.7 - Força de trefilação x Velocidade

Lubrificante 2 - Diâmetro final = 0,819 mm

Velocidade (m/s)	Força de trefilação (N)
0	105
0,36	108
0,628	113
1,63	113
2,51	115
3,56	108
5,42	95
6,66	83

Tabela 5.8 Força de trefilação x Velocidade

Lubrificante 1 - Diâmetro final = 0,819 mm

Velocidade (m/s)	Força de trefilação (N)
0	100
0,628	105
1,26	112
6,03	120

Tabela 5.9 - Força de trefilação x Velocidade

Lubrificante 2 - Diâmetro final = 0,742 mm

Velocidade (m/s)	Força de trefilação (N)
0	100
0,32	105
0,80	115
1,90	110
2,50	105
4,40	90
7,33	85

Tabela 5.10 - Força de trefilação x Velocidade

Lubrificante 1 - Diâmetro final = 0,742 mm

Velocidade (m/s)	Força de trefilação (N)
0	85
0,02	87
0,6	95
1,05	100
2,16	111

As tabelas que se seguem mostram a variação do coeficiente de atrito, calculado de acordo com a expressão de Avitzur, com base nas forças de trefilação medidas.

Tabela 5.11 - Coeficiente de atrito x Velocidade

(sem lubrificante) - Diâmetro final = 0,905 mm

Velocidade (m/s)	Coeficiente de atrito
0,01	0,39
1,26	0,50
2,00	0,59*

Tabela 5.12 - Coeficiente de atrito x Velocidade

Lubrificante 2 - Diâmetro final = 0,905 mm

Velocidade (m/s)	Coeficiente de atrito
0	0,15
0,29	0,33
1,29	0,52
2,34	0,53
2,83	0,56
2,97	0,56
3,36	0,59
3,98	0,16
5,03	0,07

Tabela 5.13 - Coeficiente de atrito x Velocidade

Lubrificante 1 - Diâmetro final = 0,905 mm

Velocidade (m/s)	Coeficiente de atrito
0	0,12
0,16	0,22
0,63	0,39
1,26	0,52
1,65	0,59
3,14	0,75*

* Rompimento do fio

Tabela 5.14 - Coeficiente de atrito x Velocidade

Lubrificante 2 - Diâmetro final = 0,819 mm

Velocidade (m/s)	Coeficiente de atrito
0	0,17
0,36	0,20
0,628	0,26
1,63	0,26
2,51	0,28
3,56	0,20
5,42	0,06
6,66	0,04

Tabela 5.15 - Coeficiente de atrito x Velocidade

Lubrificante 1 - Diâmetro final = 0,819 mm

Velocidade (m/s)	Coeficiente de atrito
0	0,11
0,628	0,17
1,26	0,25
6,03	0,34

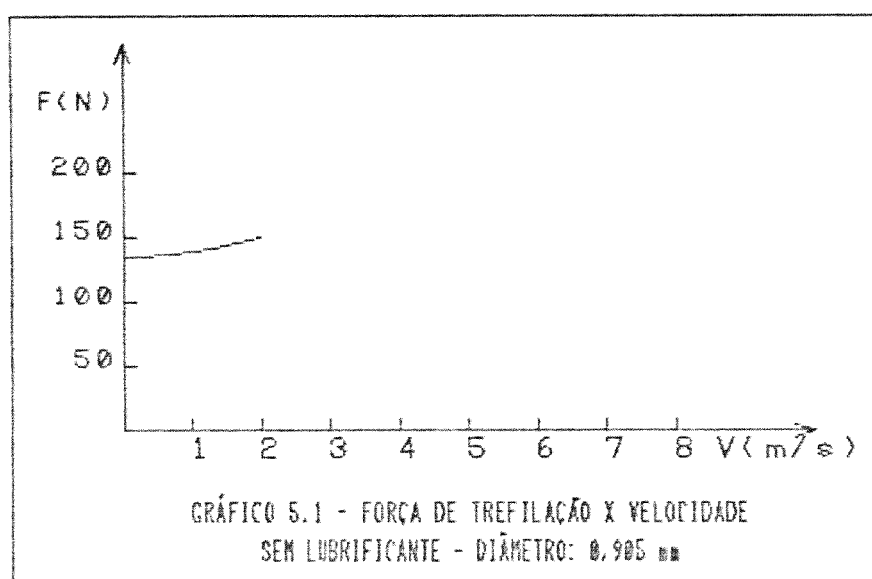
Tabela 5.16 - Coeficiente de atrito x Velocidade
Lubrificante 2 - Diâmetro final = 0,742 mm

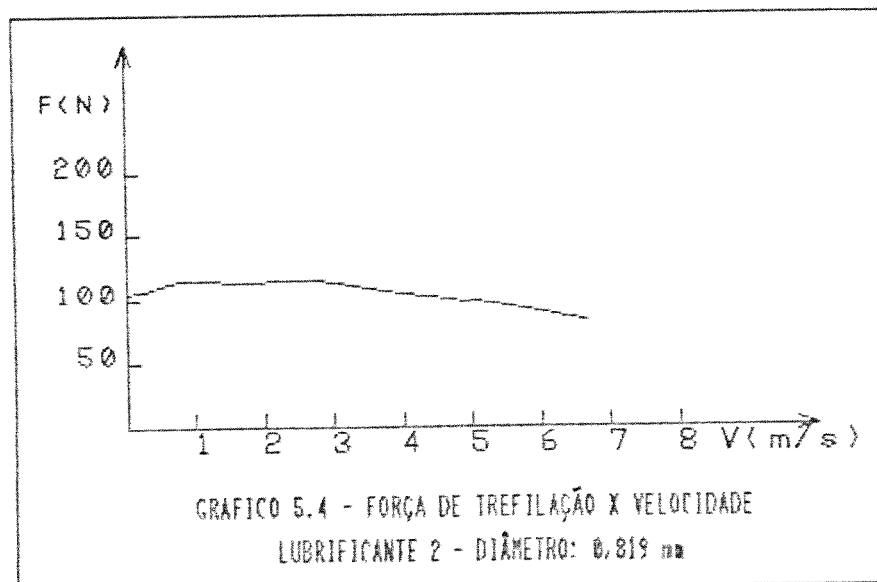
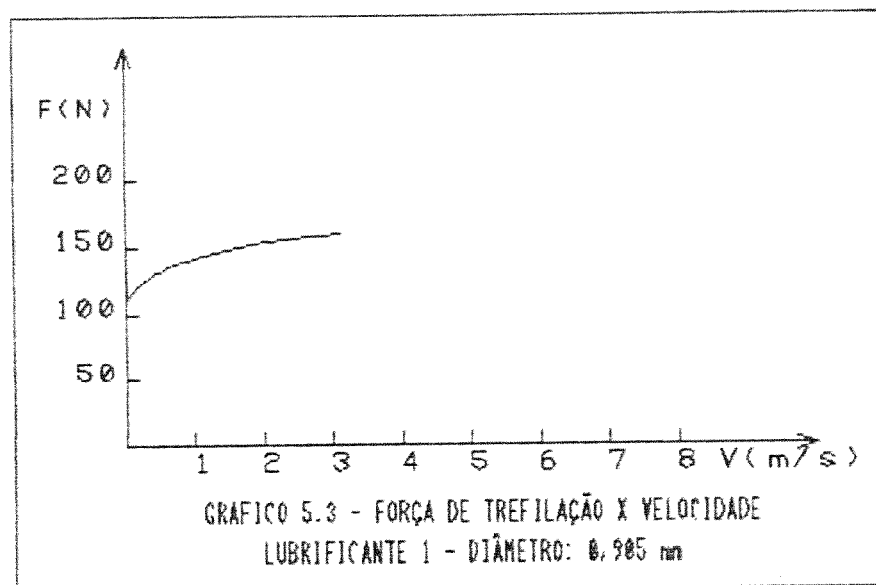
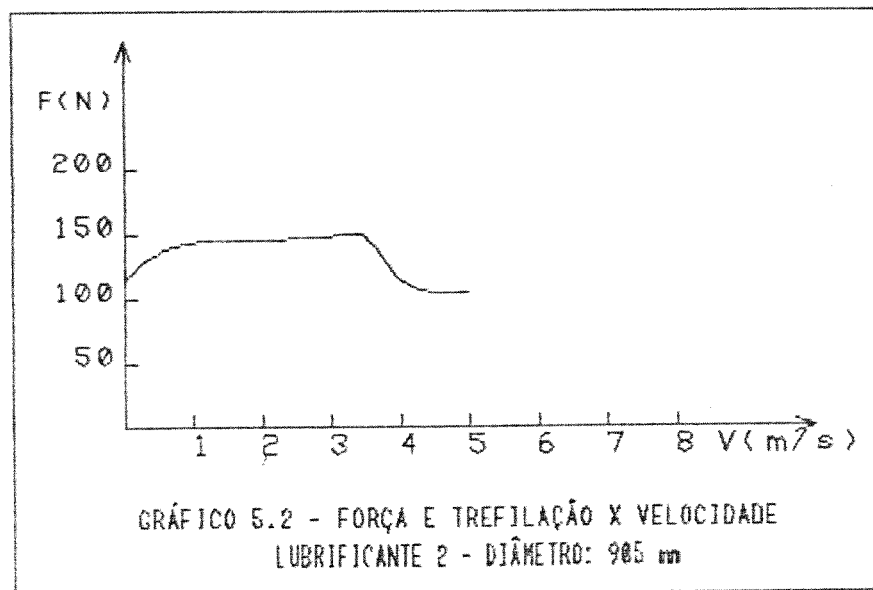
Velocidade (m/s)	Coeficiente de atrito
0	0,25
0,32	0,31
0,80	0,47
1,90	0,39
2,50	0,32
4,40	0,12
7,33	0,06

