

MINISTÉRIO DE EDUCAÇÃO E CULTURA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
METALÚRGICA E DOS MATERIAIS - PPGEMM

Método de medição de força de trefilação de arames;  
avaliação da variação do coeficiente de atrito em  
trefilação de arames de aço

por

José Gerbase Filho

Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da  
Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Ma  
teriais - PPGEMM

Porto Alegre

1976

MÉTODO DE MEDIÇÃO DE FORÇA DE TREFILAÇÃO DE ARAMES ;  
AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO EM  
TREFILAÇÃO DE ARAMES DE AÇO

TESE

Apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais - PPGEMM, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de

MESTRE EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

por

José Gerbase Filho

Engenheiro Mecânico

1976

ESCOLA DE ENGENHARIA  
BIBLIOTECA

Esta TESE foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Ciência dos Materiais e aprovada, em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.



Orientador : Ildon Guilherme Borchardt

Doutor

Banca Examinadora :

Doutor Ildon G. Borchardt

Doutor Flávio P. Livi

Doutor Arno Blass



Curso de Pós-Graduação:

Coordenador: Arno Müller  
Doutor

Coordenador do PPGEMM

## RESUMO

Este trabalho fornece um método de medição de força de trefilação de arames, em trefiladoras industriais e em experiências de laboratório. Avalia ainda, a partir da força de trefilação medida, o coeficiente de atrito na trefilação de aços de baixo e médio teor de carbono, lubrificadas com sabão e óleo - sofrendo reduções de 10<sup>o</sup>/o e 20<sup>o</sup>/o.

A avaliação do coeficiente de atrito é feita pela comparação da força medida com a força calculada por modelos teóricos, visando:

1. obter valores de coeficiente de atrito que possam ser usados no cálculo da força de trefilação, para o projeto e utilização de equipamentos de trefilação.

2. comparar os modelos teóricos de Siebel, Sachs e Geleji - quanto ao valor do coeficiente de atrito por eles calculados.

Face aos resultados finais obtidos conclui-se ser o equipamento de medição de força de trefilação utilizável dentro de uma precisão de  $\pm 1,5^o/o$ . Analisa-se ainda a variação do coeficiente de atrito face a variação de condições como: lubrificação, rugosidade superficial, pressão média na parede da fiação e resistência ao escoamento média.

## ABSTRACT

This work describes a method to measure the drawing force on wires, on industrial drawing machines and also in laboratory experiments. It evaluates also, by means of the measurement of the drawing force, the friction coefficient in the drawing of steel with low and medium carbon content, lubricated with soap and oil undergoing reduction of 10<sup>o</sup>/o and 20<sup>o</sup>/o .

The evaluation of the friction coefficient is performed by comparison of the measured force with the calculated force , utilizing theoretical models, aiming:

1. To obtain the values of the friction coefficient that can be used in the calculation of the drawing force, for the design and use of drawing equipments.

2. To compare the values of the friction coefficient obtai

ned by three theoretical models developed by Siebel, Sachs - and Geleji.

From the final results it is concluded that the equipment used in the measurement of the force can be used with an accuracy of  $\pm 1.5^0/o$ . It is also analysed the variation of the friction coefficient with the variation of lubrication, the surface finish, the average pressure at the walls of the die and the average Yield stress.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Jaroslav Kozel e ao Eng. Ivan Kayser por seus ensinamentos.

Ao Dr. Ildon G. Borchardt pela orientação na realização deste trabalho.

A Industrial Arte-Técnica S/A e em especial ao Eng. - Eudoro Lucas de Oliveira por sua colaboração.

A Secretaria de Tecnologia Industrial do MIC por ter financiado o projeto e construção do sensor de força, dentro do projeto 11-02-01.

A FINEP- Financiadora de Estudos e Projetos pelo financiamento de parte deste trabalho.

Aos senhores Danilo M. da Silveira, Ênio G. Ferreira, Carlos R.F. Ferreira e Vilson João Batista pela colaboração na elaboração deste trabalho.

## CONTEÚDO

RESUMO	iii
LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES	viii
CAP. I- INTRODUÇÃO	I-1
I-1. Trefilação	I-1
CAP. II- MODELOS TEÓRICOS	II-1
II-1. Introdução	II-1
II-2. O modelo teórico de Siebel	II-1
II-3. O modelo teórico de Sachs	II-5
II-4. O modelo teórico de Geleji	II-7
CAP. III- EQUIPAMENTO UTILIZADO	III-1
III-1. Projeto e construção de um sensor para medição de força de trefilação	III-2
III-1-1. Introdução	III-2
III-1-2. Projeto	III-2
III-1-3. Construção	III-7
III-1-4. Calibração	III-8
III-2. Equipamento utilizado na medição de velocidade	III-10
III-3. Equipamento utilizado na medição da deformação dos extensômetros	III-11
III-4. Registrador	III-11
III-5. Multímetro digital	III-12
III-6. Equipamento utilizado para trefilação	III-12
CAP. IV- CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE LABORATÓRIO	IV-1
IV-1. Material e tratamento térmico	IV-1

