

INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE TRABALHO
NA TENSÃO DE TREFILAÇÃO DE FIOS FINOS DE COBRE

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

À memória de meu pai PAULO LOUREIRO,
a minha mãe ZIZA,
aos meus irmãos PINON e MARY,
a minha esposa VITÓRIA e
ao meu filho PETRONIO.

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

INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE TRABALHO
NA TENSÃO DE TREFILAÇÃO DE FIOS FINOS DE COBRE

PETRONIO MEDEIROS LIMA

TRABALHO APRESENTADO À COMISSÃO DE PÓS-
-GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE ENGENHARIA
DE CAMPINAS, COMO PARTE DOS REQUISITOS
PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM
ENGENHARIA MECÂNICA.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. ETTORE BRESCIANI FILHO pela orientação e apoio constante.

Ao Prof. CELSO AUGUSTO COELHO, chefe do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará, por haver consentido no meu afastamento para cursar o mestrado em Engenharia Mecânica.

A Prof^a CECÍLIA A.C. ZAVÁGLIA e ao Prof. FERNANDO A. NERY pelo acompanhamento e incentivo.

Ao Prof. RICARDO ENRIQUE MEDRANO por permitir a utilização da máquina de ensaios de tração.

Aos engenheiros SÉRGIO ZARPELLON, AUGUSTO CESAR OLIVEIRA, JOÃO PLAZA, JOÃO MAURÍCIO, AUGUSTO RUI, VIRGÍLIO C. SILVA, ANTONIO GUIDETTI e SÉRGIO BOTTON pelas informações prestadas.

Ao Sr. ANTÔNIO DONADON, pelos serviços fotográficos, Srta. ENEIDA DE ALMEIDA MENDONÇA, pelos trabalhos de datilogria, Srta. TAMARA PEREIRA DE SOUZA, pela confecção dos desenhos e aos Srs. ANTONIO LAERTE STRUZIATO, LAERCIO FREGATTI, ELCIO CARDOSO, PAULO MOURA pelos trabalhos de oficina.

A TELECOMUNICAÇÕES BRASILEIRAS S.A. - TELEBRÁS (PROGRAMA TELEBRÁS/MGE/UNICAMP), por permitir a realização das experiências em seus laboratórios.

E finalmente, a todos aqueles que direta, ou indiretamente, colaboraram com a realização deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho teve como principal objetivo o estudo comparativo entre as tensões de trefilação obtidas experimentalmente e as tensões obtidas através dos modelos teóricos em função da velocidade de trefilação. Inicialmente foi feita uma revisão bibliográfica extensiva dos principais modelos teóricos de determinação da tensão de trefilação. Em seguida foi projetado e construído um dispositivo de medição de tensões de trefilação. Com o uso desse dispositivo foram levantados dados experimentais em função da velocidade de trefilação. Os resultados obtidos foram analisados comparativamente com as previsões teóricas dos modelos adotados em função do coeficiente de atrito, trabalho redundante e dos dados do limite de escoamento e coeficiente de encruamento obtidos do ensaio de tração, de modo a se verificar o distanciamento teórico-experimental.

ABSTRACT

The present work had as its main objective a comparative study of experimental drawing stresses and those predicted from theoretical models, as a function of drawing speed. At first, an extensive bibliographical review was made of the principal theoretical models for determination of drawing stresses. Afterwards, an apparatus for measuring drawing stresses was designed and built. The experimental results obtained were then compared with those expected from theoretical models as a function of the friction coefficient, the redundant work and the data concerning yield limit and strain hardening coefficient, obtained from tensile test, so as to check for the distance between theory and experiment.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS DO TRABALHO	1
1.2. JUSTIFICATIVAS DO TRABALHO	2
1.3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	7
 CAPÍTULO 2 - MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE TENSÕES DE TREFILAÇÃO	 8
2.1. PRINCÍPIOS DO PROCESSO	8
2.2. ANÁLISE DOS MÉTODOS	10
2.2.1. Considerações Gerais	10
2.2.2. Método da Energia Uniforme	16
a - Modelo de Pomp, Siebel e Houdremont	20
b - Modelo de Sachs e Van Horn	21
c - Modelo de Siebel	21
2.2.3. Método da Divisão em Elementos	21
a - Modelo de Sachs	28
b - Modelo de Korber e Eichinger	28
c - Modelo de Davis e Dokos	29
d - Modelo de Whitton	29
e - Modelo de Yang	29
f - Modelo de Trozera	30

2.2.4. Método do Limite Superior	31
a - Modelo de Avitzur	33
2.3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
CAPÍTULO 3 - ANÁLISE DOS FATORES DE INFLUÊNCIA NA	
TENSÃO DE TREFILAÇÃO	46
3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	46
3.2. INFLUÊNCIA DO TRABALHO REDUNDANTE	48
3.3. INFLUÊNCIA DO ENCRUAMENTO	55
3.4. INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE TREFILAÇÃO	63
3.5. INFLUÊNCIA DO ATRITO	70
3.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
CAPÍTULO 4 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	
4.1. MATERIAIS	84
4.1.1. Matéria Prima	84
4.1.2. Lubrificantes	84
4.1.3. Fieiras	86
4.1.4. Apontamentos dos Fios	86
4.2. EQUIPAMENTOS	87
4.2.1. Máquina Trefiladora de Laboratório	87
4.2.2. Dispositivo de Medição de Forças	90
a - Considerações Gerais	90
b - Características da Haste Flexível	92
c - Características dos Extensômetros Elétricos	95
d - Aferição do Dispositivo	99
e - Funcionamento do Dispositivo	109
4.2.3. Ponte Amplificadora e Multímetro Digital	109
4.2.4. Tacômetro	109
4.2.5. Equipamento para Ensaios de Tração	109

4.3. DESCRIÇÃO DAS EXPERIÊNCIAS	112
4.4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116
 CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	117
5.1. RESULTADOS DAS TENSÕES DE TREFILAÇÃO	117
5.1.1. Resultados Obtidos Experimentalmente	117
5.1.2. Resultados Obtidos dos Diferentes Modelos Teóricos	117
5.1.3. Resumo dos Resultados Experimentais e Calculados	132
5.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO, APÓS AS TREFILAÇÕES	140
5.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	146
5.3.1. Dispositivo de Medição de Forças	146
5.3.2. Comparação das Tensões de Trefilação Experimentais e Calculadas	147
5.3.3. Propriedades Mecânicas dos Fios	149
5.4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	151
 CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES	153
 BIBLIOGRAFIA REFERIDA	155
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA MAS NÃO REFERIDA	161
 APÊNDICES	162
A1.- SIMBOLOGIA	163
A2 - ÍNDICE DE FIGURAS	167
A3 - ÍNDICE DE TABELAS	172

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. OBJETIVOS DO TRABALHO

Os principais objetivos do trabalho são:

(a) Estudo dos modelos teóricos de determinação de tensões de trefilação.

(b) Determinação experimental da tensão de trefilação em função da velocidade.

(c) Comparação dos resultados experimentais com as previsões teóricas dos modelos adotados em função do coeficiente de atrito, trabalho redundante e dos dados do limite de escoamento e coeficiente de encruamento obtidos do ensaio de tração.

1.2. JUSTIFICATIVAS DO TRABALHO

Para o estudo do processo de trefilação é de fundamental importância a medição da tensão de trefilação que provoca a deformação plástica do fio; ela permite que se faça o acompanhamento do processo e também que se desenvolva o conhecimento dos fatores que atuam na trefilação. Com isso pode-se estabelecer um maior controle sobre a estrutura do metal e, conseqüentemente, sobre os defeitos e propriedades dos fios obtidas⁽¹⁾.

Além disso, é de grande importância, no processo de trefilação, o conhecimento da velocidade de trefilação por ser esse parâmetro um fator de influência na tensão de trefilação⁽²⁾, e na estrutura do material do fio.

O primeiro trabalho de determinação de tensão de trefilação de que se tem notícia é o de LEWIS⁽³⁾ que foi divulgado em 1915. Desde então tem-se tratado, em forma contínua, de se estabelecer uma relação entre a tensão de trefilação e as variáveis do processo, tais como: redução de área, ângulo da fieira, atrito entre o fio e a fieira e propriedades mecânicas do fio.

De um modo geral é comumente aceito na literatura⁽⁴⁾ que os métodos utilizados para a determinação da tensão de trefilação devem considerar três componentes de energia, associadas a:

(a) energia uniforme do fio, como se o mesmo fosse deformado sob tração pura;

(b) energia necessária para vencer o atrito na superfície de contato fio-fieira;

(c) energia redundante, definida como a energia gasta na deformação interna no metal, e que não contribui à mudança de dimensões.

A componente devido a energia uniforme depende exclusivamente da redução de área, independente do ângulo da fieira. A tensão necessária para vencer o atrito decresce com o ângulo da fieira, aumentando porém à medida que o coeficiente de atrito e redução de área crescem. A energia redundante cresce à medida que o ângulo da fieira cresce e a redução decresce, sendo porém praticamente independente do coeficiente de atrito. A Figura 1.1 ilustra as dependências acima mencionadas.

Alguns fatores muitas vezes não são considerados nos métodos de determinação da tensão de trefilação, tais como: o encruamento do material, variação do coeficiente de atrito, trabalho redundante e região cilíndrica da fieira.

Portanto, as soluções propostas predizem valores aproximados, para menos ou para mais, dependendo da formulação do modelo físico-matemático adotado em cada método.

Vários pesquisadores, conforme referido no Capítulo 2, desenvolveram modelos teóricos para a determinação da tensão de trefilação introduzindo fatores de correção, algumas vezes obtidos por experiências, para compensar as limitações do modelo físico-matemático adotado. Foi observado que esses modelos foram desenvolvidos através de experiências em que não consideram a influência da velocidade de trefilação.

Observou-se também que a maioria dos modelos teóricos consideram o limite de escoamento médio como constante e o coefici-

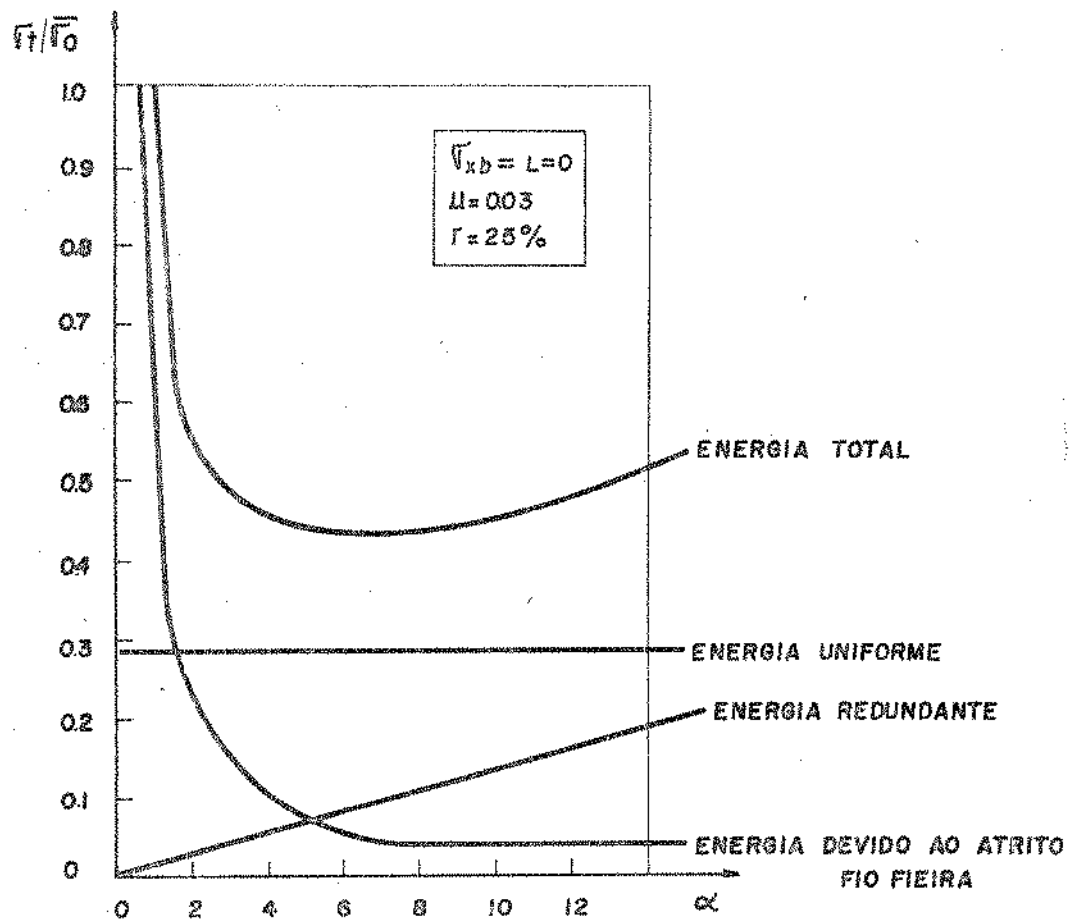


Figura 1.1 - Dependência das energias envolvidas no processo de trefilação com o ângulo da fieira e a redução de área⁽⁵⁾.

ente de atrito estimado de acordo com a literatura⁽⁶⁾, para cada caso considerado.

Baseado nesses fatos, nos modelos teóricos adotados neste trabalho, foram considerados dois fatores:

(a) limite de escoamento variável para cada redução de área e, conseqüentemente, a variação do coeficiente de encruamento, obtidos no ensaio de tração;

(b) coeficiente de atrito estimado segundo a literatura e calculado através de dados experimentais.

Assim sendo, neste trabalho foi projetado e construído um dispositivo de medição de forças, que permitiu o levantamento de dados experimentais. Os resultados obtidos foram analisados com parativamente com as previsões teóricas dos modelos adotados, de modo a se verificar o distanciamento teórico-experimental em função das alterações introduzidas nos modelos adotados.

No segundo capítulo é feita a análise sucinta dos métodos usados para determinação da tensão de trefilação bem como toda a formulação matemática para a sua compreensão. Em seguida são analisados os modelos obtidos por vários pesquisadores, decorrentes de cada método.

No terceiro capítulo, faz-se a análise dos fatores que influenciam a tensão de trefilação. São destacados como tais, a velocidade de trefilação, o trabalho redundante, o encruamento e o atrito entre o fio e a fieira.

O quarto capítulo apresenta o procedimento experimental adotado.

No capítulo seguinte é feita a apresentação dos resultados obtidos e suas discussões.

O último capítulo é dedicado às conclusões dos resultados obtidos.

1.3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) LEIDER, A.; GRABNER, J. - Measurement of Drawing Stress in the Manufacture of Wire, Wire World International, Vol. 16, 1972, pp. 63-67.
- (2) TARNAVSKII, A.L. - Elements of the Theory and Practice of High - Speed Drawing, Stal', Vol. 6, 1974, pp. 562-565.
- (3) LEWIS, K.B. - Blast Furnace and Steel Plant, Vol. 3, 1975, p. 1031.
- (4) AVITZUR, B. - Metal Forming: Processes and Analyses, McGraw-Hill, New York, 1968, p. 63.
- (5) Idem, ibidem ref. (4), p. 163.
- (6) WISTREICH, J.G. - Investigation of the Mechanics of Wire Drawing, Proc. Inst. Mech. Eng., Vol. 169, 1955, pp. 654-665.

CAPÍTULO 2

MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE TENSÕES DE TREFILAÇÃO

2.1. PRINCÍPIOS DO PROCESSO⁽¹⁻⁶⁾

O processo de trefilação é aquele na qual o fio metálico é deformado plasticamente ao passar através de uma ferramenta, denominada fieira, quando tracionado axialmente. O fio, ao passar através da fieira, que contém o perfil do produto desejado, tem seu diâmetro reduzido e seu comprimento aumentado. São partes do perfil de uma fieira, o ângulo de entrada, o cone de entrada que direciona o fio, o cone de trabalho onde o fio é deformado, a zona cilíndrica ou cilindro de calibração, o cone de saída cuja finalidade é facilitar a saída do fio e o ângulo de saída. A Figura 2.1 ilustra esquematicamente o processo de trefilação.

A passagem do fio através de uma única fieira para obtenção de um produto desejado constitui um passe de trefilação. A obtenção de um fio com forma, dimensões e propriedades mecânicas controladas pode requerer um número de passes superior a um.

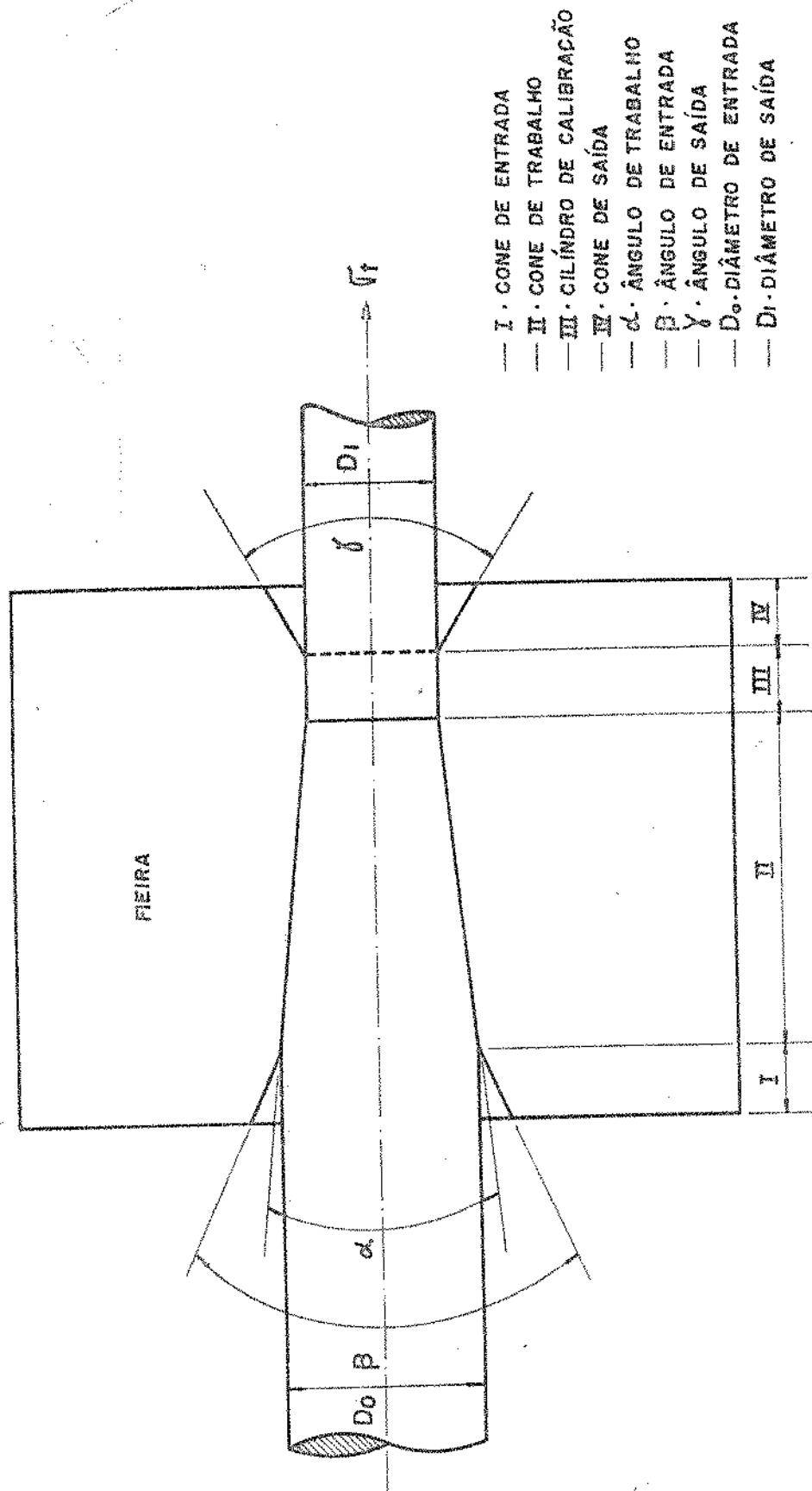


Figura 2.1 - Ilustração esquemática do processo de trefilação.

O processo de trefilação é um processo de conformação mecânica sob condições de trabalho a frio para a maioria dos metais e ligas metálicas. A distinção entre a deformação a frio e a quente não está somente na temperatura, mas na relação entre a temperatura do processo e de recristalização. A deformação a frio é efetuada abaixo da temperatura de recristalização enquanto que a deformação a quente é realizada acima da temperatura de recristalização. De uma maneira aproximada pode-se afirmar que essa temperatura de recristalização é inferior a metade da temperatura de fusão do metal.

O processo de trefilação de um modo geral inicia-se à temperatura ambiente, com uma evolução dessa temperatura para valores mais altos devido ao calor de deformação desenvolvido no processo. Contudo, a condição de trabalho a frio é mantida para a maioria dos metais, verificando a ocorrência de endurecimento do metal (encruamento).

2.2. ANÁLISE DOS MÉTODOS

2.2.1. Considerações Gerais⁽⁷⁻¹⁰⁾

As experiências têm demonstrado que de um modo geral os materiais sólidos cristalinos podem ser deformados quando solicitados por forças aplicadas externamente. Tem sido verificado ainda que até um certo valor limite para a força aplicada, esses materiais recuperam suas dimensões originais quando a força aplicada é removida. Este fenômeno é chamado de comportamento elástico. No entanto quando a força aplicada excede aquele valor limite, os sólidos cristalinos sofrem uma deformação com caracte-

rísticas diferentes da anterior. Elas não mais recuperam suas dimensões originais pela retirada do agente deformador. Diz-se então que eles sofreram uma deformação plástica. O comportamento dos materiais nesse estado de deformação não é mais regido pela lei de Hooke, expressa pela seguinte relação:

$$\epsilon = \sigma/E$$

A descrição matemática da deformação plástica ainda não está muito bem desenvolvida como da deformação elástica, através da teoria da elasticidade. Isto é devido ao fato de não existir uma relação linear entre tensões e deformações que descreve o comportamento do sólido como a lei de Hooke na teoria da elasticidade.

A curva de escoamento, ou curva tensão-deformação verdadeira, é a utilizada quando se estuda a plasticidade de um material. Várias tentativas foram feitas para expressar a curva de escoamento matematicamente. A expressão mais usada é a seguinte:

$$\sigma = K \epsilon^n \quad (2.1)$$

onde:

K = coeficiente de resistência

n = expoente de encruamento

No processo de trefilação, onde o fio sofre continuamente uma grande deformação plástica a teoria da plasticidade tem sido aplicada com sucesso. Para o estabelecimento do modelo teórico de deformação são introduzidas certas hipóteses simplificadoras

pela adoção de uma particular idealização do material, que permitem soluções completas para a tensão de trefilação, cuja análise por outros meios seria difícil de se estabelecer.

As equações são deduzidas considerando-se algumas hipóteses simplificadoras da teoria da plasticidade para facilitar o estudo:

(a) o material é considerado contínuo, uniforme, isotrópico e incompressível, isto é, sofre deformação a volume constante:

(b) a deformação elástica é desprezada, pois é muito menor que a deformação plástica, na maioria dos casos;

(c) não são considerados os fenômenos estruturais que dão origem a modificações nas propriedades mecânicas dos metais durante sua deformação ou eventual aquecimento subsequente, tais como, o encruamento e o recozimento.

Na trefilação de fios de seção circular aparece uma tensão axial no fio (Fig. 2.1), produzindo uma tensão de tração, e uma tensão de compressão na fieira. Não se pode prever, imediatamente, sob qual carga o escoamento, no interior da fieira, se inicia. O escoamento depende da combinação de todas as tensões envolvidas ou seja, das tensões principais (σ_1 , σ_2 e σ_3) e poderá ser predito, apenas se houver uma relação entre elas. Vários critérios foram propostos para o escoamento, sendo os mais importantes os critérios de Tresca (1865) ou critério da máxima tensão de cisalhamento e de von Mises (1918) ou critério da máxima energia armazenada num corpo.

O critério da máxima tensão de cisalhamento pode ser analisado no círculo de Mohr: o escoamento inicia quando a maior tensão de cisalhamento τ atingir um valor crítico. A maior tensão de cisalhamento $\tau_{\text{máx}}$ é a metade do diâmetro do círculo de Mohr (Fig. 2.2), ou seja:

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (2.2)$$

ou

$$2 \tau_{\text{máx}} = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_v \quad (2.3)$$

quando ocorrer escoamento $\sigma_v = K$ onde, K = resistência ao escoamento.

As tensões normais principais $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ são ordenadas de tal maneira que:

$\sigma < 0$ para tensão de compressão

$\sigma > 0$ para tensão de tração

e suas grandezas:

$$\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3$$

Assim, pela teoria da máxima tensão de cisalhamento, a tensão principal mediana σ_2 , não tem nenhum significado.

A teoria da máxima energia armazenada num corpo (von Mises) considera todas as três tensões σ_1, σ_2 e σ_3 de modo que:

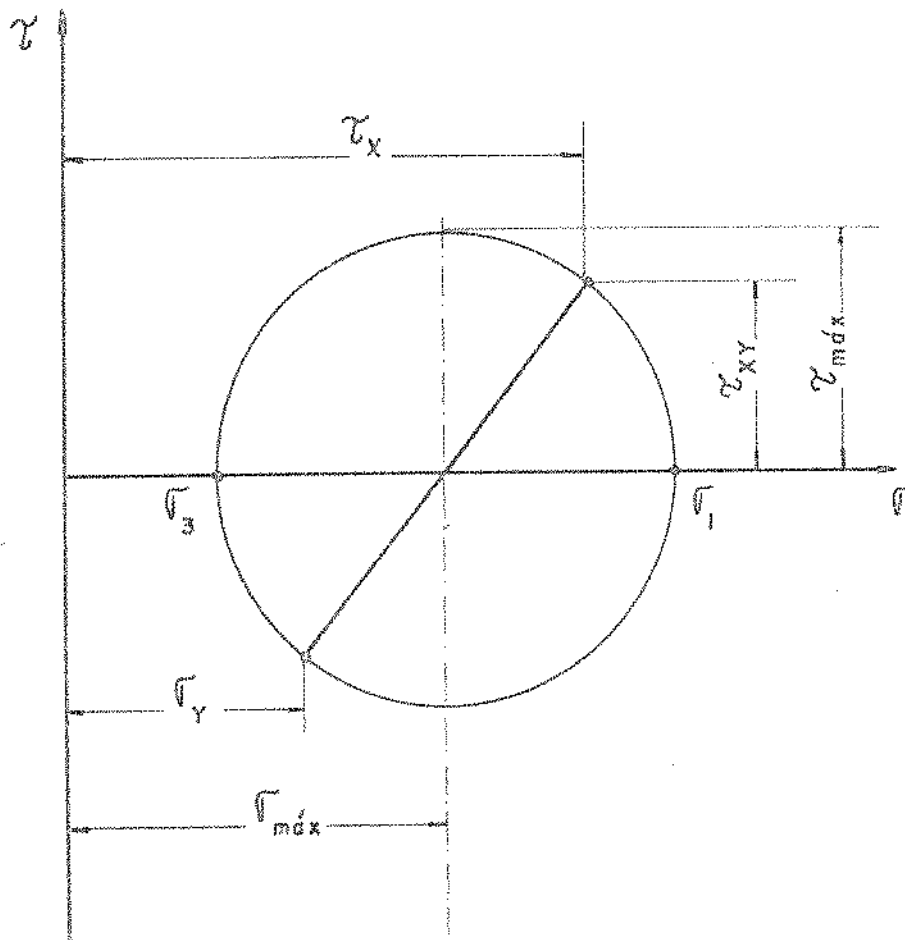


Figura 2.2 - Representação do estado de tensões através do círculo de Mohr.

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{6} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]} \quad (2.4)$$

ocorrendo o escoamento quando σ_v for igual ao valor de K obtido num estado uniaxial de tensões.

Os métodos de análise usados neste trabalho para a determinação da tensão de trefilação podem ser classificados em:

- Método da Energia Uniforme.
- Método da Divisão em Elementos.
- Método do Limite Superior.

De um modo geral esses métodos devem considerar três componentes de energia, associados a:

- (a) energia uniforme do fio;
- (b) energia necessária para vencer o atrito na superfície de contato fio-fieira;
- (c) energia redundante.

A seguir serão descritas as principais soluções obtidas para a tensão de trefilação, dentro dos métodos citados, e analisadas as hipóteses assumidas no seu desenvolvimento, sua formulação matemática e a correção desses métodos por diversos pesquisadores.

A simbologia adotada no desenvolvimento das equações é apresentada no Apêndice.

2.2.2. Método da Energia Uniforme⁽¹¹⁻¹²⁾

O método da energia uniforme supõe que a deformação é uniforme em todo o campo analisado, ou seja, se baseia na determinação do trabalho das forças internas envolvidas no processo. Assim, a energia de deformação é função de estados iniciais e final de deformação.

No desenvolvimento desse método as hipóteses simplificadoras são as seguintes:

(a) não considera o trabalho de atrito entre o fio e a fieira;

(b) não considera o trabalho redundante;

(c) não considera a região cilíndrica da fieira.

Na região cônica da fieira (Fig. 2.3a), onde ocorre a deformação plástica do fio, as tensões principais (Fig. 2.3b) tem os seguintes valores:

$$\sigma_1 = \sigma_0, \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

onde σ_0 é o limite de escoamento instantâneo para a deformação ϵ , correspondente à secção transversal A e do comprimento ℓ .

O incremento de trabalho realizado para deformar o fio de um comprimento $d\ell$ (Fig. 2.4a) é definida por:

$$dW = (\sigma_0 A) d\ell \quad (2.5)$$

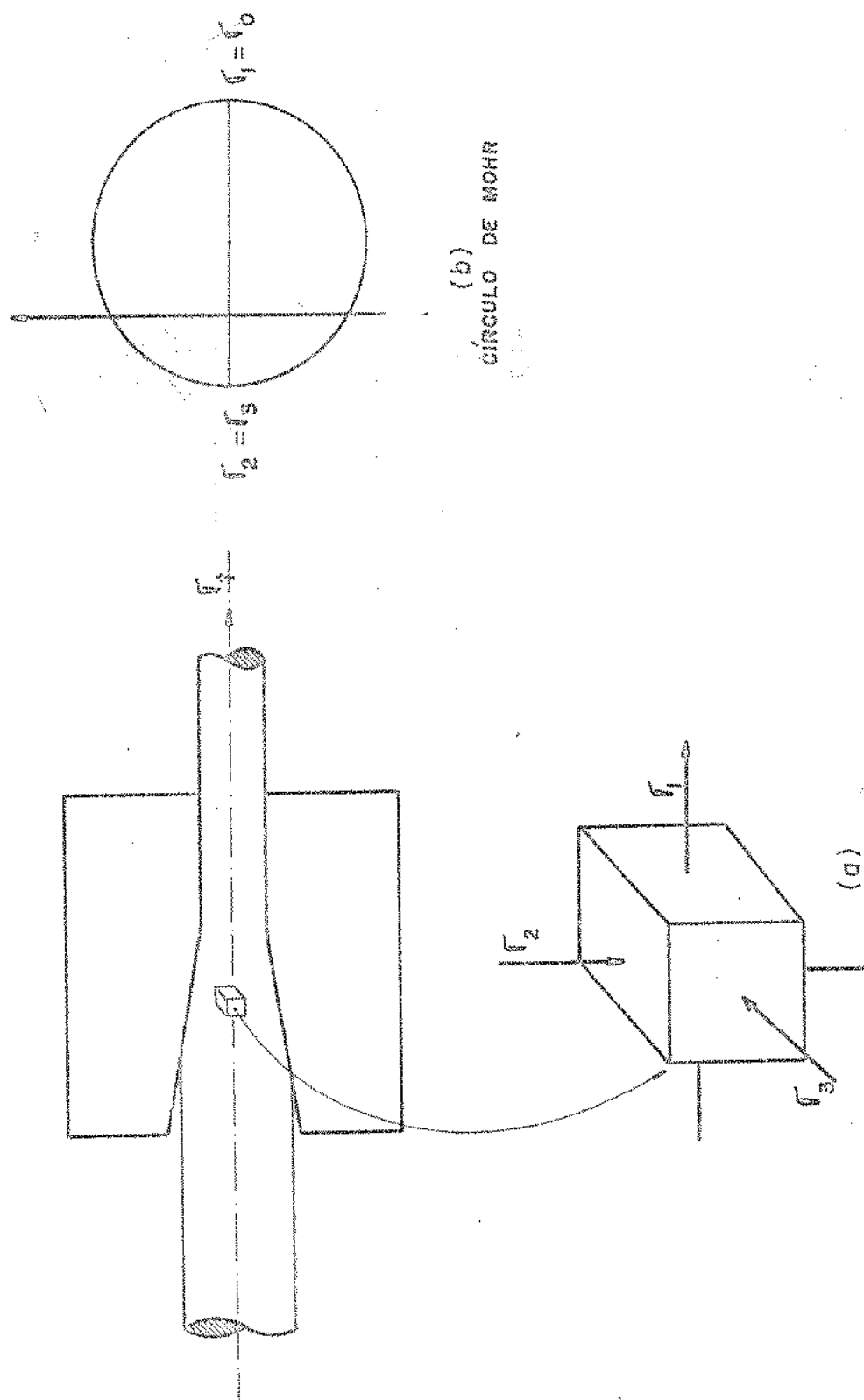


Figura 2.3 - Tensões principais para um ponto qualquer no processo de trefilação.

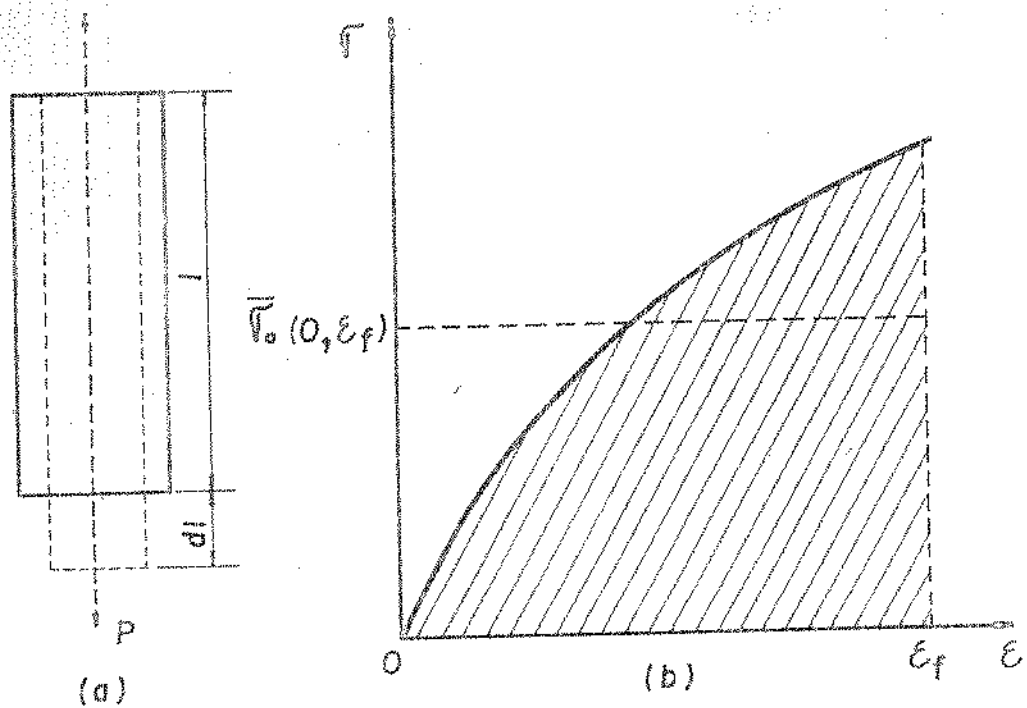


Figura 2.4 - Curva tensão-deformação verdadeira para o ensaio de tração.

O incremento de trabalho por unidade de volume será então:

$$\frac{dW}{V} = \frac{dW}{A \cdot l} = \sigma_0 \frac{dl}{l} \quad (2.6)$$

Integrando-se (2.6) entre os limites l_0 e l_1 , tem-se:

$$\frac{W}{V} = \int_{l_0}^{l_1} \sigma_0 \frac{dl}{l} = \int_{\epsilon_0}^{\epsilon_1} \sigma_0 d\epsilon \quad (2.7)$$

Da expressão acima se deduz que o trabalho realizado numa deformação homogênea do fio, por unidade de volume, é igual a área sob a curva tensão-deformação verdadeira para o ensaio de tração entre os valores de deformação correspondente (Fig. 2.4b).