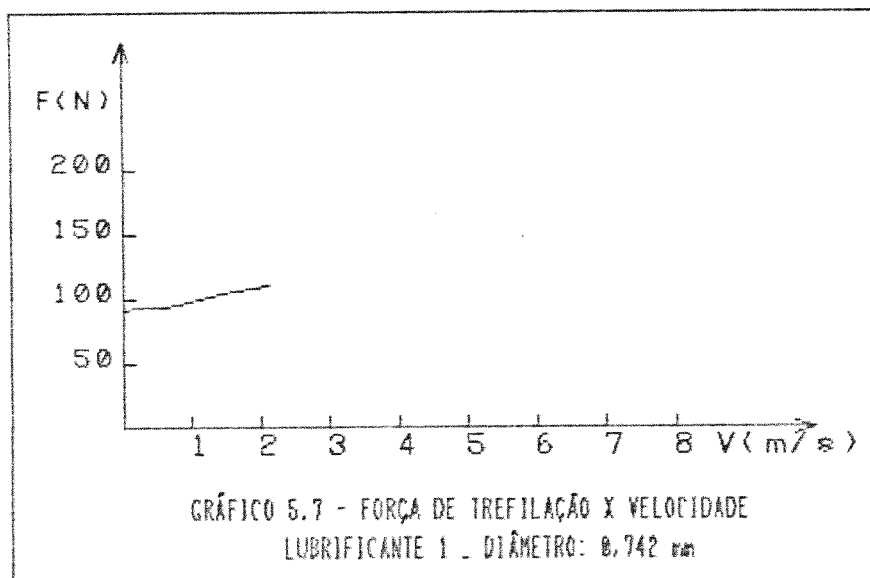
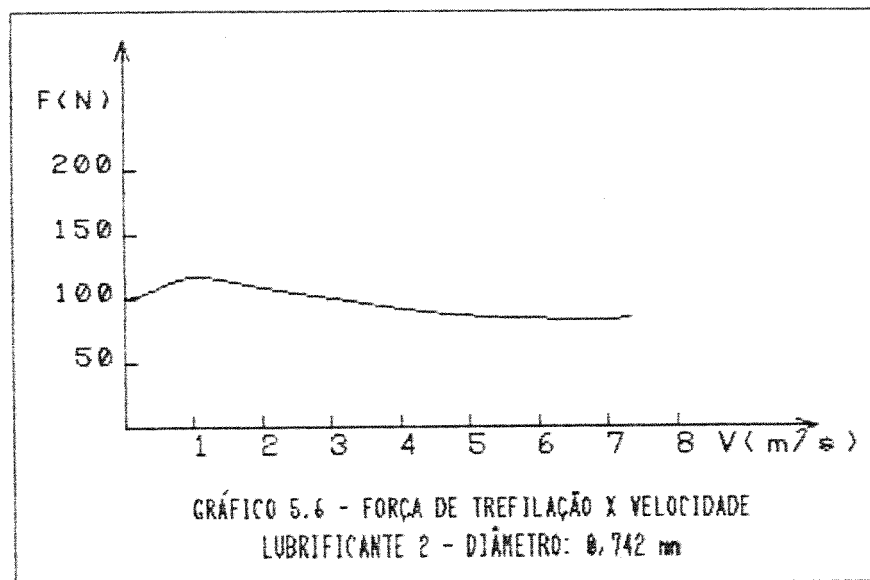
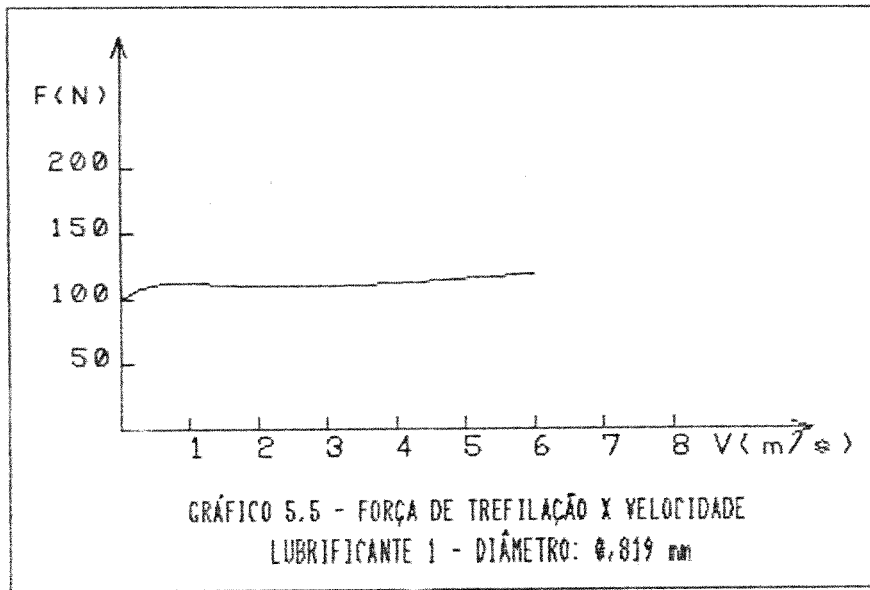
Tabela 5.17 - Coeficiente de atrito x Velocidade
Lubrificante 1 - Diâmetro final = 0,742 mm