IV-2.	Micro estrutura	IV-1
IV-3.	Dimensões e construção	IV-1
IV-4.	Curvas de resistência ao escoamento - $k_f$	IV-3
CAP.V- MÉTODO DE ENSAIO		V-1
V-1.	Plano de experiências	V-1
V-2.	Variação dos parâmetros	V-2
V-3.	Realização das experiências em laboratório	V-2
V-4.	Realização das experiências em indústria	V-4
CAP.VI- APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS		VI-1
VI-1.	Resultados da força de trefilação nas experiências de laboratório	VI-1
VI-2.	Resultados da força de trefilação nas medidas em trefiladoras industriais	VI-1
VI-3.	Resultados do coeficiente de atrito nas experiências de laboratório	VI-4
VI-4.	Resultados do coeficiente de atrito nas medidas em trefiladoras industriais	VI-4
VI-5.	Resultados das medidas de velocidade	VI-5
CAP.VII- CONCLUSÕES		VII-1
CAP.VIII- SUGESTÕES DE CONTINUIDADE DO TRABALHO		VIII-1
APÊNDICE - A		A-1
APÊNDICE - B		B-1
APÊNDICE - C		C-1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		R-1

## LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES ADOTADAS

Para uniformidade de notação adotou-se em todo o trabalho a seguinte lista de símbolos e unidades.

A	área da seção transversal do material no interior da fieira em um ponto qualquer	mm <sup>2</sup>
A <sub>0</sub>	valor de A na entrada da fieira	mm <sup>2</sup>
A <sub>1</sub>	valor de A na saída da fieira	mm <sup>2</sup>
F	força de trefilação	kgf
T	trabalho de trefilação	kgm
k <sub>f</sub>	resistência ao escoamento do material, obtida em um ensaio de compressão uniaxial, (em um ponto qualquer da fieira).	kgf/mm <sup>2</sup>
k <sub>f0</sub>	valor de k <sub>f</sub> na entrada da fieira	kgf/mm <sup>2</sup>
k <sub>f1</sub>	valor de k <sub>f</sub> na saída da fieira	kgf/mm <sup>2</sup>
k <sub>fm</sub>	valor médio de k <sub>f</sub>	kgf/mm <sup>2</sup>
α	semi-ângulo da fieira	rad
μ	coeficiente de atrito entre material e fieira	
σ <sub>z</sub>	tensão axial em uma seção qualquer do material	kgf/mm <sup>2</sup>
σ <sub>x</sub>	tensão na direção perpendicular ao eixo da fieira	kgf/mm <sup>2</sup>
D	diâmetro da seção transversal do material no interior da fieira em um ponto qualquer	mm
D <sub>0</sub>	valor de D na entrada da fieira	mm
D <sub>1</sub>	valor de D na saída da fieira	mm
r	raio da seção transversal do material no interior da fieira em um ponto qualquer	mm
r <sub>0</sub>	valor de r na entrada da fieira	mm
r <sub>1</sub>	valor de r na saída da fieira	mm
ε	deformação relativa da área da seção transversal definida por $\frac{A_0 - A_1}{A_0}$	
φ	deformação logarítmica definida por $\ln \frac{A_0}{A_1}$	kgf/mm <sup>2</sup>
q <sub>m</sub>	pressão média na parede da fieira	

## I- INTRODUÇÃO

## I-1. Trefilação

A trefilação é um processo de conformação, normalmente realizado a frio, para a obtenção de barras e arames, acabados e semi-acabados.

Tendo como matéria prima, normalmente, material laminado, o processo consiste em tracionar axialmente o material através de uma ferramenta, chamada fieira, dotada de um furo cônico de diâmetro final menor do que o diâmetro do material ( fig.I-1)