Supondo um limite de escoamento médio $\bar{\sigma}_0$, então a equação do trabalho por unidade de volume (Eq. 2.7) pode ser determinada diretamente da variação das dimensões:

$$W = V \bar{\sigma}_0 \ln \frac{l_1}{l_0} \quad (2.8)$$

A força de trefilação é dada pela equação de trabalho:

$$W = F_t \cdot l_1 \quad (2.9)$$

Substituindo a equação (2.8) em (2.9), a força de trefilação após um rearranjo e algumas simplificações assume a seguinte forma:

$$F_t = A_1 \bar{\sigma}_0 \ln A_0/A_1 \quad (2.10)$$

Considerando a redução de área r como:

$$r = \frac{A_0 - A_1}{A_0} = 1 - \frac{A_1}{A_0} \therefore \frac{A_1}{A_0} = 1 - r \quad (2.11)$$

então, a força de trefilação torna-se:

$$F_t = A_1 \bar{\sigma}_0 \ln \frac{1}{1 - r} \quad (2.12)$$

Conseqüentemente a tensão de trefilação é dada por:

$$\sigma_t = \frac{F_t}{A_1} = \bar{\sigma}_0 \ln \frac{A_0}{A_1} \quad (2.13)$$

ou

$$\sigma_t = \bar{\sigma}_0 \ln \frac{1}{1 - r} \quad (2.14)$$

Desse método surgiram os seguintes modelos⁽¹³⁾:

a - Modelo de POMP, SIEBEL e HOUDREMONT⁽¹⁴⁾

POMP, SIEBEL e HOUDREMONT⁽¹⁴⁾, em 1929, estudaram a tensão de trefilação, considerando o atrito entre fio e fieira e o semi-ângulo da fieira, resultando na seguinte equação:

$$\sigma_t = \bar{\sigma}_0 \ln \frac{A_0}{A_1} + \frac{\mu}{\alpha} \bar{\sigma}_0 \ln \frac{A_0}{A_1} \quad (2.15)$$

onde:

μ = coeficiente de atrito;

α = semi-ângulo da fieira.

b - Modelo de SACHS e VAN HORN⁽¹⁵⁾

SACHS e VAN HORN⁽¹⁵⁾, muitos anos mais tarde, em 1940, desenvolveram uma equação baseada nos mesmos estudos de POMP, SIEBEL e HOUDREMONT⁽¹⁴⁾, cuja solução é dada por:

$$\sigma_t = \bar{\sigma}_0 \ln \frac{A_0}{A_1} + B \bar{\sigma}_0 \ln \frac{A_0}{A_1} \quad (2.16)$$

onde:

$$B = \mu \cdot \cot \alpha$$

c - Modelo de SIEBEL⁽¹⁶⁾

SIEBEL⁽¹⁶⁾, em 1947, partindo também da solução de POMP, SIEBEL e HOUDREMONT⁽¹⁴⁾ e considerando o trabalho redundante estudado por KORBER e EICHINGER⁽²²⁾ chegou a uma equação de forma:

$$\sigma_t = \bar{\sigma}_0 \ln \frac{A_0}{A_1} + \frac{\mu}{\alpha} \bar{\sigma}_0 \ln \frac{A_0}{A_1} + \frac{2}{3} \bar{\sigma}_0 \alpha \quad (2.17)$$

onde $\frac{2}{3} \bar{\sigma}_0 \alpha$ é o termo correspondente a influência do trabalho redundante.

2.2.3. Método da Divisão em Elementos⁽¹⁸⁻¹⁹⁾

O método da divisão em elementos baseia-se no equilíbrio das forças de um elemento na zona do fio que está sendo deformado segundo uma direção coincidente com o eixo de simetria do fio, como mostra a Figura 2.5.

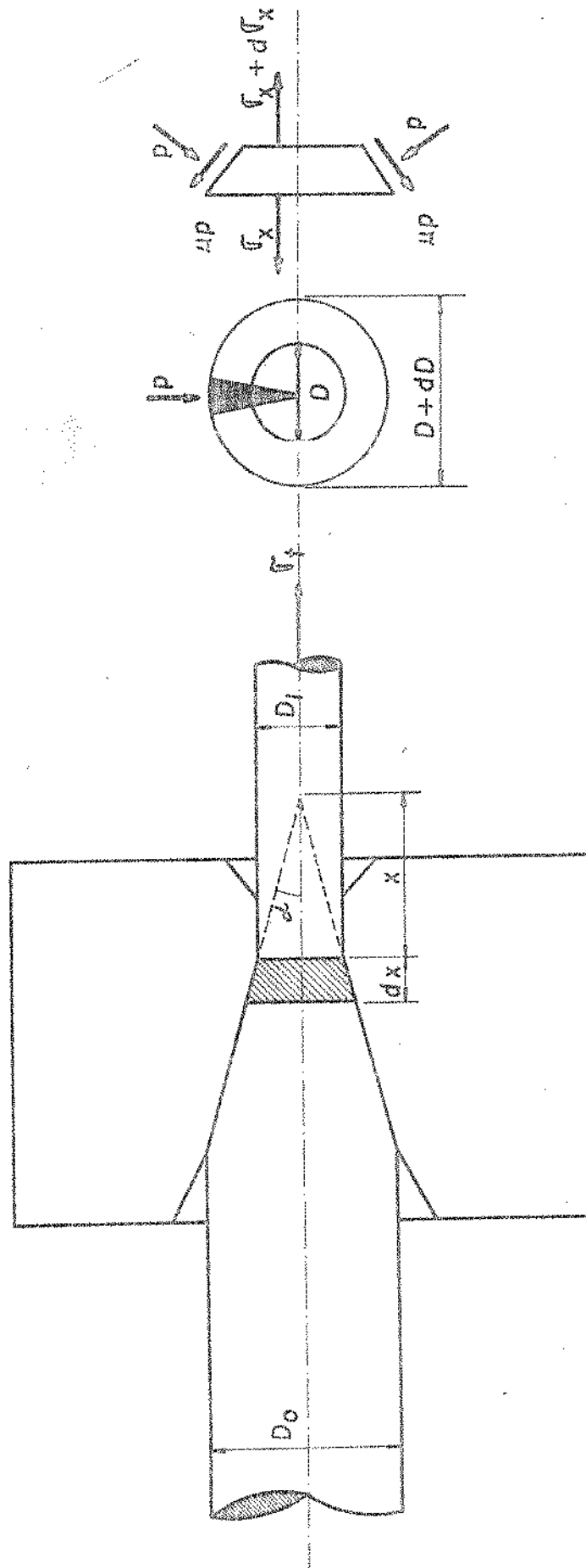


Figura 2.5 - Ilustração do método da divisão em elementos (20).

As principais hipóteses simplificadoras nesse método são:

- (a) considera o trabalho de deformação uniforme;
- (b) considera o trabalho de atrito;
- (c) não considera o trabalho redundante.

Para o cálculo da tensão de trefilação, inicialmente é isolado um elemento infinitesimal do fio dentro da zona de deformação, como indicado na Figura 2.5; nessa região são consideradas três forças cujas componentes atuam na direção longitudinal:

- (a) força devido a variação da tensão longitudinal σ_x :

$$(\sigma_x + d\sigma_x) \frac{\pi}{4} (D + dD)^2 - \sigma_x \frac{\pi}{4} D^2 \quad (2.18)$$

- (b) força devido a pressão (p) aplicada pela fiação:

$$p \left(\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \sin \alpha \quad (2.19)$$

- (c) força devido ao atrito

$$\mu p \left(\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \cos \alpha \quad (2.20)$$

É estabelecido sobre o elemento infinitesimal o equilíbrio estático das expressões (2.18), (2.19) e (2.20) na direção longitudinal e desprezando-se os produtos infinitesimais, tem-se que:

$$\frac{\sigma_x D dD}{2} + \frac{D^2 d\sigma_x}{4} + p D dx \operatorname{tg} \alpha + \mu p D dx = 0 \quad (2.21)$$

Se duas tensões principais são iguais o sistema é equivalente a uma tensão uniaxial combinada com uma tensão hidrostática, de modo que a deformação permanente seja σ_0 .

Os dois critérios de escoamento devem conduzir a esse resultado:

(a) critério de von Mises:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2 \sigma_0^2$$

$$2 (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 2 \sigma_0^2$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_0$$

(b) critério de Tresca:

$$\frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{1}{2} \sigma_0$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_0$$

Portanto,

$$\sigma_x + p = \sigma_0 \quad (2.28)$$

Substituindo (2.28) na expressão (2.23) tem-se:

$$\frac{d\sigma_x}{B \sigma_x - \sigma_0 (1+B)} = 2 \frac{dD}{D} \quad (2.29)$$

com $B = \mu \cot \alpha$.

A equação diferencial (2.29) pode ser integrada diretamente se B for constante e adotar um valor médio para o limite de escoamento $\bar{\sigma}_0$ tem-se:

$$\frac{1}{B} \ln \left[B \sigma_x - \bar{\sigma}_0 (1 + B) \right] = 2 \ln D + C \quad (2.30)$$

$$B \sigma_x - \bar{\sigma}_0 (1 + B) = C D^{2B} \quad (2.31)$$

A constante C de integração é determinada através das condições de contorno:

$$\sigma_x = \sigma_{x0} = 0 \quad \text{admitindo-se que não existe tensão longitudinal na entrada da fieira;}$$

$$D = D_0$$

portanto

$$C = - \frac{\bar{\sigma}_0 (1 + B)}{(D_0)^{2B}} \quad (2.32)$$

Substituindo (2.32) em (2.31).

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_0} = \frac{1 + B}{B} \left[1 - \left(\frac{D}{D_0} \right)^{2B} \right] \quad (2.33)$$

A tensão de trefilação σ_t é igual a σ_x para $x = x_1$, então:

$$\sigma_t = \bar{\sigma}_0 \left(\frac{1 + B}{B} \right) \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_0} \right)^{2B} \right] \quad (2.34)$$

Considerando a redução de área:

$$r = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_0^2) / \frac{\pi}{4} D_1^2 \quad (2.35)$$

$$r = 1 - \left(\frac{D_0}{D_1} \right)^2 \quad (2.36)$$

então:

$$\sigma_t = \bar{\sigma}_0 \left(\frac{1+B}{B} \right) \left(1 - (1-r)^B \right) \quad (2.37)$$

Considerando as condições de lubrificação perfeita, isto é:

$$\mu = 0 \text{ e } B = 0$$

tem-se:

$$\sigma_t = \bar{\sigma}_0 \ln \frac{A_0}{A_1} \quad (2.38)$$

ou

$$\sigma_t = \bar{\sigma}_0 \ln \frac{1}{1-r} \quad (2.39)$$

Observa-se que a equação (2.38) [ou (2.39)] é igual a obtida pelo método da energia uniforme, equação (2.13) [ou (2.14)], e isso comprova que o método da divisão em elementos não considera o trabalho redundante.

Desse método surgiram os seguintes modelos corrigidos:

a - Modelo de SACHS⁽²¹⁾

SACHS⁽²¹⁾, em 1928, considerou o atrito entre o fio e a fiação e chegou a uma solução para o cálculo da tensão de trefilação dado por:

$$\sigma_t = \bar{\sigma}_0 \left(\frac{1+B}{B} \right) \left[1 - \left(\frac{A_0}{A_1} \right)^{-B} \right] \quad (2.40)$$

onde:

$$B = \mu \cot \alpha.$$

Esse modelo não é somente o mais antigo como também o mais conhecido.

b - Modelo de KORBER e EICHINGER⁽²²⁾

KORBER e EICHINGER⁽²²⁾, muitos anos depois, em 1940, são os primeiros a considerar o efeito do trabalho redundante. Nas suas análises esse trabalho redundante é dado por:

$$\frac{4}{3\sqrt{3}} \bar{\sigma}_0 \alpha$$

Essa expressão é adicionada a equação de SACHS⁽²¹⁾ cuja equação é dada por:

$$\sigma_t = \bar{\sigma}_0 \left(\frac{1+B}{B} \right) \left[1 - \left(\frac{A_0}{A_1} \right)^{-B} \right] + \frac{4}{3\sqrt{3}} \bar{\sigma}_0 \alpha \quad (2.41)$$

onde:

$$B = \mu \cot \alpha.$$

c - Modelo de DAVIS e DOKOS⁽²³⁾

DAVIS e DOKOS⁽²³⁾, quatro anos depois, em 1944, além de considerar o trabalho redundante consideraram também o efeito do encruamento, resultando a seguinte equação:

$$\sigma_t = \sigma_0 \left(\frac{1+B}{B} \right) \left\{ \left[1 - \left(\frac{A_0}{A_1} \right)^{-B} \right] \left(1 - \frac{K}{(\sigma_0)^B} \right) + \frac{K}{\sigma_0} \ln \frac{A_0}{A_1} \right\} \quad (2.42)$$

onde:

K = coeficiente de encruamento da curva $\bar{\sigma} = \sigma_0 + K\bar{\epsilon}$

$B = \mu \cot \alpha$.

d - Modelo de WHITTON⁽²⁴⁾

WHITTON⁽²⁴⁾, em 1958, partindo também da solução de SACHS⁽²¹⁾, e considerando o trabalho redundante, chegou a seguinte equação:

$$\sigma_t = \bar{\sigma}_0 \left(\frac{1+B}{B} \right) \left[1 - \left(\frac{A_0}{A_1} \right)^{-B} \right] + \frac{2}{3} \bar{\sigma}_0 \alpha^2 \left(\frac{1-r}{r} \right) \quad (2.43)$$

onde:

$B = \mu \cot \alpha$.

e - Modelo de YANG⁽²⁵⁾

YANG⁽²⁵⁾, em 1961, determinou uma nova equação que difere muito pouco da análise de SACHS⁽²¹⁾ ao considerar a região cilíndrica da fieira:

$$\sigma_t = \bar{\sigma}_0 \left(\frac{G}{1-G} \right) \left[\left(\frac{A_0}{A_1} \right)^{1-G} - 1 \right] \quad (2.44)$$

onde:

$$G = (1 + \mu \cot \alpha) / (1 - \mu \cot \alpha)$$

f - Modelo de TROZERA⁽²⁶⁾

TROZERA⁽²⁶⁾, mais recentemente, em 1964, desenvolveu uma equação semelhante ao estudo de YANG⁽²⁵⁾, mas considerou o efeito do encruamento:

$$\sigma_t = H - (H + M) \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^{G-1} + M \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^{-D} + \frac{BG}{G-1} \ln \frac{A_1}{A_0} \quad (2.45)$$

onde:

$$M = \frac{CG}{[G-1 + D]}$$

$$H = \frac{AG}{G-1} - \frac{BG}{(G-1)^2}$$

$$G = (1 + \mu \cot \alpha) / (1 - \cot \alpha)$$

A, B, C, D = constantes da curva característica do material expressa por:

$$\bar{\sigma} = A + B\bar{\epsilon} + C \exp. (D\bar{\epsilon}).$$

2.2.4. Método do Limite Superior⁽²⁷⁾

O método do limite superior baseia-se no teorema do limite superior, o qual estabelece uma aproximação por excesso da tensão de trefilação, ou seja, quando um corpo escoar, o trabalho das forças externas é menor ou igual ao trabalho das forças associadas a qualquer campo de velocidades cinematicamente admissível.

O procedimento para obter-se o limite superior da tensão de trefilação é o seguinte:

(a) estabelecer um campo de velocidades cinematicamente admissível para o corpo, que atenda as condições cinemáticas nos limites e se aproxima do escoamento real;

(b) determinar a potência interna ($\dot{W}_i$), correspondente ao campo de velocidades cinematicamente admissível. Essa potência interna é composta de duas parcelas: uma para pontos onde a velocidade é contínua, e a outra para os pontos de superfície de descontinuidades de velocidades;

(c) determinar a potência externa aplicada ($\dot{W}_e$);

(d) estabelecer a relação de desigualdade:

$$\dot{W}_e \leq \dot{W}_i$$

O teorema do limite superior, expressa a seguinte relação⁽²⁸⁾:

$$\dot{w}_e = \dot{w}_i = \dot{w}_u + \dot{w}_s \quad (2.46)$$

onde:

$\dot{w}_e$ = potência externa aplicada;

$\dot{w}_u$ = potência interna de deformação;

$\dot{w}_s$ = potência dissipada por atrito e por descontinuidade de velocidades,

sendo:

$$\dot{w}_e = \int_{S_i} T_i V_i dS \quad (2.47)$$

$$\dot{w}_u = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma}_0 \int_V \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij} \cdot \dot{\epsilon}_{ij}} dV \quad (2.48)$$

$$\dot{w}_s = \int_{S_r} \tau \Delta V dS \quad (2.49)$$

onde:

T_i = tensão aplicada no fio;

V_i = velocidade para cada elemento da superfície do fio;

dS = elemento de superfície;

$\bar{\sigma}_0$ = limite de escoamento do material do fio;

$\dot{\epsilon}_{ij}$ = componentes do tensor de velocidade de deformação;

dV = elemento de volume na zona deformada;

τ = componente da tensão de cisalhamento;

ΔV = descontinuidades de velocidades.

a - Modelo de AVITZUR⁽²⁹⁻³¹⁾

AVITZUR⁽²⁹⁻³¹⁾, em 1962, abordou o problema de determinação da tensão de trefilação empregando o método do limite superior.

Avitzur adotou as seguintes hipóteses simplificadoras:

(a) o material do fio é considerado como rígido-plástico, isotrópico, homogêneo e contínuo;

(b) o modelo da zona plástica é limitada pelas superfícies Γ_1 e Γ_2 na entrada e saída do fio na fieira e pela superfície cônica Γ_3 (Fig. 2.6);

(c) a fieira é considerada como um corpo rígido;

(d) o modelo do campo de velocidades cinematicamente admissível, é o esquematizado na Figura 2.7.

O fio é dividido em três zonas de velocidades contínuas:

(i) - zona I, onde o fio não está deformado, a velocidade é uniforme (V_i) e possui somente uma componente axial;

(ii) - zona II, onde o fio é deformado plasticamente; zona limitada pelas superfícies esféricas Γ_1 e Γ_2 e pela superfície cônica Γ_3 . Nessa zona o vetor velocidade é dirigida na direção do vértice O (Fig. 2.7) do cone da fieira de semi-ângulo α .

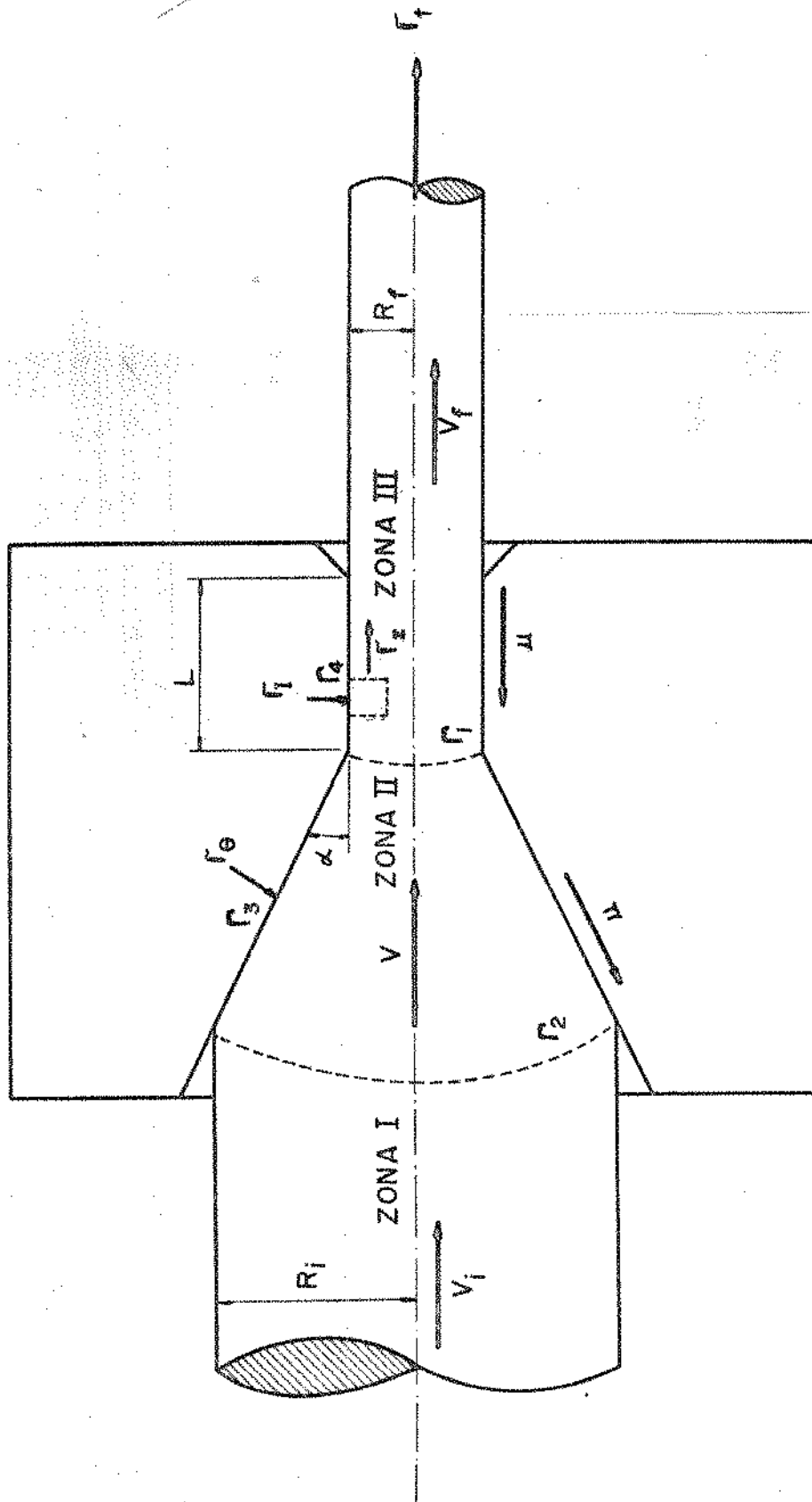


Figura 2.6 - Modelo da zona plástica adotado por AVITZUR para a trefilação⁽³¹⁾.

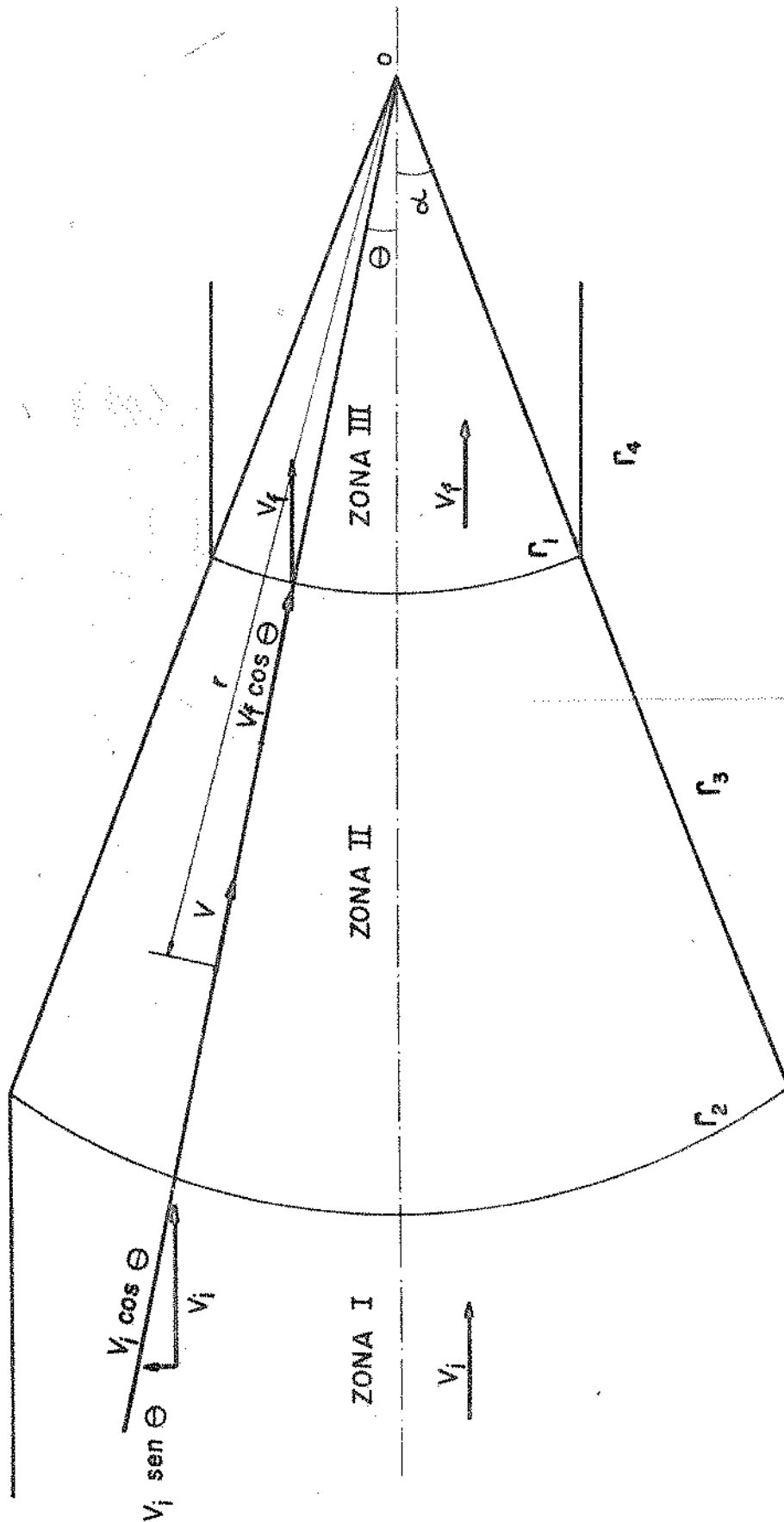


Figura 2.7 - Modelo do campo de velocidade cinematicamente admissível, adotado por AVITZUR⁽³¹⁾.

No sistema de coordenadas esféricas (r, θ, ϕ) as componentes de velocidades são:

$$\dot{U}_r = V = -V_f r_f^2 \frac{\cos\theta}{r^2} \quad (2.50)$$

$$\dot{U}_\theta = \dot{U}_\phi = 0 \quad (2.51)$$

As componentes de deformações são:

$$\dot{\epsilon}_{rr} = \frac{\partial \dot{U}_r}{\partial r} ; \dot{\epsilon}_{\theta\theta} = \frac{\dot{U}_r}{r} ; \dot{\epsilon}_{\phi\phi} = \frac{\dot{U}_r}{r} = -(\dot{\epsilon}_{rr} + \dot{\epsilon}_{\theta\theta}) \quad (2.52)$$

$$\dot{\epsilon}_{r\theta} = \frac{1}{2r} \frac{\partial \dot{U}_r}{\partial \theta} \quad (2.53)$$

$$\dot{\epsilon}_{\theta\phi} = \dot{\epsilon}_{r\phi} = 0 \quad (2.54)$$

Logo, as velocidades de deformações são:

$$\dot{\epsilon}_{rr} = -2 \dot{\epsilon}_{\theta\theta} = -\dot{\epsilon}_{\phi\phi} = 2 V_f r_f^2 \frac{\cos\theta}{r^3} \quad (2.55)$$

$$\dot{\epsilon}_{r\theta} = \frac{1}{2} V_f r_f^2 \frac{\sin\theta}{r^3} \quad (2.56)$$

$$\dot{\epsilon}_{\theta\phi} = \dot{\epsilon}_{r\phi} = 0 \quad (2.57)$$

Através das superfícies Γ_1 , Γ_2 , Γ_3 e Γ_4 , as componentes normais de velocidades são contínuas, entretanto, ali existem velocidades descontínuas paralelas a essas superfícies, dadas por:

$$\Gamma_1 : \Delta V = V_f \sin \theta \quad (2.58)$$

$$\Gamma_2 : \Delta V = V_f \sin \theta \quad (2.59)$$

$$\Gamma_3 : \Delta V = V_f \left(\frac{R_f}{R} \right)^2 \quad (2.60)$$

$$\Gamma_4 : \Delta V = V_f \quad (2.61)$$

(iii) - zona III, que compreende o produto trefilado, a velocidade é uniforme e possui apenas uma componente axial (V_f);

(e) as perdas de energia durante o processo de trefilação são devidas ao atrito entre o fio e a fieira e por descontinuidade de velocidades;

(f) o modelo de atrito adotado foi o modelo de atrito de Coulomb, dado por:

$$\tau = \mu \sigma \quad (2.62)$$

onde:

μ = coeficiente de atrito de Coulomb

O cálculo da tensão de trefilação é desenvolvido da seguinte maneira:

(a) cálculo da potência externa aplicada dada pela expressão (2.47), então:

$$\dot{W}_e = \int_{S_1} T_i V_i dS = \pi V_f R_f^2 \sigma_t \quad (2.63)$$

onde:

$$T_i = \sigma_t$$

$$V_i = V_0$$

$$dS = 2 \pi r dr$$

(b) cálculo da potência interna de deformação dado pela expressão (2.48), logo:

$$\dot{W}_u = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma}_0 \int_V \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij} \cdot \dot{\epsilon}_{ij}} dV$$

$$\dot{W}_u = 2 \pi \bar{\sigma}_0 V_f R_f^2 f(\alpha) \ln \frac{R_i}{R_f} \quad (2.64)$$

$$\dot{W}_u = 2 \pi \bar{\sigma}_0 V_f R_f^2 \ln \frac{R_i}{R_f} \quad (2.65)$$

onde:

$$\dot{\epsilon}_{ij} \cdot \dot{\epsilon}_{ij} = \text{dado pelas expressões (2.55 - 2.57)}$$

$$dV = 2 \pi r \sin \theta r d\theta dr$$

$$f(\alpha) \equiv 1 \text{ para semi-ângulos } (\alpha) \text{ pequenos.}$$

(c) cálculo da potência dissipada por atrito e por descon^{tin}tinuidade de velocidades dado pela expressão (2.49), então:

(i) nas superfícies Γ_1 e Γ_2

$$\dot{W}_{S_{1-2}} = \int_{S_{1-2}} \tau \Delta V dS = \int_{S_1} \tau \Delta V_1 dS + \int_{S_2} \tau \Delta V_2 dS$$

$$\dot{W}_{S_{1-2}} = \frac{4}{3\sqrt{3}} \pi \bar{\sigma}_0 V_f R_f^2 \operatorname{sen} \alpha \quad (2.66)$$

onde:

$$\tau = \frac{\bar{\sigma}_0}{\sqrt{3}} \quad (\text{tensão de cisalhamento segundo o critério de escoamento de von Mises})$$

$$\Delta V_1 = V_f \operatorname{sen} \theta \text{ e } dS = 2 \pi r_f \operatorname{sen} \theta r_f d\theta$$

$$\Delta V_2 = V_i \operatorname{sen} \theta \text{ e } dS = 2 \pi r_i \operatorname{sen} \theta r_i d\theta$$

(ii) na superfície Γ_3

$$\dot{W}_{S_3} = \int_{S_3} \tau \Delta V dS = \frac{2 \pi \mu \bar{\sigma}_0}{\operatorname{sen} \alpha} V_f R_f^2 \left(1 - \ln \frac{R_i}{R_f}\right) \ln \frac{R_i}{R_f} \quad (2.67)$$

onde:

$$\tau = \mu \sigma_\theta \quad (\text{assumindo o atrito de Coulomb})$$

$$\sigma_\theta = \bar{\sigma}_0 [\ln R_i^2 - (1 + \ln R^2)]$$

$$\Delta V = V_f \left(\frac{R_f}{R}\right)^2$$

$$dS = 2 \pi R \frac{dR}{\operatorname{sen} \alpha}$$

(iii) na superfície Γ_4

$$\dot{W}_{S_4} = \int_{S_4} \tau \Delta V dS = 2 \pi \mu V_f R_f L (\sigma_t - \bar{\sigma}_0) \quad (2.68)$$

onde:

$$\tau = \mu \sigma_I$$

$$\sigma_I = \sigma_t - \bar{\sigma}_0$$

$$\Delta V = V_f$$

$$dS = 2 \pi L dR$$

A potência total dissipada por atrito e por descontinuidade de velocidades fica:

$$\dot{W}_S = \dot{W}_{S_{1-2}} + \dot{W}_{S_3} + \dot{W}_{S_4}$$

$$\dot{W}_S = \pi \bar{\sigma}_0 V_f R_f^2 \left[\frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{sen} \alpha + \frac{2\mu}{\operatorname{sen} \alpha} \left(1 - \ln \frac{R_i}{R_f} \right) \ln \frac{R_i}{R_f} \right] \quad (2.69)$$

com $L = 0$.

Substituindo os valores das expressões (2.63), (2.65) e (2.69) na relação (2.46) e efetuando-se as devidas simplificações, resulta a equação para o cálculo da tensão de trefilação dada por:

$$\sigma_t = 2 \bar{\sigma}_0 \left[1 + \frac{\mu}{\operatorname{sen} \alpha} \left(1 - \ln \frac{R_i}{R_f} \right) \right] \ln \frac{R_i}{R_f} + \frac{4}{3\sqrt{3}} \bar{\sigma}_0 \operatorname{sen} \alpha \quad (2.70)$$

Avitzur considerou o efeito do encruamento⁽³²⁾ substituindo o valor do limite de escoamento ($\bar{\sigma}_0$) por:

$$\bar{\sigma}_0 = \sigma_{\text{eff}} = S \left[1 + n \cdot \ln \frac{A_0}{A_1} \right] \quad (2.71)$$

onde:

σ_{eff} = tensão efetiva;

S = limite de escoamento;

n = expoente de encruamento.

A Tabela 2.1 apresenta uma comparação dos modelos de cálculo da tensão de trefilação citados em função das hipóteses adotadas para o desenvolvimento dos mesmos.

Tabela 2.1 - Comparação dos principais modelos de cálculo da tensão de trefilação em função das hipóteses adotadas

MODELOS	MÉTODO ADOTADO	EQUAÇÃO	HIPÓTESES ADOTADAS				
			ATRITO	SEMI-ÂNGULO DA FIEIRA	REGIÃO CILÍNDRICA DA FIEIRA	TRABALHO REDUNDANTE	ENCRUAMENTO
SACHS	Divisão em Elementos	2.40	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
POMP, SIEBEL E HOUDREMONT	Energia Uniforme	2.15	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
SACHS E VAN HORN	Energia Uniforme	2.16	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
KORBER E EICHINGER	Divisão em Elementos	2.41	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM
DAVIS E DOKOS	Divisão em Elementos	2.42	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM
SIEBEL	Energia Uniforme	2.17	SIM	SIM	NÃO	SIM	NÃO
WHITTON	Divisão em Elementos	2.43	SIM	SIM	NÃO	SIM	NÃO
YANG	Divisão em Elementos	2.44	SIM	SIM	SIM	SIM	NÃO
TROZERA	Divisão em Elementos	2.45	SIM	SIM	NÃO	NÃO	SIM
AVITZUR	Limite Superior	2.70	SIM	SIM	SIM	SIM	NÃO
AVITZUR	Limite Superior	2.71	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM

2.3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) WISTREICH, J.G. - The Fundamentals of Wire Drawing,
Metallurgical Reviews, Vol. 3, nº 10, 1958, pp. 97-112.
- (2) FRANCIS, E.C.; THOMPSON, F.C. - The Drawing of Non-Ferrous,
Journal of the Institute of Metals, Vol. 46, 1931, pp.
313-351.
- (3) DAVIS, E.A.; DOKOS, S.J. - Theory of Wire Drawing, Journal
of Applied Mechanics, Trans. ASME, Vol. 66, 1944, pp.
A193-A198.
- (4) CLEAVER, F.T.; MILLER, H.J. - Wire Drawing: Technique
and Equipament, J. Inst. Metals, Vol. 78, 1950, pp.
537-562.
- (5) PAPARONI, F. - The Drawing of Copper Wire, The Wire
Journal, 1966, pp. 965-973.
- (6) BRESCIANI FQ, E. - Conformação Plástica dos Metais, Apos-
tila Pós-Graduação, UNICAMP/FEC, Campinas, 1977, pp.
49-57.
- (7) AVITZUR, B. - Metal Forming: Process and Analysis,
MacGraw Hill, New Delhi, 1977.
- (8) Idem, ibidem ref. (16), pp. 55-81.
- (9) THOMSEN, E.G.; YANG, C.I.; KOBAYASHI, S. - Mechanics of
Plastic Deformation in Metal Processing, Mc Millina, New
York, 1965, pp. 69-127.

- (10) ROWE, G.W. - Conformado de los Metals, Ediciones Urno, Bilbao, 1972.
- (11) BRESCIANI FQ, E. - Conformação Plástica dos Metais (Fundamentos da Mecânica da Conformação Plástica), Apostila Pós-Graduação DEM/UNICAMP, Campinas 1978, pp. 55-82.
- (12) Idem, ibidem ref. (10), pp. 79-95.
- (13) ESPINOSA, R.; LARRAGUIBEL, J.S.; NEGRONI, F. - Analisis Teórico Experimental de las Expressiones para Predicir la Tension Media de Trefilacion, Anais da Vª Conferência Inter-Americana de Tecnologia de Materiais, São Paulo, 1978, pp. 369-377.
- (14) POMP, A; SIEBEL, E.; HOUDREMONT, E. - Mitt. K. W. Inst. Eisenforsch, Vol. 11, 1929, p. 553, in ref. (13), p. 376.
- (15) SACHS, G.; VAN HORN, K.R. - Practical Metallurgy, Cleveland O (A.S.M.), 1940, in ref. (13), p. 376.
- (16) SIEBEL, E. - Stahl U. Eisen, Vol. 66-67, 1947, p. 171, in ref. (13), p. 376.
- (17) KÖRBER, F.; EICHINGER, A. - Mitt. K. W. Inst. Eisenforsch, Vol. 22, 1940, p. 57, in ref. (13), p. 376.
- (18) Idem, ibidem ref. (11), pp. 90-92.
- (19) Idem, ibidem ref. (10), pp. 143-158.