Velocidade (m/s)	Coeficiente de atrito
0	0,07
0,02	0,09
0,6	0,18
1,05	0,25
2,16	0,40

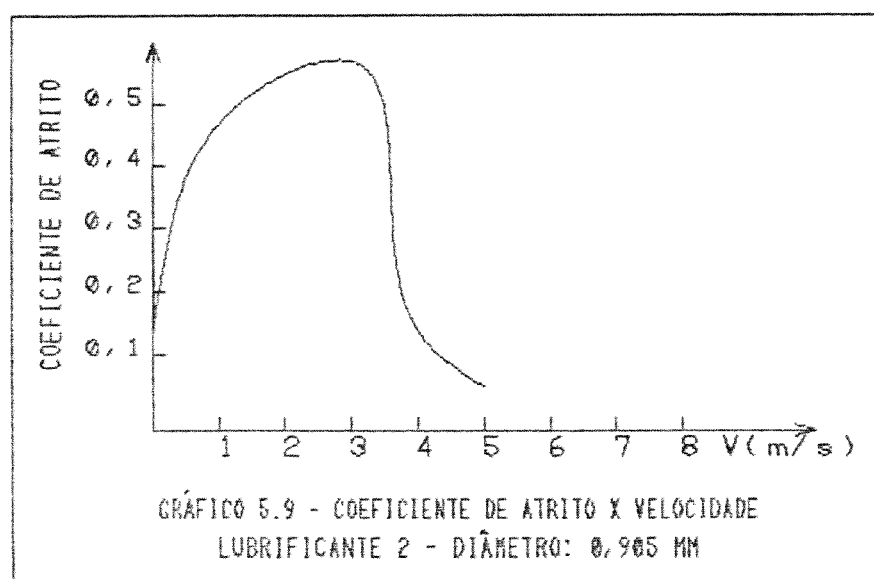
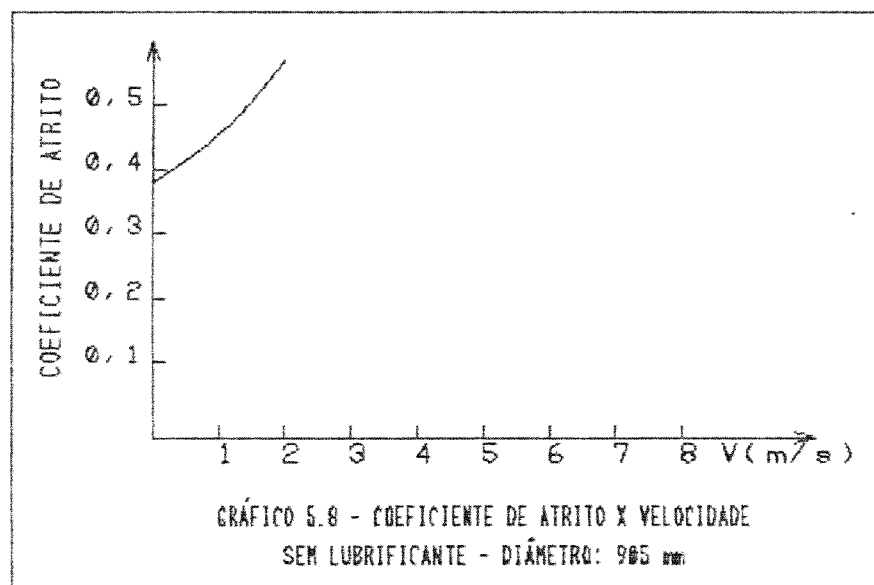
Os gráficos 5.1 a 5.7 mostram a variação da força de trefilação, como função da velocidade, de acordo com os valores das tabelas anteriores.

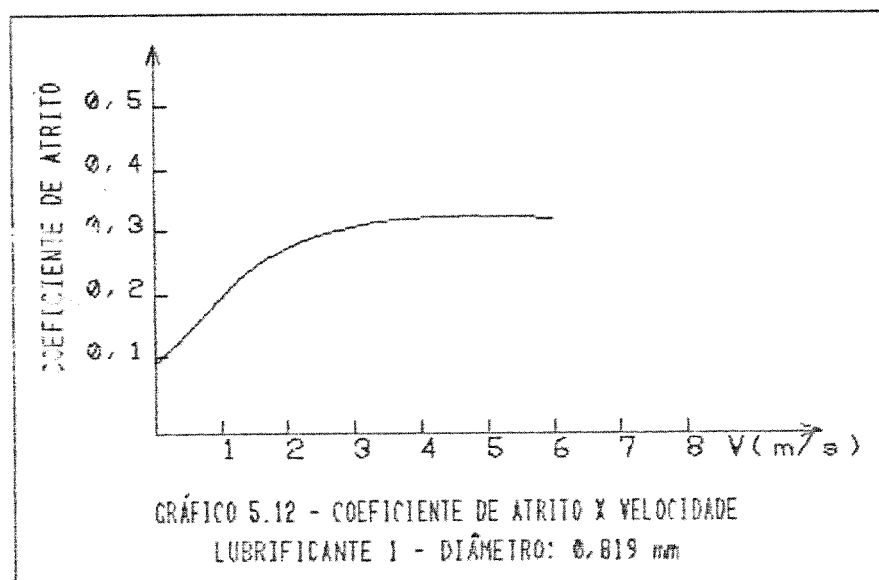
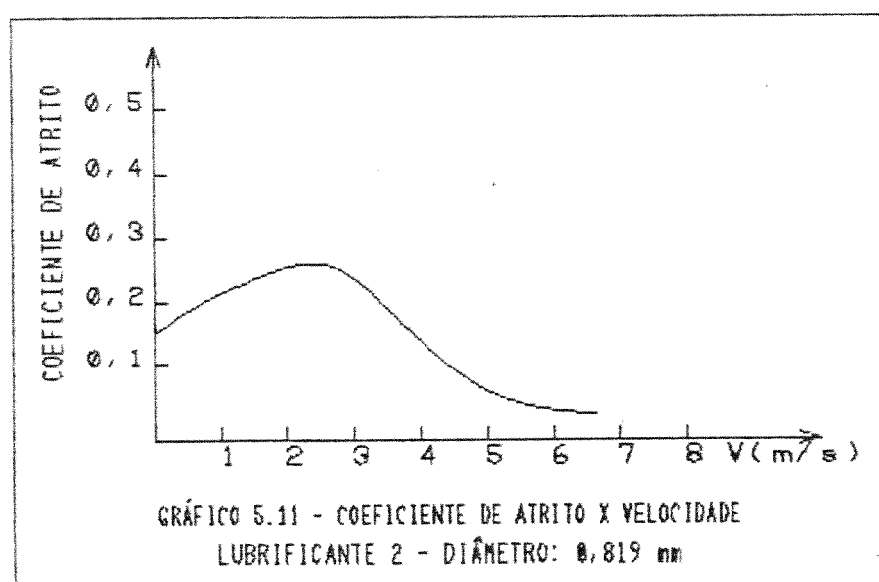
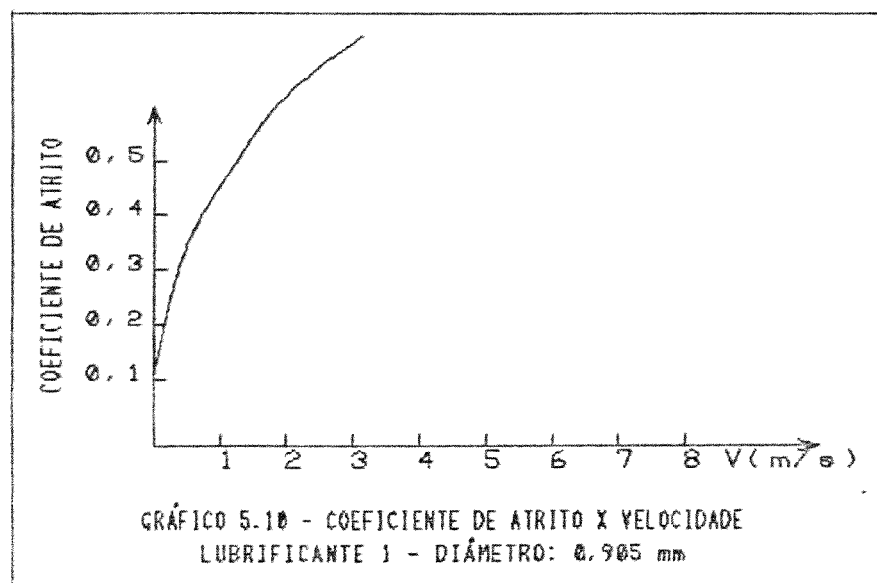