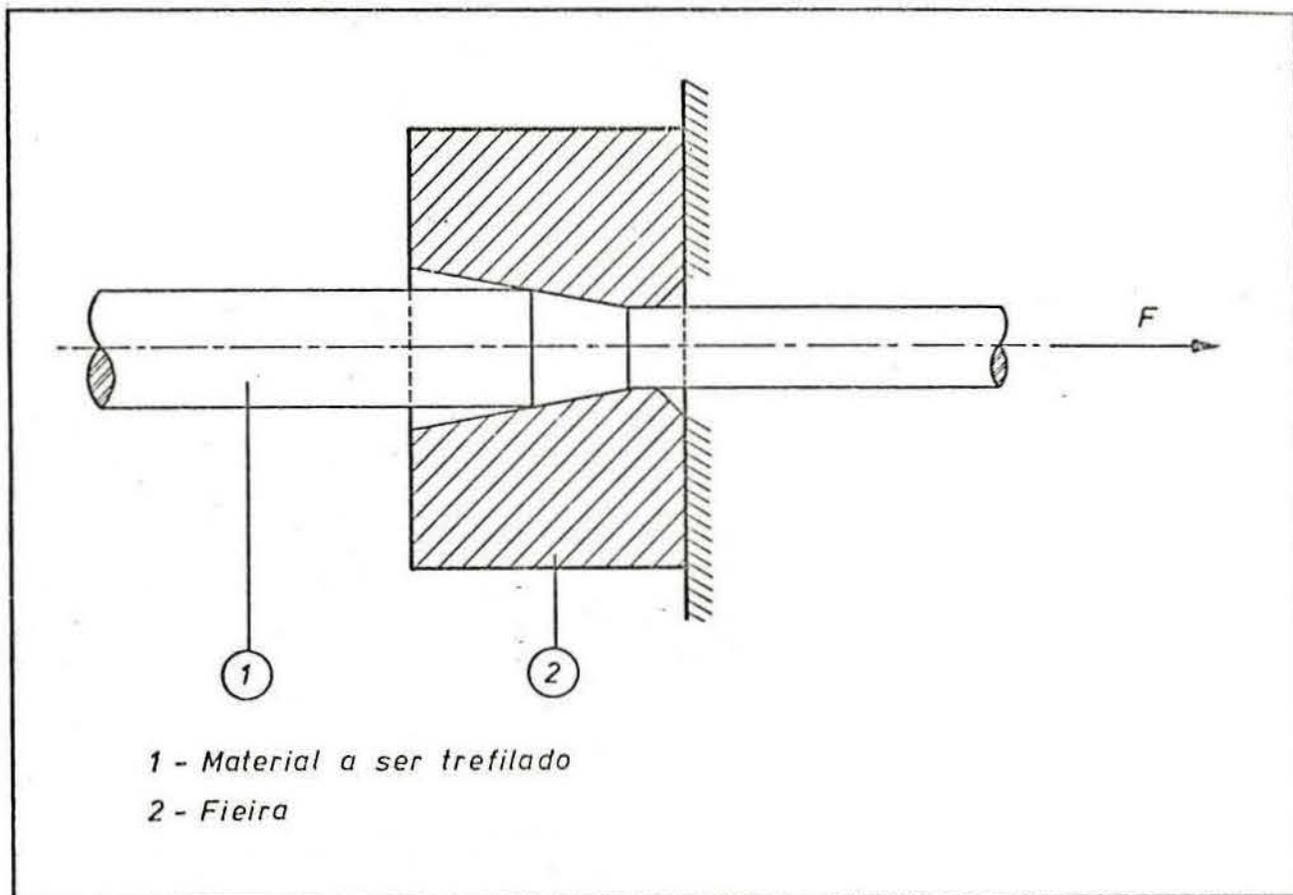


Fig. I-1. Material durante a trefilação

Após este processo o material apresenta uma maior precisão dimensional, um melhor acabamento e melhores propriedades mecânicas.

A trefilação é usualmente dividida em trefilação de arames e trefilação de barras. A trefilação de arames, onde o diâmetro inicial do material é da ordem de 10 mm, é realizada em máqui-

nas de trefilação contínuas onde o arame se encontra em forma de rolos. Esta trefilação é feita em várias etapas, ou passes onde em cada etapa se obtém uma fração da redução total desejada.

A trefilação de barras é realizada em máquinas que trefilam barras de comprimento determinado, individualmente.

Como o material a ser trefilado se encontra, normalmente no estado de pós-laminação, é necessário um processo de decapagem para eliminar as carepas da superfície altamente abrasivas e prejudiciais a vida útil da fieira. Esta decapagem pode ser realizada mecânicamente, por jateamento de areia ou dobramento, ou quimicamente.

Em cada passe, havendo uma conformação a frio, o material sofre um encruamento alterando suas propriedades mecânicas. Estas alterações elevam a tensão de escoamento do material, podendo atingir valores onde não é mais possível a trefilação, por ser a força de trefilação superior à resistência a ruptura do material na saída da fieira. Nestes casos é necessário um recozimento intermediário com a finalidade de diminuir a tensão de escoamento e, assim, permitir novos passes de trefilação.

A estrutura cristalina que apresenta melhores resultados nas propriedades mecânicas do material, após a trefilação é a estrutura bainítica, obtida pelo patenteamento, principalmente para aços de alto teor de carbono. Esta estrutura oferece as propriedades desejadas no produto final, ou seja, boa conformabilidade e alta resistência.

A redução de seção obtida em cada passe de trefilação é limitada por vários fatores, tais como: a resistência do material após a trefilação, o desgaste da fieira e a potência do equipamento utilizado. Para a determinação destes fatores é necessário o conhecimento da força de trefilação, ou seja, a força axial necessária para a conformação do material. Para este cálculo foram desenvolvidos diversos modelos teóricos que fornecem valores aproximados da força de trefilação. Estes modelos, desenvolvidos por Siebel, Sachs e outros, apresentam formas diferentes para o cálculo da força de trefilação, partindo de princípios diferentes. Todos os modelos, no entanto, estão base-

ados nas mesmas variáveis, apesar destas atuarem de maneira diferente em cada modelo, possuindo importâncias relativas também diferentes.