- (20) Idem, ibidem ref. (10), p. 154.
- (21) SACHS, G. - Zur Theories des Zie Hyorgangs, Z. Augew, Match. Mech., Vol. 7, 1927, p. 235, in ref. (13), p. 376.
- (22) Idem, ibidem ref. (17), p. 57.
- (23) Idem, ibidem ref. (3), p. A195.
- (24) WHITTON, P.W. - The Calculation of Drawing Force and Die Pressure in Wire Drawing, J. Inst. Metals, Vol. 86, 1958, pp. 417-421.
- (25) YANG, C.T. - On the Mechanics of Wire Drawing, Trans. ASME, Sēries B, J. Eng. Ind., Vol. 89, 1961, pp. 523-525.
- (26) TROZERA, P.A. - Trans. ASM, Vol. 57, 1964, p. 309, in ref. (13), p. 376.
- (27) Idem, ibidem ref. (11), pp. 58.
- (28) Idem, ibidem ref. (7), p. 157.
- (29) AVITZUR, B. - Analyses of Wire Drawing and Extrusion Through Conical Dies of Small Cone Angle, Trans. ASME, Sēries B, 1963, pp. 89-96.
- (30) _____ . - Analyses of Wire Drawing and Extrusion Through Conical Dies of Large Cone Angle, Trans. ASME, Sēries B, Vol. 86, n° 4, 1964, pp. 305-316.

- (31) Idem, ibidem ref. (29), p. 91.
- (32) AVITZUR, B. - Strain-Hardening and Strain-Rate Effects
in Plastic Flow Through Conical Converging Dies,
Trans. ASME, 1967, pp. 556-562.

CAPÍTULO 3

ANÁLISE DOS FATORES DE INFLUÊNCIA NA TENSÃO DE TREFILAÇÃO

3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

É difícil analisar os fatores que influenciam a tensão de trefilação devido ao grande número de variáveis de influência e da dificuldade em se isolar seus efeitos.

Componente de fundamental importância na tensão de trefilação é o atrito entre o fio e a fiação devido aos esforços que induz no fio e que altera as condições de trefilação; o atrito e associado a ele as condições de lubrificação, constitui-se num fator de influência complexo a ser analisado.

Outro fator de influência é a velocidade de trefilação que, evidentemente, impõe uma velocidade de deformação ao fio; o comportamento mecânico do material do fio se altera com diferentes velocidades de deformação, portanto, é difícil analisar a velocidade de trefilação separadamente, pois além da velocidade de deformação, ela depende da temperatura e das condições de atrito

entre fio e fieira.

Convém ainda destacar o fato de que os fatores de influência, na tensão de trefilação, são os mesmos que condicionam a obtenção de determinadas propriedades mecânicas no produto final; ao estudo desses fatores se associa a análise das condições que melhor podem conduzir a obtenção de um produto final nas dimensões e propriedades mecânicas especificadas e isento de defeitos de fabricação.

Os fatores de influência na tensão de trefilação são de grande importância, pois exercem influência na qualidade do produto final e alguns desses fatores, podem ser controlados com mais facilidade.

Neste trabalho serão analisados os seguintes fatores de influência:

- trabalho redundante;
- encruamento;
- velocidade de trefilação;
- atrito entre o fio e a fieira associado as condições de lubrificação.

Embora ainda existam outros fatores de influência envolvidos, como o ângulo da fieira e a redução de área por passe, tais fatores não serão analisados em maior detalhe, porque já foram amplamente estudados.

A seguir serão analisados os fatores que influenciam a tensão de trefilação, sabendo-se de antemão que é difícil anali-

sar o efeito de cada um separadamente e virtualmente impossível analisar o efeito combinado de todos os fatores simultaneamente.

3.2. INFLUÊNCIA DO TRABALHO REDUNDANTE

Tradicionalmente se tem medido a deformação que sofre um fio ao ser trefilado em função de sua redução de área. Contudo, quando se procura fazer uma análise rigorosa do processo de trefilação, há que se levar em conta a não uniformidade de deformação através da secção transversal. Ocorrem distorções internas no fio e isto requer uma energia adicional para se processar a deformação. Esta energia adicional é denominada trabalho redundante, o qual não contribui em nada para a mudança dimensional do fio trefilado.

As distorções introduzidas podem ser vistas como um cisalhamento processando-se em cada elemento do fio, conforme esquematizado na Figura 3.1.

O fator de trabalho redundante é definido como⁽²⁾:

$$\phi = f(\alpha, r) = \frac{\epsilon^*}{\epsilon} \quad (3.1)$$

onde:

ϕ = fator de trabalho redundante;

ϵ^* = deformação real processada internamente;

ϵ = deformação nominal sofrida pelo material.

O fator de trabalho redundante pode ser diretamente deter

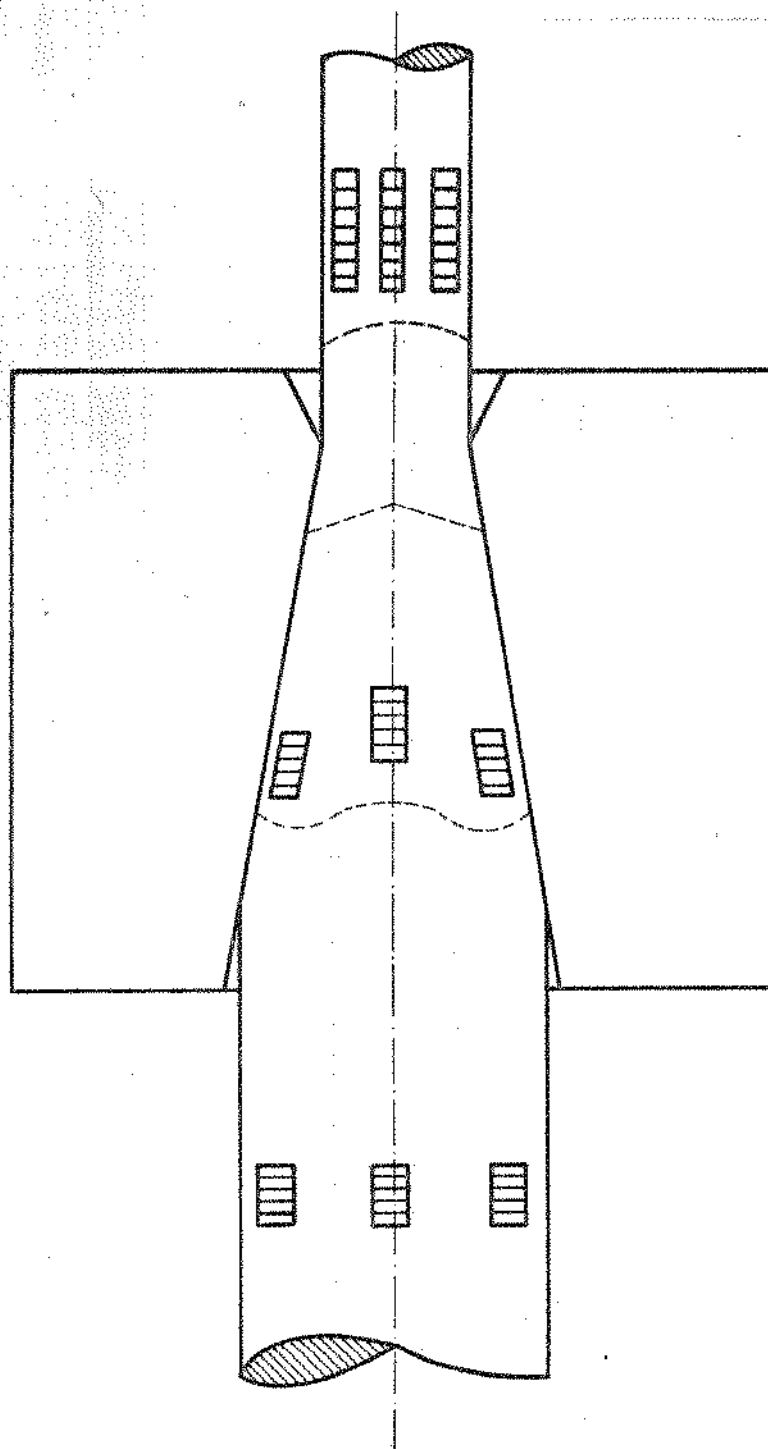


Figura 3.1 - Trabalho redundante do fio no interior da fieira⁽¹⁾.

minado, conforme indica a Figura 3.2. A curva de escoamento do fio trefilado é superposta à curva básica do material. A origem da curva para o metal trefilado é deslocada ao longo do eixo de deformação, de uma distância equivalente à redução:

$$\varepsilon = \ln A_0/A_1 \quad (3.2)$$

O fato de estar a tensão de escoamento acima da curva básica, para o mesmo material quando trefilado, é devido ao trabalho redundante que o fio sofreu⁽⁴⁾. Para se determinar o fator de trabalho redundante, a curva para o material trefilado é deslocada para a direita, onde as curvas coincidem. A área varrida pelo deslocamento, representa o trabalho redundante por unidade de volume.

O fator de trabalho redundante é mostrado ser linearmente relacionado à redução de área (r) ao semi-ângulo da fiação (α) e ao comportamento do encruamento do material⁽⁵⁻⁶⁾.

Se a curva tensão-deformação verdadeira à tração para o material trefilado obedece a lei

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (3.3)$$

onde K é o coeficiente de resistência e n é o expoente de encruamento, a literatura⁽⁷⁾ afirma que o fator de trabalho redundante é dado por:

$$\phi = C_1 + C_2 \Delta \quad (3.4)$$

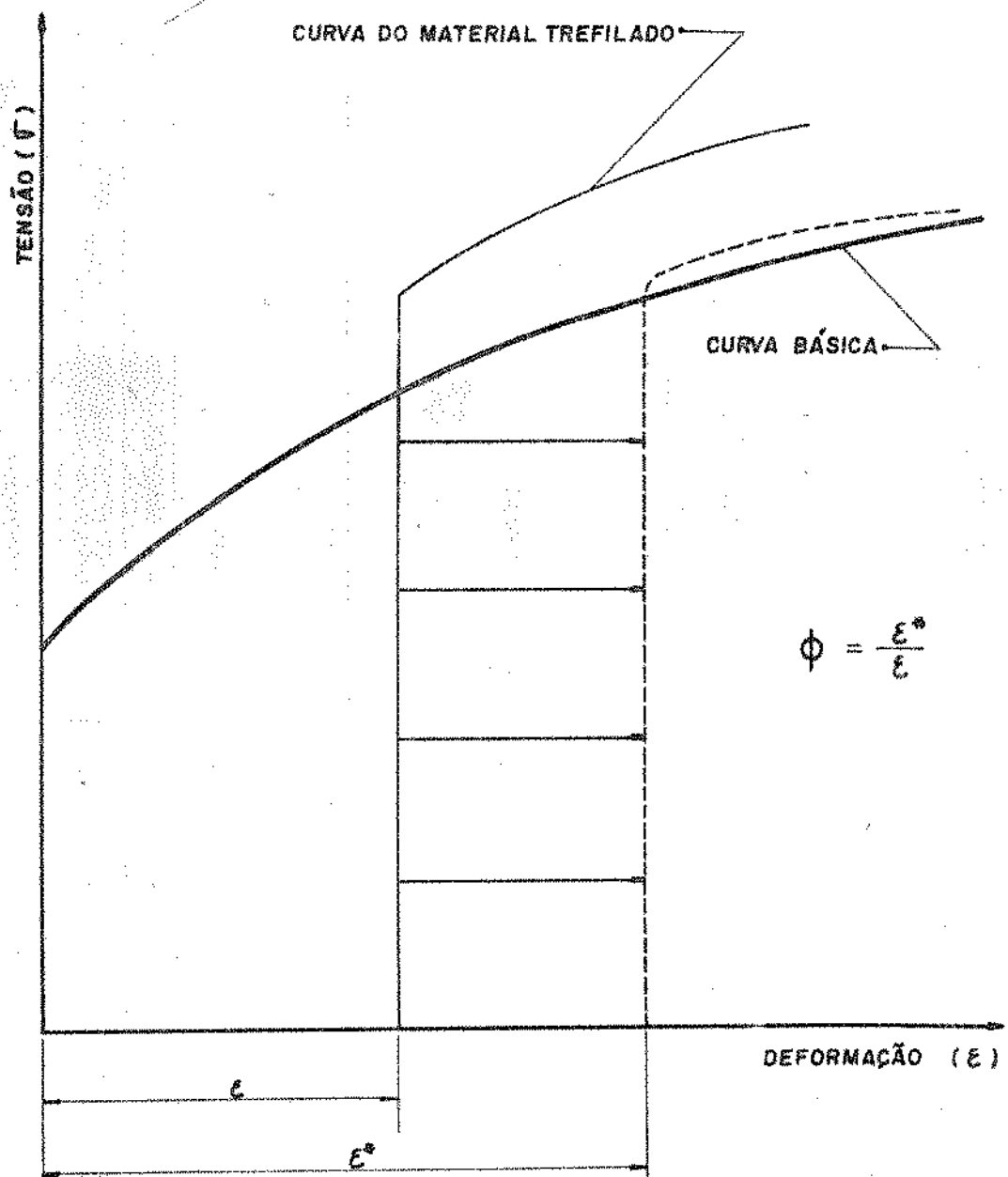


Figura 3.2 - Procedimento para a determinação do fator de trabalho redundante⁽³⁾.

sendo:

$$\Delta = \frac{D_0 + D_1}{D_0 - D_1} \cdot \operatorname{sen} \alpha \quad (3.5)$$

$$C_1 = 1,79 \cdot K^{-0,1} \cdot n^{0,28} \quad (3.6)$$

$$C_2 = 0,357 \cdot K^{-0,054} \cdot n^{0,76} \quad (3.7)$$

onde:

C_1, C_2 = são funções da curva de encruamento;

Δ = parâmetro que descreve a geometria da fieira;

D_0 = diâmetro inicial do fio;

D_1 = diâmetro final do fio;

α = semi-ângulo da fieira.

O trabalho redundante será maior quanto maior for o ângulo da fieira. Como o atrito influi na geometria da fieira, o trabalho redundante não seria totalmente independente do coeficiente de atrito. Entretanto foi experimentalmente demonstrado⁽⁸⁾ que, para uma ampla faixa de materiais e lubrificantes, esta dependência, em caso de existir, não afeta de forma sensível o trabalho redundante, o que depende somente da geometria da fieira.

Como o trabalho redundante envolve deformação plástica, também contribui para o processo de endurecimento do material. Dessa forma, encontra-se que o limite de escoamento do material trefilado é maior do que o limite de escoamento de um material

tracionado que sofreu a mesma redução de área.

Como na prática industrial empregam-se pequenos ângulos e grandes reduções, é possível desprezar o efeito do trabalho redundante na avaliação da tensão de trefilação. Na verdade, esse efeito é particularmente importante quando opera-se com seguidos passes leves, porque o endurecimento do material é agora acumulativo.

Não existe uma teoria rigorosa para avaliar o trabalho redundante no processo de trefilação de fios de secção circular. É freqüente considerar sua influência sobre a tensão de trefilação através de um fator multiplicativo semi-empírico ϕ ou um fator a ser adicionado na tensão de trefilação.

Além de CADDEL e ATKINS^(2,5) diversos pesquisadores determinaram diferentes fórmulas para este fator de trabalho redundante, das quais apresentam-se as mais conhecidas.

JHONSON e ROWE⁽⁹⁾ determinaram um fator de trabalho redundante por comparação entre as tensões de trefilação obtidas experimentalmente com aquelas previstas pela fórmula de SACHS⁽¹⁰⁾, dado por:

$$\phi = 0,88 + 0,78 A_s/M \quad (3.8)$$

sendo:

$$\frac{A_s}{M} = \frac{D_0 + D_1}{D_0 - D_1} \cdot \frac{1 - \cos\alpha}{2 \operatorname{sen}\alpha} \quad (3.9)$$

onde:

A_s/M = parâmetro geométrico da fieira.

WISTREICH⁽¹¹⁾ determinou um fator de trabalho redundante que foi aplicado à equação de SACHS⁽¹⁰⁾ para se obter a tensão de trefilação. O fator multiplicativo toma a seguinte forma:

$$\phi = 0,87 + A_1/M \quad (3.10)$$

sendo:

$$\frac{A_1}{M} = \frac{D_1^2 \cdot \text{sen} \alpha}{D_0^2 - D_1^2} \quad (3.11)$$

onde:

A_1/M = parâmetro geométrico da fieira.

BACKOFEN⁽¹²⁾ desenvolveu uma fórmula para o fator de trabalho redundante, dado por:

$$\phi = 1 + 0,12 (\Delta - 1) \quad (3.12)$$

sendo:

$$\Delta = \alpha \cdot \left(\frac{D_0 + D_1}{D_0 - D_1} \right) \quad (3.13)$$

onde:

Δ = parâmetro geométrico da fieira.

Também, Siebel, Korber e Eichinger, Whitton e Avitzur determinaram fatores de trabalho redundante (ver Capítulo 2).

O emprego desse fator de trabalho redundante parece conduzir a resultados mais coerentes no cálculo do coeficiente de atrito e no aumento da tensão de trefilação⁽¹³⁾.

3.3. INFLUÊNCIA DO ENCRUAMENTO⁽¹⁴⁾

Um cristal metálico sofre um processo de endurecimento quando deformado plasticamente; este fenômeno de endurecimento por deformação plástica, que é denominado encruamento, pode ser representado numa curva tensão de cisalhamento vs. deformação tangencial onde se observa a elevação da tensão com o aumento da deformação. A inclinação da curva define a taxa de encruamento, isto é, estabelece o aumento da tensão para uma dada variação de deformação, num dado setor da curva (Fig. 3.3).

A curva representativa do fenômeno de deformação plástica, e do encruamento decorrente, tem sido tradicionalmente uma parábola; para muitos problemas de conformação plástica dos metais a hipótese do comportamento parabólico na relação entre tensão e deformação é adotado, como são também admitidas outros tipos de curvas mais simplificadas. Entretanto analisando cada tipo de estrutura cristalina dos metais, verifica-se que a forma da curva é mais complexa sendo impossível caracterizar todo o comportamento de um metal.

O fenômeno de encruamento para um metal é influenciado por diversos fatores, como:

- estrutura cristalina do metal;
- natureza química do metal;

- pureza do metal;
- orientação do cristal metálico;
- temperatura no processo de deformação;
- forma e dimensão do cristal metálico;
- condições superficiais do cristal metálico.

Os cristais de estrutura cfc podem revelar três estágios na curva tensão-deformação referida. O primeiro estágio é representado por um encruamento linear de pequena inclinação, o segundo apresenta uma inclinação acentuada e o terceiro uma acentuada atenuação da inclinação. Contudo a inclinação e a extensão desses estágios dependem dos fatores de influência mencionados, particularmente as impurezas (natureza, quantidade e forma de distribuição), a orientação do cristal e a temperatura no processo de deformação. Os cristais de estrutura ccc apresentam uma gradual diminuição da declividade da curva ao longo do processo de deformação e os cristais de estrutura hc apresentam uma pequena inclinação da curva ao longo desse processo. Essas curvas representadas na Figura 3.3, permitem comparar o comportamento dos três tipos de estrutura.

Um agregado policristalino de um metal apresenta uma taxa de encruamento bem maior do que a de um monocristal do mesmo metal; contudo as posições relativas das curvas tensão-deformação dependem da orientação do cristal em relação a direção da carga externa e do tamanho dos grãos do agregado policristalino (Fig. 3.4). Um mono cristal, num ensaio de tração, consegue deformar-se com um único sistema de deslizamento durante uma grande parte

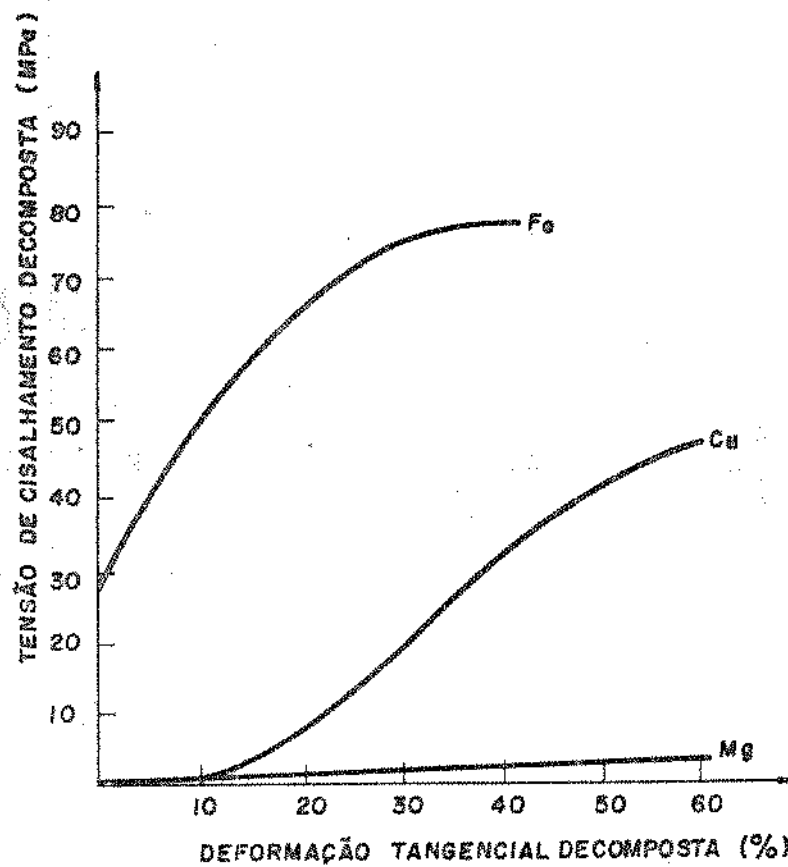


Figura 3.3 - Curva tensão (de cisalhamento decomposta) x x deformação (tangencial ou de cisalhamento decomposta) para metais dos sistemas ccc(Fe), cfc(Cu) e hc(Mg) ⁽³⁵⁾.

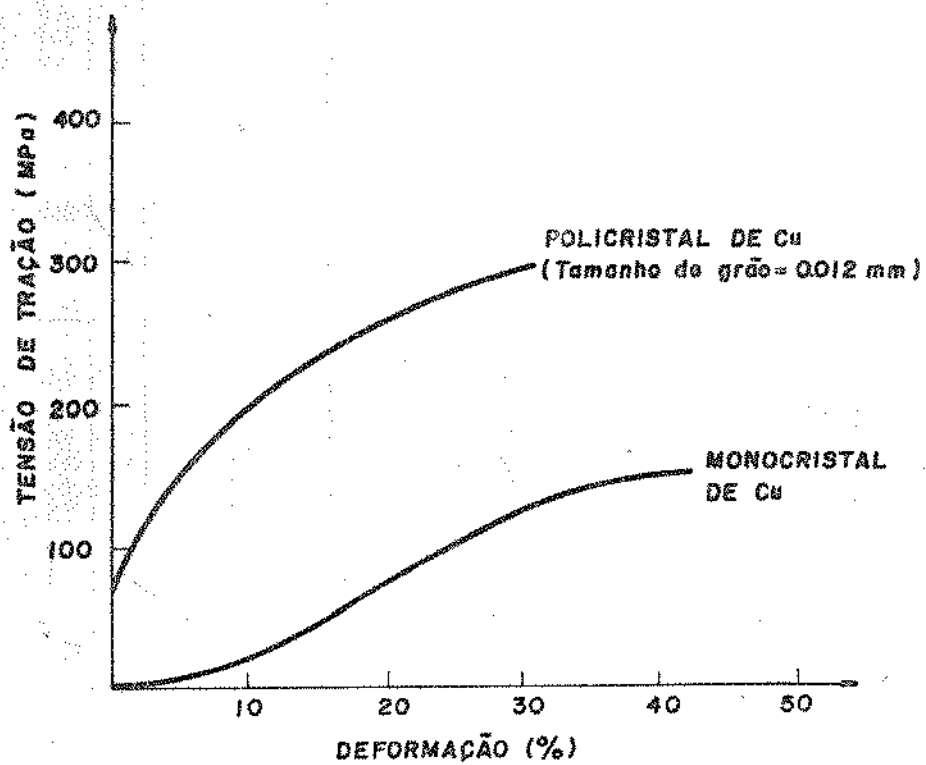


Figura 3.4 - Curva de tensão (de tração) x deformação linear relativa) para um cristal e um agregado policristalino de um mesmo metal⁽³⁶⁾.

do processo de deformação pois apresenta uma grande liberdade de movimentação, girando ao redor do eixo de tração; no caso de um agregado essa situação é bem diferente devido a orientação ao acaso dos diversos cristais constituintes, e cada cristal é traçado em uma direção diferente. Também no caso do estudo do comportamento de agregados policristalino cabe analisar três tipos básicos de estruturas cristalinas.

A curva tensão-deformação típica de um metal de estrutura cfc pode ser representada por uma parábola com a equação:

$$\sigma = \sigma_0 + A\epsilon^n \quad (3.14)$$

onde:

σ_0 = limite de escoamento;

A = coeficiente de resistência;

n = expoente de encruamento.

Contudo outra forma, mais precisa, de representar o comportamento do metal no encruamento, realizado pelo ensaio de tração, é dividir a curva em três estágios (Fig. 3.5) e representar cada um por uma equação diferente da seguinte forma:

$$\begin{aligned} 1^\circ \text{ estágio: } \sigma &= \sigma_0 + A\epsilon^n && \text{para } \epsilon < \epsilon_1 \\ &&& \text{com } \epsilon_1 = 1 \text{ a } 2\% \end{aligned}$$

$$2^\circ \text{ estágio: } \sigma = \sigma'_0 + P\epsilon \quad \text{para } \epsilon_1 < \epsilon < \epsilon_2$$

$$3^\circ \text{ estágio: } \sigma = \sigma''_0 + B\epsilon^m \quad \text{para } \epsilon > \epsilon_2$$

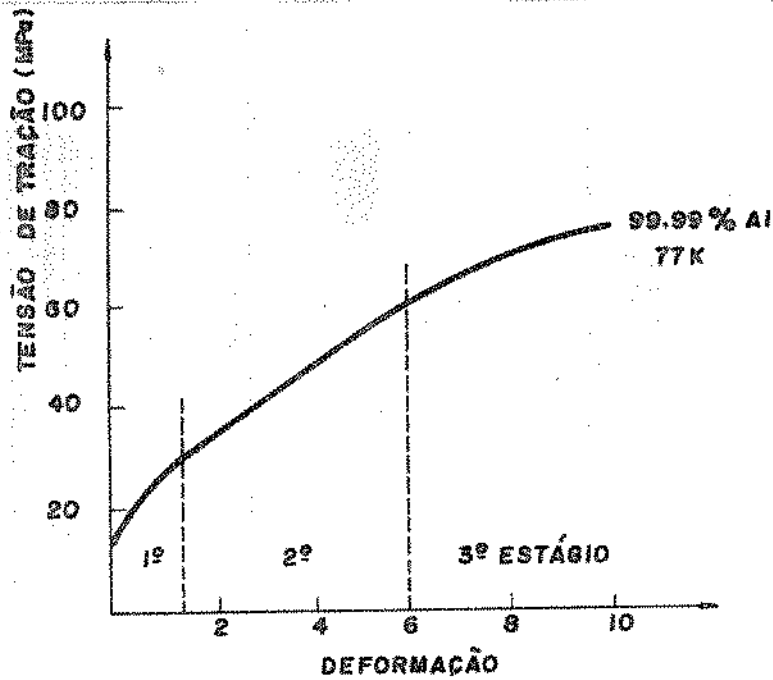


Figura 3.5 - Curva tensão x deformação para o alumínio puro (cfc) ilustrando os três estágios de encruamento⁽³⁷⁾.

O primeiro e terceiro estágios correspondem a um comportamento parabólico e o intermediário a um linear. Contudo, a forma da curva está estreitamente ligada a natureza do metal e a temperatura de ensaio.

O tamanho do grão exerce uma influência marcante no encruamento, alterando a forma e posição da curva tensão-deformação, e, particularmente, o limite de escoamento (Fig. 3.6).

As curvas tensão-deformação para os metais que se cristalizam no sistema ccc apresentam como característica particular a formação de um patamar de escoamento e um nítido ponto de escoamento marcando o limite da deformação elástica, ou seja, o início da fase do comportamento plástico. Da mesma forma que no caso dos metais de estrutura cfc, os metais do sistema ccc apresentam um comportamento influenciado pelo tamanho do grão: um tamanho do grão menor corresponde a um limite de escoamento maior e a uma taxa de encruamento maior. A forma e posição das curvas são sensivelmente influenciados pela temperatura do processo de deformação.

Os monocristais de metais de estrutura hc encruam através de mecanismos de deslizamento mais simples do que os dos metais de estrutura cúbica; o deslizamento ocorre em somente uma família de planos que são paralelos ao plano de base e o metal apresenta uma pequena taxa de encruamento. A curva tensão de cisalhamento vs deformação tangencial tem uma aparência mais linear do que parabólica e a inclinação diminui com o aumento da temperatura do processo de deformação.

No agregado policristalino a deformação plástica ocorre

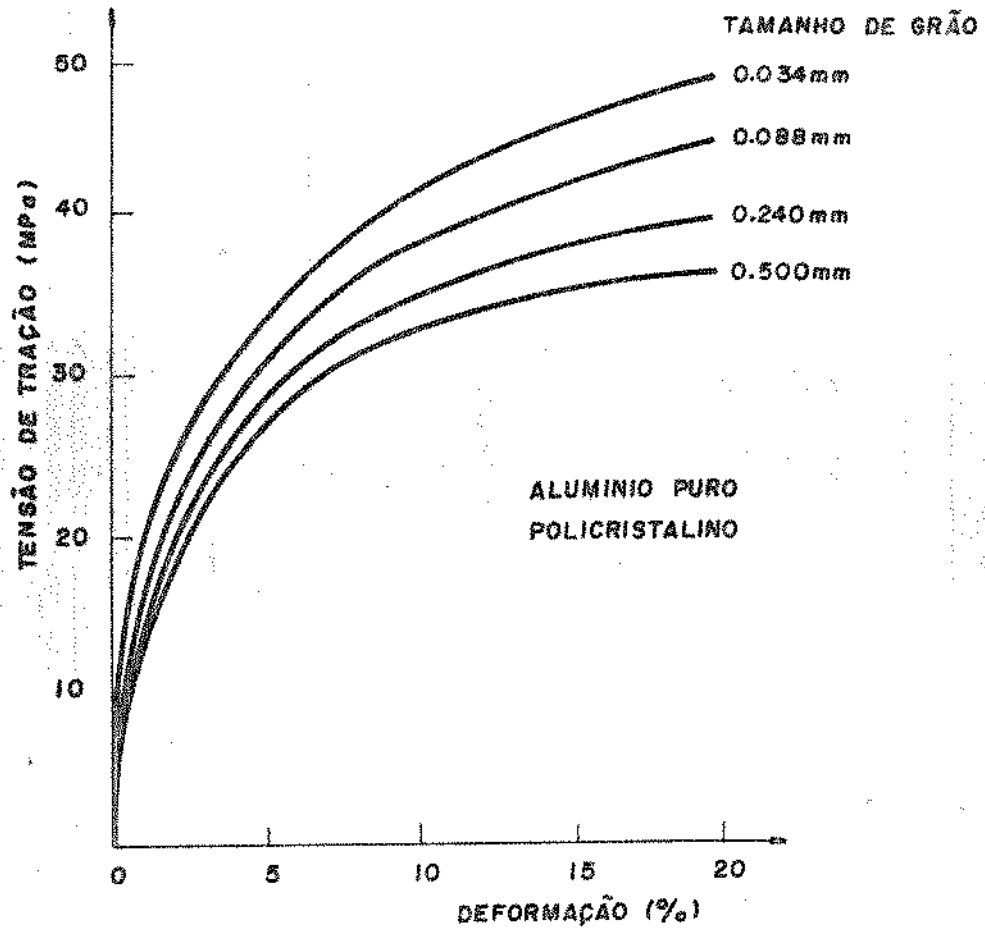


Figura 3.6 - Curva tensão x deformação para o alumínio ilustrando a influência do tamanho do grão⁽³⁸⁾.

por escorregamento mas também por maclação, complicando a análise do fenômeno. A taxa de encruamento é bem mais acentuada do que para o monocristal.

a - Mudanças de Propriedades com o Encruamento

Algumas propriedades dos metais são alteradas pelo encruamento. O encruamento é obtido, nos produtos metálicos, através de processos de conformação plástica realizados com um trabalho a frio.

As propriedades mecânicas são alteradas pelo trabalho a frio; num ensaio de tração, por exemplo, verifica-se que um metal mais encruado apresenta maiores limites de escoamento e de resistência, maior dureza e maior alongamento e estrição, ou seja, a medida que a resistência se eleva pelo encruamento a ductilidade decresce (Fig. 3.7).

As propriedades físicas como densidade e condutibilidade elétrica são alteradas diminuindo os seus níveis com o aumento do encruamento; o contrário acontece com a expansão térmica.

A microestrutura se altera com o trabalho a frio; os grãos deformados se tornam alongados e adquirem uma orientação cristalográfica preferencial de acordo com a direção do processo de conformação.

3.4. INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE TREFILAÇÃO

A influência da velocidade de trefilação sobre a tensão de trefilação é governada pelo seu efeito sobre a resistência do

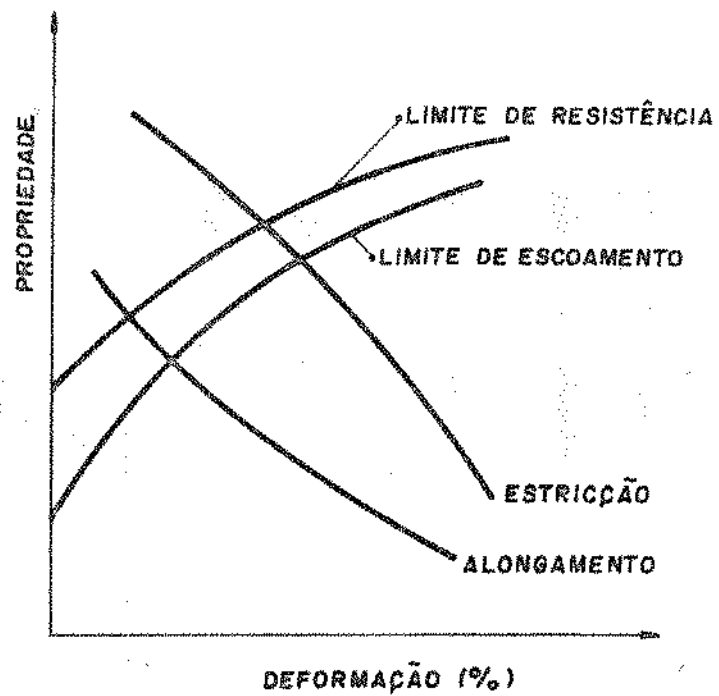


Figura 3.7 - Alteração das propriedades mecânicas com o aumento da deformação plástica, caracterizando o encruamento (curvas ilustrativas de tendências).

metal à deformação e sobre o atrito entre o fio e a fieira.

Dependendo das condições de trefilação, o efeito da velocidade sobre a tensão de trefilação será diferente.

SCHWIER⁽¹⁵⁾ analisou a trefilação de fios de aço considerando inicialmente uma redução de área de 22% e uma variação na velocidade de 0,6 m/s a 0,8 m/s, obteve uma tensão de trefilação reduzida de 3%, enquanto com uma redução de 32% e o mesmo aumento na velocidade considerada anteriormente, a tensão de trefilação aumentou de 15%.

BARON e THOMPSON⁽¹⁶⁾ demonstraram que a tensão de trefilação diminui com o aumento da temperatura e com o aumento da velocidade de trefilação.

FRANCIS e THOMPSON⁽¹⁷⁾ realizaram estudo sobre a trefilação do aço, concluíram que a tensão de trefilação não é independente da velocidade; aumentando-se a velocidade, partindo-se da máquina parada a tensão de trefilação aumenta rapidamente até praticamente se estabilizar, num valor entre 0,01 a 3 m/s. Concluíram também que a tensão de trefilação é proporcional a redução de área.

BARRAND e GADEAU⁽¹⁸⁾ estudando o processo de trefilação do alumínio, concluíram que a velocidade de trefilação não pode ser aumentada além de certos níveis, para se obter maior produção por unidade de tempo. O motivo disso é que mesmo usando lubrificantes especiais, somente se consegue reduções pequenas por passe, pois elevando o número de passes necessários para uma determinada redução e às velocidades elevadas o fluido lubrificante pode ser decompor, perdendo a sua eficiência.