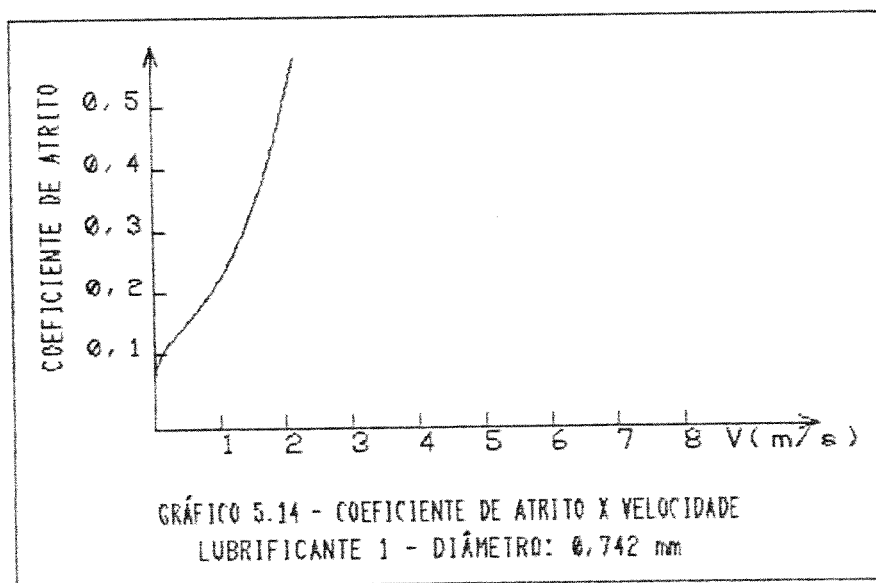
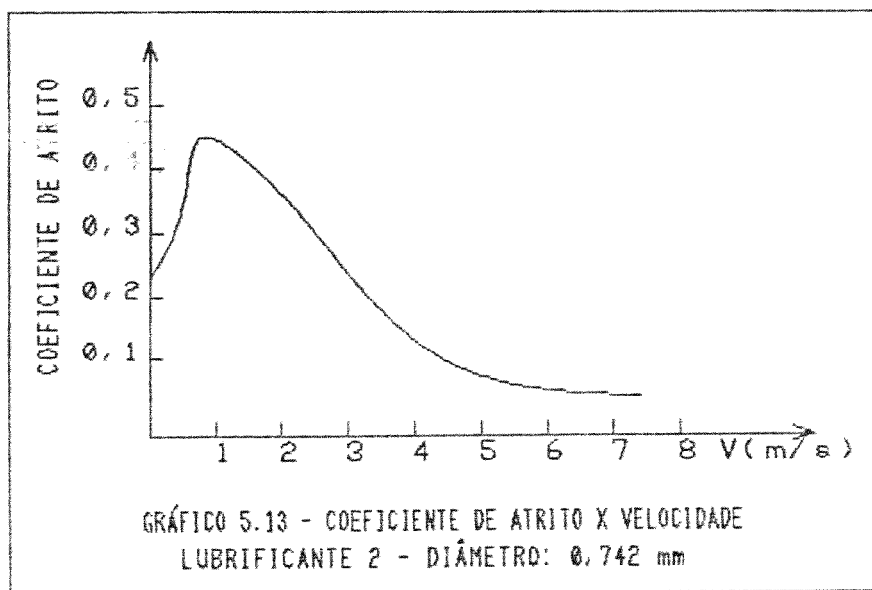




O coeficiente de atrito também pode ser mostrado graficamente, com base nas forças medidas e na equação de Avitzur (ver gráficos 5.8 - 5.14).







5.2 - Velocidades teóricas dos regimes de lubrificação

As velocidades de fim do regime de lubrificação limite, coincidente com o início do regime de lubrificação misto, e fim do regime de lubrificação misto podem ser calculados com a ajuda

das expressões deduzidas para a espessura do filme lubrificante e com as hipóteses que estabelecem o início e o fim desse regime (ver capítulo 3). As tabelas 5.18 e 5.19 mostram as velocidades teóricas calculadas nos diferentes casos.

Tabela 5.18 - Velocidades teóricas do regime de lubrificação mista

Lubrificante 1		
Diâmetro final	Velocidade de início do regime	Velocidade de término do regime
0,905 mm	358 m/s	1075 m/s
0,819 mm	366 m/s	1098 m/s
0,742 mm	377 m/s	1131 m/s

Tabela 5.19 - Velocidades teóricas de ocorrência dos regimes misto e hidrodinâmico - Lubrificante 2

Diâmetro final	Velocidades	
	início regime misto	início hidrodinâmico
0,905 mm	0,84 m/s	2,52 m/s
0,819 mm	0,89 m/s	2,69 m/s
0,742 mm	0,98 m/s	2,94 m/s

5.4 - Discussão dos resultados obtidos

5.4.1 - Força de trefilação x velocidade

Como demonstram os gráficos 5.1 a 5.7 e as tabelas 5.4 a 5.10, a força de trefilação não é independente da velocidade da operação, conforme os resultados obtidos a partir do modelo teórico desenvolvido por Avitzur (ver capítulo 2). Verifica-se que, na ausência de lubrificante, a força de trefilação cresce continuamente, até que atinge um valor tal que a tensão de trefilação supera a resistência mecânica à tração do metal trefilado e o fio rompe-se.