Estas variáveis, ou parâmetros de trefilação, são: o ângulo da fieira, o coeficiente de atrito entre material trefilado e a parede da fieira, as áreas inicial e final, ou seja a redução e o valor da tensão de escoamento média. A menos do coeficiente de atrito, todos estes parâmetros são passíveis de medição direta. Assim, o ângulo da fieira pode ser medido, a redução pode ser calculada pela medida dos diâmetros inicial e final e o valor da tensão de escoamento média pode ser obtida através das curvas de resistência ao escoamento de cada material. Não havendo um método de determinação direta do coeficiente de atrito, não é possível comparar com exatidão os diversos modelos teóricos para o cálculo da força de trefilação, nem afirmar qual modelo fornece indicações mais exatas do processo. Este é o problema básico de toda pesquisa em trefilação que só será resolvido quando se dispuser de um método de medir diretamente o coeficiente de atrito. Mc. Lellan(1) sugere uma maneira de determinar diretamente o coeficiente de atrito pela medição simultânea da força de trefilação e da força radial consequente (força que tende a separar em duas metades a fieira). Uma relação vetorial entre estas duas forças forneceria o coeficiente de atrito. Este problema, no entanto, ainda não está solucionado.

A maneira de se contornar a questão é através da medição da força real de trefilação, podendo-se assim calcular o valor do coeficiente de atrito necessário, em cada modelo, para igualar o valor da força de trefilação medida para as mesmas condições de ensaio. Este processo foi utilizado por vários autores, entre os quais: Lueg e Trptow (2), (3), Pomp e Gesche (4) e Leider e Gräbner (5) .

Supondo-se que o coeficiente de atrito não deva variar com a variação de alguns parâmetros de trefilação como o ângulo da fieira, a redução e a tensão de escoamento média, pode-se comparar os diversos modelos teóricos quanto ao valor de coeficiente de atrito por eles fornecidos, na medida que estes valores variarem com as variações das condições de trefilação.

É de se supor, no entanto, que os modelos existentes terão validade em condições de aplicação diferentes, ou seja, a aplicação de um ou outro dependerá de cada caso particular.

Este trabalho tem por objetivo a obtenção de um método de medição de força de trefilação de arames, em trefiladoras industriais e em experiências de laboratório. Avalia-se ainda, a partir da força de trefilação medida, o coeficiente de atrito na trefilação de aços de baixo e médio carbono, lubrificados com sabão e óleo sofrendo reduções de área de  $10^0/o$  e  $20^0/o$ . A avaliação do coeficiente de atrito é feita pela comparação da força medida com a força calculada por modelos teóricos, visando:

1. obter valores de coeficiente de atrito que possam ser utilizados no cálculo da força de trefilação, para o projeto e uso de equipamentos de trefilação.

2. comparar os modelos teóricos de Siebel, Sachs e Geleji quanto ao valor de coeficiente de atrito por eles calculados.

Deve-se ressaltar que este trabalho faz parte de um estudo geral de condições de trefilação de materiais nacionais e que, sendo o principal objetivo a implantação de um método de medição de força de trefilação, a avaliação do coeficiente de atrito foi feita usando-se modelos simplificados, deixando-se de lado outros mais sofisticados como o de Avitzur ou de Wistreich, uma vez que esta avaliação tem a finalidade básica de verificação do equipamento.

## II- MODELOS TEÓRICOS \*

## II-1. Introdução

Lewis, em 1915, foi um dos primeiros a tentar desenvolver uma expressão para o cálculo da força de trefilação. Sua fórmula final envolve fatores empíricos que variam com a redução de área do material trefilado.

Após estes primeiros estudos, numerosos pesquisadores fizeram tentativas no intuito de formular uma expressão que fornecesse valores mais exatos da força de trefilação. Sachs, em 1927, apresentou seu modelo na teoria elementar da plasticidade. Siebel, em diversos trabalhos publicados a partir de 1927, apresentou seu modelo desenvolvido a partir do trabalho de trefilação. Em 1940 Körber e Eichinger acrescentaram aos modelos de Siebel e Sachs mais um termo devido ao cisalhamento interno do material no interior da fieira. Estes dois modelos, de Siebel e Sachs, são usados até os dias de hoje para o cálculo da força de trefilação, sempre acompanhados das modificações introduzidas por Körber e Eichinger.

Numerosos autores, entre 1940 e 1950, como Geleji (6), Mc. Lellan (1) e outros, baseados nos modelos de Sachs e Siebel, formularam novas expressões para o cálculo da força de trefilação.

Mais modernamente autores como Hill e Tupper (7) e V. Piispanen e R. Piispanen (8) apresentaram novas expressões baseados em desenvolvimentos da teoria da plasticidade.