As velocidades de trefilação variam de 0,5 a 40 m/s, dependendo da máquina, do diâmetro do fio e do material a ser trefilado. Na indústria⁽¹⁹⁾, fios finos de cobre são trefilados a 25 m/s. Contudo, com o aumento da velocidade aparecem vários problemas: diminui a eficiência do lubrificante, há dificuldade de dissipação do calor produzido e aumento do desgaste das fieiras.

a -- Determinação da Velocidade da Deformação⁽²⁰⁾

A velocidade de deformação não depende apenas da velocidade de trabalho da máquina, mas também do deslocamento do material. O processo de trefilação pode envolver velocidades de deformação muito elevadas devido às altas velocidades envolvidas. Deve-se notar que a velocidade de deformação não é constante mas aumenta à medida que o fio avança da entrada para a saída da fieira. A Figura 3.8 será usada na derivação da velocidade de deformação.

A relação que exprime a constância de volume permite a obtenção das velocidades:

$$\left(\frac{\pi D_0^2}{4} \right) L_0 = \left(\frac{\pi D_1^2}{4} \right) L_1 = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) L = \text{constante} \quad (3.14)$$

$$A_0 L_0 = A_1 L_1 = A \cdot L \quad (3.14a)$$

L é uma secção arbitrária do material que foi marcada e cujo comprimento varia à medida que passa pela fieira. Dividindo-se a expressão (3.14) pelo tempo requerido para deslocar L, tem-se:

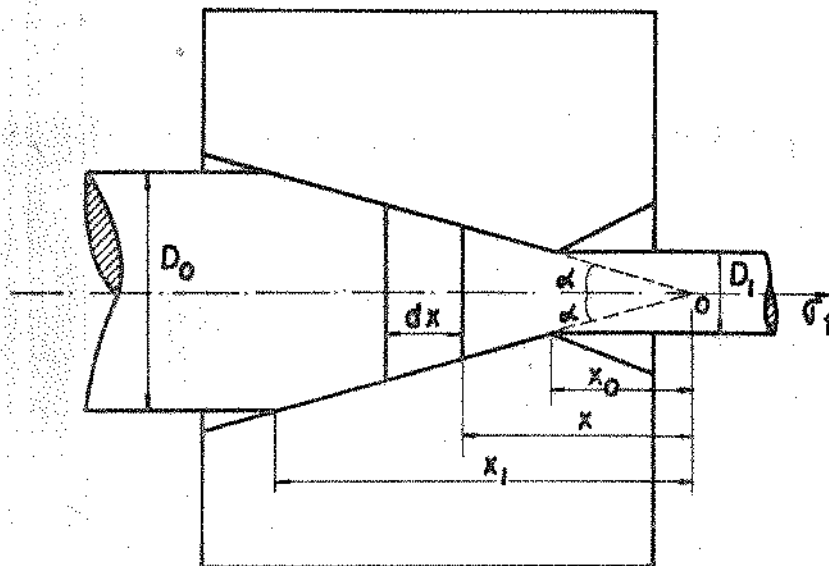


Figura 3.8 - Determinação da velocidade de deformação.

$$\left(\frac{\pi D_0^2}{4}\right) v_0 = \left(\frac{\pi D_1^2}{4}\right) v_1 = \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) v \quad (3.15)$$

$$A_0 v_0 = A_1 v_1 = A \cdot v \quad (3.15a)$$

A deformação para uma certo ponto pode ser, de modo simplificado, expresso como:

$$d\epsilon = \frac{dL}{L} = - \frac{dA}{A} \quad (3.16)$$

A velocidade de deformação $\dot{\epsilon}$ é definida como:

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} \quad (3.17)$$

Substituindo a equação (3.16) em (3.17) e multiplicando e dividindo por dx , tem-se:

$$\dot{\epsilon} = - \frac{1}{A} \frac{dA}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (3.18)$$

A área A a uma certa distância x_1 da origem O na região de deformação pode ser expressa como:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi}{4} (D_0 - 2x \operatorname{tg}\alpha)^2 \quad (3.19)$$

$$\frac{dA}{dx} = - \pi \operatorname{tg}\alpha (D_0 - 2x \operatorname{tg}\alpha) \quad (3.20)$$

Da equação (3.15):

$$\frac{dx}{dt} = v = \frac{v_0 D_0^2}{D} = v_0 \frac{D_0^2}{(D_0 - 2x \operatorname{tg} \alpha)^2} \quad (3.21)$$

Substituindo-se as equações (3.19), (3.20) e (3.21) na equação (3.18) e efetuando-se as devidas simplificações, tem-se:

$$\dot{\epsilon} = \frac{4 \operatorname{tg} \alpha v_0 D_0^2}{(D_0 - 2x \operatorname{tg} \alpha)^3} \quad (3.22)$$

A velocidade de deformação na entrada da fieira é:

$$\dot{\epsilon}_0 = \frac{4 \operatorname{tg} \alpha v_0}{D_0} \quad (3.23)$$

A velocidade de deformação na saída da fieira é:

$$\dot{\epsilon}_1 = \frac{4 \operatorname{tg} \alpha v_0 D_0^2}{D_1^3} \quad (3.24)$$

onde:

$\dot{\epsilon}$ = velocidade de deformação;

v_0 = velocidade de trefilação;

D_0 = diâmetro inicial do fio;

D_1 = diâmetro final do fio;

α = semi-ângulo da fieira.

O aumento na velocidade de deformação, quando o diâmetro do fio decresce, é devido ao fato de o comprimento da zona de deformação decrescer.

3.5. INFLUÊNCIA DO ATRITO⁽²¹⁾

No processo de trefilação o atrito é um dos fatores mais importantes a ser considerado devido aos esforços que induz no fio e que altera as condições de trefilação; o atrito, e associado a ele as condições de lubrificação, constitui-se num fator de influência complexo a ser analisado.

Anteriormente considerava-se o atrito como devido somente às irregularidades das superfícies colocadas em contato; posteriormente foi levada em consideração a interação devido às forças de atração entre as moléculas de duas superfícies perfeitamente planas e isentas de contaminação, colocadas em contato. Entretanto, por melhores que sejam os processos de acabamento e polimento das superfícies, estas se apresentam constituintes de saliências e reentrâncias: são superfícies rugosas. Postas em contato com outras superfícies, a área real de contato será muito menor do que a área aparente, sendo o contato realizado apenas em pontos localizados. A Figura 3.9 ilustra esse fato através de uma interface entre o fio e a fieira.

Exercendo uma pressão gradativa sobre elas, aquela de menor resistência ou dureza, sofrerá nos pontos de contato deformações que serão elásticas a princípio, passando por plásticas até atingir a uniões que dificultam o movimento relativo das superfícies.

Ao tentarmos provocar um movimento relativo entre duas superfícies postas em contato, os campos de forças atrativas das estruturas moleculares se deslocam uma em relação a outra, opondo-se à continuidade regular do movimento. Também as uniões for-

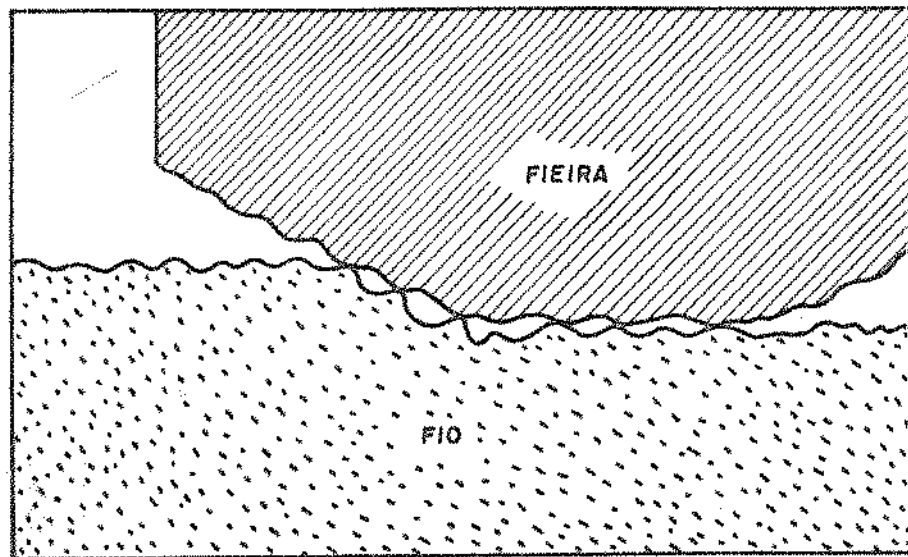


Figura 3.9 - Aspecto de uma interface entre o fio e a fieira⁽²²⁾.

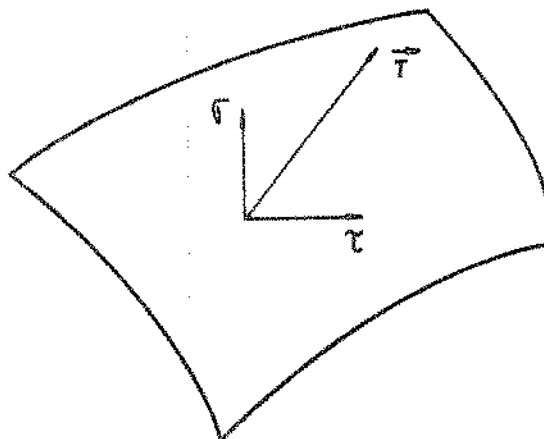


Figura 3.10 - Vetor tensão na interface.

madas pelas rugosidades opõem-se a este movimento, criando-se então uma resistência. Essa resistência ao movimento das superfícies é denominada atrito.

Há duas idealizações clássicas do atrito⁽²³⁾:

(a) Modelo de Coulomb.

A componente normal σ e a componente tangencial τ do vetor tensão T na interface (Fig. 3.10), são relacionadas pela expressão:

$$\tau = \mu \sigma \quad (3.25)$$

onde μ é o coeficiente de atrito.

Segundo esse modelo:

$$\tau = \mu \sigma \text{ se } \mu \sigma < \tau_{\max} \text{ e}$$

$$\tau = \tau_{\max} \text{ se } \mu \sigma > \tau_{\max}$$

onde:

$\tau_{\max} = \sigma_0 / \sqrt{3}$ se o material obedece ao critério de escoamento de von Mises;

$\tau_{\max} = \sigma_0 / 2$ se o material obedece ao critério de escoamento de Tresca.

Segundo esse modelo, as superfícies em movimento relativo, e sujeitas a atrito, não são lisas, mas rugosas.

(b) Modelo da Camada Limite.

Segundo esse modelo, a componente tangencial do vetor tensão T tem um módulo constante:

$$\tau = m \tau_{\max} \quad (3.26)$$

onde m é também chamado de coeficiente de atrito.

Segundo esse modelo, quando

$m = 0$ contato perfeitamente lubrificado, $\tau = 0$; e

$m = 1$ contato aderente.

Nesse modelo tudo se passa como se na interface tivesse uma camada de material de tensão de escoamento, perfeitamente aderente as superfícies, onde $0 \leq m \leq 1$.

Para a escolha do modelo de atrito que se deve adotar (modelo de Coulomb ou modelo da camada limite), há, que se levar em conta a comodidade dos cálculos e a natureza física do contato envolvido, ou seja, de que tipo de contato o caso em foco se aproxima mais.

Uma das principais dificuldades envolvidas no processo de trefilação é a determinação experimental do coeficiente de atrito (μ), uma vez que não se sabe como esse fator varia de ponto para ponto no orifício da fiação.

Para a determinação do coeficiente de atrito (μ), para o caso da trefilação, há na literatura uma técnica, chamada técnica da fiação bi-partida proposta por MACLELLAN⁽²⁴⁾ em 1952. 0

coeficiente de atrito encontrado era função, além da força de separação entre as duas metades da fieira, do semi-ângulo da fieira e da força de trefilação. A Figura 3.11 indica a interação entre o fio e a fieira. Do equilíbrio das forças axiais no fio (Fig. 3.11b), e radiais na fieira (Fig. 3.11a) se obtém, respectivamente:

$$F_t = \bar{p} \Delta A (1 + \mu \cot \alpha) + \mu \bar{p} \pi D_0 L \quad (3.27)$$

$$F_s = \frac{1}{\pi} \left[\bar{p} \Delta A (\cot \alpha - \mu) + \bar{p} D_0 L \right] \quad (3.28)$$

Resolvendo as equações (3.27) e (3.28) e eliminando $\bar{p}$, se obtém, para o cálculo do coeficiente de atrito a seguinte relação:

$$\mu = \frac{\Delta A \cdot \cot \alpha \cdot \pi \cdot D_0 L - \pi \cdot (F_s/F_t) \cdot \Delta A}{(F_s/F_t) \cdot \pi \cdot (\Delta A \cdot \cot \alpha + \pi \cdot D_0 L) + \Delta A} \quad (3.29)$$

onde:

μ = coeficiente de atrito;

F_t = força de trefilação;

F_s = força de separação entre as duas metades da fieira;

L = comprimento da região cilíndrica da fieira;

α = semi-ângulo da fieira;

D_0 = diâmetro inicial do fio

$\Delta A = A_0 - A_1$.

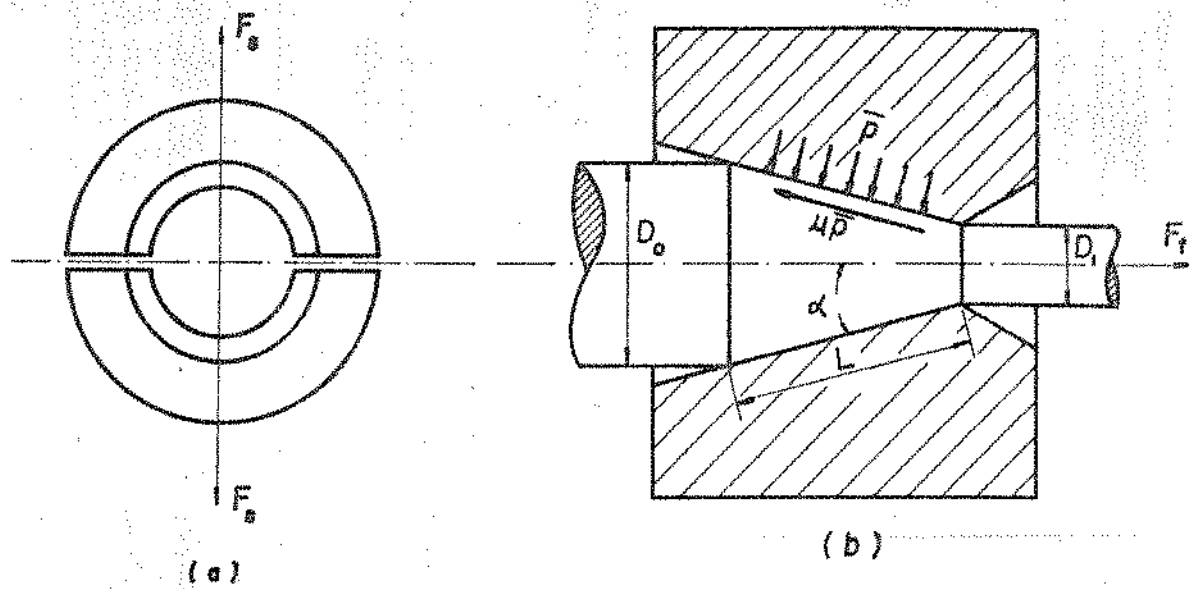


Figura 3.11 - Interação entre fio e fieira⁽²⁴⁾.

Quando não se considera o comprimento da região cilíndrica da fieira ($L = 0$),

$$\mu = \frac{\cot \alpha - \pi (F_s/F_t)}{1 + \pi (F_s/F_t) \cot \alpha} \quad (3.30)$$

Portanto, para se determinar o valor do coeficiente de atrito, usando a técnica da fieira bi-partida, será necessário conhecer a relação (F_s/F_t) , já que os outros termos dependem da geometria da fieira.

Alguns pesquisadores⁽²⁵⁻²⁷⁾ utilizaram essa técnica. Contudo, atualmente a maioria dos pesquisadores adotam valores estimados para o coeficiente de atrito.

As principais conseqüências do atrito são⁽²⁸⁾:

(a) produção de fluxos irregulares de metal durante o processo de trefilação;

(b) alteração desfavorável dos estados de tensão necessários para a deformação;

(c) aparecimento de tensões residuais no material;

(d) queda da qualidade superficial do material;

(e) elevação da temperatura do material a níveis de comprometer as propriedades mecânica do material;

(f) aumento do desgaste das fieiras;

(g) aumento do consumo de energia necessária à deformação.

Portanto, a separação efetiva das superfícies é imperati-

va quando se deseja eliminar ou reduzir os efeitos do atrito, criando-se uma camada de lubrificante entre elas. Em relação à espessura da camada lubrificante, há alguns tipos de lubrificação^(29,30), correspondentes aos tipos de atrito:

(a) Lubrificação Hidrodinâmica.

Consiste na criação de uma camada suficiente de lubrificante a tal ponto de se ter uma completa separação das superfícies, resultando o mínimo de atrito, pois o mesmo é devido somente as forças moleculares do lubrificante, havendo neste caso, um acréscimo no coeficiente de atrito quando houver aumento da viscosidade do lubrificante.

As grandes vantagens desse tipo de lubrificação são:

- mínimo consumo de fiação, e
- possibilidade de elevadas velocidades de trefilação.

(b) Lubrificação Mista.

Nesse tipo, a espessura da camada do filme lubrificante não é suficiente para produzir a completa separação das superfícies. Ela é rompida em alguns pontos, havendo aí o encontro entre as superfícies. Nesse tipo de lubrificação, à medida que a viscosidade do lubrificante aumenta, uma maior quantidade de lubrificante entra para a zona de deformação. Como resultado, o coeficiente de atrito e a tensão de trefilação decrescem. Esse tipo de lubrificação, é sensível a temperatura e a velocidade. Devido a esses fatos é o tipo mais empregado no processo de trefilação.

(c) Lubrificação Limite.

Esse tipo, corresponde ao contato das superfícies ao longo de toda sua extensão, sem qualquer camada de lubrificante entre elas. Nesse caso, haverá um máximo de atrito, produzindo temperaturas elevadas a ponto de impedir a trefilação.

As funções da lubrificação no processo de trefilação são muito mais complexas do que apresentam à primeira vista. Pode-se citar algumas dessas funções⁽³¹⁾:

- reduzir o atrito entre o fio e a fieira;
- manter a temperatura em um nível baixo;
- prolongar a vida da fieira;
- conferir brilho ao fio.

A lubrificação na trefilação pode ser feita por dois processos de acordo com o tipo de máquina de trefilar: por imersão, onde as fieiras estão submersas num banho de lubrificante e por aspersão, onde um jato de lubrificante é dirigida a cada fieira.

Os lubrificantes, quanto ao tipo, podem ser classificados em secos e úmidos. Os lubrificantes secos são mais utilizados na trefilação de metais ferrosos e os úmidos são utilizados na trefilação de metais não ferrosos, embora essa não seja uma regra geral pois o oposto pode ocorrer.

A escolha do lubrificante é experimental e deve-se basear nas seguintes informações: tipo de material a ser trefilado, tipo de máquina, número de reduções por passe e velocidade de trefilação.

Alguns pesquisadores analisaram a influência do coeficiente de atrito no processo de trefilação:

BARON e THOMPSON⁽³²⁾ realizaram estudo sobre a trefilação de fios de bronze, e concluíram que:

i - o coeficiente de atrito decresce com o aumento da redução de área;

ii - com um lubrificante de sabão, o filme lubrificante tende a tornar-se menos viscoso quando a velocidade de trefilação aumenta, e, o coeficiente de atrito decresce quando a temperatura do lubrificante é aumentada até 120° .

WISTREICH⁽³³⁾ indicou com base no trabalho de THOMPSON⁽³²⁾, que o coeficiente de atrito cresce com o aumento do ângulo da fieira. Concluiu também, que o coeficiente de atrito de cresce com o aumento da velocidade de trefilação.

SMITH e COOPER⁽³⁴⁾ estudando o processo de trefilação do aço, e considerando uma redução de área de 25% e um ângulo da fieira de 5° , concluíram que a tensão de trefilação aumenta com o aumento do coeficiente de atrito.

3.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ROWE, G.W. — Principles of Industrial Metalworking Processes, Londres, Edward Arnold Ltda., 1977, p.407. in CETLIN, P.R. et alli. — Influência do Perfil do Furo da Fieira sobre o Esforço de Trefilação, XXXVI Congresso da ABM, 1981, p.
- (2) CADDEL, R.M.; ATKINS, A.G. — The Influence of Redundant work when Drawing Rods Through Conical Dies, Trans. ASME, série B, 1968, pp. 411-419.
- (3) DIETER, G.E. — Metalurgia Mecânica, Editora Guanabara Koogan S.A., 1981, p. 565.
- (4) Idem, ibidem ref. (3), pp. 565-566.
- (5) ATKINS, A.G.; CADDEL, R.M. — The Incorporation of work Hardening and Redundant work in Rod-Drawing Analyses, J.Mech. Sci., 1968, pp. 15-28
- (6) DUCKFIELD, B.S. — The Theory and Practice of Wire Drawing, Part I, Wire Industry, 1973, pp. 618-624.
- (7) Idem, ibidem ref. (2), p. 413.
- (8) JOHNSON, R.W.; ROWE, G.W. — Redundant work in Drawing Cylindrical Stock, Journal of the Institute of Metals, 1968, pp. 97-104.
- (9) Idem, ibidem ref. (8), p. 101.
- (10) SACHS, G. — Zur Theories des Ziehvorgangs, Z. Angew, Math. Mech., Vol. 7, 1927, p. 235, in ESPINOSA, R. et alli. —

Análisis Teórico Experimental de las Expresiones para Predecir la Tension Media de Trefilacion, Anais da V Conferência Inter-Americana de Tecnologia de Materiais, São Paulo, 1978, p. 376.

- (11) WISTREICH, J.G. — Investigation of the Mechanics of Wire Drawing, Proc. Inst. Mech. Eng., 169, 1955, pp. 654-655.
- (12) BACKOFEN, W.A. — Deformation Processing, Reading Mass., Adison - Wesley, 1972, p. 326.
- (13) Idem, ibidem ref. (8), p. 101.
- (14) BRESCIANI FQ, E. — Conformação Plástica dos Metais, Aposti
1a Pós-Graduação, UNICAMP/FEC, Campinas, 1982, pp. 30-35.
- (15) SCHWIER, F. — Stahl Eisen, 1952, pp. 58-66, in TARNAVSKII, A.L. — Elements of the Theory and Practice of High-Speed Drawing, Stal', 1974, p. 503.
- (16) BARON, H.G.; THOMPSON, F.C. — Friction in Wire Drawing, J. Inst. Metals, 1950-51, p. 447.
- (17) FRANCIS, E.L.; THOMPSON, F.C. — The Drawing of Non-Ferrous Wires, Journal of the Institute of Metals, 1931, pp. 313-351.
- (18) BARRAND, P.; GADEAU, R. — Enciclopédia del Alumínio - Fabri
cation de Semi-produtos (Vol.3), Ed. Urmo, Bilbao, 1968, pp. 226-231.
- (19) TARNAVSKII, A.L. — Elements of the Theory and Practice of High-Speed Drawing, Stal', 1974, p. 503.

- (20) MEYERS, M.A.; CHAWLA, K.K. — Princípios de Metalurgia Mecânica, Editora Edgard Blücher Ltda., 1982, pp. 114-115.
- (21) COELHO, A.R.Z.; MAGNAVACCA, E.H. — Lubrificação a Seco em Trefilação de Arames de Aço-Carbono, Metalurgia, Vol.31, 1975, pp. 651-657.
- (22) NAKAMURA, Y. et alii. — An Evaluation of Lubrication in Wire Drawing, Wire Journal, 1980, p. 54.
- (23) AVITZUR, B. — Metal Forming: Process and Analysis, Tata McGraw Hill Co. Ltda., New Delhi, 1977, pp. 60-61.
- (24) MacLELLAN, G.D. — Some Friction Effects in Wire Drawing, J. Inst. Metals, 1952-53, pp. 1-13.
- (25) Idem, ibidem ref. (11), pp. 654-665.
- (26) MAJORS, H. — Studies in Cold - Drawing, Part 3: Determination of Friction Coefficient, Transactions of the ASME, 1956, pp. 79-87.
- (27) YANG, C.T. — On the Mechanics of Wire Drawing, J. Eng. Industry, 1961, pp. 523-530.
- (28) BOOR, U. — Views on the Use of Drawing Lubricants, Wire World International, Vol.16, 1974, p. 68.
- (29) Idem, ibidem ref. (28), pp. 68-70.
- (30) SMITH, B.F.; COOPER, A. — The Theory of Lubrication, Wire Journal, 1979, pp. 76-80.
- (31) LEE, D.J. — A Lubricant for Fine Wire Drawing, Wire Industry, 1978, p. 1004-1005.

- (32) Idem, ibidem ref. (16), pp. 455-462.
- (33) WISTREICH, J.G. — The Fundamentals of Wire Drawing, Metallurgical Reviews, 1958, pp. 97-142.
- (34) Idem, ibidem ref. (30), pp. 76-77.
- (35) WULFF, J. et alli - The Structure and Properties of Materials, J. Wiley, 1964, p. 105. in ref. (14), p. 31.
- (36) Idem, ibidem ref. (35). in ref. (14), p. 31.
- (37) HONEYCOMBE, R.W.K. - The Plastic Deformation of Metals, E. Arnold, Londres, 1977, p. 229. in ref. (14), p. 32.
- (38) Idem, ibidem ref. (37). in ref. (14), p. 32.

CAPÍTULO 4

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1. MATERIAIS

4.1.1. Matéria Prima

A matéria prima empregada nas experiências foi o cobre eletrolítico tenaz (CuETP) de diâmetro inicial 0,513 mm recozido, por ser de baixo custo, propriedades mecânicas favoráveis e fácil disponibilidade no comércio com a composição química conforme Tabela 4.1 fornecida pela PIRELLI S.A.

As propriedades mecânicas desse fio são as seguintes:

- resistência a tração: 392,3 MPa
- limite de escoamento: 239,1 MPa
- alongamento: 10,5 (% em 100 mm)

4.1.2. Lubrificantes

Como lubrificante de trefilação foi utilizado o TREFIL

Tabela. 4.1 - Composição química do cobre eletrolítico tenaz (CuETP)*

ELEMENTO	QUANTIDADE (MÁX)
Cu	99,96%
O	0,02%
As	2 ppm
Ag	8 ppm
Fe	6 ppm
Sb, Ni, Pb, Bi, Te, Zn, Sn, Cd	menor que 1 ppm

* De acordo com PIRELLI S/A

1269-P, fabricado por E.F. HOUGHTON DO BRASIL. Trata-se de um lubrificante semi-sintético de natureza gordurosa, que produz emulsões leitosas muito finas, do tipo óleo em água.

As características típicas desse lubrificante são:

- aspecto: óleo viscoso, límpido
- emulsão: leitosa, semi-translúcida
- pH da emulsão a 5%: 8,5 - 10,0
- material ativo: 90%

4.1.3. Fieiras

As fieiras utilizadas foram compostas com núcleos de diamantes, com propriedades e dimensões de acordo com PHILIPS DO BRASIL⁽¹⁾.

As fieiras de diamantes adquiridas possuem o perfil adequado para a trefilação de cobre, com as seguintes características:

- ângulo de entrada: $35 \pm 5^\circ$
- ângulo de redução: $20 \pm 2^\circ$
- ângulo de saída: $35 \pm 2^\circ$
- comprimento da região cilíndrica: 0,2 a 0,4 do diâmetro do orifício

4.1.4. Apontamento dos Fios

Os fios foram apontados através de uma solução de NH_3 mais água na proporção de 1:1, para se proceder a passagem inicial na fieira.

4.2. EQUIPAMENTOS

4.2.1. Máquina Trefiladora de Laboratório

As experiências de trefilação foram efetuadas em uma máquina trefiladora de laboratório, desenvolvida por ZAVAGLIA⁽²⁾ e tem a seguinte composição: uma desbobinadora, três fieiras intercaladas com três anéis tirantes e uma bobinadora. Possui quatro motores de corrente contínua, sendo três deles acoplados aos anéis tirantes e o último a bobinadora. O controle das velocidades dos motores é feito por um sistema eletrônico, com controle individual da velocidade de cada motor e um controle geral para os três motores vinculados às fieiras.

A Figura 4.1 apresenta o desenho geral da máquina com detalhamento.

O sistema de lubrificação é constituído de uma bomba movida por um motor de corrente alternada de 1/4 HP, com filtro para retirar a sujeira e partículas metálicas incorporadas ao lubrificante, e um reservatório para lubrificantes com 30ℓ de capacidade. O lubrificante é enviado pela bomba a três tubos de borracha, tendo um bico direcional flexível em cada extremidade, que irão lubrificar as três fieiras. O retorno ocorre através de dois tubos de borracha.

A Figura 4.2 apresenta o sistema de lubrificação, com a disposição e a listagem dos elementos constituintes.

O controle das velocidades dos motores é efetuado por um equipamento eletrônico com controle individual para cada motor e

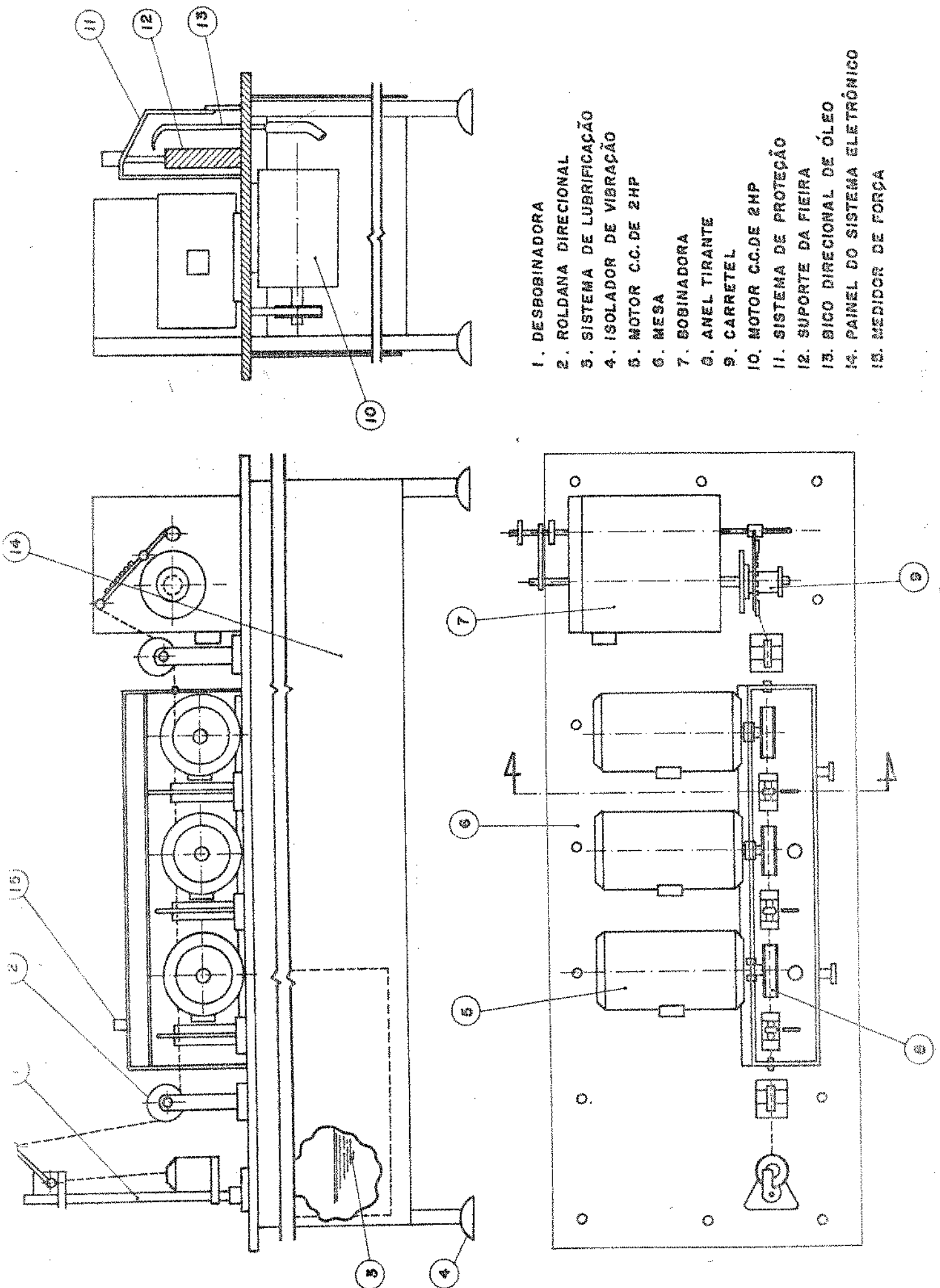
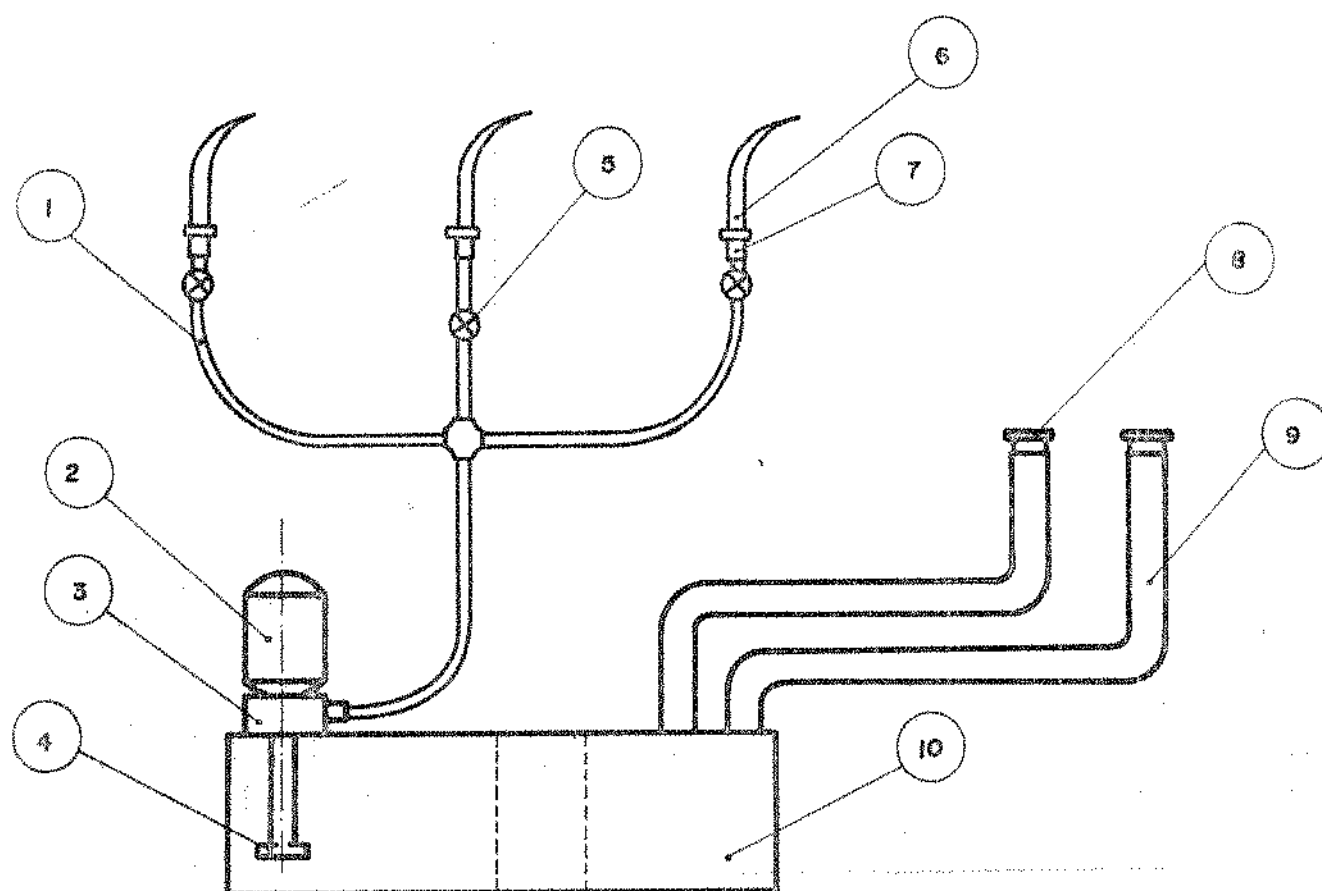


Figura 4.1 - Máquina trefiladora de laboratório.



1.9	TUBOS DE BORRACHA
2	MOTOR
3	BOMBA
4	FILTRO
5	VALVULA
6	BICO FLEXIVEL
7.8	CONEXÕES
10	RESERVATÓRIO

Figura 4.2 - Sistema de lubrificação.

controle geral para os três motores acoplados aos anéis tirantes, conforme Figura 4.3. Desse modo é possível trabalhar com qualquer motor separadamente, ou dois deles, ou com os três motores. Através do controle geral é possível variar as velocidades dos motores, mantendo a proporção entre as velocidades dos motores, que devem ser diferentes devido à deformação plástica do fio.