Aplicando-se o lubrificante 1, a força de trefilação também cresce continuamente. Contudo, as velocidades alcançadas antes do

rompimento do fio são superiores àquela alcançada sem lubrificante. Nota-se, ainda, que a velocidade alcançada no momento do rompimento do fio é maior para os diâmetros menores. O aumento da força de trefilação nessa etapa relaciona-se com a condição de lubrificação limite.

A aplicação do lubrificante 2 altera o comportamento verificado para o lubrificante 1. Nesse caso, A força de trefilação cresce até um valor máximo e, então, cai para valores inferiores aos valores de início da operação com o lubrificante 2, nos três testes executados. Sendo assim, podemos concluir a existência de dois regimes de lubrificação distintos durante a operação. Na etapa de crescimento contínuo da força de trefilação com a velocidade, existe o regime de lubrificação limite, e, na etapa de queda da força de trefilação com a velocidade, existe o regime de lubrificação misto.

A força de trefilação, calculada pela equação de Avitzur adotando-se $\mu = 0,1$ e considerando o encruamento do metal (ver tabela 5.3), se aproxima muito dos valores medidos na presença de lubrificante, para velocidades próximas a zero. O mesmo não ocorre se o encruamento não é considerado (tabela 5.1).

Convém notar ainda que os valores da forças de trefilação medidas com o lubrificante 1 são menores que àquelas do lubrificante 2, nas velocidades próximas de zero.

As velocidades de início e fim dos diversos regimes podem ser obtidas através dos gráficos 5.1 a 5.7 e comparada com as velocidades teóricas calculadas e apresentadas nas tabelas 5.18 e 5.19. Nos casos em que foi utilizado o lubrificante 1, as velocidades calculadas para o fim do regime de lubrificação limite são elevadas. As velocidades reais não ficam caracterizadas nos gráficos força x velocidade com o lubrificante 1.

Nos casos em que o lubrificante 2 foi empregado, as velocidades reais de início do regime de lubrificação misto são maiores que as previstas no modelo teórico e a velocidades reais

de fim desse regime não são possíveis de se determinar a partir dos gráficos de força x velocidade com o lubrificante 2.

5.4.2 - Coeficiente de atrito x velocidade

A variação do coeficiente de atrito com a velocidade é muito mais representativa para a verificação da eficiência da lubrificação do que a variação da força com a velocidade. Isto deve ao fato de que, para iguais reduções em área e mesmo ângulo de trabalho, o trabalho contra o atrito não se altera (ver capítulo 2).

Convém salientar que o coeficiente de atrito, neste trabalho, foi calculado substituindo-se a força de trefilação medida na equação de Avitzur. Os resultados obtidos contêm, então, dois erros. O primeiro é devido ao erro instrumental na medição da força e o segundo é devido ao erro teórico do modelo adotado por Avitzur.

Na ausência de lubrificante, o coeficiente de atrito cresce continuamente, até que a parcela de trabalho devido ao atrito, somada ao trabalho redundante mais o trabalho de deformação homogênea, levam o fio ao rompimento. Nessa situação a trefilação ocorre na condição de atrito a seco.

Usando-se o lubrificante 1, o coeficiente de atrito também cresce continuamente com o aumento da velocidade. Os valores do coeficiente de atrito obtidos nesse intervalo indicam a presença do regime de lubrificação limite.^[38]

Os gráficos do coeficiente de atrito x velocidade mostram que o coeficiente de atrito na presença do lubrificante 2 tem um comportamento diferente. Nesses casos o coeficiente de atrito cresce até um valor máximo e então cai para valores inferiores àqueles do início da operação com esse lubrificante. Pode-se concluir pela existência de dois regimes de lubrificação

distintos: até o valor máximo do atrito, existe o regime de lubrificação limite, seguido do regime de lubrificação misto a partir daí. Os valores do coeficiente de atrito nessas duas etapas são compatíveis com os valores relacionados com esses dois regimes na literatura. [38]

Os valores calculados para o coeficiente atrito na presença de lubrificantes são muito próximos do valor adotado comumente na prática ($\mu = 0,1$) [39,40], para velocidades próximas a zero.

Convém notar que, nas velocidades próximas a zero, o coeficiente de atrito obtido com o lubrificante 1 é menor que o obtido com o lubrificante 2, indicando a dificuldade de arraste de um lubrificante mais viscoso para o interior da zona de deformação.

Como mostram os gráficos, o regime hidrodinâmico deve ocorrer para velocidades superiores a 7 m/s, quando a curva tende a valores do coeficiente de atrito menor que 0,05, indicados como valores típicos desse regime [38]. Tal fato não pode ser comprovado devido a limitação do equipamento, que fornece velocidade máxima de 7,33 m/s.

A forma das curvas, em todos os casos, refletem o comportamento verificado por outros pesquisadores e prevista na teoria da lubrificação. [38,41] Ou seja, uma fase de crescimento contínuo do atrito, correspondente ao atrito de lubrificação limite, seguida de uma queda acentuada do atrito, correspondente ao regime de lubrificação mista. Apesar de não estar perfeitamente caracterizada, segue-se uma tendência à estabilidade do coeficiente de atrito, correspondente ao regime hidrodinâmico.

5.4.3 - Eficiência da lubrificação

A eficiência da lubrificação pode ser avaliada pela redução do esforço de trefilação, da redução do atrito, da redução da

energia requerida para o processo, pela redução dos defeitos superficiais e internos e pela redução do desgaste.

A redução de força efetivamente ocorreu, conforme mostram os gráficos da força x velocidade, a partir de certa velocidade, empregando-se o lubrificante 2. Na ausência de lubrificantes ou com lubrificante de baixa viscosidade, como o lubrificante 1, esta redução não ocorre. Então, existe uma correlação entre as propriedades físicas do lubrificante, a velocidade de operação e o esforço de conformação.

A redução do atrito também ficou bem caracterizada para o lubrificante 2, a partir de uma certa velocidade. Na ausência de lubrificante ou com o lubrificante 1, essa redução não ocorre. Existe, então, uma correlação entre as propriedades do fluido, a velocidade de operação e o coeficiente de atrito.

A energia consumida é função da força e do comprimento de fio trefilado. Como a força mostra-se função das propriedades do lubrificante e da velocidade, assim também o será a energia consumida. Portanto, o aumento da velocidade, associado a fluidos de alta viscosidade, levam a uma redução na energia necessária para o trabalho em questão.

A potência do equipamento também pode ser reduzida com o emprego de lubrificantes de alta viscosidade e com velocidades elevadas. Ou seja, na trefilação de diversos fios, com o mesmo comprimento final e mesma qualidade superficial, na presença de fluidos de viscosidades diferentes, a operação com o fluido mais viscoso demandará menor tempo e menor esforço, com conseqüente redução do consumo de energia e de potência consumida.

A redução de defeitos do produto pode ser avaliada pelo aumento da capacidade de redução em área, com o emprego de lubrificantes de alta viscosidade. Para uma mesma velocidade, maiores reduções são possíveis, com mesmo esforço de conformação, aumentando-se a viscosidade do fluido lubrificante. Então, para uma mesma redução e para uma mesma velocidade, defeitos internos,

do tipo "central burst", por exemplo, devem ser amenizados.