A seguir são apresentados os desenvolvimentos de Siebel, Sachs e Geleji, os dois primeiros por serem os modelos onde estão baseadas a maioria das teorias de trefilação e o de Geleji por ser uma aplicação mais recente destes modelos.

## II-2. O modelo teórico de Siebel ( 9 )

Siebel baseou seu modelo teórico no cálculo do trabalho-

\* os símbolos e notações originais dos modelos foram modificados para uniformidade de notação adotando-se os mesmos símbolos na descrição de todos os modelos. (ver lista de símbolos)

necessário de trefilação.

O trabalho total de trefilação ( $T$ ) será a soma de uma parcela chamado trabalho útil ( $T_u$ ) e de uma parcela chamada trabalho de atrito ( $T_a$ ). O trabalho útil é o trabalho necessário para a conformação do material e o trabalho de atrito é o necessário para vencer o atrito entre material e fiação. Assim :

$$T = T_u + T_a \quad \text{II-1}$$

O trabalho útil é calculado a partir do deslocamento de um elemento de forma cilíndrica no interior da fiação. O trabalho necessário para a deformação deste elemento, de área  $A$  e comprimento  $l$ , que sofre um deslocamento  $dl$  será :

$$dT_u = \sigma_z A dl + \sigma_x dr 2\pi r dl \quad \text{II-2}$$

onde  $\sigma_x$  e  $\sigma_z$  são as tensões radial e tangencial que atuam sobre o material, conforme figura II-1.

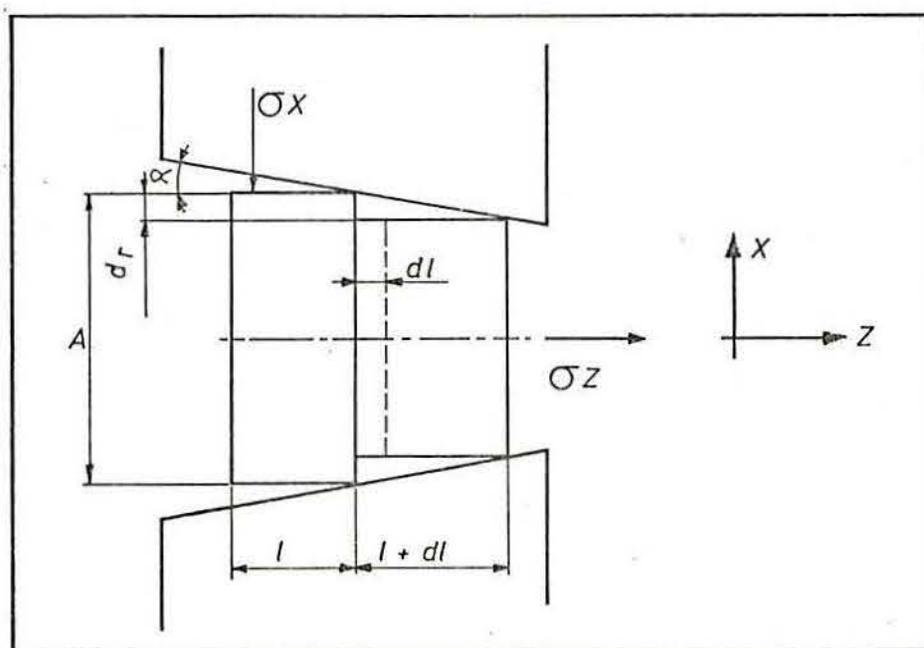


Fig. II-1 - tensões durante a trefilação

Considerando que esta alteração de forma se dá a volume constante tem-se  $A dl = -l dA$  e, sendo  $2\pi r dr = dA$ , a equa -

ção II-2 fica:

$$dT_U = \sigma_z A dl - \sigma_x A dl \quad \text{II-3}$$

Utilizando-se o critério de escoamento de Tresca ( 17) da máxima tensão de cisalhamento tem-se a seguinte relação , na zona de escoamento :

$$\sigma_z - \sigma_x = k_f \quad \text{II-4}$$

onde  $k_f$  é a tensão de escoamento do material. A equação II - 3 fica, portanto :

$$dT_U = k_f l dA = k_f V \frac{dA}{A} \quad \text{II-5}$$

pois o volume  $V = A l$

Supondo  $k_f$  constante e integrando a equação II-5 de  $A_0$  até  $A_1$  resulta :

$$T_U = V k_f \ln \frac{A_0}{A_1} \quad \text{II-6}$$

e sendo por definição

$$\ln \frac{A_0}{A_1} = \varphi_A \quad \text{resulta}$$

$$T_U = V k_f \varphi_A \quad \text{II-7}$$

O trabalho de atrito (sendo  $\mu$  o coeficiente de atrito) para o mesmo deslocamento do elemento no interior da fieira - será :