O funcionamento da máquina (Fig. 4.1) é o seguinte: o fio é desenrolado de um carretel na desbobinadora, passa por uma roldana direcional, é tracionado por um anel tirante, passando através da primeira fieira onde ocorre a primeira redução. Ocorre deslizamento do fio no anel. A seguir o fio sofre mais duas reduções de modo análogo e é enrolado pela bobinadora em outro carretel. Para compensar o aumento de comprimento do fio em cada redução, o segundo motor gira a uma velocidade maior que o primeiro e o terceiro a uma velocidade maior que o segundo. Após cada passada do fio pela máquina, as três fieiras são substituídas por outras três de diâmetros menores e assim sucessivamente até se efetuar a redução total desejada.

Durante todo o processo é efetuada uma lubrificação por aspersão no material que está sendo trefilado.

4.2.2. Dispositivo de Medição de Forças de Trefilação

a - Considerações Gerais

Para medir forças de trefilação foi contruído um dispositivo especial, a exemplo do usado por ZAVAGLIA et alii⁽³⁾. O dispositivo consiste essencialmente de uma haste retangular de aço

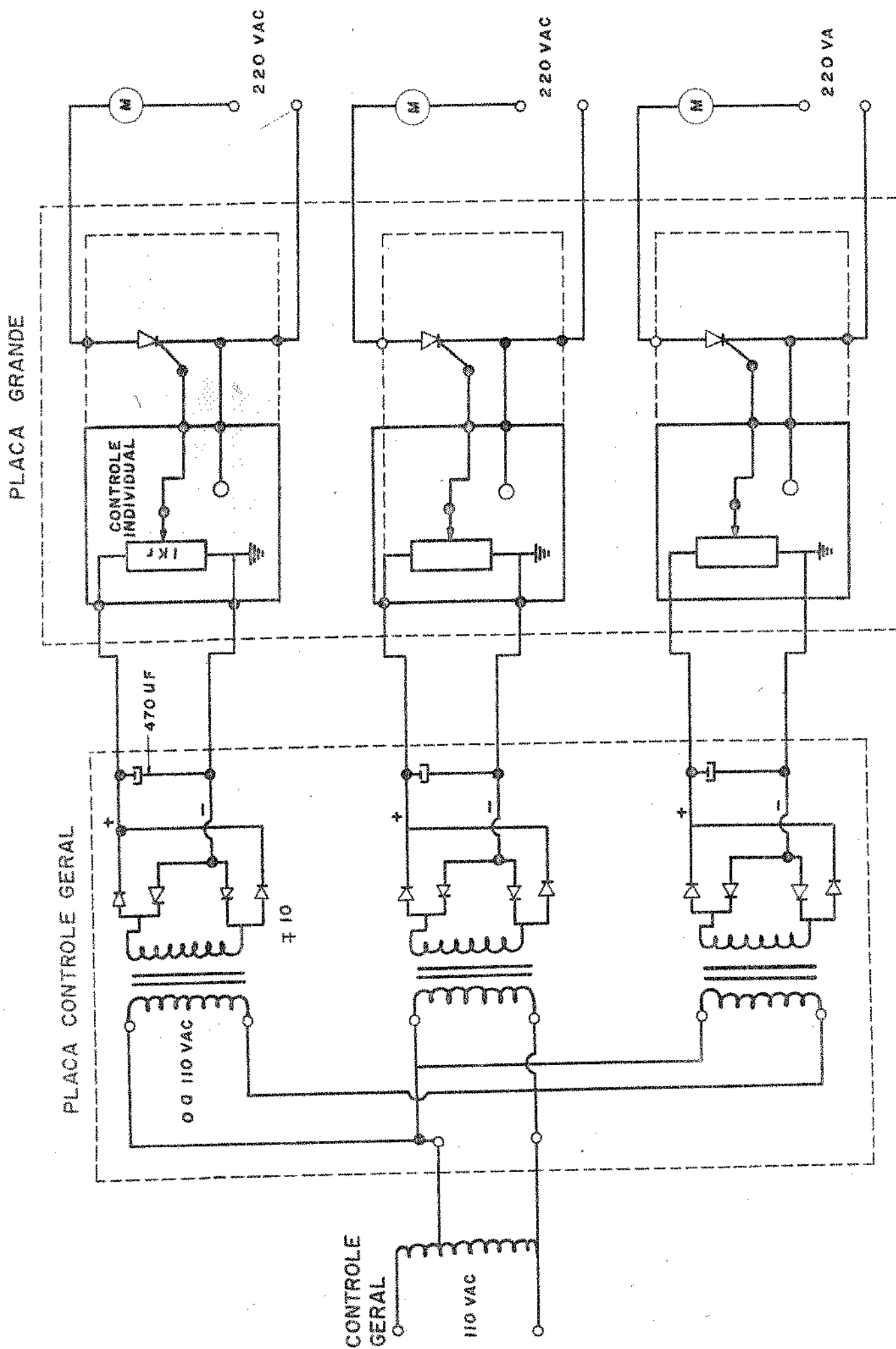


Figura 4.3 - Sistema do controle de velocidade.

temperado que se deforma sob a ação da força de trefilação aplicada na extremidade da mesma, conforme Figura 4.4a. Esta deformação é detectada por extensômetros elétricos, colados na superfície da haste. A Figura 4.4b apresenta a disposição dos extensômetros na região de medida. Os extensômetros estão ligados em circuitos de ponte de *wheatstone* (Fig. 4.4c), de maneira que as variações das resistências elétricas, devido as variações de seus comprimentos, são acusados pelo desequilíbrio da ponte.

A alimentação dos circuitos, assim como a saída do sinal, é efetuada através de pontes amplificadoras (ver item 4.2.3).

O dispositivo mede força de trefilação até 30N e sua precisão é de 4% com 95% de confiança. Esse dispositivo é colocado entre o suporte da fieira e o anel tirante que traciona o fio conforme ilustra a Figura 4.7 e dessa forma mede força de trefilação.

b - Características da Haste Flexível

O material usado na haste do dispositivo de medição de forças de trefilação foi o aço temperado VWM-2 de fabricação de AÇOS VILLARES S.A.⁽⁴⁾, com as seguintes características:

- composição química: C = 0,85%; Si = 0,3%; Mn = 0,25%;
S = 0,03%; P = 0,03%; Mo = 5%;
V = 2%; Cr = 4% e W = 6%;
- limite de escoamento: 812,2 MPa;
- módulo de elasticidade: $205,9 \times 10^3$ MPa.

As dimensões da haste do dispositivo (Fig. 4.4a) que está

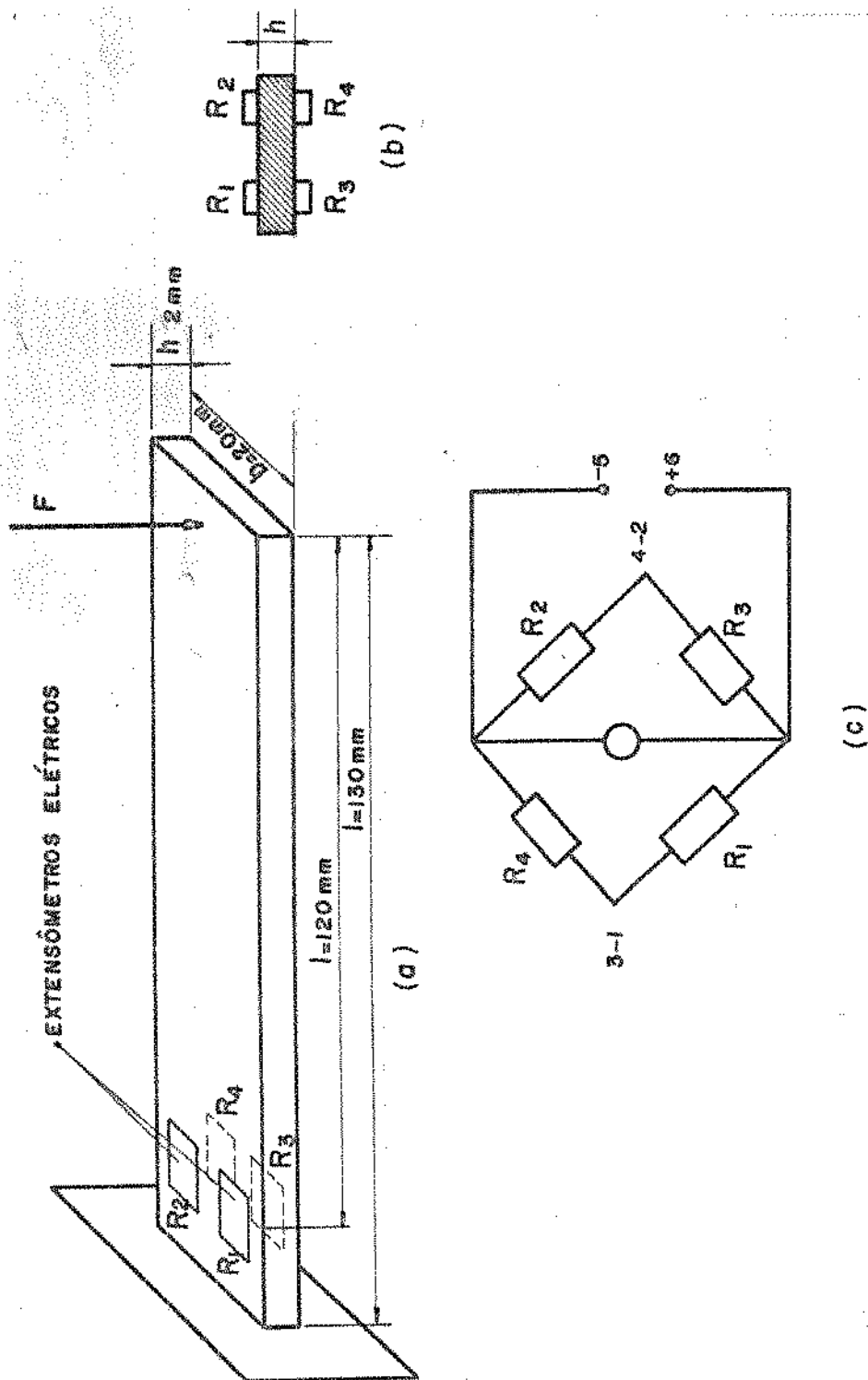


Figura 4.4 - (a) Dimensões da haste flexível.
 (b) Disposição dos extensômetros na haste.
 (c) Ligação dos extensômetros na ponte amplificadora.

sujeita a esforços de flexão, são escolhidas de modo que a mesma se deforme sempre na região elástica e deve-se observar a seguinte relação⁽⁵⁾:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} \leq \sigma_0 \quad (4.1)$$

sendo:

$$M_{\max} = F \cdot \ell \quad \text{e} \quad W = \frac{b h^2}{6}$$

onde:

$\sigma_{\max}$ = tensão admissível máxima na haste

$M_{\max}$ = momento fletor máximo

F = força máxima aplicada na haste

W = módulo de flexão

ℓ = comprimento da haste

b = largura da haste

h = espessura da haste

σ_0 = tensão de escoamento do material da haste

Adotando:

$$F = 30 \text{ N}$$

$$\ell = 120 \text{ mm}$$

$$b = 20 \text{ mm}$$

$$h = 2 \text{ mm}$$

tem-se:

$$\sigma_{\max} = 270,7 \text{ MPa} \leq \sigma_0 \quad \text{para} \quad \sigma_0 = 812,2 \text{ MPa}$$

Então, as dimensões adotadas satisfazem as condições de projeto.

As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam respectivamente o dispositivo de medição de forças construído e uma vista geral da máquina trefiladora com o dispositivo.

c - Características dos Extensômetros Elétricos

Para a escolha dos extensômetros elétricos, torna-se necessária a determinação da deformação máxima na região de medida do dispositivo:

$$\epsilon_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{E} = 13.147 \text{ } \mu\text{d} \quad (4.2)$$

onde:

$$\epsilon = 1.10^6 \text{ } \mu\text{d} \text{ (micro deformação)}$$

$$E = \text{módulo de elasticidade do material da} \\ \text{haste} = 205,9 \times 10^3 \text{ MPa}$$

Baseando-se nesta deformação máxima de trabalho, foram escolhidos os extensômetros SHINCOH, B.L.H B-4S-12T11, com as seguintes características:

- tipo = chapa metálica
- resistência = $120 \pm 0,2 \text{ } \Omega$

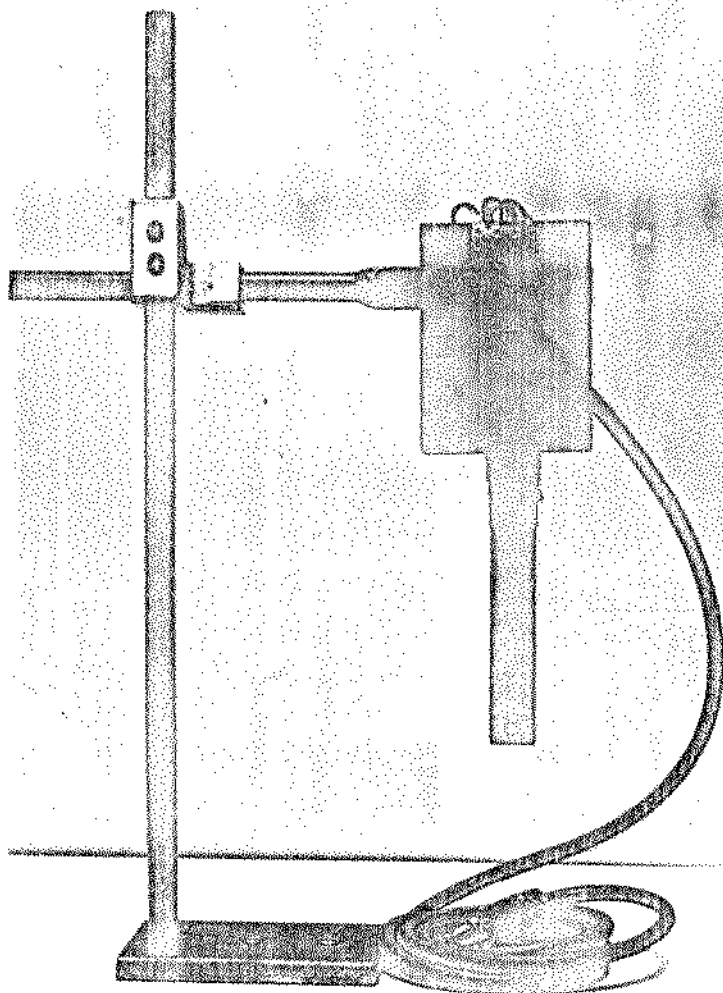


Figura 4.5 - Dispositivo de medição de forças construído.

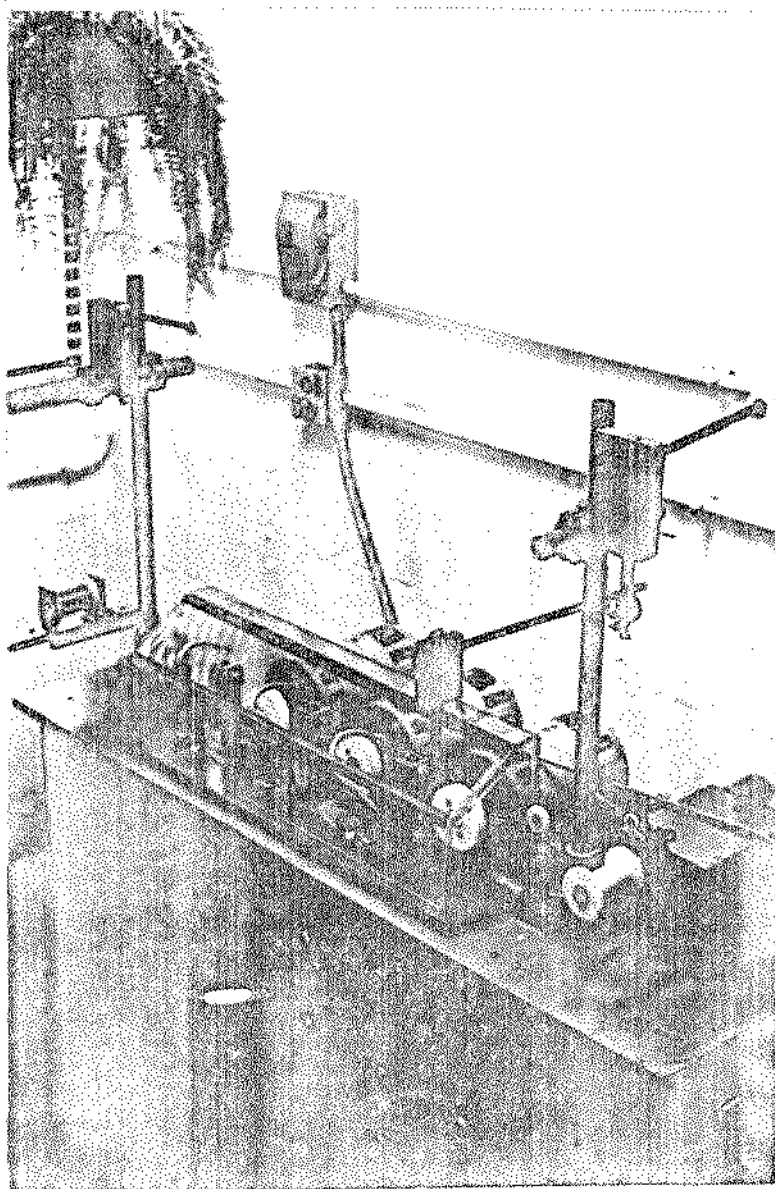


Figura 4.6 - Vista geral da máquina trefiladora com dispositivo de medição de forças.

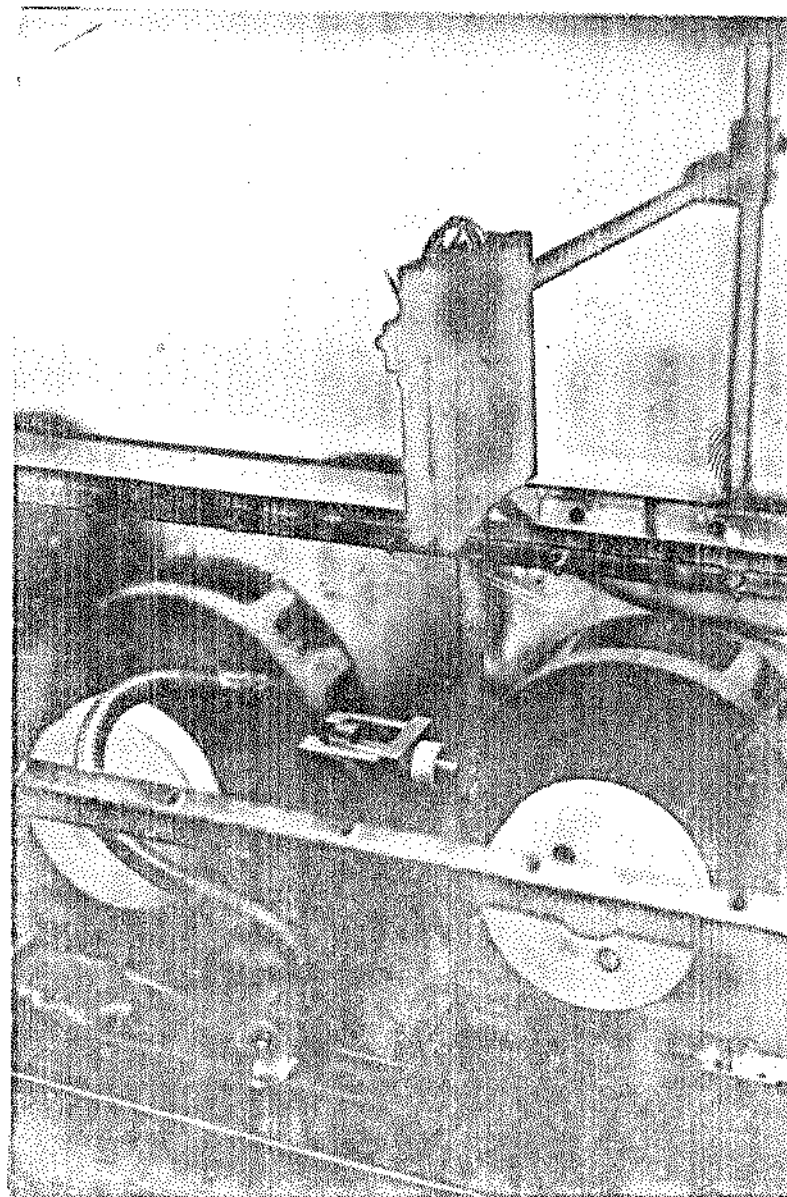


Figura 4.7 - Dispositivo de medição de forças entre o suporte da fieira e o anel tirante.

- corrente máxima admissível . = 10 mA
- coeficiente de sensibilidade = $2,03 \pm 1\%$
- máxima deformação = 50.000 μ d
- comprimento = 4 mm
- largura = 3,5 mm

Os extensômetros utilizados foram de um mesmo lote de fabricação, de maneira a possibilitar fácil equilíbrio no balanceamento da ponte amplificadora utilizada.

d - Aferição do Dispositivo

Após a colagem dos extensômetros na região de medida foi determinada a curva de aferição do dispositivo, a qual indica a relação existente entre as leituras da deformação dos extensômetros elétricos na ponte amplificadora e os valores das cargas aplicadas no dispositivo.

A aferição do dispositivo foi feita através de uma balança engastada no dispositivo, construída para esse fim, através de aplicações de pesos previamente aferidos. A Figura 4.8 mostra um aspecto da aferição do dispositivo.

Os pares de valores F_i (carga aplicada no dispositivo, em Newton) versus L_i (leituras da deformação dos extensômetros elétricos na ponte amplificadora, em volts) se encontram registrados na Tabela 4.2.

A fim de traçarmos uma reta que exprima a curva de aferição do dispositivo, podemos utilizar o método dos mínimos quadrados⁽⁶⁾.

Seja a reta de regressão:

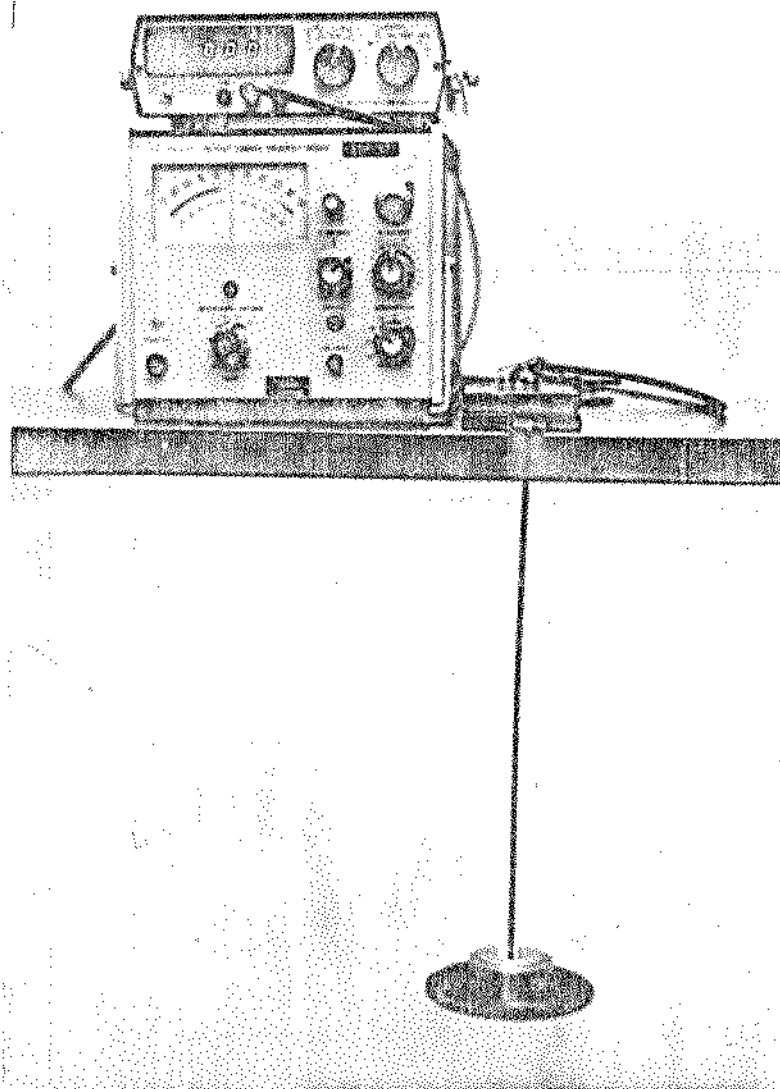


Figura 4.8 - Aspecto de aferição do dispositivo de medição de forças.

Bc/4839

Tabela. 4.2 - Valores das leituras das deformações
obtidas na aferição do dispositivo

Carga (N)	LEITURAS (Volts)					
	1. ^a	2. ^a	3. ^a	4. ^a	5. ^a	6. ^a
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,98	0,045	0,044	0,043	0,046	0,043	0,045
1,96	0,090	0,089	0,087	0,090	0,087	0,088
2,94	0,131	0,130	0,130	0,131	0,129	0,129
3,92	0,179	0,173	0,174	0,174	0,173	0,174
5,88	0,264	0,242	0,249	0,245	0,250	0,251
7,84	0,339	0,314	0,317	0,317	0,321	0,322
9,81	0,408	0,375	0,381	0,386	0,387	0,389
11,77	0,471	0,447	0,444	0,450	0,450	0,454
13,73	0,541	0,513	0,506	0,517	0,513	0,514
15,69	0,595	0,579	0,569	0,580	0,574	0,571
17,66	0,661	0,645	0,633	0,650	0,638	0,637
19,61	0,719	0,708	0,695	0,709	0,699	0,699
24,52	0,846	0,854	0,849	0,851	0,851	0,852
29,42	0,997	0,998	1,000	1,000	1,001	1,001

$$y_i = a + b (x_i - \bar{x}) \quad (4.3)$$

obtida a partir do conjunto de pontos

$$\begin{array}{ccccccccc} x_1 & - & y_{11}, & y_{12}, & \dots, & y_{1j}, & \dots, & y_{1n_1} \\ x_2 & - & y_{21}, & y_{22}, & \dots, & y_{2j}, & \dots, & y_{2n_2} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_k & - & y_{k1}, & y_{k2}, & \dots, & y_{kj}, & \dots, & y_{kn_k} \end{array} \quad (4.4.)$$

onde x é uma variável não aleatória de tamanho k . Para cada valor x_i de x , corresponde um número n_i de observações da variável aleatória y .

Aplicando o teorema de FIELLER⁽⁷⁾ tem-se a equação da reta inversa,

$$x_i = \bar{x} + \frac{b(y_i - a)}{b^2 - \frac{t^2 S_*^2}{\sum_{i=1}^k n_i (x_i - \bar{x})^2}} \quad (4.4)$$

O erro x_i será dado por:

$$\Delta x_i = \frac{t S_*}{b^2 - \frac{t^2 S_*^2}{\sum_{i=1}^k n_i (x_i - \bar{x})^2}} \left\{ \left[b^2 - \frac{t^2 S_*^2}{\sum_{i=1}^k n_i (x_i - \bar{x})^2} \right] \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{n} \right) + \frac{(y_i - a)^2}{\sum_{i=1}^k n_i (x_i - \bar{x})^2} \right\}^{1/2} \quad (4.5)$$

sendo:

$$n = \sum_{i=1}^k n_i \quad (4.6)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i x_i}{n} \quad (4.7)$$

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}}{n_i} \quad (4.8)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^k y_i}{k} \quad (4.9)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^k n_i (x_i - \bar{x}) y_i}{\sum_{i=1}^k n_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.10)$$

$$S_*^2 = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{n - k} \quad (4.11)$$

onde:

k = número de variáveis independentes

n = número total de observações

n_i = número de observações para cada carga

t = distribuição de student t p/ 95% de confiança

$\bar{x}$ = média aritmética dos valores obtidos

$\bar{y}_i$ = média baseada em n_i observações, todas elas pressupos

tas como provenientes de um mesmo, porém desconhecido valor de x_i

a = coeficiente linear da reta

b = coeficiente angular da reta

S_*^2 = estimativa do desvio

Os valores de Σy_i , Σx_i , $\Sigma (x_i - \bar{x})^2$, $\Sigma (x_i - \bar{x}) y_i$ e $\Sigma (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$ estão computados na Tabela 4.3.

Temos portanto:

$$k = 15$$

$$\Sigma y_i = 6,144$$

$$n_i = 6$$

$$\Sigma x_i = 165,73$$

$$n = 90$$

$$\Sigma (x_i - \bar{x})^2 = 1125,97$$

$$t = 1,96 \quad (n > 30)$$

$$\Sigma (x_i - \bar{x}) y_i = 38,212$$

$$\Sigma (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 = 5433 \cdot 10^{-6}$$

Aplicando-se os valores acima nas equações (4.5) a (4.11) tem-se:

$$\bar{x} = 11,04$$

$$a = 0,41$$

$$b = 0,033$$

$$S_*^2 = 7,2 \times 10^{-5}$$

$$m = 1 \quad (\text{para uma leitura, em cada carga aplicada durante})$$

Tabela. 4.3 - Computação de $\Sigma \bar{x}_i$, $\Sigma \bar{y}_i$, $\Sigma (x_i - \bar{x})^2$,
 $\Sigma (x_i - \bar{x})y_i$ e $\Sigma (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$
(método dos mínimos quadrados)

i	x_i	$\bar{y}_i$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(x_i - \bar{x})y_i$	$(y_{ij} - \bar{y}_i)^2$
1	0,00	0,000	121,88	0,000	0,00
2	0,98	0,044	101,20	-0,443	8,10 ⁶
3	1,96	0,088	82,45	-0,799	12.
4	2,94	0,130	65,61	-1,053	27.
5	3,92	0,174	50,69	-1,239	38.
6	5,88	0,250	26,62	-1,290	287.
7	7,84	0,322	10,24	-1,030	644.
8	9,81	0,388	1,51	-0,477	797.
9	11,77	0,453	0,52	0,326	665.
10	13,73	0,517	7,24	1,391	787.
11	15,69	0,579	21,62	2,692	919.
12	17,66	0,644	43,69	4,257	727.
13	19,61	0,705	73,44	6,042	453.
14	24,52	0,851	181,44	11,463	57.
15	29,42	0,999	337,82	18,362	12.
Σ	165,73	6,144	1.125,97	38,212	5433.10 ⁻⁶

a utilização do dispositivo)

Substituindo os valores acima nas equações (4.4) e (4.5) tem-se:

$$F_i = 11,04 + 29,42 (L_i - 0,410) \quad (4.12)$$

$$\Delta F_i = 15,31 \sqrt{0,0011 - \frac{(L_i - 0,410)^2}{6.755,82}} \quad (4.13)$$

onde:

L_i = leitura da deformação dos extensômetros elétricos na ponte amplificadora, em volts;

F_i = carga aplicada no dispositivo, em newton;

ΔF_i = erro da carga aplicada F_i , em função de uma determinada leitura da deformação dos extensômetros elétricos L_i na ponte amplificadora.

A Figura 4.9 apresenta a curva de aferição do dispositivo de medição de forças.

Calculando-se o erro relativo $\Delta F_i / F_i$, construiu-se a curva da Figura 4.10.

Para leituras da deformação dos extensômetros elétricos na ponte amplificadora superiores a 0,400 volts, o erro relativo da carga aplicada no dispositivo é inferior a 4%, com 95% de confiança.

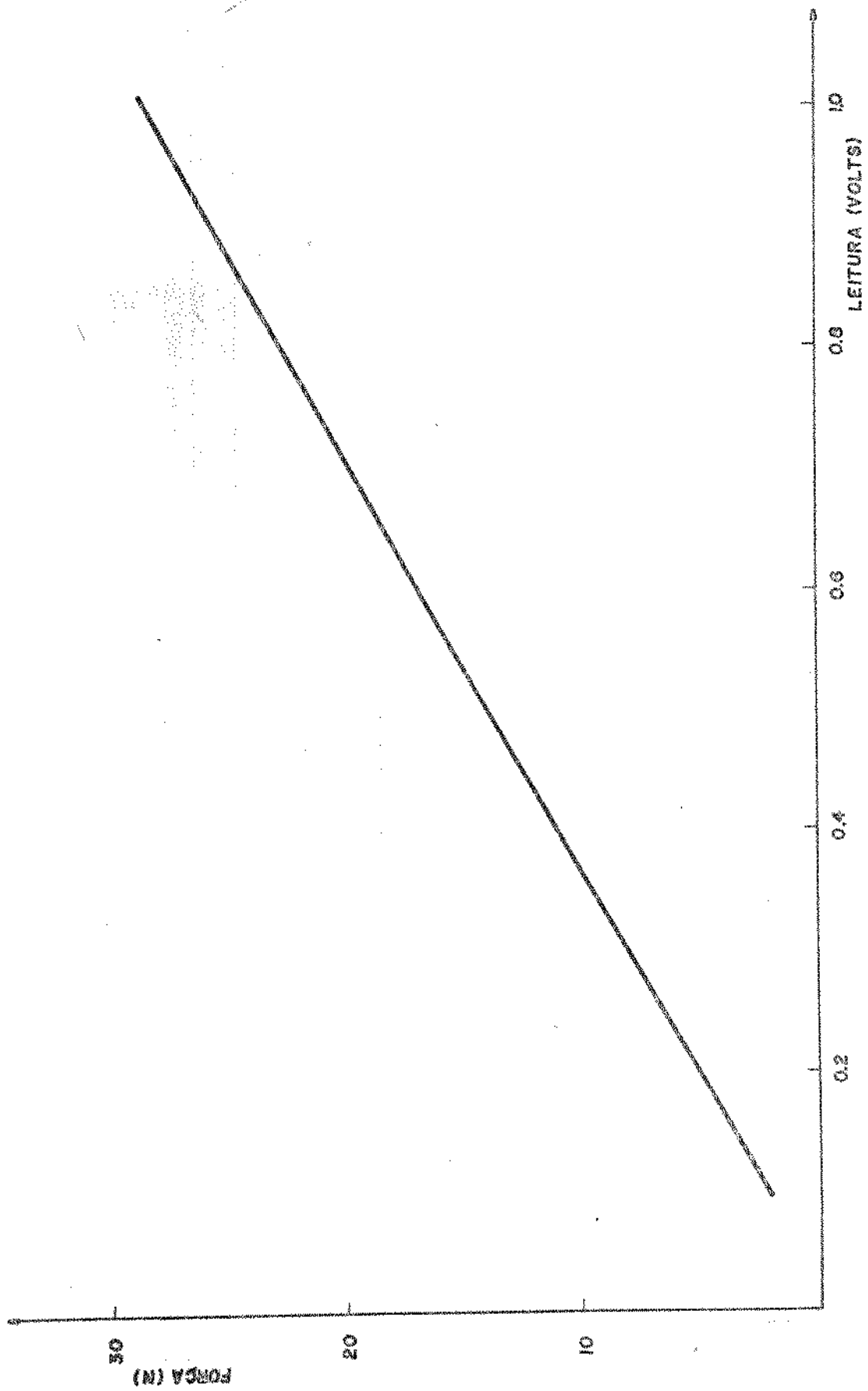


Figura 4.9 - Curva de aferição do dispositivo de medição de forças.