O principal defeito externo é, sem dúvida, o rompimento do fio, consequência do aumento da tensão de trefilação além do limite de escoamento do metal do fio. Esse efeito pode ser analisado neste trabalho. Verifica-se que maiores velocidades são conseguidas com o aumento da viscosidade do lubrificante ou pela simples presença deste. O fio trefilado sem lubrificante rompeu-se à velocidade de 2 m/s. Com o lubrificante 1, o rompimento pode ser adiado para velocidades maiores e com o lubrificante 2 não se verificou rompimentos. Portanto, a presença de lubrificante previne a fratura do fio. Este defeito pode ser totalmente extinto pela especificação de lubrificantes mais viscosos.

O desgaste pode ser encarado de duas formas: desgaste da matriz e desgaste do fio, assumindo este último a característica de um defeito superficial. Neste trabalho não se avaliou o desgaste da matriz. O desgaste superficial foi avaliado na forma da rugosidade superficial do produto. Verifica-se que a lubrificação pobre leva a um alisamento da superfície, que a torna mais brilhante.^[42] Lubrificantes mais viscosos, trabalhando em velocidades mais elevadas, conduzem a um aumento da rugosidade superficial. Entretanto, este aumento não se mostrou significativo a ponto de alterar demasiadamente o diâmetro final do produto (ver capítulo 4). A aparência do fio, brilhante ou fôska, pode indicar uma lubrificação mais ou menos eficiente.^[43]

5.5 - Referências bibliográficas

- [37] BARON, H.G. e THOMPSON, F.C. - "Friction in wire drawing". J. Inst. Metals, vol. 78, 1950-51, pp. 415-462.
- [38] WILSON, R. D. - "Friction and lubrication in bulk metal-forming process". J. Applied Metalworking, vol. 1, 1979, pp.7-9.
- [39] SMITH, B.F. e COOPER, A. - "The theory of lubrication". Wire Journal, 19070, pp. 76-81.
- [40] HARPER, S. - "Lubrication aspects of drawing non-ferrous wire". Wire Industry, 1976, aug, pp. 623-626.
- [41] LANCASTER, P. R. e SMITH, B. F. - "High Speed Wire Drawing". Wire Industry, 1974, pp. 933-937.
- [42] WRIGHT, R.N. e MALE, A.T. - "Surface defects in drawing aluminum magnet wire". J. Lubr. Tech., ASME, jan, 1975, pp. 134-141.
- [43] HASHIMIT, M.S.J., SYMMONS, G.R. e PARVIMEHR, H. - " A novel technique of wire drawing". J. Mech. Eng. Science, vol. 24, n. 1, 1982, pp. 1-4.

CONCLUSÕES

- 6.1 - A força e a tensão de trefilação são dependentes da velocidade e do lubrificante.
- 6.2 - Na ausência de lubrificante, existe o atrito a seco, e a força de trefilação aumenta continuamente com o aumento da velocidade, podendo ocorrer a ruptura do fio trefilado.
- 6.3 - Na presença do lubrificante de baixa viscosidade, a força de trefilação aumenta com o aumento da velocidade. As velocidades em que a ruptura do fio pode ocorrer são maiores do que a velocidade onde ocorre a ruptura do fio trefilado sem lubrificação.
- 6.4 - Na trefilação com o lubrificante de alta viscosidade, a ruptura não ocorreu. A força de trefilação aumenta até um valor limite, a partir daí, cai para valores inferiores ao do início da trefilação com esse lubrificante.
- 6.5 - Os valores das forças de trefilação à velocidades próximas a zero concordam com os resultados obtidos pelo modelo teórico de Avitzur quando se emprega coeficientes de atrito igual a 0,1 e se considera o encruamento do metal do fio.
- 6.6 - O coeficiente de atrito calculado aumenta com a velocidade, quando a trefilação ocorre sem lubrificação ou com o lubrificante de baixa viscosidade.
- 6.7 - Na presença do lubrificante de baixa viscosidade, a trefilação ocorre sob condições de lubrificação limite e os valores dos coeficientes de atrito calculados concordam com os valores preditos pela literatura para esse regime.

6.8 - Com o lubrificante de alta viscosidade, o coeficiente de atrito calculado cresce até um valor máximo e, então, cai para valores inferiores àqueles do início da operação com esse lubrificante.

6.9 - Na presença do lubrificante de alta viscosidade, a trefilação ocorre sob dois regimes de lubrificação: até o valor máximo do coeficiente de atrito, existe o regime de lubrificação limite, e, a partir daí, existe o regime de lubrificação misto.

6.10 - As curvas do coeficiente de atrito como função da velocidade têm o formato predito na teoria da lubrificação e os valores dos coeficientes de atrito calculado nos diversos regimes concordam com os valores preditos nessa teoria.

6.11 - A trefilação na presença de lubrificantes é mais eficiente e reduções no consumo de energia, na potência dos equipamentos e no desgaste das matrizes podem ser conseguidas com lubrificantes de viscosidades mais elevadas e com o aumento da velocidade de operação.

6.12 - Defeitos superficiais e internos podem ser prevenidos com lubrificantes de viscosidades mais elevadas e com o aumento da velocidade de operação.

BIBLIOGRAFIA REFERIDA

- [1] AVITZUR, B. - "Analysis of wire drawing and extrusion through conical dies of large cone angles". J. eng. Ind., ASME, vol. 86, nov, 1964,, pp. 78-81.
- [2] AVITZUR, B. - "Study of flow through conical converging dies". Wire Industry, vol. 49, June, 1982, pp. 449-455.
- [3] AVITZUR, B. - "Study of flow through conical converging dies". Wire Industry, vol. 49, July, 1982, pp. 503-509.
- [4] AVITZUR, B. - "Study of flow through conical converging dies". Wire Industry, vol. 49, aug, 1982, pp. 614-618.
- [5] BAIR, S. e WUNER, W. O. - "Shear strenght measurements of lubricant at high pressure". J. Lub. Tech., July, 1979, vol. 101, pp. 251-257.
- [6] BAIR, S. e WUNER, W. O. - "Some observations in high pressure rheology of lubricant". J. Lub. Tech., July, 1979, vol. 104, pp. 357-364.
- [7] BARON, H.G. e THOMPSON, F.C. - "Friction in wire drawing". J. Inst. Metals, vol. 78, 1950-51, pp. 415-462.
- [8] BOWDEN, F. P. e TABOR, D. - "The Friction and Lubrication of Solids". Part 2, 1964, Oxford, Claredon Press.
- [9] BRESCIANI F.^O, E. - "Tribologia na Conformacao Plastica". Monografia, Unicamp/EPUSP, Campinas/SP, 1986.
- [10] BRESCIANI F.^O, E. e outros. "Conformacao Plastica dos Metais". Unicamp, Campinas, 1985, vol. 1 e 2.
- [11] CAMERON, A. - "Basic Lubrication Theory". London, Longman Group, 1970.