$$dT_a = \mu \sigma_x \frac{2 \pi r l}{\cos \alpha} \frac{dr}{\sin \alpha} \quad \text{II-8}$$

pois  $2 \pi r l / \cos \alpha$  é a área de atuação de  $\sigma_x$  e  $dr / \sin \alpha$  é a componente de  $dl$  na direção da força de atrito. Sendo  $2 \pi r dr = dA$  e  $V = l A$  tem-se :

$$dT_a = \frac{\mu \sigma_x V}{\text{sen } \alpha \cos \alpha A} dA \quad \text{II-9}$$

que por integração entre  $A_0$  e  $A_1$  e supondo  $\sigma_x$  constante resulta :

$$T_a = V \frac{\mu \sigma_x}{\text{sen } \alpha \cos \alpha} \ln \frac{A_0}{A_1} \quad \text{II-10}$$

ou

$$T_a = V \frac{\mu \sigma_x}{\alpha} \varphi_A \quad \text{II-11}$$

pois  $\alpha$  é pequeno para os casos usuais de trefilação (em torno de  $6^\circ$ ).

Como na interface arame-fieira tem-se  $\sigma_z$  aproximadamente igual a zero, conforme Siebel (9), obtem-se :

$$T_a = V \frac{\mu}{\alpha} k_f \varphi_A \quad \text{II-12}$$

É necessário ainda acrescentar, conforme Eichinger, um terceiro termo proveniente do trabalho interno de cisalhamento (também chamado atrito interno) causado pela mudança de orientação do material dentro da fieira. Este trabalho de cisalhamento  $T_c$  tem por expressão :

$$T_c = \frac{2}{3} V k_f \frac{\alpha}{\varphi_A} \quad \text{II-13}$$

Assim considerando o trabalho total de trefilação como:

$$T = T_u + T_a + T_c \quad \text{obtem-se :}$$

$$T = V \varphi_A k_f \left( 1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{2}{3} \frac{\alpha}{\varphi_A} \right) \quad \text{II-14}$$

e uma vez que  $V / l = A_1$  e  $T = l F$  resulta de II-14 :

$$F = A_1 \varphi_A k_f \left( 1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{2}{3} \frac{\alpha}{\varphi_A} \right) \quad \text{II-15}$$

que é a expressão da força de trefilação segundo Siebel (9)

Como o valor de  $k_f$  varia durante a trefilação pelo encruamento do material, calcula-se a força de trefilação tomando -se para  $k_f$  um valor médio entre os pontos de entrada e saída da fieira. Assim fazendo-se :

$$k_{fm} = \frac{k_{f0} + k_{f1}}{2} \quad \text{II-16}$$

a expressão II-15 fica :

$$F = A_1 \phi_A k_{fm} \left( 1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{2}{3} \frac{\alpha}{\phi_A} \right) \quad \text{II-17}$$

Esta é a expressão final para o cálculo da força de trefilação, segundo Siebel, levando-se em conta o encruamento do material.

A partir da equação II-17 e da medida da força de trefilação pode-se calcular o valor do coeficiente de atrito pela seguinte expressão :

$$\mu = \alpha \left( \frac{F}{A_1 k_{fm} \phi_A} - \frac{2}{3} \frac{\alpha}{\phi_A} - 1 \right) \quad \text{II-18}$$

### II-3. O modelo teórico de Sachs ( 10 )

Sachs desenvolveu seu modelo a partir da teoria elementar da plasticidade. Considerando-se um elemento de espessura  $dz$  no interior da fieira e fazendo-se o equilíbrio das forças no sentido axial, obtém-se, conforme a figura II-2 :

$$(\sigma_z + d\sigma_z) (A + dA) - \sigma_z A + dP \sin \alpha + \mu dP \cos \alpha \quad \text{II-19}$$

ou seja :

$$\sigma_z dA + A d\sigma_z + dP \sin \alpha + \mu dP \cos \alpha = 0 \quad \text{II-20}$$

Pelo critério de escoamento de Tresca se tem :  $\sigma_1 - \sigma_3 = k_f$  onde  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  são tensões principais.