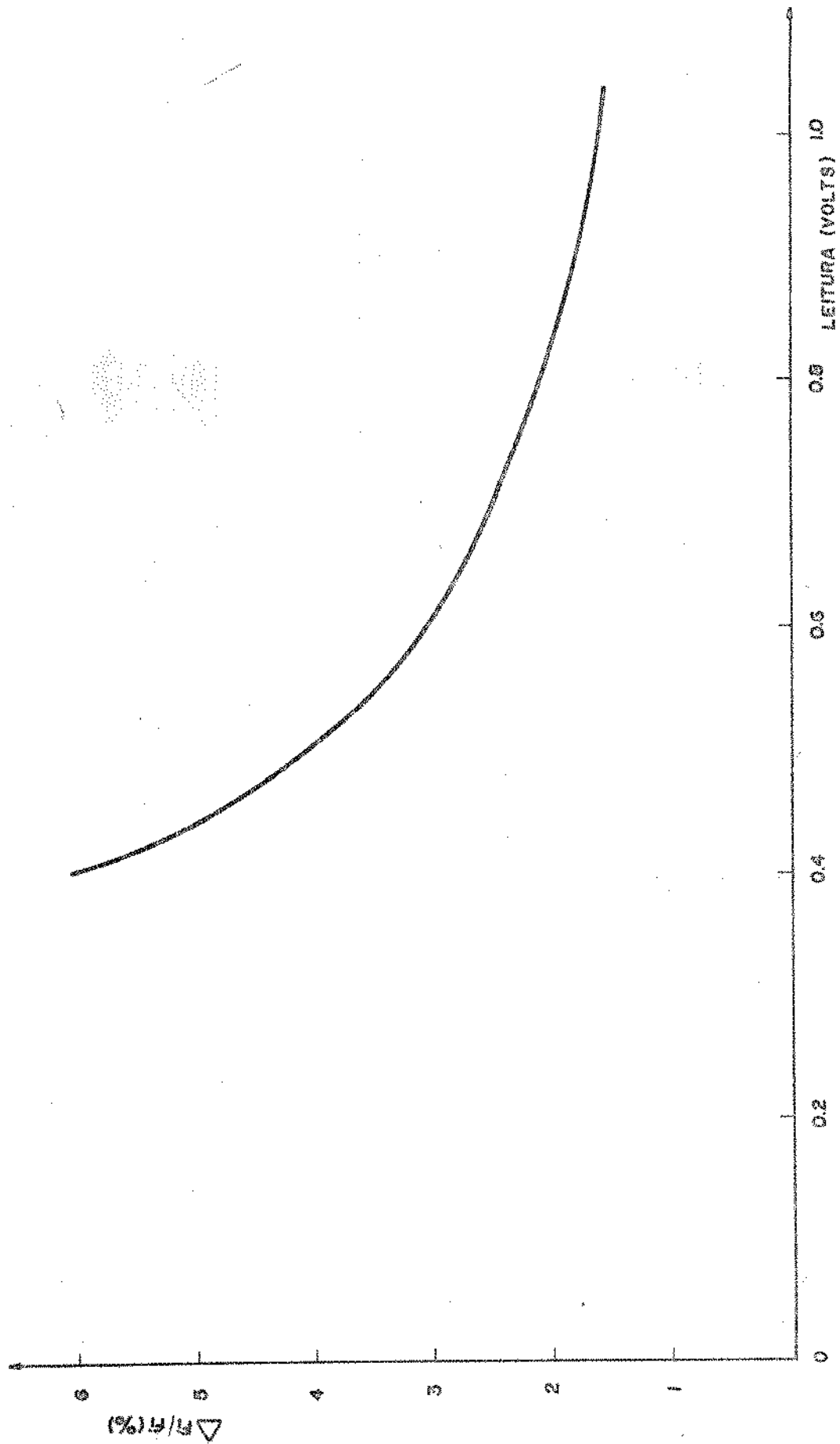


Figura 4.10 - Erro relativo da carga F_i aplicada na haste flexível do dispositivo de medição de forças em função da leitura na ponte amplificadora.

e - Funcionamento do Dispositivo⁽⁸⁾

O dispositivo construído funciona da seguinte maneira (Fig. 4.11): a fieira que permanece solta no suporte "1", é puxada pelo fio de encontro a um tubo metálico "2"; em consequência ocorre um deslocamento do tubo que por sua vez, movimenta uma haste flexível "4" na qual estão colocados extensômetros elétricos "5". Para diminuir o atrito entre o tubo metálico e o suporte, foi colocada uma bucha de teflon "3" envolvendo o orifício por onde o tubo desliza; além disso o tubo foi lubrificado.

4.2.3. Ponte Amplificadora e Multímetro Digital

As leituras das deformações dos extensômetros elétricos do sistema de medição de forças foram medidas por uma ponte amplificadora PHYLIPS PR 9307 com um canal de alimentação com tensão de alimentação empregada de 4 volts. Para uma leitura mais precisa foi acoplado à ponte amplificadora um MULTÍMETRO DIGITAL ANALOG M3525.

4.2.4. Tacômetro

As velocidades dos motores (r.p.m.) foram medidas por um tacômetro mecânico, marca DEUMO modelo HT50 com um apalpador mecânico.

4.2.5. Equipamento para Ensaios de Tração

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina

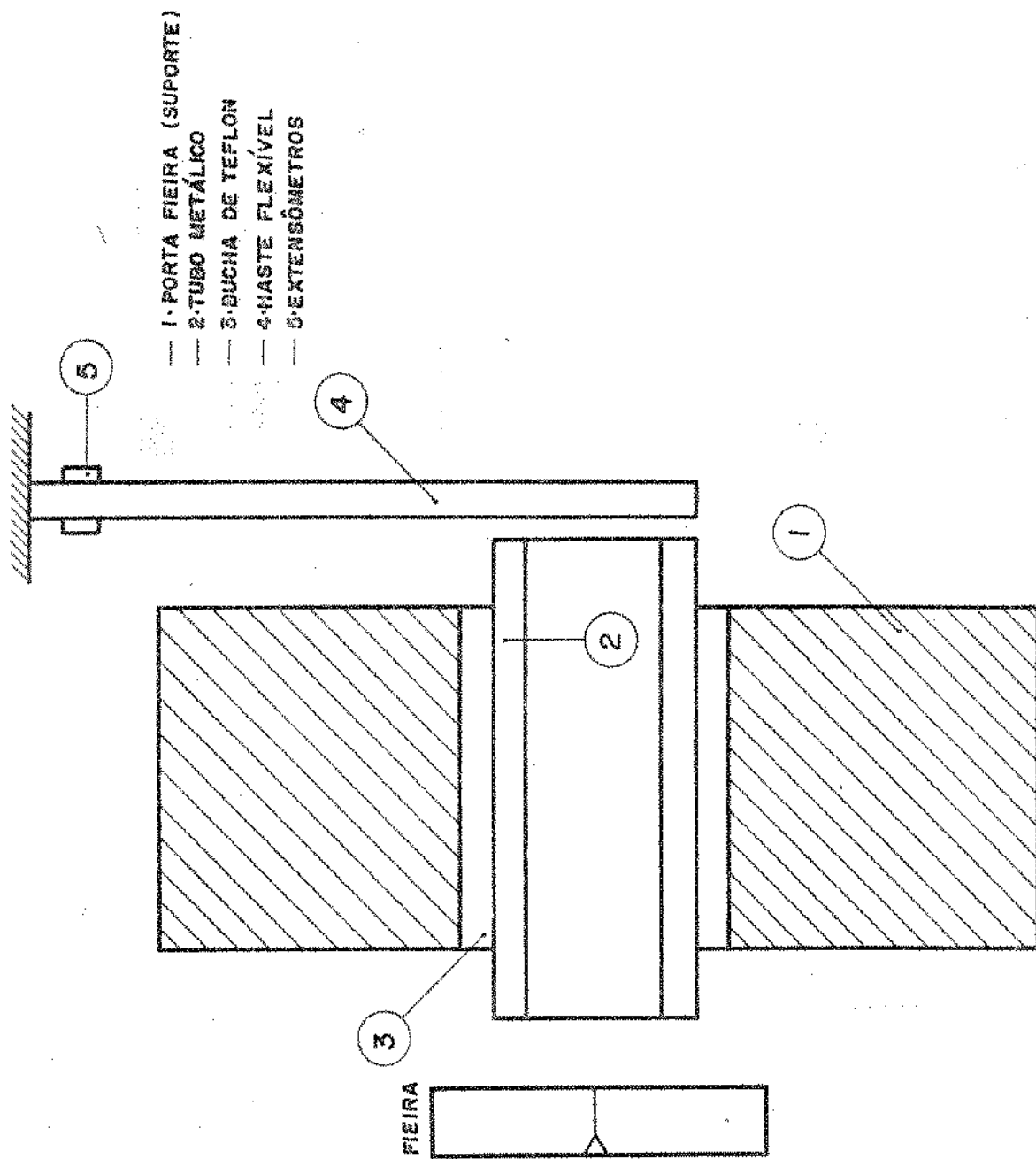


Figura 4.11 - Funcionamento do dispositivo de medição de forças⁽⁸⁾.

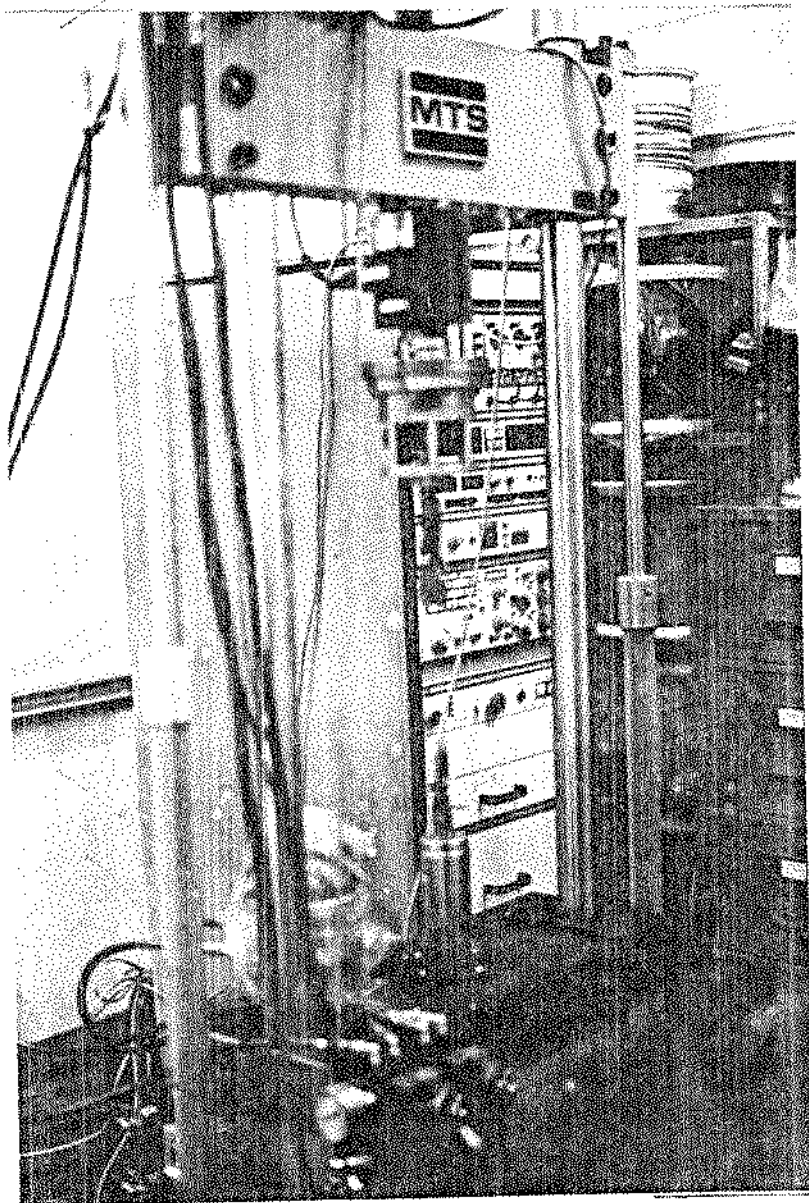


Figura 4.12 - Máquina M.T.S. para ensaio de tração.

M.T.S. (Fig. 4.12) instalada no Instituto de Física da UNICAMP, com capacidade de 98.068 N e equipada com uma célula de carga marca M.T.S. com uma base de medida de 980,7 N.

4.3. DESCRIÇÃO DAS EXPERIÊNCIAS

As experiências efetuadas na máquina trefiladora de laboratório para fios finos de cobre visaram verificar a influência do aumento da velocidade na força de trefilação e conseqüentemente na tensão de trefilação.

Partiu-se de um fio com 0,513 mm de diâmetro, chegando-se a 0,150 mm. A seqüência de redução por passe (Tabela 4.4) foram aproximadamente iguais a 18%.

Foram efetuadas cento e oitenta experiências, variando-se a velocidade de trefilação de 0,05 a 0,25 m/s (Tabela 4.5); para cada série de doze reduções de área foi adotada um nível de velocidade sempre crescente; e para cada combinação de redução e velocidades diferentes foram realizadas três experiências.

Foi utilizado apenas um motor com a finalidade de eliminar as eventuais influências dos outros motores na força de tração que provoca a primeira redução.

Os resultados experimentais das tensões de trefilação foram comparados com os resultados obtidos pelos modelos teóricos. O objetivo dessa comparação foi verificar a validade dos modelos teóricos em função das alterações introduzidas nos mesmos, tais como: limite de escoamento variável ($\overline{\sigma}_0$) para cada redução de área, e coeficiente de encruamento (n), obtidos através do ensaio

Tabela. 4.4 - Seqüência de redução de área adotada

Número da Redução	Diâmetro de Entrada (mm)	Diâmetro de Saída (mm)	REDUÇÃO (%)	
			Por Passe	Acumulado
1	0,513	0,465	18	18
2	0,465	0,422	18	32
3	0,422	0,383	18	44
4	0,383	0,347	18	54
5	0,347	0,316	17	62
6	0,316	0,286	18	69
7	0,286	0,260	17	74
8	0,260	0,236	18	79
9	0,236	0,213	17	83
10	0,213	0,194	17	86
11	0,194	0,176	18	88
12	0,176	0,160	17	90

Tabela. 4.5 - Níveis de velocidades adotadas

Níveis	Velocidade Angular (ω) (rpm)	Velocidade de trefilação (v) (m/s)
1	60	0,05
2	120	0,10
3	180	0,15
4	240	0,20
5	300	0,25

Observação: O diâmetro do anel tirante é de ϕ 100 mm.

de tração e do coeficiente de atrito (μ) estimado e calculado. Esses modelos foram escolhidos em função dos métodos adotados e dos fatores que cada modelo adota.

Após cada passada do fio pela máquina, foram retiradas três amostras de 50 mm para verificações das propriedades mecânicas, através de ensaios de tração. Para todos os ensaios de tração foram traçados gráficos tensão-deformação, com auxílio da célula de carga. A velocidade de deformação adotada nos ensaios foi de 10^{-3} s^{-1} .

4.4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Catálogo da S.A. Phylips do Brasil - Informações sobre o Produto Comercial Fieiras de Diamante, São Paulo.
- (2) ZAVAGLIA, C.A.C. - Contribuição ao Estudo da Trefilação de Fios Capilares de Metais Não-Ferrosos, Tese de Mestrado, UNICAMP/DEM, 1979, pp. 71-89.
- (3) ZAVAGLIA, C.A.C. et alii - Dispositivo para Determinação da Força de Trefilação de Fios Capilares Metálicos. V Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1979, Campinas, pp. B-201-210.
- (4) AÇOS VILLARES S.A. - Catálogo sobre Aços Villares para Construção Mecânica, São Paulo, 1980.
- (5) PROVENZA, F. - Prontuário do Projetista de Máquinas, PRO-TEC, São Paulo, 1976, p. 3-76.
- (6) LEME, R.A.S. - Curso de Estatística, Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico, 1969, pp.
- (7) ARAUJO, S. - Dinamômetro para Medidas de Forças no Torneamento - Tese de Mestrado, Publicação CT-Nº5 - 1975, p. 60.
- (8) Idem, Ibidem ref. (3), pp. B-203-204.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. RESULTADOS DAS TENSÕES DE TREFILAÇÃO

5.1.1. Resultados Obtidos Experimentalmente

Na Tabela 5.1 encontram-se os resultados das forças e tensões de trefilação obtidas experimentalmente a cinco níveis de velocidades diferentes para cada redução de área, que colocados em gráfico nos fornece as curvas da Figura 5.1. As forças e tensões indicadas representam o valor médio de um conjunto de três medidas.

5.1.2. Resultados Obtidos dos Diferentes Modelos Teóricos

Nas Tabelas 5.2 a 5.7 e 5.9 a 5.13, encontram-se os resultados das tensões de trefilação obtidas dos diferentes modelos teóricos levando em conta a variação do limite de escoamento para cada redução de área (Tabela 5.14) e o coeficiente de atrito estimado ($\mu = 0,03$) e calculado

Tabela 5.1 - Resultados das forças e tensões de trefilação obtidas experimentalmente a cinco níveis de velocidades (valores médios de três experiências)

Número da Redução	Diâmetro de Saída (mm)	Redução Total (%)	FORÇA DE TREFILAÇÃO (N)					TENSÃO DE TREFILAÇÃO (MPa)				
			F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	σ_{t1}	σ_{t2}	σ_{t3}	σ_{t4}	σ_{t5}
1	0,465	18	19,93	20,84	21,81	22,08	22,25	117,35	122,72	128,43	130,02	131,02
2	0,422	32	19,28	20,22	21,07	21,60	21,75	137,85	144,57	150,64	154,43	155,51
3	0,383	44	18,40	19,81	20,31	20,63	21,10	159,71	171,95	176,29	179,07	183,15
4	0,347	54	16,93	17,57	19,51	19,96	20,54	179,02	185,79	206,30	211,06	217,20
5	0,316	62	15,07	15,20	15,37	15,93	18,00	192,16	193,81	195,98	203,12	229,52
6	0,286	69	13,48	13,83	14,33	14,63	16,25	209,83	215,28	223,37	227,73	252,95
7	0,260	74	11,25	11,98	12,25	12,72	13,04	211,90	225,65	230,73	239,58	245,61
8	0,236	79	10,39	10,60	11,10	11,98	12,25	237,52	242,32	253,75	273,87	280,04
9	0,213	83	7,66	8,10	8,28	10,57	11,25	214,98	227,32	232,38	296,64	315,73
10	0,194	86	6,98	7,34	7,36	7,69	8,04	236,14	248,32	249,00	260,16	272,00
11	0,176	88	6,01	6,19	6,19	6,22	6,22	247,04	254,44	254,44	255,67	255,67
12	0,160	90	4,04	4,07	4,10	4,13	4,13	200,94	202,43	203,92	205,41	205,41

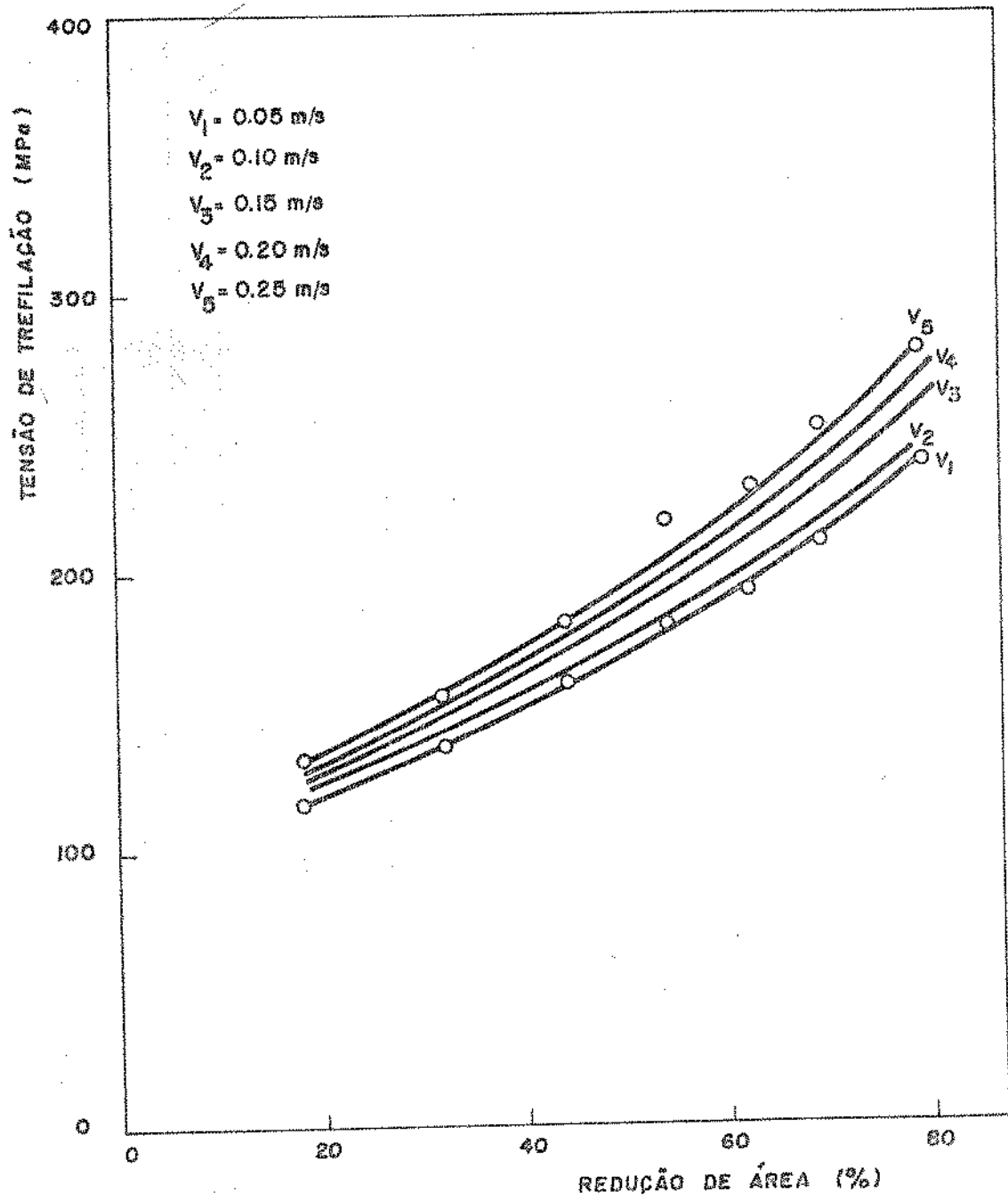


Figura 5.1 - Efeito da velocidade de trabalho na tensão de trefilação.

Tabela 5.2 - Resultados das tensões de trefilação obtidas segundo modelos teóricos adotados

Número da Redução	Diâmetro de Saída (mm)	Redução Total (%)	Tensões de Trefilação (MPa)								TROZERA	AVITZUR
			POMP, SIEBEL E HOUDREMENT	SACHS E VAN HORN	SIEBEL	SACHS	KORBER E EICHINGER	DAVIS E DOKOS	WHITTON	YANG		
1	0,465	18	56,83	57,82	88,95	54,36	93,89	58,32	84,01	66,72	66,72	94,85
2	0,422	32	58,65	59,67	91,80	56,10	96,90	60,19	86,70	68,85	68,85	97,85
3	0,383	44	59,32	60,35	92,85	56,74	98,00	60,87	87,69	69,63	69,63	98,99
4	0,347	54	60,90	61,96	95,32	58,26	100,63	62,51	90,04	71,50	71,50	101,61
5	0,316	62	60,90	61,96	95,32	58,26	100,63	62,51	90,04	71,50	71,50	101,61
6	0,286	69	61,13	62,20	95,68	58,48	101,00	62,75	90,38	71,77	71,77	101,99
7	0,260	74	61,80	62,87	96,73	59,11	102,10	63,43	91,35	72,55	72,55	103,13
8	0,236	79	62,26	63,34	97,45	59,55	102,86	63,91	92,03	73,09	73,09	103,89
9	0,213	83	63,39	64,49	99,22	60,63	104,73	65,07	93,70	74,41	74,41	105,76
10	0,194	86	62,47	63,55	97,78	59,75	103,21	64,12	92,34	73,33	73,33	104,24
11	0,176	88	63,59	64,70	99,53	60,83	105,07	65,28	94,01	74,65	74,65	106,16
12	0,160	90	63,59	64,70	99,53	60,83	105,07	65,28	94,01	74,65	74,65	106,14

OBS.: Para os cálculos utilizaram-se os seguintes valores:

$\mu = 0,03$ (estimado) e $\bar{\sigma}_0$ obtidos experimentalmente para os fios trefilados a 0,05 m/s.

Tabela. 5.3 - Resultados das tensões de trefilação
obtidas segundo modelo de SACHS e VAN
HORN para μ estimado

Número da Redução	Diâmetro de Saída (mm)	Redução Total (%)	TENSÃO DE TREFILAÇÃO (MPa)				
			σ_{t_1}	σ_{t_2}	σ_{t_3}	σ_{t_4}	σ_{t_5}
1	0,465	18	57,8	58,1	59,0	59,2	59,4
2	0,422	32	59,7	59,9	59,9	60,1	60,1
3	0,383	44	60,4	60,8	61,3	61,3	61,7
4	0,347	54	62,0	62,0	62,2	62,2	62,4
5	0,316	62	62,0	62,4	62,4	62,6	62,9
6	0,286	69	62,2	62,6	62,9	62,9	63,1
7	0,260	74	62,9	63,1	63,3	63,3	63,8
8	0,236	79	63,3	63,6	63,6	63,8	63,8
9	0,213	83	64,5	64,5	64,7	64,7	65,4
10	0,194	86	63,6	64,0	64,0	64,3	64,7
11	0,176	88	64,7	64,7	64,7	64,9	64,9
12	0,160	90	64,7	64,9	64,9	65,2	65,4

Tabela. 5.4 - Resultados das tensões de trefilação obtidas segundo modelo de SIEBEL para μ estimado

Número da Redução	Diâmetro de Saída (mm)	Redução Total (%)	TENSÃO DE TREFILAÇÃO (MPa)				
			σ_{t_1}	σ_{t_2}	σ_{t_3}	σ_{t_4}	σ_{t_5}
1	0,465	18	89,0	90,8	90,9	91,1	91,4
2	0,422	32	91,8	92,2	92,2	92,5	92,5
3	0,383	44	92,9	94,2	94,4	94,2	95,0
4	0,347	54	95,3	95,7	95,7	95,7	96,0
5	0,316	62	95,3	96,0	96,0	96,4	99,7
6	0,286	69	95,7	96,7	96,4	96,7	97,1
7	0,260	74	96,7	97,5	97,1	97,5	98,1
8	0,236	79	97,5	97,8	97,8	98,1	98,1
9	0,213	83	99,2	99,5	99,2	99,5	100,6
10	0,194	86	97,8	98,5	98,5	98,9	99,5
11	0,176	88	99,5	99,5	99,5	99,7	99,9
12	0,160	90	99,5	99,9	99,9	100,3	100,6

Tabela. 5.5 - Resultados das tensões de trefilação
obtidas segundo modelo de WHITTON
para μ estimado

Número da Redução	Diâmetro de Saída (mm)	Redução Total (%)	TENSÃO DE TREFILAÇÃO (MPa)				
			σ_{t_1}	σ_{t_2}	σ_{t_3}	σ_{t_4}	σ_{t_5}
1	0,465	18	84,0	84,4	85,6	86,1	86,4
2	0,422	32	86,7	87,0	87,0	87,3	87,4
3	0,383	44	87,7	88,4	89,0	89,0	89,7
4	0,347	54	90,0	90,1	90,4	90,4	90,7
5	0,316	62	90,0	90,7	90,7	91,0	91,4
6	0,286	69	90,4	91,0	91,3	91,3	91,7
7	0,260	74	91,4	91,5	92,1	92,1	96,7
8	0,236	79	92,0	92,4	92,4	92,7	96,7
9	0,213	83	93,7	93,7	94,0	94,0	95,0
10	0,194	86	92,3	93,0	93,0	93,4	94,0
11	0,176	88	94,0	94,0	94,0	94,4	94,4
12	0,160	90	94,0	94,3	94,4	94,7	95,0

Tabela. 5.6 - Resultados das tensões de trefilação
obtidas segundo modelo de TROZERA
para μ estimado

Número da Redução	Diâmetro de Saída (mm)	Redução Total (%)	TENSÃO DE TREFILAÇÃO (MPa)				
			σ_{t_1}	σ_{t_2}	σ_{t_3}	σ_{t_4}	σ_{t_5}
1	0,465	18	66,7	67,0	68,0	68,3	68,6
2	0,422	32	68,9	69,1	69,1	69,4	69,4
3	0,383	44	69,6	70,2	70,7	70,7	71,2
4	0,347	54	71,5	71,5	71,8	71,8	72,0
5	0,316	62	71,5	72,1	72,0	72,3	72,6
6	0,286	69	71,8	72,3	72,5	72,5	72,8
7	0,260	74	72,6	72,8	73,1	73,1	73,6
8	0,236	79	73,1	73,3	73,3	73,6	73,6
9	0,213	83	74,4	74,4	74,7	74,7	75,5
10	0,194	86	73,3	73,9	73,9	74,1	74,7
11	0,176	88	74,7	74,7	74,7	74,9	74,9
12	0,160	90	74,7	75,0	74,9	75,2	75,5

Tabela. 5.7 - Resultados das tensões de trefilação
obtidas segundo modelo de AVITZUR
para μ estimado

Número da Redução	Diâmetro de Saída (mm)	Redução Total (%)	TENSÃO DE TREFILAÇÃO (MPa)				
			σ_{t_1}	σ_{t_2}	σ_{t_3}	σ_{t_4}	σ_{t_5}
1	0,465	18	94,9	95,2	96,9	97,4	97,9
2	0,422	32	97,9	98,3	97,5	98,8	99,0
3	0,383	44	99,0	99,8	100,7	100,9	101,7
4	0,347	54	101,6	101,6	102,2	102,4	102,8
5	0,316	62	101,6	102,4	102,6	103,1	103,6
6	0,286	69	102,0	102,8	103,3	103,6	103,9
7	0,260	74	103,1	103,5	104,1	104,3	105,0
8	0,236	79	103,9	104,2	104,5	105,0	105,0
9	0,213	83	105,8	105,7	106,4	106,6	107,7
10	0,194	86	104,2	105,0	105,2	105,7	106,6
11	0,176	88	106,1	106,1	106,4	106,9	106,9
12	0,160	90	106,1	106,5	106,7	107,3	107,7

Tabela. 5.8 - Coeficientes de atrito obtidos através da equação de AVITZUR.

Número da Redução	Diâmetro de Saída (mm)	Redução Total (%)	COEFICIENTE DE ATRITO (μ)				
			μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5
1	0,465	18	0,17	0,19	0,23	0,23	0,25
2	0,422	32	0,27	0,31	0,35	0,36	0,38
3	0,383	44	0,38	0,45	0,48	0,50	0,52
4	0,347	54	0,47	0,51	0,63	0,66	0,68
5	0,316	62	0,54	0,56	0,57	0,61	0,75
6	0,286	69	0,64	0,67	0,71	0,74	0,89
7	0,260	74	0,64	0,72	0,74	0,79	0,83
8	0,236	79	0,77	0,80	0,87	0,98	1,01
9	0,213	83	0,63	0,70	0,73	1,08	1,19
10	0,194	86	0,76	0,82	0,83	0,89	0,95
11	0,176	88	0,81	0,85	0,85	0,86	0,86
12	0,160	90	0,55	0,56	0,57	0,57	0,58

Tabela. 5.9 - Resultados das tensões de trefilação
obtidas segundo modelo de SACHS e
VAN HORN para μ calculado

Número da Redução	Diâmetro de Saída (mm)	Redução Total (%)	TENSÃO DE TREFILAÇÃO (MPa)				
			σ_{t_1}	σ_{t_2}	σ_{t_3}	σ_{t_4}	σ_{t_5}
1	0,465	18	97,1	103,0	116,1	116,6	122,8
2	0,422	32	129,1	141,1	152,7	156,3	162,1
3	0,383	44	162,7	184,6	194,9	200,8	208,3
4	0,347	54	194,1	206,1	243,1	252,1	259,0
5	0,316	62	215,1	222,7	225,7	238,7	282,3
6	0,286	69	255,1	256,9	270,1	279,2	236,1
7	0,260	74	248,8	274,1	281,3	296,6	311,1
8	0,236	79	290,5	300,7	322,3	357,5	366,7
9	0,213	83	252,0	273,9	284,2	393,9	433,1
10	0,194	86	288,4	309,1	312,2	332,1	353,2
11	0,176	88	309,3	321,8	321,8	326,1	326,1
12	0,160	90	227,8	231,7	234,9	235,7	239,7

Tabela. 5.10 - Resultados das tensões de trefilação
obtidas segundo modelo de SIEBEL
para μ calculado

Número da Redução	Diâmetro de Saída (mm)	Redução Total (%)	TENSÃO DE TREFILAÇÃO (MPa)				
			σ_{t_1}	σ_{t_2}	σ_{t_3}	σ_{t_4}	σ_{t_5}
1	0,465	18	123,6	129,1	141,2	141,7	147,3
2	0,422	32	152,9	163,8	174,0	177,3	182,4
3	0,383	44	183,1	202,7	212,0	217,3	224,2
4	0,347	54	211,8	222,4	255,2	263,2	269,4
5	0,316	62	230,4	237,4	240,1	251,6	290,2
6	0,286	69	257,8	267,7	279,4	287,5	329,0
7	0,260	74	260,6	283,2	289,7	303,2	316,2
8	0,236	79	297,8	306,9	325,9	357,1	365,3
9	0,213	83	264,6	283,8	293,0	389,8	424,8
10	0,194	86	296,1	314,7	317,4	335,0	353,9
11	0,176	88	315,2	326,2	326,2	330,2	330,2
12	0,160	90	243,3	247,0	249,8	250,6	254,3

Tabela. 5.11 - Resultados das tensões de trefilação
obtidas segundo modelo de KORBER
e EICHINGER para μ calculado

Número da Redução	Diâmetro de Saída (mm)	Redução Total (%)	TENSÃO DE TREFILAÇÃO (MPa)				
			σ_{t_1}	σ_{t_2}	σ_{t_3}	σ_{t_4}	σ_{t_5}
1	0,465	18	124,0	128,5	138,3	138,9	143,2
2	0,422	32	147,5	155,2	162,1	164,5	167,8
3	0,383	44	168,4	180,9	186,8	189,8	194,1
4	0,347	54	187,4	193,4	210,5	214,3	217,5
5	0,316	62	197,7	201,9	203,3	209,4	227,3
6	0,286	69	211,8	217,0	222,7	226,2	242,8
7	0,260	74	214,1	224,8	227,9	233,4	239,4
8	0,236	79	231,3	235,4	242,6	253,7	256,3
9	0,213	83	218,3	227,2	231,5	265,8	277,0
10	0,194	86	230,9	239,2	240,3	247,2	254,7
11	0,176	88	240,7	244,8	244,8	246,8	246,8
12	0,160	90	207,9	210,1	211,5	211,7	214,5

Tabela. 5.12 - Resultados das tensões de trefilação
segundo modelo de DAVIS e DOKOS
para μ calculado

Número da Redução	Diâmetro de Saída (mm)	Redução Total (%)	TENSÃO DE TREFILAÇÃO (MPa)				
			σ_{t_1}	σ_{t_2}	σ_{t_3}	σ_{t_4}	σ_{t_5}
1	0,465	18	84,5	88,8	98,0	98,4	102,6
2	0,422	32	106,7	114,3	121,2	123,4	126,7
3	0,383	44	127,2	139,3	144,9	147,9	151,9
4	0,347	54	145,0	151,0	168,0	171,8	174,8
5	0,316	62	155,5	159,2	160,6	166,6	184,3
6	0,286	69	169,3	174,2	179,7	183,2	199,7
7	0,260	74	171,1	181,6	184,6	190,1	195,8
8	0,236	79	188,0	191,9	199,1	210,1	212,7
9	0,213	83	174,2	183,1	187,3	221,6	232,2
10	0,194	86	187,5	195,4	196,5	203,3	210,4
11	0,176	88	196,4	200,6	200,6	202,4	202,4
12	0,160	90	163,6	165,7	167,1	167,1	169,4

Tabela. 5.13 - Resultados das tensões de trefilação
obtidas segundo modelo de WHITTON
para μ calculado

Número da Redução	Diâmetro de Saída (mm)	Redução Total (%)	TENSÃO DE TREFILAÇÃO (MPa)				
			σ_{t_1}	σ_{t_2}	σ_{t_3}	σ_{t_4}	σ_{t_5}
1	0,465	18	114,2	118,6	128,2	128,8	133,1
2	0,422	32	137,3	145,0	151,9	154,2	157,5
3	0,383	44	158,1	170,5	176,3	179,3	183,6
4	0,347	54	176,8	182,8	199,9	203,7	206,8
5	0,316	62	187,1	191,2	192,6	198,7	216,6
6	0,286	69	201,2	206,3	211,9	215,4	232,0
7	0,260	74	203,4	213,8	217,1	222,6	228,5
8	0,236	79	220,4	224,5	231,7	242,8	245,4
9	0,213	83	207,3	216,2	220,5	254,8	265,8
10	0,194	86	220,1	228,2	229,3	236,3	243,6
11	0,176	88	229,6	233,8	233,8	235,7	235,7
12	0,160	90	196,8	199,0	200,4	200,5	203,3

(Tabela 5.8) respectivamente.

Na Tabela 5.2 observa-se a comparação entre as tensões de trefilação obtidas através dos modelos teóricos analisados neste trabalho (ver Capítulo 2) considerando para os cálculos o coeficiente de atrito estimado e o limite de escoamento para os fios trefilados a 0,05 m/s. Observa-se que os melhores resultados foram obtidos pelos modelos de Avitzur, Korber e Eichinger e Siebel.

Para comparação com os resultados experimentais foram escolhidos os seguintes modelos teóricos:

a - modelo de Sachs e Van Horn, que consideram a influência do atrito na tensão de trefilação e o modelo de Siebel, que considera a influência do atrito e do trabalho redundante, obtidos através do método da energia uniforme;

b - modelo de Korber e Eichinger e o modelo de Whitton, que consideram o efeito do atrito e trabalho redundante, modelo de Davis e Dokos e o modelo de Trozera, que consideram o atrito e o encruamento, obtidos através do método da divisão em elementos;

c - modelo de Avitzur, que considera a influência do atrito, trabalho redundante e encruamento, obtido através do método do limite superior.