- [12] CARVALHO, C.A., FERREIRA, I. e BRESCIANI F.^O, E. - "Dispositivo para determinacao da forca de trefilacao de fios finos metalicos". Anais do V Congresso de Engenharia Mecânica, ABCM, 1979, pp. 201-210.
- [13] Catálogo S/A PHILIPS DO BRASIL. Informacoes sobre o produto comercial -Fieiras de diamante. pp. 1 - 7.
- [14] DIETER, G. E. - "Metalurgia Mecanica". Guanabara Dois, 1981, Rio de Janeiro.
- [15] EDER, K. - "History and new trends in wire drawing dies". Wire Ind. vol. 48, nov., 1981, pp. 797-801.
- [16] FANTINO, B. FRENE, J. e GODET, M. - "Reynolds Equation in Viscous Fluid Theory". J. Lub. Tech., July, 1972, p. 287.
- [17] HARPER, S. - "Lubrication aspects of drawing non-ferrous wire". Wire Industry, 1976, aug, pp. 623-626.
- [18] HASHIMIT, M.S.J., SYMMONS, G.R. e PARVIMEHR, H. - " A novel technique of wire drawing". J. Mech. Eng. Science, vol. 24, n. 1, 1982, pp. 1-4.
- [19] LANCASTER, P. R. e SMITH, B. F. - "High Speed Wire Drawing". Wire Industry, 1974, pp. 933-937.
- [20] LEME, R.A.S. - Curso de Estatística. Rio de Janeiro, Ao livro Técnico, 1969.
- [21] NOWAK, S. e KNISCH, T. - "Hydrodynamic drawing affects wire properties". Wire World Int., vol. 26, 1984, pp. 115-117.
- [22] PUGH, D. - "Redundant work and friction in hydrostatic extrusion of pure aluminium and an aluminium alloy". J. Mech. Eng. Science, vol. 6, n. 4, 1964, pp. 362-370.

- [23] RABINOWICZ, E. - "Friction and Wear of Materials". John Willey Sons, USA, 1966, pp. 125-167.
- [24] SMITH, B.F. e COOPER, A. - "The theory of lubrication". Wire Journal, 1970, pp. 76-81.
- [25] TABOR, D. - "Friction and Lubrication". J. Lub. Tech., ASME, 1981, n. 103, pp. 169-179.
- [26] WILSON, W. R. D. - "Workpiece surface roughening a hydrodynamically lubricated metal forming process". J. Lub. Tech., ASME, Jan, 1977, pp. 10-14.
- [27] WILSON, R. D. - "Friction and lubrication in bulk metal-forming process". J. Applied Metalworking, vol. 1, 1979, pp.7-9.
- [28] WILSON, R. D. e WALOWIT, J. A. - "An isothermal hydrodynamic lubrication theory for hidrostatic extrusion and wire drawing with conical converging dies". J. Lub. Tech., 1971, pp. 69-74.
- [29] WILSON, R. D. - "Temporary breakdown of hydrodynamic lubrication during the iniciation extrusion". J. Lub. Tech., 1971, pp. 69-74.
- [30] WISTREICH, J. G. - "The fundamentals of wire drawing". Metallurgical Review, vol. 3, m. 10, 1958, pp. 97-142.
- [31] WRIGHT, R.N. e MALE, A.T. - "Surface defects in rawing aluminum magnet wire". J. Lubr. Tech., jan, 1975, pp. 134-141.
- [32] YUST, C. S. - "Tribology and Wear". International Metals Rewiew, 1985, vol. 3, n. 3, pp. 141-154.
- [33] ZAVAGLIA, C.A.C. - "Contribuicao ao estudo da trefilacao de fios capilares de metais nao-ferrosos". Tese de Mestrado, UNICAMP/FEC/DEM, 1970.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA MAS NÃO REFERIDA

- [1] BOOR, U. - "Views on the use of drawing lubricants". Wire World Int., vol. 16, mar-apr, 1974, pp. 68-73.
- [2] BLOOR, S.M., DOWSON, D. e PARSONS, B. - "An elasto-plasto-hydrodynamic lubrication analysys of the plane strain drawing process". J. Mech. Eng. Science, vol. 12, n. 3, 1970, pp. 113-122.
- [3] RAMARAJ, T.C. e SHAW, M.C. - "A new method of evaluating metal-working lubricants". Journal of Tribology, ASME, vol. 107, apr, 1985, pp. 216-219.
- [4] KAWAI, N., NAKAMURA, T. e SEKO, S. - "The welding mechanism in drawing of aluminun sheet". J. Eng. Ind., aug, 1980, vol. 102, pp. 229-238.
- [5] SNIDLE R. W., DOWSON, D. e PARSONS, B. - "An elasto-plasto-hydrodynamic lubrication analysys of the hydrostatic extrusion process". J. Mech. Eng. Science, vol. 12, n. 3, 1970, pp. 178-190.
- [6] SNIDLE R. W., DOWSON, D. e PARSONS, B. - "A thermal hydrodynamic lubrication Theory of the hydrostatic extrusion low strenght materials". J. Mech. Eng. Science, vol. 12, n. 3, 1970, pp. 178-190.
- [7] ZAVAGLIA, C.A.C. - BRESCIANI, F.^O, E. - "Influencia da velocidade de trabalho na trefilacao de fios metalicos capilares". Anais do XXXV Congresso Anual da ABM, 1980, vol. 3, pp. 561-574.

APÊNDICES

A.1 - SIMBOLOGIA

A	- Área
A_a	- Área aparente de contato
A_o	- Área inicial do fio
A_r	- Área real de contato
A_f	- Área final do fio
B	- constante
b	- largura da haste
c	- constante de integração
dr	- elemento de raio
D	- diâmetro
D_o	- diâmetro inicial do fio
D_f	- diâmetro final do fio
E	- módulo de elasticidade
F	- força - Força que provoca deformação na haste
F_a	- Força de atrito
h	- espessura da haste - espessura do filme lubrificante
h_1	- espessura do filme na entrada da zona de deformação
h_2	- espessura do filme na saída da zona de deformação
K	- coeficiente de resistência
L	- comprimento da zona cilíndrica - distância da entrada da zona de deformação até o ápice do cone
m	- fator de atrito- coeficiente de sensibilidade à taxa de deformação
N	- força normal - velocidade circunferencial
n	- coeficiente de encruamento
O	- origem dos sistemas de coordenadas
P	- Pressão
p	- pressão de compressão - tensão longitudinal
p_m	- pressão média de escoamento do material mais mole
p_o	- pressão de escoamento
Q_r	- contribuição para a tensão de trefilação devido ao trabalho redundante

q	- compressão circunferencial
q_x	- fluxo na direção x
q_y	- fluxo na direção y
R_a	- Rugosidade média superficial
r	- raio - redução
r_o	- raio inicial do fio
r_f	- raio final do fio
RMS	- Rugosidade média quadrática
u	- velocidade na direção x
W	- trabalho total - módulo de flexão
W_h	- trabalho de deformação homogênea
W_r	- trabalho redundante
W_a	- trabalho devido ao atrito
W_e	- trabalho externo
W_i	- trabalho interno
V	- velocidade - velocidade na direção y
V_o	- velocidade inicial
V_f	- velocidade final
V_x	- velocidade à distância x da entrada da zona de deformação
Z	- viscosidade
α	- ângulo de trabalho - constante
β	- ângulo da superfície de descontinuidade da velocidade - ângulo de entrada da fieira - redução em área - fração da área de contato
γ	- ângulo de saída da fieira - coeficiente de viscosidade-pressão
η	- viscosidade
η_o	- viscosidade à pressão atmosférica
δ	- redução em diâmetro
λ	- alongamento
θ	ângulo
ϵ	- deformação verdadeira ou logarítmica
$\dot{\epsilon}$	- taxa de deformação
μ	- coeficiente de atrito
μ_l	- coeficiente de atrito limite
μ_h	- coeficiente de atrito hidrodinâmico
σ	- tensão normal
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	- tensões principais

- σ_t - tensão de trefilação
- σ_x - tensão longitudinal
- τ - tensão cisalhante
- σ_o - tensão de escoamento
- $\bar{\sigma}_o$ - tensão média de escoamento
- τ_i - tensão de cisalhamento no escoamento do material na interface
- τ_m - tensão de cisalhamento no escoamento do metal mais mole
- τ_o - tensão de cisalhamento no escoamento
- ρ - raio da superfície esférica de descontinuidade da velocidade.