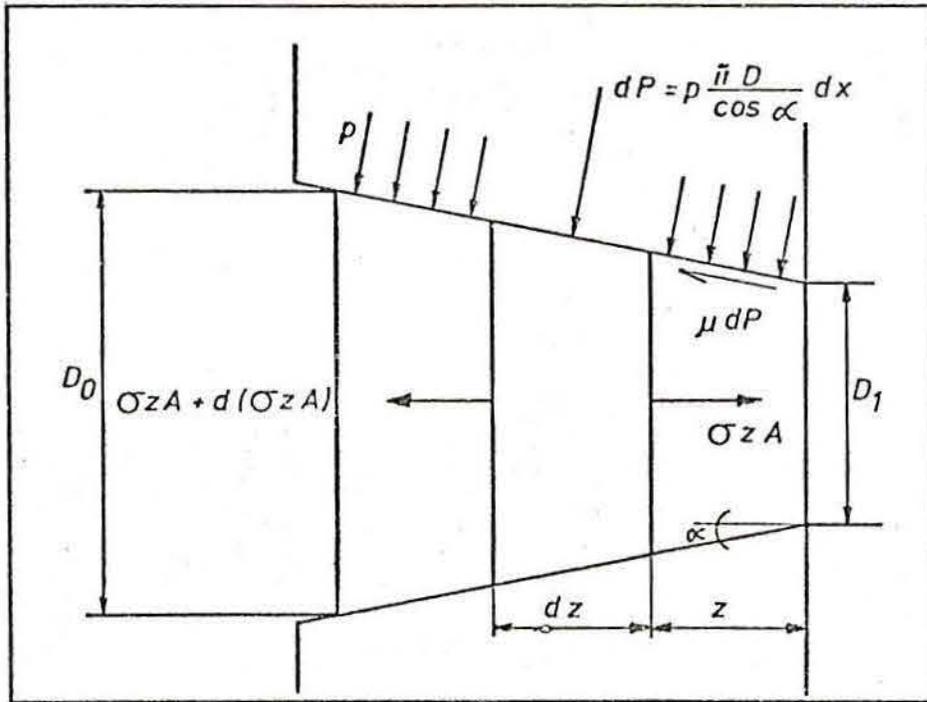


Fig. II-2. tensões durante a trefilação

Fazendo-se  $\sigma_1 = \sigma_z$  e  $\sigma_3 = -p$  obtem-se:

$$p = k_f - \sigma_z \quad \text{II-21}$$

de modo que a equação II-20 fica :

$$\sigma_z dA + A d\sigma_z + (k_f - \sigma_z) \frac{dA}{\sin \alpha} \sin \alpha + \mu (k_f - \sigma_z) \frac{dA}{\sin \alpha} \cos \alpha = 0 \quad \text{II-22}$$

ou seja

$$A d\sigma_z + k_f dA (1 + \mu \cot \alpha) - \mu \sigma_z \cot \alpha dA = 0 \quad \text{II-23}$$

Separando as variáveis e integrando entre os limites  $\sigma$  e  $\sigma_z$  e  $A_0$  e  $A$ , supondo  $k_f$  constante, obtem-se :

$$\frac{1}{\mu \cot \alpha} \left[ \ln \frac{\sigma_z \mu \cot \alpha - k_f (1 + \mu \cot \alpha)}{-k_f (1 + \mu \cot \alpha)} \right] = \ln \frac{A}{A_0} \quad \text{II-24}$$

ou seja

$$\frac{\sigma_z \mu \cot \alpha - k_f (1 + \mu \cot \alpha)}{-k_f (1 + \mu \cot \alpha)} = \left( \frac{A}{A_0} \right)^{\mu \cot \alpha} \quad \text{II-25}$$

e a tensão em um ponto qualquer da fieira será :

$$\sigma_z = k_f \left( 1 + \frac{1}{\mu \cot \alpha} \right) \left[ 1 - \left( \frac{A}{A_0} \right)^{\mu \cot \alpha} \right] \quad \text{II-26}$$

A tensão  $\sigma_z$  na saída da fieira será :

$$\sigma_{z1} = k_f \left( 1 + \frac{1}{\mu \cot \alpha} \right) \left[ 1 - \left( \frac{A_1}{A_0} \right)^{\mu \cot \alpha} \right] \quad \text{II-27}$$

Como  $F = \sigma_{z1} A_1$  e tomando-se o valor médio de  $k_f$  obtem -  
-se :

$$F = A_1 k_{fm} \left( 1 + \frac{1}{\mu \cot \alpha} \right) \left[ 1 - \left( \frac{A_1}{A_0} \right)^{\mu \cot \alpha} \right] \quad \text{II-28}$$

É necessário ainda acrescentar um termo devido ao cisalhamento interno. Este termo, conforme Eichinger vale :

$$F_c = \frac{4}{3 \sqrt{3}} k_{fm} \alpha A_1 \cong 0,77 \alpha k_{fm} A_1 \quad \text{II-29}$$

e a expressão II-28 fica :

$$F = A_1 k_{fm} \left\{ \left( 1 + \frac{1}{\mu \cot \alpha} \right) \left[ 1 - \left( \frac{A_1}{A_0} \right)^{\mu \cot \alpha} \right] + 0,77 \alpha \right\}$$

II-30

que é a expressão de Sachs para o cálculo da força de trefilação, segundo Paul Funke ( 11 ).

A partir da equação II-30 e da medida da força de trefilação pode-se calcular o valor do coeficiente de atrito. Este cálculo não pode ser feito diretamente, sendo necessário a utilização de um método iterativo.

Geleji calculou a força de trefilação como a soma de três-forças, ou seja, uma força necessária à mudança de forma ( $F_U$ ), uma força devida ao atrito externo ( $F_a$ ) e uma força devida ao cisalhamento interno ( $F_c$ ).