5.1.3. Resumo dos Resultados Experimentais e Calculados

Nas Figuras 5.2a e b, 5.3 a 5.7 observam-se as comparações entre as tensões de trefilação obtidas experi-

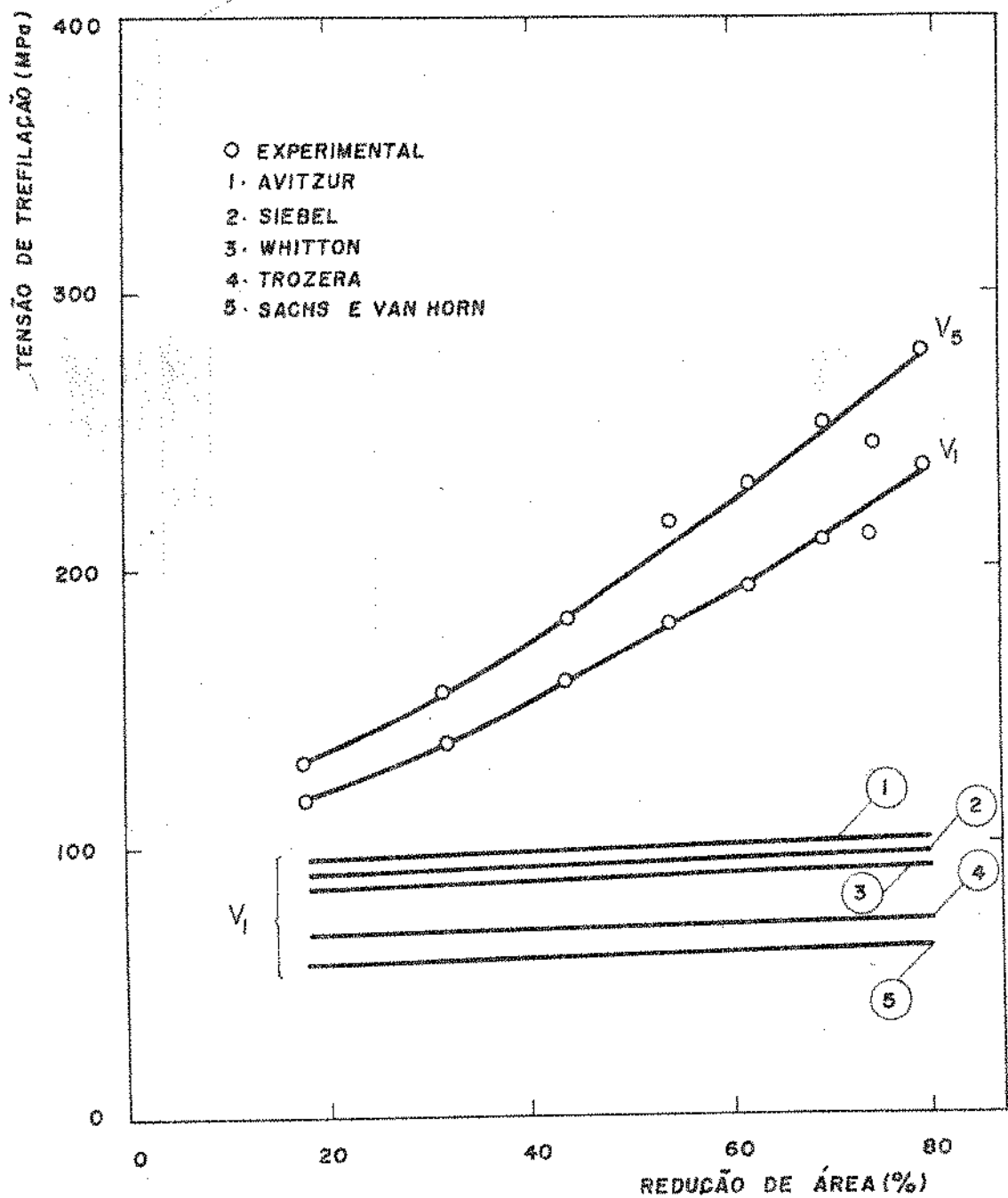


Figura 5.2a - Comparação entre as tensões de trefilação experimentais com as obtidas pelos modelos teóricos adotados para μ estimado e $v_1 = 0,05$ m/s.

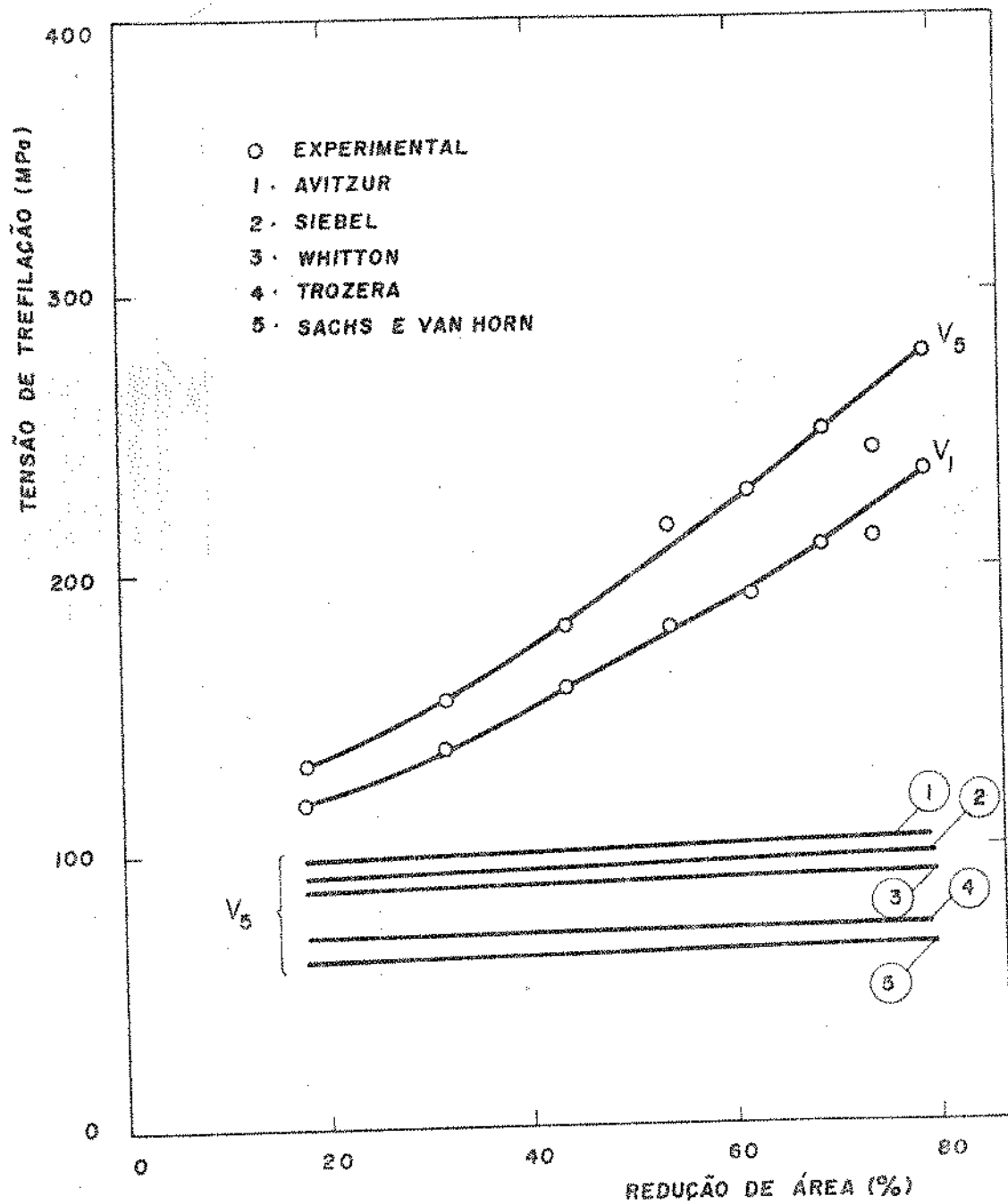


Figura 5.2b - Comparação entre as tensões de trefilação experimentais com as obtidas segundo modelos teóricos adotados para μ estimado e $v_s = 0,25$ m/s.

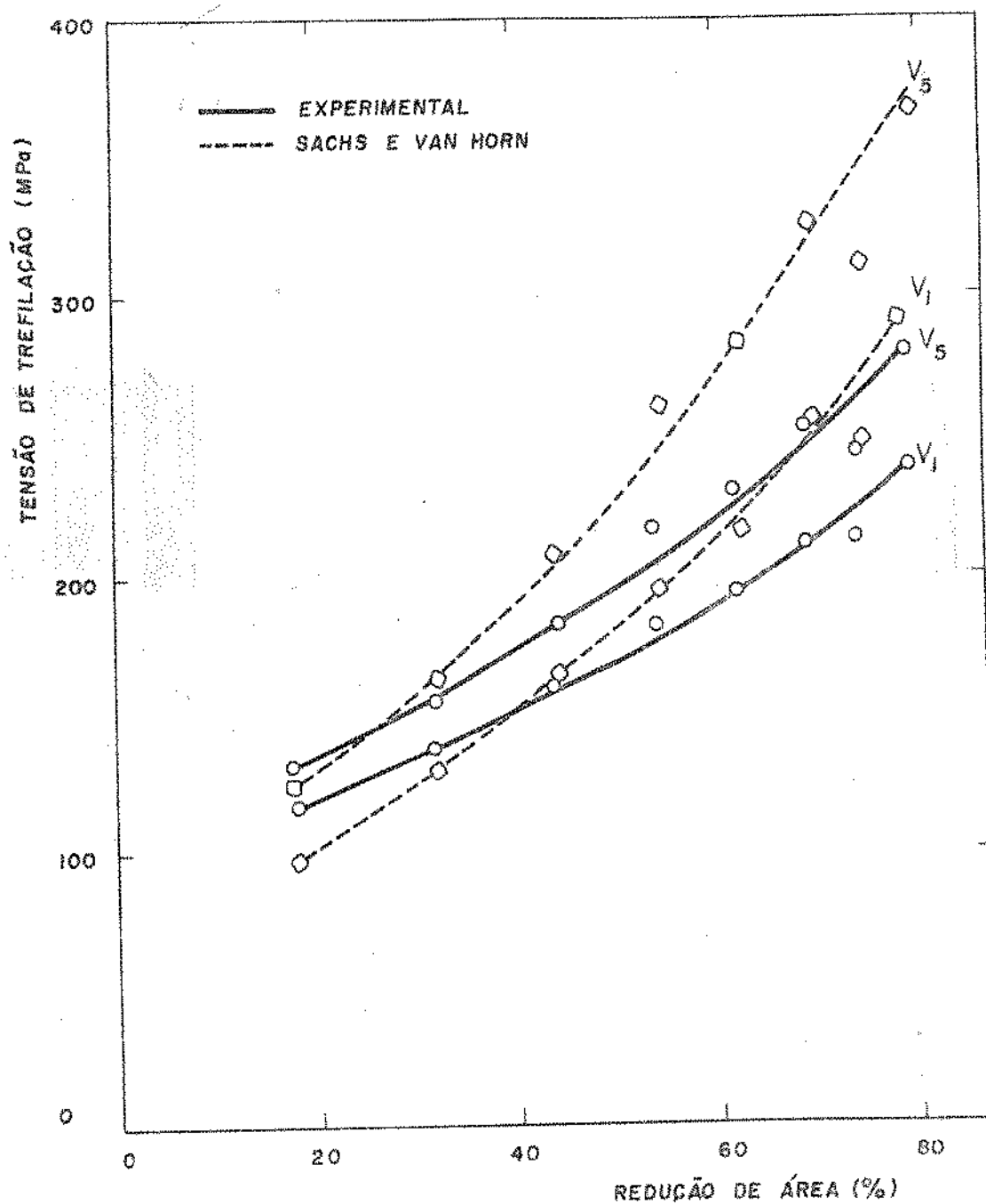


Figura 5.3 - Comparação entre as tensões de trefilação experimentais com as obtidas segundo modelo de SACHS e VAN HORN para μ calculado.

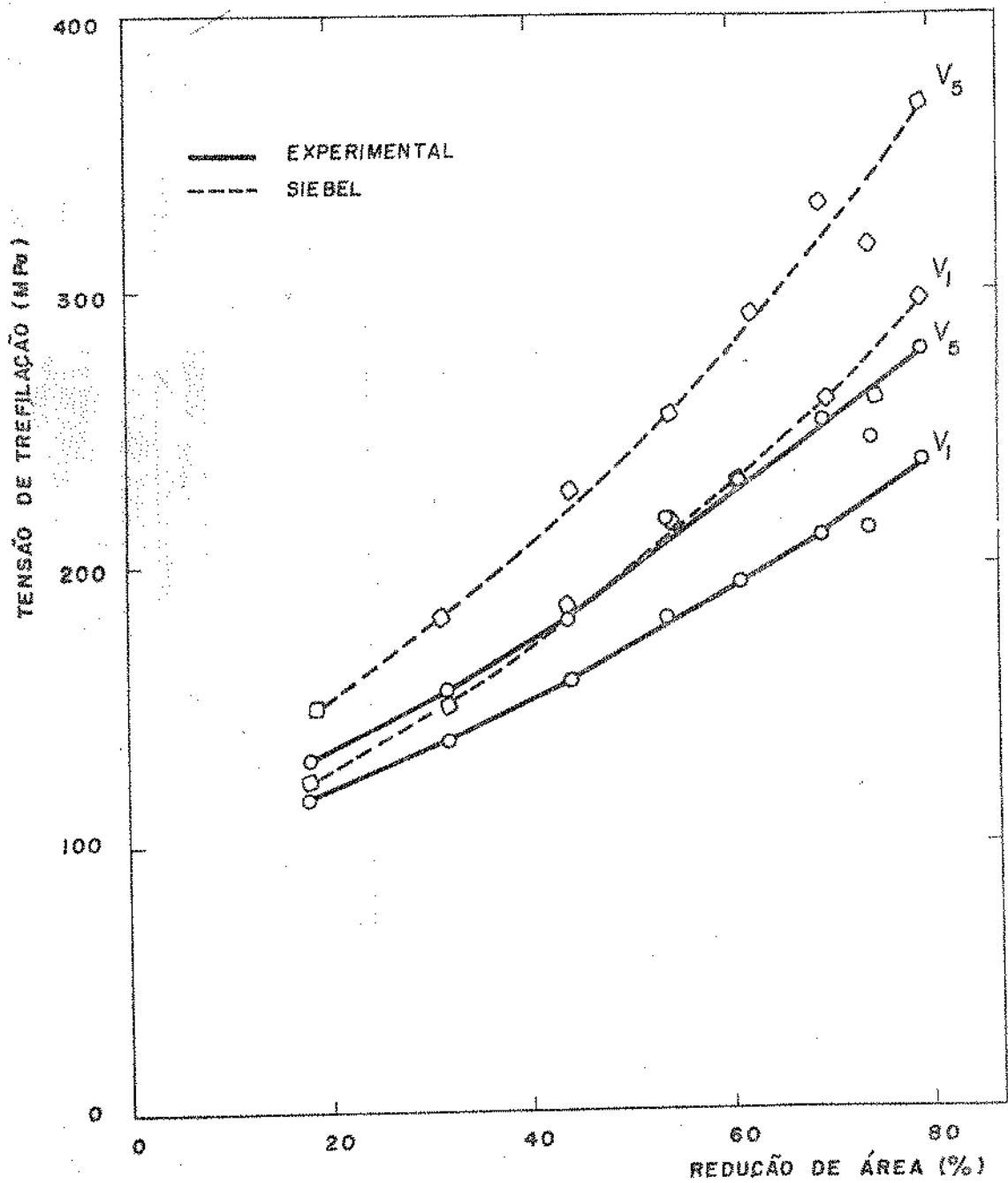


Figura 5.4 - Comparação entre as tensões de trefilação experimentais com as obtidas segundo modelo de SIEBEL para μ calculado.

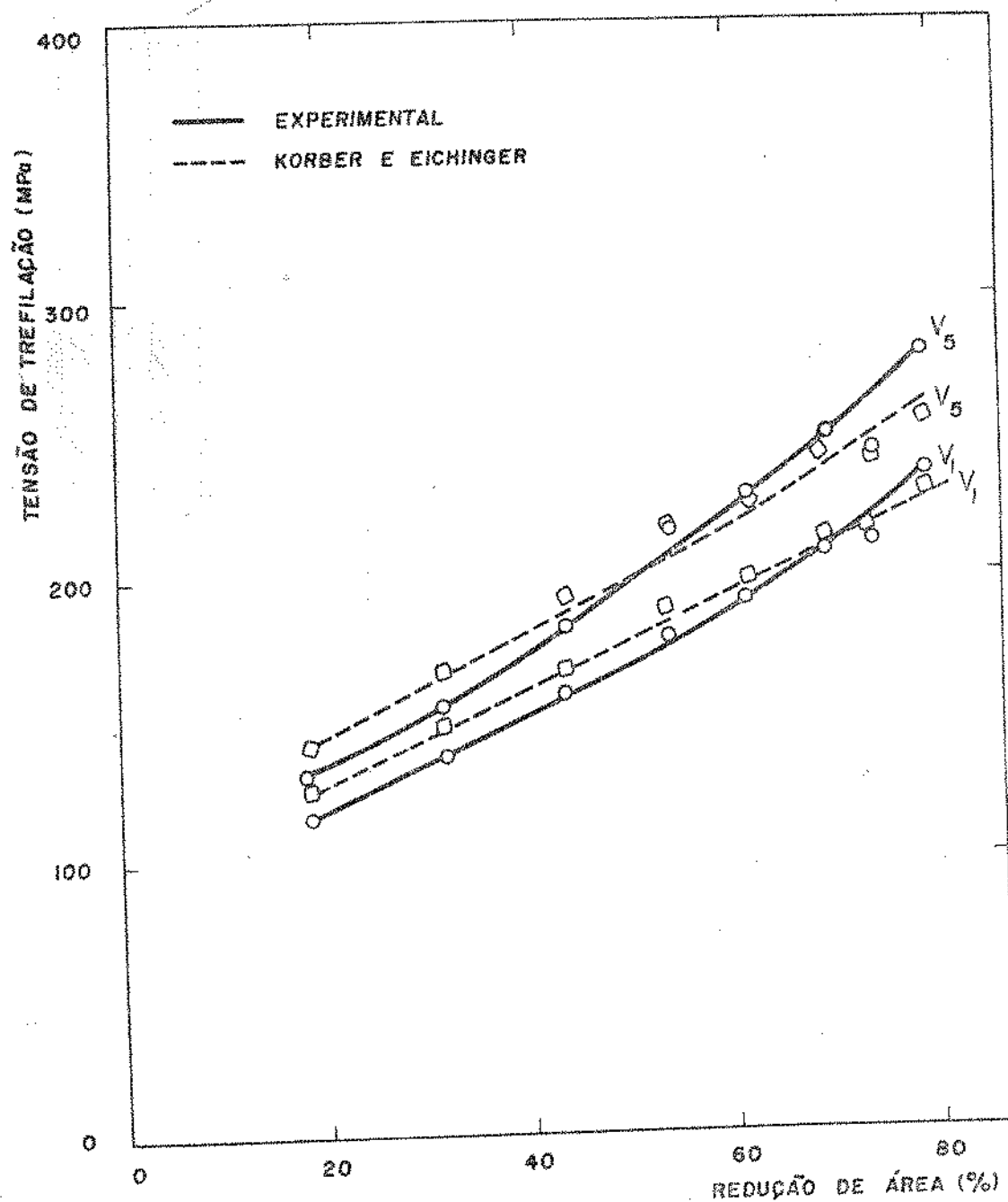


Figura 5.5 - Comparação entre as tensões de trefilação experimentais com as obtidas segundo modelo de KORBER e EICHINGER para μ calculado.

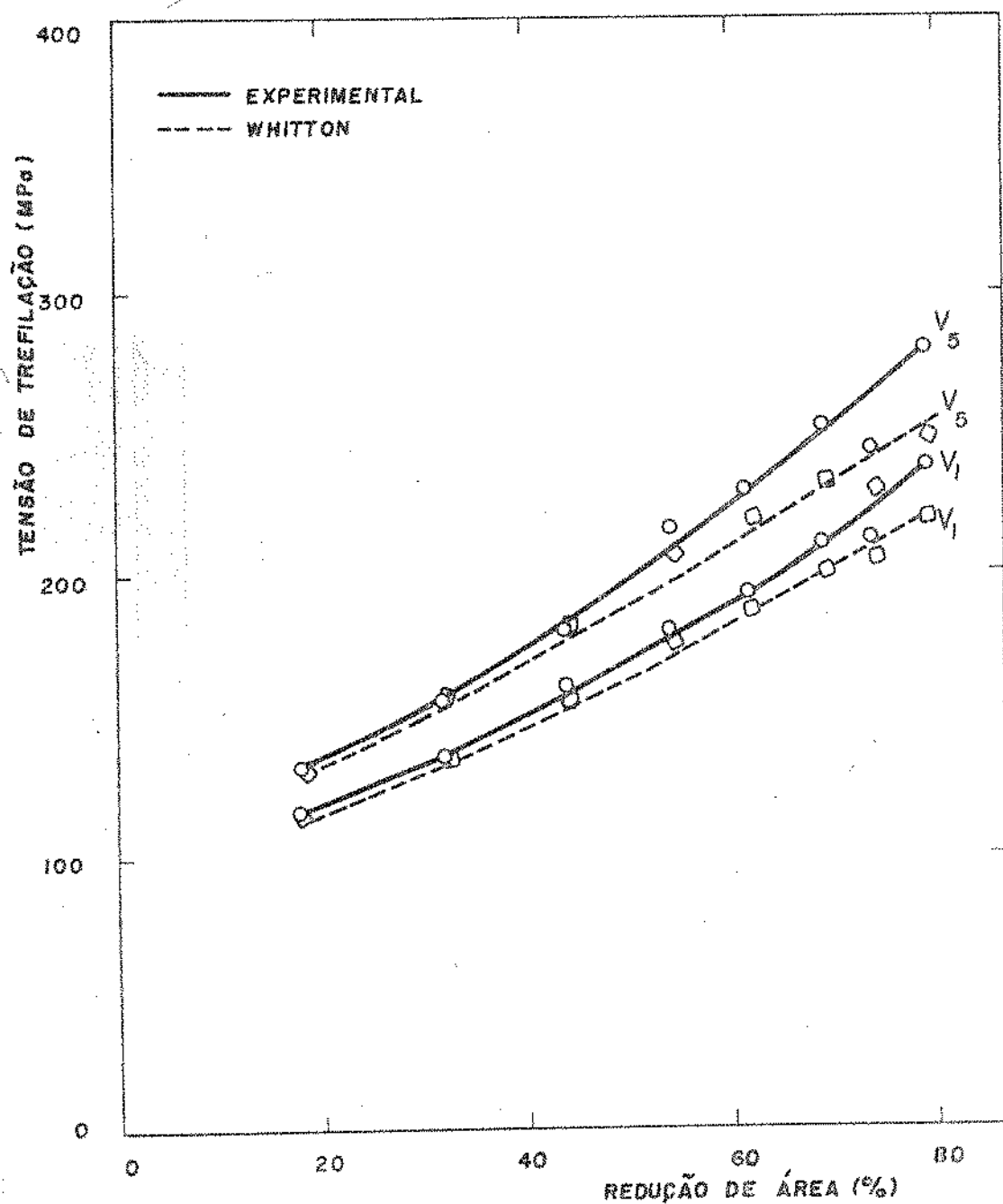


Figura 5.6 - Comparação entre as tensões de trefilação experimentais com as obtidas segundo modelo de WHITTON para μ calculado.

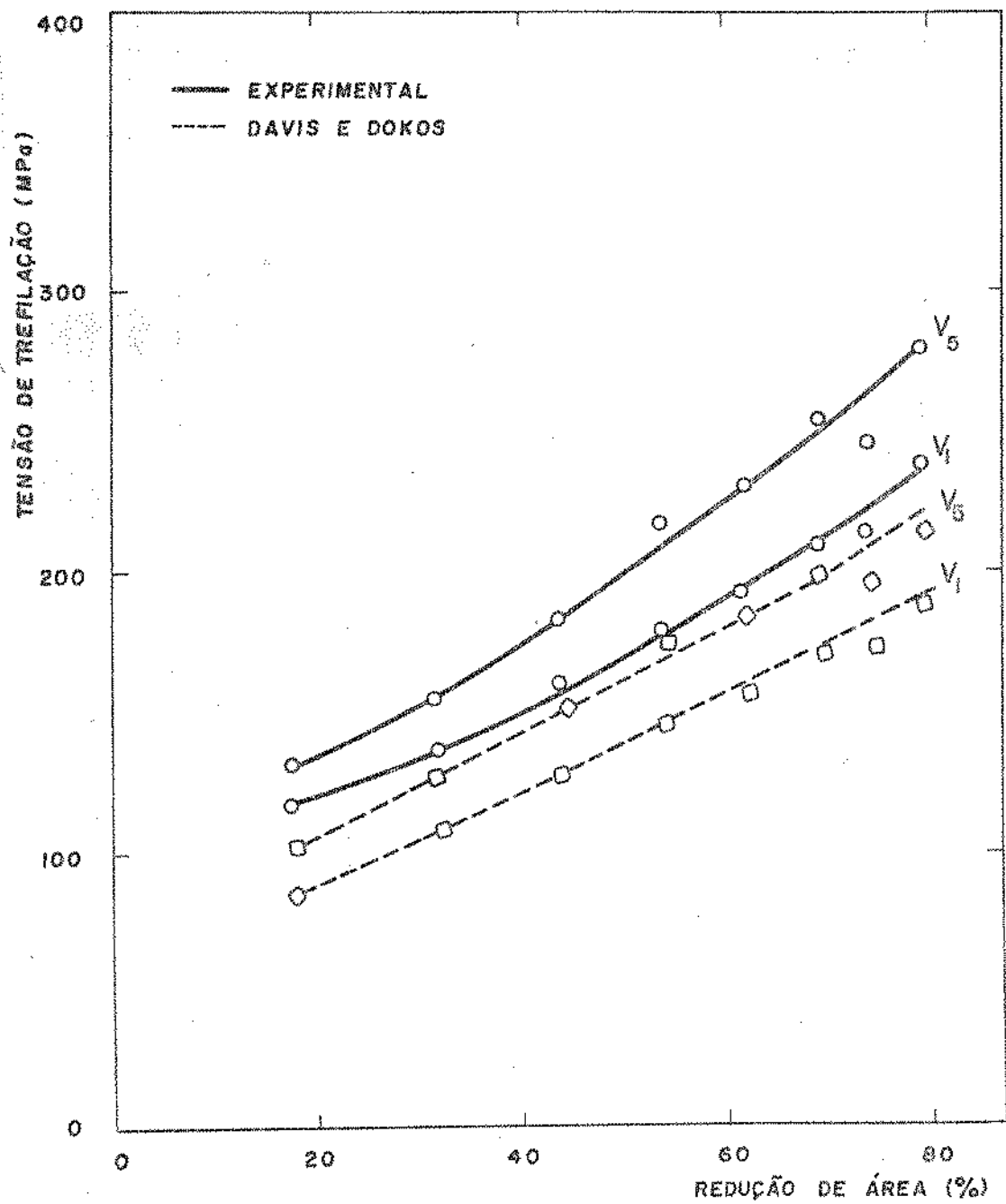


Figura 5.7 - Comparação entre as tensões de trefilação experimentais com as obtidas segundo modelo de DAVIS e DOKOS para μ calculado.

mentalmente em função da velocidade de trefilação, com as obtidas pelos modelos teóricos adotados levando em conta a variação do limite de escoamento para cada redução de área e o coeficiente de atrito estimado e calculado respectivamente.

5.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO, APÓS AS TREFILAÇÕES

Com a finalidade de verificação das propriedades mecânicas dos fios trefilados após cada redução de área, foram efetuados ensaios de tração. Foram ensaiados três amostras para cada condição de trefilação.

Os resultados obtidos nos ensaios de tração encontram-se na Tabela 5.14, que colocados em gráfico nos fornecem as curvas da Figura 5.8, que são as envolventes das várias curvas para cada redução de área e cada nível de velocidade adotado.

Para o cálculo dos parâmetros de encruamento foi empregado a expressão indicada no Capítulo 2 (expressão 2.1):

$$\sigma = k \epsilon^n$$

onde:

σ = tensão verdadeira

k = coeficiente de resistência

ϵ = deformação verdadeira

n = expoente de encruamento

e, aplicando-se logaritmo, tem-se:

Tabela 5.14 - Resultados dos ensaios de tração dos fios trefilados
a cinco níveis de velocidades

Número da Redução	Diâmetro de Saída (mm)	Redução Total (%)	Propriedades Mecânicas														
			Limite de Resistência (MPa)					Limite de Escoamento(MPa)					Alongamento (% em 100mm)				
			σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	$\bar{\sigma}_1$	$\bar{\sigma}_2$	$\bar{\sigma}_3$	$\bar{\sigma}_4$	$\bar{\sigma}_5$	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
1	0,465	18	407,0	407,0	409,9	419,9	414,8	247,1	248,1	252,0	253,0	254,0	9,5	10,0	10,0	10,5	10,7
2	0,422	32	415,8	416,8	421,7	421,7	423,6	255,0	255,9	255,9	256,9	256,9	7,5	8,0	8,0	9,5	9,5
3	0,383	44	425,6	425,6	425,7	429,5	442,3	257,9	259,9	261,8	261,8	263,8	7,2	7,2	8,0	8,5	9,0
4	0,347	54	430,5	430,5	435,5	440,3	440,3	264,8	264,8	265,8	265,8	266,7	7,2	7,5	7,5	8,0	8,0
5	0,316	62	430,5	432,5	437,4	444,2	447,2	264,8	266,7	266,7	267,7	268,7	7,0	7,5	7,5	8,0	8,0
6	0,286	69	442,3	442,3	442,3	450,1	450,1	265,8	267,7	268,7	268,7	269,7	7,0	7,5	7,5	7,5	7,5
7	0,260	74	452,1	452,1	452,1	452,1	452,1	268,7	269,7	270,7	270,7	272,6	6,0	6,5	6,5	7,2	7,5
8	0,236	79	448,2	459,9	470,7	470,7	470,7	270,7	271,6	271,6	272,6	272,6	6,0	6,0	6,0	6,5	6,5
9	0,213	83	440,3	454,0	467,8	481,5	481,5	275,6	275,6	276,5	276,5	279,5	4,2	4,2	5,0	5,5	6,0
10	0,194	86	438,4	464,8	464,8	480,5	480,5	271,6	273,6	273,6	274,6	276,5	4,2	4,5	5,0	5,0	5,0
11	0,176	88	451,1	475,6	475,6	487,4	487,4	276,5	276,5	276,5	277,5	277,5	3,5	4,5	4,5	4,5	5,0
12	0,160	90	443,3	463,9	483,5	483,5	523,7	276,5	277,5	277,5	278,5	279,5	3,5	3,5	3,7	4,0	4,5

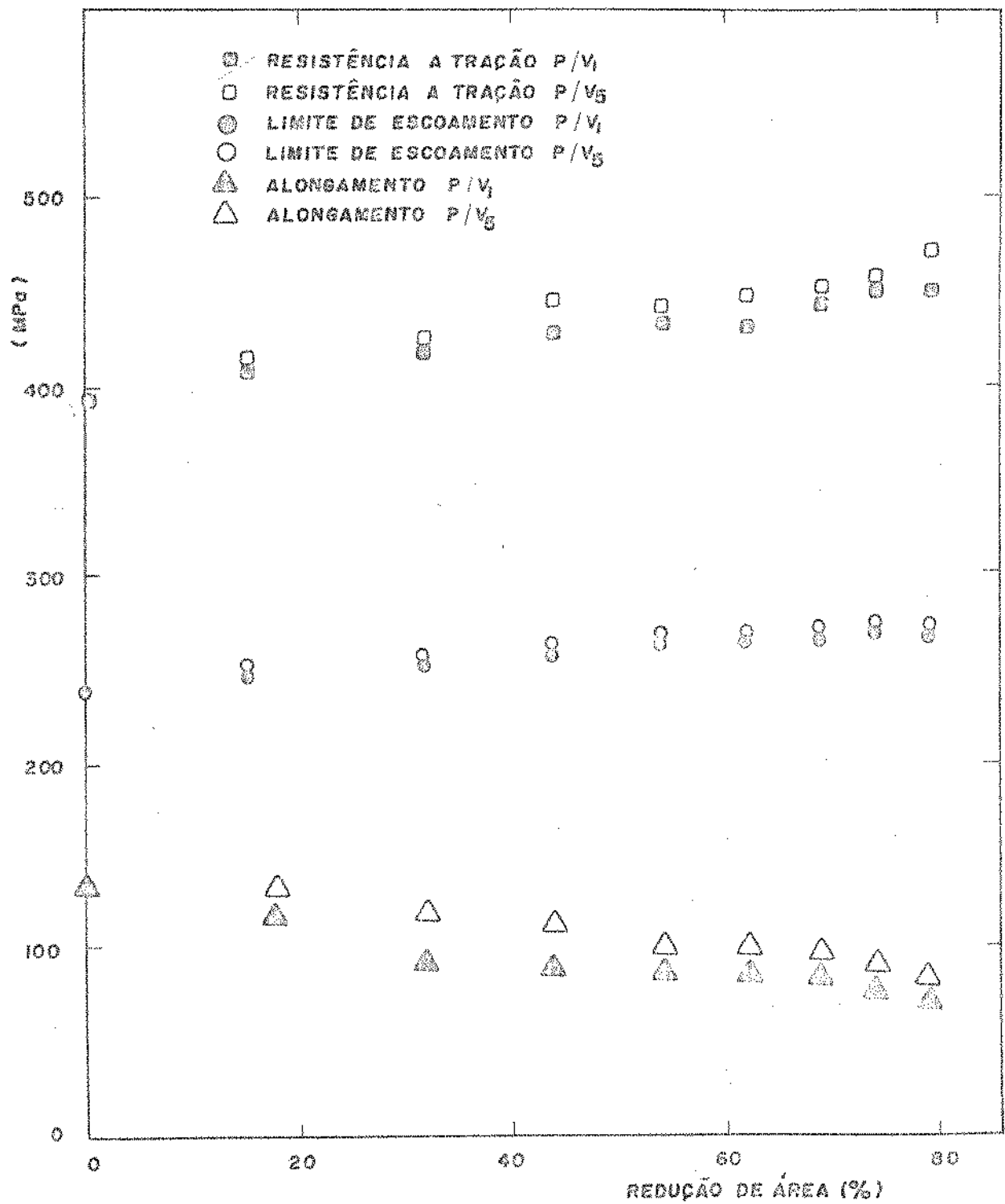


Figura 5.8 - Resistência a tração, limite de escoamento e alongamento em função da redução de área.

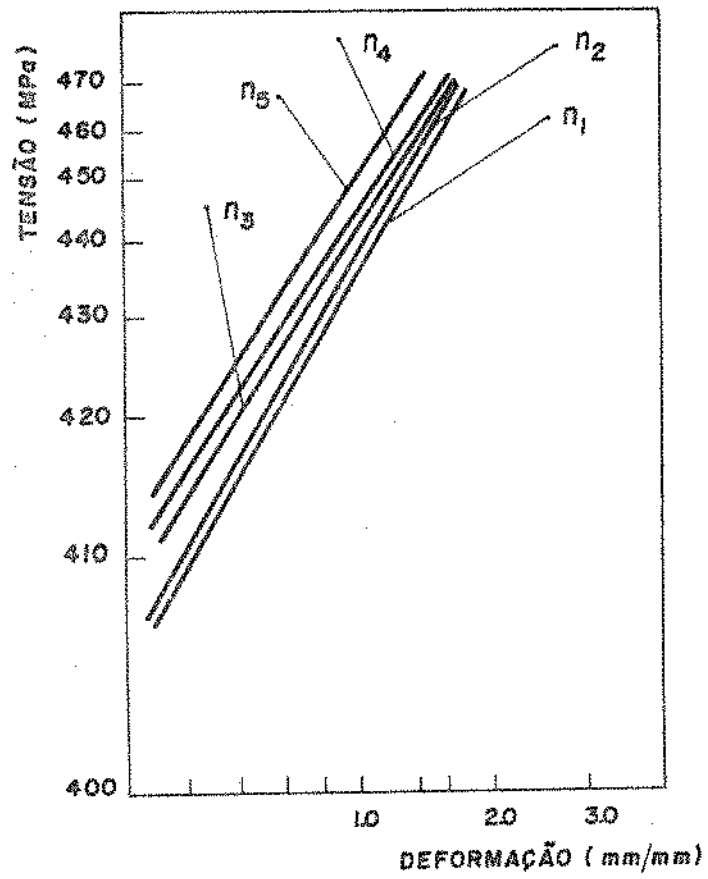


Figura 5.9 - Determinação dos valores dos parâmetros de encruamento na curva log - log.