A.2 - ÍNDICE DE FIGURAS

O primeiro número se refere ao capítulo e o segundo se refere à posição da figura dentro do capítulo.

Figura 2.1	- Esquema de uma trefilação	6
Figura 2.2	- Escoamento através de uma fieira cônica	9
Figura 2.3	- Campos básicos de velocidade	10
Figura 2.4	- Superfícies trapezoidais.	10
Figura 2.5	- Superfície esférica de descontinuidade	12
Figura 2.6	- Linhas de escoamento	13
Figura 2.7	- Contribuição para a tensão de trefilação	15
Figura 2.8	- Decomposição do estado de tensões na trefilação	17
Figura 2.9	- Método da divisão em elementos	18
Figura 2.10	- Campo esférico de velocidade	20
Figura 2.11	- Tensão de trefilação x ângulo da fieira	22
Figura 2.12	- Redução máxima x ângulo da fieira	23
Figura 3.1	- Tribossistema simples entre dois sólidos	27
Figura 3.2	- Sensibilidade na medição de rugosidades	29
Figura 3.3	- Área real de contato	29
Figura 3.4	- Aspecto geral das superfícies sólidas	31
Figura 3.5	- Regimes de lubrificação	36
Figura 3.6	- Sistema fio/fieira/lubrificante	43
Figura 3.7	- Elemento diferencial na cunha	43
Figura 3.8	- Equilíbrio de forças no elemento	43
Figura 3.9	- Escoamento em cunha no fluido	47
Figura 3.10	- Variação de h com ZN/P	51
Figura 3.11	- Variação do atrito com ZN/P	51
Figura 4.1	- Máquina trefiladora de laboratório	56
Figura 4.2	- Curva tensão x deformação do cobre ETP	59
Figura 4.3	- Dispositivo de medição de força	60
Figura 4.4	- Sistema de medição de força	60
Figura 4.5	- Ponte de Wheatstone	61
Figura 4.6	- Esquema da calibração do medidor	64
Figura 4.7	- Curva de calibração	67

A.3 - ÍNDICE DAS TABELAS

O primeiro número se refere ao capítulo e o segundo se refere à posição da tabela dentro do capítulo.

Tabela 4.1	- Especificação das fieiras empregadas	57
Tabela 4.2	- Características dos lubrificantes	58
Tabela 4.3	- Resultados do ensaio de tração do fio de cobre ETP.....	59
Tabela 4.4	- Rugosidade superficial dos fios	60
Tabela 4.5	- Força aplicada x tensão de saída dos extensômetros	65
Tabela 4.6	- Segunda série de testes	68
Tabela 4.7	- Terceira série de testes	68
Tabela 5.1	- Força de trefilação calculada ($\mu = 0,1$)	72
Tabela 5.2	- Resultados do ensaio de tração do produto trefilado	73
Tabela 5.3	- Força de trefilação calculada	73
Tabela 5.4	- Força de trefilação x velocidade (sem lubrificante) - Diâmetro final = 0,905 mm	74
Tabela 5.5	- Força de trefilação x velocidade Lubrificante 2 - Diâmetro final = 0,905 mm	74
Tabela 5.6	- Força de trefilação x velocidade Lubrificante 1 - Diâmetro final = 0,905 mm	74
Tabela 5.7	- Força de trefilação x velocidade Lubrificante 2 - Diâmetro final = 0,819 mm	75
Tabela 5.8	- Força de trefilação x velocidade Lubrificante 1 - Diâmetro final = 0,819 mm	75
Tabela 5.9	- Força de trefilação x velocidade Lubrificante 2 - Diâmetro final = 0,742 mm	75
Tabela 5.10	- Força de trefilação x velocidade Lubrificante 1 - Diâmetro final = 0,742 mm	76
Tabela 5.11	- Coeficiente de atrito x velocidade (sem lubrificante) - Diâmetro final = 0,905 mm	76
Tabela 5.12	- Coeficiente de atrito x velocidade Lubrificante 2 - Diâmetro final = 0,905 mm	76

Tabela 5.13	- Coeficiente de atrito x velocidade Lubrificante 1 - Diâmetro final = 0,905 mm	77
Tabela 5.14	- Coeficiente de atrito x velocidade Lubrificante 2 - Diâmetro final = 0,819 mm	77
Tabela 5.15	- Coeficiente de atrito x velocidade Lubrificante 1 - Diâmetro final = 0,819 mm	77
Tabela 5.16	- Coeficiente de atrito x velocidade Lubrificante 2 - Diâmetro final = 0,742 mm	78
Tabela 5.17	- Coeficiente de atrito x velocidade Lubrificante 1 - Diâmetro final = 0,742 mm	78
Tabela 5.18	- Velocidades teóricas do regime de lubrificação mista - lubrificante 1	84
Tabela 5.19	- Velocidades teóricas de ocorrência dos regimes misto e hidrodinâmico - lubrificante 2	84

A.4 - ÍNDICE DOS GRÁFICOS

O primeiro número se refere ao capítulo e o segundo se refere à posição do gráfico dentro do capítulo.

Gráfico 5.1	- Força de trefilação x velocidade (sem lubrificante) - Diâmetro final = 0,905 mm	78
Gráfico 5.2	- Força de trefilação x velocidade Lubrificante 2 - Diâmetro final = 0,905 mm	79
Gráfico 5.3	- Força de trefilação x velocidade Lubrificante 1 - Diâmetro final = 0,905 mm	79
Gráfico 5.4	- Força de trefilação x velocidade Lubrificante 2 - Diâmetro final = 0,819 mm	79
Gráfico 5.5	- Força de trefilação x velocidade Lubrificante 1 - Diâmetro final = 0,819 mm	80
Gráfico 5.6	- Força de trefilação x velocidade Lubrificante 2 - Diâmetro final = 0,742 mm	80
Gráfico 5.7	- Força de trefilação x velocidade Lubrificante 1 - Diâmetro final = 0,742 mm	80
Gráfico 5.8	- Coeficiente de atrito x velocidade (sem lubrificante) - Diâmetro final = 0,905 mm	81
Gráfico 5.9	- Coeficiente de atrito x velocidade Lubrificante 2 - Diâmetro final = 0,905 mm	81
Gráfico 5.10	- Coeficiente de atrito x velocidade Lubrificante 1 - Diâmetro final = 0,905 mm	82
Gráfico 5.11	- Coeficiente de atrito x velocidade Lubrificante 2 - Diâmetro final = 0,819 mm	82
Gráfico 5.12	- Coeficiente de atrito x velocidade Lubrificante 1 - Diâmetro final = 0,819 mm	82
Gráfico 5.13	- Coeficiente de atrito x velocidade Lubrificante 2 - Diâmetro final = 0,742 mm	83
Gráfico 5.14	- Coeficiente de atrito x velocidade Lubrificante 1 - Diâmetro final = 0,742 mm	83