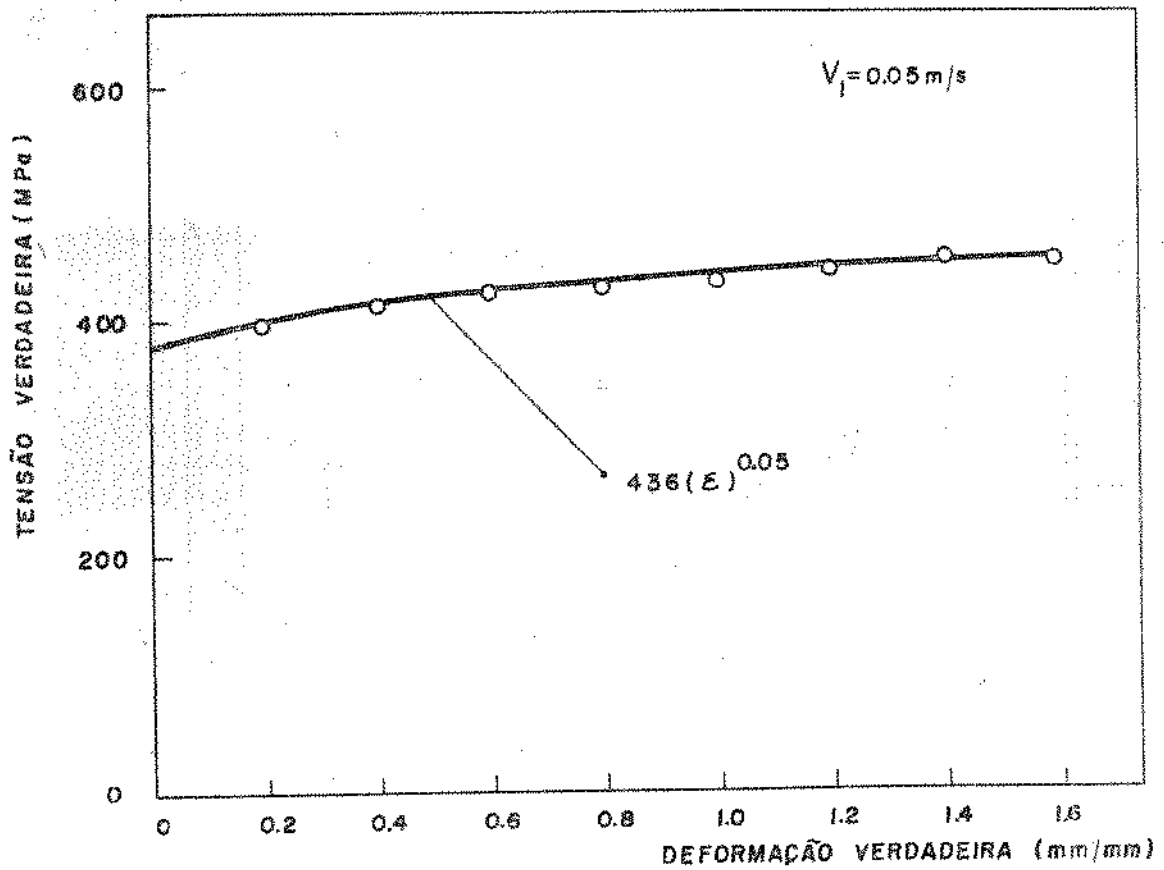


Figura 5.10a - Curva tensão x deformação verdadeira obtida em um ensaio de tração - pontos experimentais para os fios trefilados com $v_1 = 0,05 \text{ m/s}$ e representação analítica.

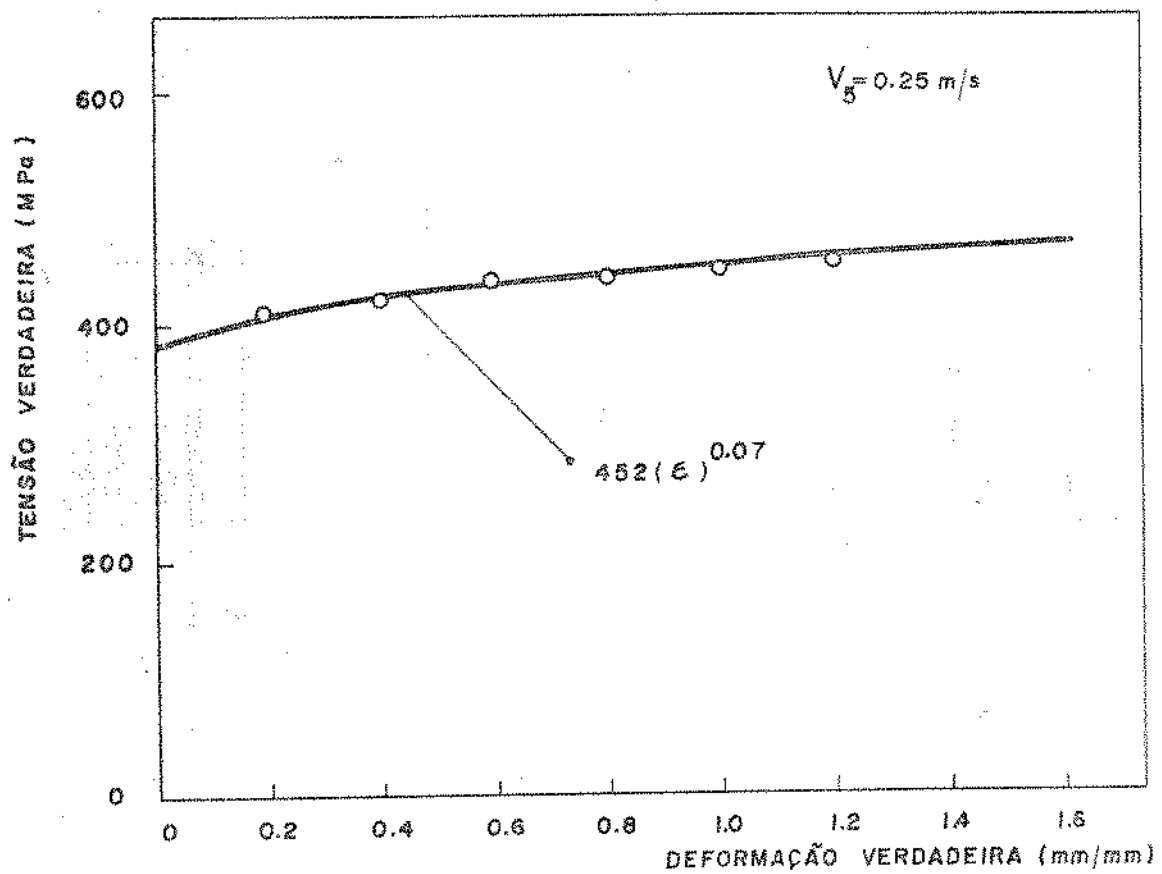


Figura 5.10b - Curva tensão x deformação verdadeira obtida em um ensaio de tração - pontos experimentais para os fios trefilados com $v_s = 0,25 \text{ m/s}$ e representação analítica.

$$\ln \sigma = \ln k + n \ln \epsilon$$

que vem a ser a expressão de uma reta com inclinação n , e para $n \ln \epsilon = 0$, $\sigma = k$; nesse ponto $\epsilon = 1$.

Valores de σ e ϵ , tirados da curva tensão-deformação verdadeira (Fig. 5.8), levam facilmente, aos valores de k e n (Fig. 5.9).

Para o presente estudo, tem-se:

$$\sigma_1 = 436 \epsilon^{0,05} \quad (5.1)$$

$$\sigma_2 = 438 \epsilon^{0,05} \quad (5.2)$$

$$\sigma_3 = 442 \epsilon^{0,06} \quad (5.3)$$

$$\sigma_4 = 446 \epsilon^{0,07} \quad (5.4)$$

$$\sigma_5 = 452 \epsilon^{0,07} \quad (5.5)$$

Nas Figuras 5.10a e b observam-se as curvas tensão-deformação verdadeira obtidas experimentalmente e sua representação analítica.

5.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

5.3.1. Dispositivo de Medição de Forças

O dispositivo mostrou-se versátil e eficiente na sua uti-

lização operacional e, portanto, adequado para a determinação experimental das forças e tensões de trefilação de fios finos. Observou-se que a tensão de trefilação aumentou com o aumento da velocidade de trefilação (Fig. 5.1).

Observou-se também que as tensões de trefilação obtidas para os fios com diâmetros abaixo de 0,236 mm foram praticamente constantes. Isso parece ter ocorrido porque adotou-se extensômetros elétricos com a máxima deformação muito baixo em relação a máxima deformação na região de medida ou seja, trabalhou-se com um coeficiente de segurança baixo (igual a quatro), diminuindo dessa forma a sensibilidade do dispositivo.

Deu-se grande importância na análise estatística dos resultados experimentais, em particular, na determinação correta do intervalo de confiança e dos erros das tensões de trefilação.

5.3.2. Comparação das Tensões de Trefilação Experimentais e Calculadas

De acordo com a análise dos fatores de influência na tensão de trefilação, visto no Capítulo 3, a determinação experimental do coeficiente de atrito é difícil. Devido a esse fato, para o cálculo das tensões de trefilação dos modelos teóricos, foram utilizados dois coeficientes de atrito: um estimado segundo a literatura⁽¹⁾ e igual a 0,03 para todas as reduções de área e outro, calculado pela equação de AVITZUR⁽²⁾ para cada redução de área. A escolha da equação de AVITZUR⁽²⁾ baseou-se no fato de que esse modelo é o mais bem elaborado para determinação da tensão de trefilação e por dar melhores resultados quando se uti

liza coeficientes de atrito estimado (Tabela 5.2 e Figuras 5.2a e b).

Observou-se que as tensões de trefilação teóricas, obtidas com o valor do coeficiente de atrito estimado, estão muito abaixo dos valores experimentais (Figs. 5.2a e b), o que nos leva a concluir que o coeficiente de atrito estimado é bem inferior ao real, contrariando a literatura⁽¹⁾. Os valores das tensões de trefilação teóricas, obtidas com os coeficientes de atrito calculados com a equação de AVITZUR⁽²⁾, se aproximam bastante dos valores experimentais (Figs. 5.3 a 5.7) mesmo considerando a possível não representatividade, das condições reais, do modelo físico-matemático de AVITZUR⁽²⁾.

Os valores das tensões de trefilação obtidas segundo modelos teóricos de KORBER e EICHINGER⁽³⁾ e WHITTON⁽⁴⁾, considerando os coeficientes de atrito calculados por AVITZUR⁽²⁾, são os que mais se aproximam dos valores experimentais (Figs. 5.5 e 5.6). Isso seria válido também para os modelos de SACHS e VAN HORN⁽⁵⁾, SIEBEL⁽⁶⁾ e DAVIS e DOKOS⁽⁷⁾ considerando-se uma tolerância de $\pm 11\%$, $\pm 14\%$ e 27% respectivamente (Figs. 5.3, 5.4 e 5.7).

Convém notar que neste trabalho a velocidade de deformação utilizada nos ensaios de tração ($\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) na determinação do limite de escoamento e expoente de encruamento, foi muito menor do que a utilizada no processo de trefilação (variou de $\dot{\epsilon} = 9 \times 10^1 \text{ s}^{-1}$ a $\dot{\epsilon} = 13 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$). Aí deve residir um fator de erro na predição das tensões de trefilação dos modelos teóricos adotados.

Observou-se que o coeficiente de atrito calculado pela

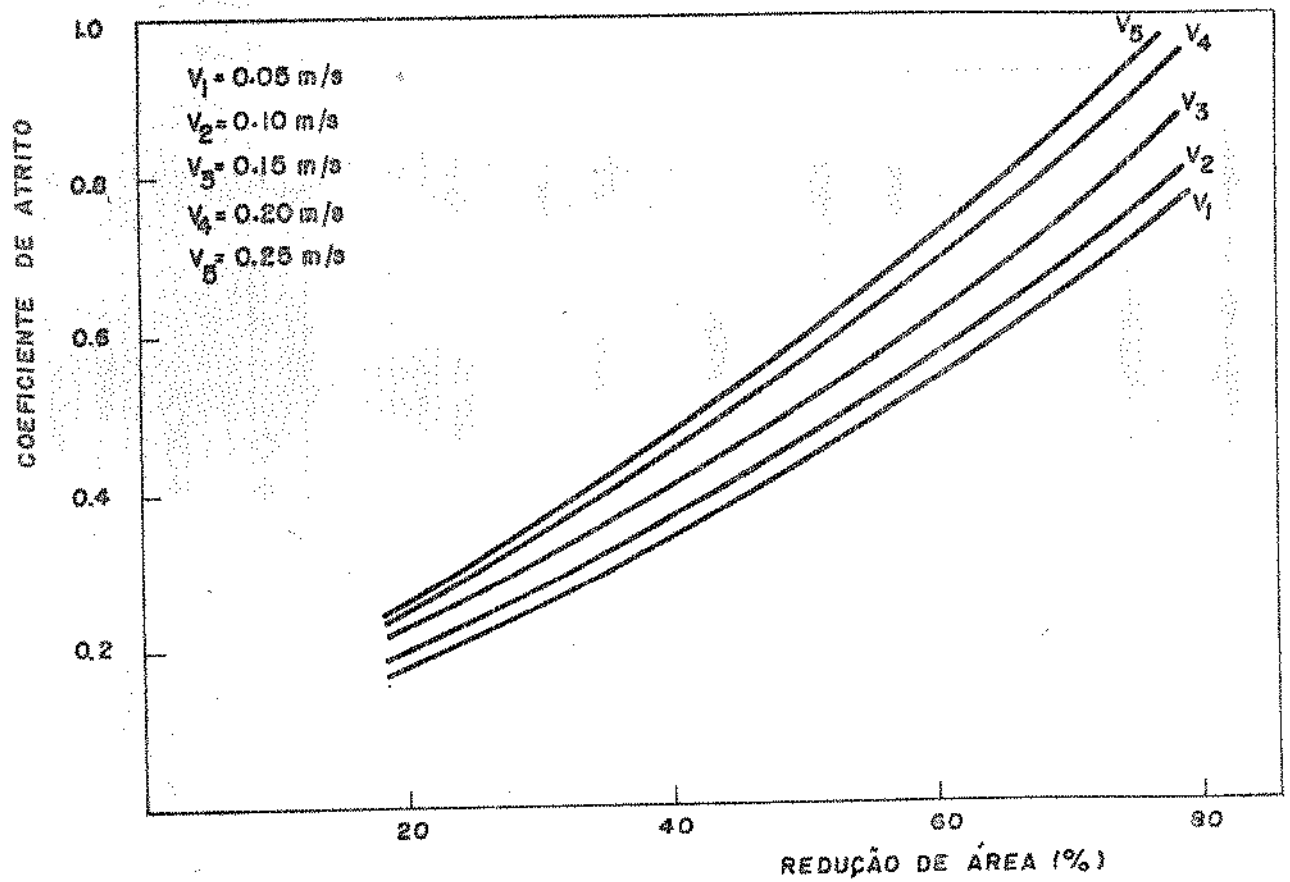


Figura 5.11 - Efeito da velocidade de trefilação sobre o coeficiente de atrito.

equação de AVITZUR⁽²⁾ aumenta com o aumento da velocidade de trefilção (Fig. 5.11).

5.3.3. Propriedades Mecânicas dos Fios

A Figura 5.8 mostra a variação das principais proprieda-
des mecânicas dos fios trefilados no ensaio de tração.

O alongamento é comumente tomado como uma indicação da dutilidade. Considerando apenas esta característica, observou-se que a dutilidade do fio decresceu, enquanto a resistência mecâni-
ca e o limite de escoamento cresceram com a redução de área.

A velocidade de trefilação tem influência sobre as carac-
terísticas mecânicas dos fios⁽⁸⁾. Observou-se um aumento da re-
sistência a tração e do limite de escoamento e um decrêscimo na
dutilidade, com o aumento da velocidade.

5.4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) WISTREICH, J.G. - Investigation of the Mechanics of Wire Drawing, Proc. Inst. Mech. Eng., Vol. 169, 1955, pp. 654-665.
- (2) AVITZUR, B. - Strain-Hardening and Strain-Rates Effects in Plastic Flow Through Conical Converging Dies, Trans. ASME, 1967, p. 45.
- (3) KORBER, F.; EICHINGER, A. - Mitt. k. w. Inst. Eisenforsch., Vol. 22, 1940, p. 57 in Espinosa et alli. Anais da V Conferência Inter Americana de Tecnologia de Materiais, São Paulo, 1978, p. 376.
- (4) WHITTON, P.W. - The Calculation of Drawing Force and Die Pressure in Wire Drawing, J. Inst. Metals, Vol. 86, 1958, p. 419.
- (5) SACHS, G.; VAN HORN, K.R. - Practical Metallurgy, Cleveland O (A.S.M.), 1940, in Espinosa et alli. Anais da V. Conferência Inter Americana de Tecnologia de Materiais, São Paulo, 1978, p. 376.
- (6) SIEBEL, E. - Stahl U. Eisen, Vol. 66-67, 1947, p. 171, in Espinosa et alli. Anais da V. Conferência de Materiais, São Paulo, 1978, p. 376.
- (7) DAVIS, E.A.; DOKOS, S.J. - Theory of Wire Drawing, Journal of Applied Mechanics, Trans. ASME, Vol. 66, 1944, p. A-195.

- (8) DOVE, A.B. - Steel Wire Handbook, Vol. 1, The Wire Association, 1975.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

- 6.1. O dispositivo se comportou satisfatoriamente. As leituras na ponte amplificadora, assim como as leituras no multímetro digital, permaneceram constantes durante as experiências. O dispositivo mede forças de trefilação até 30N e sua precisão é de 4% com 95% de confiança.
- 6.2. A força e a tensão de trefilação aumentam com a velocidade.
- 6.3. O coeficiente de atrito calculado aumenta com a velocidade; e para as reduções maiores esse aumento é também maior.
- 6.4. A resistência a tração do fio e o limite de escoamento aumentam e o alongamento diminui com o aumento da velocidade.
- 6.5. Os valores das tensões de trefilação obtidas segundo modelos teóricos de Korber-Eichinger e Whitton, considerando os coeficientes de atrito calculados por Avitzur, são os

que mais se aproximam dos valores experimentais. Isso se ria válido também para os modelos de Sachs-Van Horn, Siebel e Davis-Dokos considerando-se uma tolerância de $\pm 11\%$, $\pm 14\%$ e $\pm 27\%$ respectivamente.

BIBLIOGRAFIA REFERIDA

- (1) ATKINS, A.G.; CADDEL, R.M. - The Incorporation of Work Hardening and Redundant Work in Rod-Drawing Analyses, Int. J. Mec. Sci., 1968, pp. 15-28.
- (2) AVITZUR, B. - Metal Forming: Processes and Analyses, McGraw-Hill, New York, 1968.
- (3) _____. - Analysis of Wire Drawing and Extrusion Throught Conical Dies of Small Cone Angle, Trans. ASME, 1963, pp. 89-96.
- (4) _____. - Analyses of Wire Drawing and Extrusion Throught Conical Dies of Large Cone Angle, Trans. ASME, Series B, 1964, pp. 305-316.
- (5) _____. - Strain-Hardening and Strain-Rate Effects in Plastic Flow Throught Conical Converging Dies, Trans. ASME, 1967, pp. 556-562.
- (6) BACKOFEN, W. - Fundamentals of Deformation Processing, Syracuse University Press, New York, 1964.
- (7) BARON, H.G.; THOMPSON, F.C. - Friction of Wire Drawing, J. Inst. Metals, Vol. 78, 1950-51, pp. 415-462.

- (8) BARRAND, P.; GADEAU, R. - Enciclopédia del Alumínio, Fabrication de Semiprodutos, Vol. 3, Ed. Urmo, Bilbao, 1968.
- (9) BOOR, U. - Views on the Use of Drawing Lubricants, Wire World International, Vol. 16, 1974, pp. 68-73.
- (10) BRESCIANI FQ, E. - Conformação Plástica dos Metais, Apostila Pós-Graduação, UNICAMP/FEC, Campinas, SP, 1977.
- (11) . - Conformação Plástica dos Metais (Fundamentos da Mecânica da Conformação Plástica), Apostila Pós-Graduação, UNICAMP/FEC, Campinas, SP, 1978.
- (12) . - Conformação Plástica dos Metais, Apostila Pós-Graduação UNICAMP/FEC, Campinas, SP, 1982.
- (13) CADDEL, R.M.; ATKINS, A.G. - The Influence of Redundant Work When Drawing Rods Through Conical Dies, Trans. of the ASME, Journal of Enginnering for Industry, 1968, pp. 411-419.
- (14) Catálogo da S.A. Phylips do Brasil - Informação sobre o Produto Comercial Fieiras de Diamante, São Paulo.
- (15) Catálogo sobre Aços Villares para Construção Mecânica, São Paulo, 1980.
- (16) CLEAVER, F.T.; MILLER, H.J. - Wire Drawing: Technique and Equipment, J. Inst. Metals, 1950, pp. 537-562.
- (17) COELHO, A.R.Z.; MAGNAVANCCA, E.H. - Lubrificação a Seco em Trefilação de Arames de Aço-Carbono, Metalurgia, Vol. 3, 1975, pp. 651-657.

- (18) DAVIS, E.A.; DOKOS, S.J. - Theory of Wire Drawing,
Journal of Applied Mechanics, Trans. ASME, Vol. 66,
1944, pp. A193-A198.
- (19) DIETER, G.E. - Metalurgia Mecânica, Guanabara Dois, 1981.
- (20) DOVE, A.B. - Steel Wire Handbook, Vol. 1, The Wire
Association, 1975.
- (21) DUCKFIELD, B.S. - The Theory and Practice of Wire
Drawing, Part-I, Wire Industry, pp. 618-624.
- (22) ESPINOSA, R.; LARAGUIBEL, J.S.; NEGRONI, F. - Analisis
Teórico Experimental de las Expresiones para Precedir
la Tensión Media de Trefilacion, Anais da V Conferên-
cia Inter-Americana de Tecnologia de Materiais, São
Paulo, 1978, pp. 369-377.
- (23) FRANCIS, E.C.; THOMPSON, F.C. - The Drawing of Non-Ferrous,
Journal of the Institute of Metals, Vol. 46, 1981, pp.
319-351.
- (24) JOHNSON, R.W.; ROWE, G.W. - Redundant Work in Drawing
Cylindrical Stock, Journal of the Institute of Metals,
Vol. 96, 1968, pp. 97-105.
- (25) KÖRBER, F.; EICHINGER, A. - Mitt. K. W. Inst.
Eisenforsch, Vol. 22, 1940, p. 57, in ref. (22), p.
376.
- (26) LEE, D.J. - A Lubricant for Fine Wire Drawing, Wire
Industry, 1978, pp. 1007-1008.

- (27) LEIDER, A.; GRABNER, J. - Measurement of Drawing Stress in the Manufacture of Wire, Wire World International, Vol. 16, 1972, pp. 63-67.
- (28) LEME, R.A.S. - Curso de Estatística, Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico, 1969.
- (29) LEWIS, K.B. - Blast Furnace and Steel Plant, Vol. 3, 1975, p. 1031.
- (30) MacLELLAN, G.D. - Some Friction Effects in Wire Drawing, J. Inst. Metals, Vol. 81, 1952-53, pp. 1-13.
- (31) MAJORS, H. - Studies in Cold-Drawing, Part 3, Trans. ASME, 1956, pp. 79-87.
- (32) MEYERS, M.A.; CHAWLA, K.K. - Princípios de Metalurgia Mecânica, Editora Edgard Blücher Ltda., 1982, pp. 114-115.
- (33) NAKAMURA, Y.; et alii - An Evaluation of Lubrication in Wire Drawing, Wire Journal, 1980, pp. 54-58.
- (34) PAPARONI, F. - The Drawing of Copper Wire, Wire Journal, 1966, pp. 965-973.
- (35) POMP, A.; SIEBEL, E.; HOUDREMONT, E. - Mitt. K. W. Inst. Eisenforsch, Vol. 11, 1929, p. 553, in ref. (22), p. 376.
- (36) PROVENZA, F. - Prontuário do Projetista de Máquinas, PRO-TEC, São Paulo, 1976.

- (37) ROWE, G. - Conformado de los Metales, Ed. Urmo, Bilbao, 1972.
- (38) SACHS, G.; VAN HORN, K.R. - Practical Metallurgy, Cleveland O (ASM), 1940, in ref. (22), p. 376.
- (39) SACHS, G. - Zur Theories des Zie Hyorgangs, Z. Augew, Match. Mech., Vol. 7, 1927, p. 235, in ref. (22), p. 376.
- (40) SCHWIER, F. - Stahl Eisen, 1952, pp. 58-60, in TARNAVSKII, A.L. - Elements of High-Speed, Stal', Vol. 6, 1974, p. 503.
- (41) SIEBEL, E. - Stahl U. Eisen, Vol. 66-67. 1947, p. 171, in ref. (22), p. 376.
- (42) SMITH, B.F.; COOPER, A. - The Theory of Lubrication, Wire Journal, Vol. 12, 1979, pp. 76-81.
- (43) TARNAVSKII, A.L. - Elements of High-Speed, Stal', Vol. 6, 1974, pp. 63-67
- (44) THOMSEN, E.G.; YANG, C.I.; KOBAYASHI, S. - Mechanics of Plastic Deformation in Metal Processing, McMillian, New York, 1965, pp. 69-127.
- (45) TROZERA, P.A. - Trans. ASM, Vol. 57, 1964, p. 309, in ref. (22), p. 376.
- (46) YANG, C.T. - On The Mechanics of Wire Drawing, Trans. ASME, 1961, pp. 523-530.

- (47) WHITTON, P.W. - The Calculation of Drawing Force and Die Pressure in Wire Drawing, J. Inst. Metals, Vol. 86, 1958, pp. 417-421.
- (48) WISTREICH, J.G. - The Fundamentals of Wire Drawing, Metallurgical Reviews, Vol. 3, 1958, pp. 97-142.
- (49) _____. - Investigation of the Mechanics of Wire Drawing, Proc. Inst. Mech. Eng., Vol. 169, 1965, pp. 654-665.
- (50) ZAVAGLIA, C.A.C. - Contribuição do Estudo da Trefilação de Fios Capatares de Metais Não-Ferrosos, Tese de Mestrado, UNICAMP/FEC/DEM, 1979.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA MAS NÃO REFERIDA

- (1) AVENS, P. et alii - Mise en Forme des Métaux et Alliages, Editions du CNRS, Paris, 1976.
- (2) BAQUE, P. et alii - Mise en Forme de Metaux: Calculs par la Plasticité, Dunod, Paris, 1973.
- (3) HOFFMAN, O.; SACHS, G. - Introduction to the Theory of Plasticity for Engineers, McGraw-Hill Book Company, New York, 1953.
- (4) JOHNSON, W.; MELLOR, P.B. - Engineering Plasticity, van Nostrand, London, 1973.
- (5) KACHANOV, L.M. - Fundamentals of the Theory of Plasticity, Mir Publishers, Moscow, 1974.
- (6) MASTEROV, V.; BERKOVSKY, V. - Theory of Plastic Deformation and Metal Working, Mir Publishers, Moscow, 1975.
- (7) RABINOWICZ, E. - Friction and Wear of Materials, Ed. Wiley Interscience, New York, 1965.
- (8) SCHEY, J.A. - Metal Deformation Process-Friction and Lubrication, M. Dekker Inc., New York, 1970.

APÊNDICES

A.1. SIMBOLOGIA

A	= área
A_0	= área inicial do fio
A_1	= área final do fio
B	= constante
b	= largura da haste
c	= constante de integração
dr	= elemento de raio
ds	= elemento de volume
D	= diâmetro do fio
D_0	= diâmetro inicial do fio
D_1	= diâmetro final do fio
E	= módulo de elasticidade
F	= força que provoca deformação na haste
F_s	= força de separação entre as duas metades das fieiras
F_t	= força de trefilação
h	= espessura da haste
K	= coeficiente de resistência
L	= comprimento da região cilíndrica da fieira

- ℓ = comprimento da haste
 $M_{\max}$ = momento fletor máximo
 m = coeficiente de atrito (modelo da camada limite)
 n = expoente de encruamento
 O = origem do sistema de coordenadas esféricas
 $\bar{p}$ = pressão exercida sobre o fio pela fiação
 R_i = raio inicial do fio
 R_f = raio final do fio
 r = redução de área
 r_i = distância radial
 S = limite de escoamento
 T_i = tensão aplicado no fio
 u_r, r_θ, u_ϕ = componentes do vetor velocidade no sistema de coordenadas esféricas r, θ e ϕ
 V = volume
 v = velocidade de trefilação
 v_i = velocidade inicial
 v_f = velocidade final
 $\dot{w}_e$ = potência externa
 $\dot{w}_i$ = potência interna

$\dot{W}_S$ = potência dissipada por atrito e por descontinuidade de velocidade

$\dot{W}_U$ = potência de deformação

W = módulo de flexão

α = semi-ângulo da fiação ou ângulo de entrada

β = ângulo de trabalho

γ = ângulo de saída

ΔA = variação de área

ΔV = descontinuidade de velocidade

$\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$ = superfícies de descontinuidades de velocidades

ϵ = deformação

$\dot{\epsilon}$ = velocidade de deformação

$\dot{\epsilon}_{ij}$ = componentes do tensor de velocidade de deformação

$\dot{\epsilon}_{rr}; \dot{\epsilon}_{\theta\theta}; \dot{\epsilon}_{\phi\phi}$ = componentes de velocidade de deformação normais segundo coordenadas esféricas r, θ e ϕ

μ = coeficiente de atrito

σ_0 = limite de escoamento

σ = tensão

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = tensões principais

σ_{eff} = tensão efetiva

σ_r = tensão radial

σ_t = tensão de trefilação

σ_x = tensão longitudinal

τ = tensão de cisalhamento

ϕ = fator de trabalho redundante

σ_θ = tensão angular no fio na zona II

σ_I = tensão radial no fio na zona III

σ_z = tensão longitudinal no fio na zona III

A2 - ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	- Dependência das energias envolvidas no processo de trefilação com o ângulo da fieira e a redução de área.	4
Figura 2.1	- Ilustração esquemática do processo de trefilação.	9
Figura 2.2	- Representação do estado de tensões através do círculo de Mohr.	14
Figura 2.3	- Tensões principais para um ponto qualquer no processo de trefilação.	17
Figura 2.4	- Curva tensão-deformação verdadeira para o ensaio de tração.	18
Figura 2.5	- Ilustração do método da divisão em elementos.	22
Figura 2.6	- Modelo da zona plástica adotado por Avitzur para a trefilação.	34
Figura 2.7	- Modelo do campo de velocidade cinematicamente admissível, adotado por Avitzur.	35
Figura 3.1	- Trabalho redundante do fio no interior da fieira.	49
Figura 3.2	- Procedimento para a determinação do fator de trabalho redundante.	51

- Figura 3.3 - Curva tensão (de cisalhamento decomposta) x deformação (tangencial ou de cisalhamento decomposta) para metais dos sistema ccc (Fe), cfc (Cu) e hc (Mg). 57
- Figura 3.4 - Curva de tensão (de tração) x deformação (linear relativa) para um cristal e um agregado policristalino de um mesmo metal. 58
- Figura 3.5 - Curva tensão x deformação para o alumínio puro (cfc) ilustrando os três estágios de encruamento. 60
- Figura 3.6 - Curva tensão x deformação para o alumínio ilustrando a influência do tamanho do grão. 62
- Figura 3.7 - Alteração das propriedades mecânicas com o aumento da deformação plástica, caracterizando o encruamento (curvas ilustrativas de tendências). 64
- Figura 3.8 - Determinação da velocidade de deformação. 67
- Figura 3.9 - Aspecto de uma interface entre o fio e a fieira. 71
- Figura 3.10 - Vetor tensão na interface. 71
- Figura 3.11 - Interação entre fio e fieira. 75

Figura 4.1	- Máquina trefiladora de laboratório.	88
Figura 4.2	- Sistema de lubrificação.	89
Figura 4.3	- Sistema do controle de velocidade.	91
Figura 4.4	- (a) Dimensões da haste flexível.	93
	(b) Disposição dos extensômetros na haste.	93
	(c) Ligação dos extensômetros na ponte amplificadora.	93
Figura 4.5	- Dispositivo de medição de forças construído.	96
Figura 4.6	- Vista geral da máquina trefiladora com dispositivo de medição de forças.	97
Figura 4.7	- Dispositivo de medição de forças entre o suporte da fieira e o anel tirante.	98
Figura 4.8	- Aspecto de aferição do dispositivo de medição de forças.	100
Figura 4.9	- Curva de aferição do dispositivo de medição de forças.	107
Figura 4.10	- Erro relativo da carga F_i aplicada na haste flexível do dispositivo de medição de forças em função da leitura na ponte amplificadora.	108
Figura 4.11	- Funcionamento do dispositivo de medição de forças.	110

- Figura 4.12 - Máquina M.T.S. para ensaio de tração. 111
- Figura 5.1 - Efeito da velocidade de trabalho na tensão de trefilação. 119
- Figura 5.2a - Comparação entre as tensões de trefilação experimentais com as obtidas pelos modelos teóricos adotados para μ estimado e $v = 0,05$ m/s. 133
- Figura 5.2b - Comparação entre as tensões de trefilação experimentais com as obtidas segundo modelos teóricos adotados para μ estimado e $v = 0,25$ m/s. 134
- Figura 5.3 - Comparação entre as tensões de trefilação experimentais com as obtidas segundo modelo de Sachs e Van Horn para μ calculado. 135
- Figura 5.4 - Comparação entre as tensões de trefilação experimentais com as obtidas segundo modelo de Siebel para μ calculado. 136
- Figura 5.5 - Comparação entre as tensões de trefilação experimentais com as obtidas segundo modelo de Korber e Eichinger para μ calculado. 137
- Figura 5.6 - Comparação entre as tensões de trefilação experimentais com as obtidas segundo modelo de Whitton para μ calculado. 138

- Figura 5.7 - Comparação entre as tensões de trefilação experimentais com as obtidas segundo o modelo de Davis e Dokos para μ calculado. 139
- Figura 5.8 - Resistência a tração, limite de escoamento e alongamento em função da redução de área. 142
- Figura 5.9 - Determinação dos valores dos parâmetros de encruamento na curva log - log. 143
- Figura 5.10a - Curva tensão x deformação verdadeira obtida em um ensaio de tração - pontos experimentais para os fios trefilados com $v = 0,05$ m/s e representação analítica. 144
- Figura 5.10b - Curva tensão x deformação verdadeira obtida em um ensaio de tração - pontos experimentais para os fios trefilados com $v = 0,25$ m/s e representação analítica. 145
- Figura 5.11 - Efeito da velocidade de trefilação sobre o coeficiente de atrito. 149

A3 - ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1	- Comparação dos modelos de cálculo da tensão de trefilação em função das hipóteses adotadas.	41
Tabela 4.1	- Composição química do cobre eletrolítico tenaz (CuETP) de acordo com Pirelli S.A.	85
Tabela 4.2	- Valores das leituras das deformações obtidas na aferição do dispositivo.	101
Tabela 4.3	- Computação de $\Sigma \bar{x}_i$, $\Sigma \bar{y}_i$, $\Sigma (x_i - \bar{x})^2$, $\Sigma (x_i - \bar{x}) y_i$ e $\Sigma (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$ (método dos mínimos quadrados).	105
Tabela 4.4	- Seqüência de redução de área adotada.	113
Tabela 4.5	- Níveis de velocidades adotados.	114
Tabela 5.1	- Resultados das forças e tensões de trefilação obtidas experimentalmente a cinco níveis de velocidades (valores médios de três experiências).	118
Tabela 5.2	- Resultados das tensões de trefilação segundo modelos teóricos adotados para μ estimado.	120
Tabela 5.3	- Resultados das tensões de trefilação obtidas segundo modelo de Sachs e Van Horn para μ estimado.	121

Tabela 5.4 - Resultados das tensões de trefilação ob	
tidas segundo modelo de Siebel para μ	
estimado.	122
Tabela 5.5 - Resultados das tensões de trefilação ob	
tidas segundo modelo de Whitton para μ	
estimado.	123
Tabela 5.6 - Resultados das tensões de trefilação ob	
tidos segundo modelo de Trozera para μ	
estimado.	124
Tabela 5.7 - Resultados das tensões de trefilação ob	
tidas segundo modelo de Avitzur para μ	
estimado.	125
Tabela 5.8 - Coeficientes de atrito obtidos através	
da equação de Avitzur.	126
Tabela 5.9 - Resultados das tensões de trefilação ob	
tidas segundo modelo de Sachs e Van	
Horn para μ calculado.	127
Tabela 5.10 - Resultados das tensões de trefilação ob	
tidas segundo modelo de Siebel para μ	
calculado.	128
Tabela 5.11 - Resultados das tensões de trefilação ob	
tidas segundo modelo de Korber e Eichin	
ger para μ calculado.	129
Tabela 5.12 - Resultados das tensões de trefilação ob	
tidas segundo modelo de Davis e Dokos	
para μ calculado.	130

Tabela 5.13 - Resultados das tensões de trefilação ob-
tidas segundo modelo de Whitton para μ
calculado.

131

Tabela 5.14 - Resultados dos ensaios de tração após a
trefilação.

141