O valor de  $F_U$  é dado, conforme a figura II-4, por:

$$dF_U = q_m ds' \operatorname{sen} \alpha \quad \text{II-31}$$

onde  $q_m$  é a pressão média entre material e fieira ( ver item-II-4. ).

e

$$F_U = q_m ( A_0 - A_1 ) = q_m \Delta A \quad \text{II-32}$$

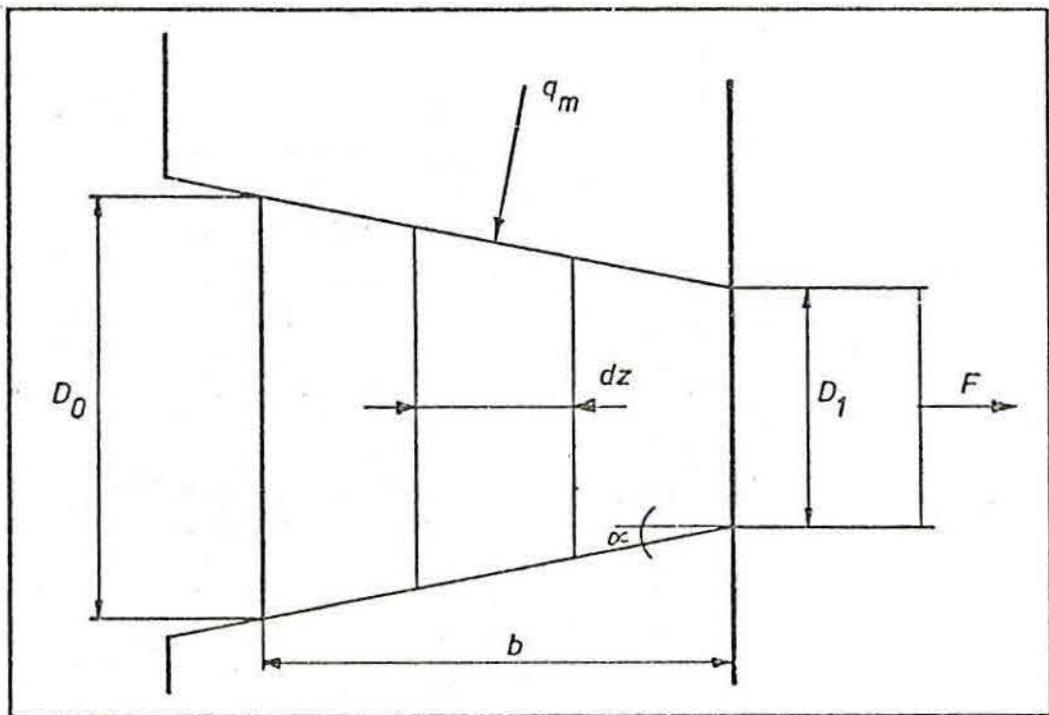


Fig. II-4. pressão média  $q_m$

O valor de  $F_a$  é dado por

$$F_a = \Delta A q_m \mu / \operatorname{sen} \alpha \quad \text{II-33}$$

e o valor de  $F_c$  é dado por

$$F_c = 0,77 k_{fm} A_1 \alpha \quad \text{II-34}$$

A força de trefilação  $F = F_u + F_a + F_c$  é dada portanto por :

$$F = q_m \Delta A \left( 1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) + 0,77 k_{fm} A_1 \alpha \quad \text{II-35}$$

Para valores pequenos de  $\alpha$ , ou seja, para os casos normais de trefilação o valor de  $q_m$  é calculado, segundo Geleji (6), pela expressão :

$$q_m = \frac{k_{fm} (1 - 0,385 \alpha)}{1 + 1/2(A_0/A_1 - 1)(1 + \mu/\alpha)} \quad \text{II-36}$$

A partir das equações II-35 e II-36 pode-se calcular o valor do coeficiente de atrito, uma vez medida a força de trefilação, pela seguinte expressão :

$$\mu = \alpha \frac{1}{(A_0 - A_1)(k_{fm} / F - 0,77 k_{fm} A_1 \alpha - 1/2 A_1)} - 1 \quad \text{II-37}$$

#### II-5. Pressão média $q_m$ na parede da fieira

Um parâmetro importante na avaliação das condições de lubrificação é a pressão média existente entre o material trefilado e a parede da fieira durante a trefilação.

Pomp e Gesche (4) sugerem que a pressão média  $q_m$  seja calculada pela expressão :

$$q_m = \frac{F \operatorname{sen} \alpha}{\operatorname{sen}(\alpha + \rho) (A_0 - A_1)} \quad \text{II-38}$$

onde  $\rho$  é o ângulo de atrito definido por  $\rho = \operatorname{tg}^{-1} \mu$

## III- EQUIPAMENTO UTILIZADO

A figura III-1 mostra o diagrama de conjunto dos equipamentos utilizados para a medição da força e velocidade de trefiliação

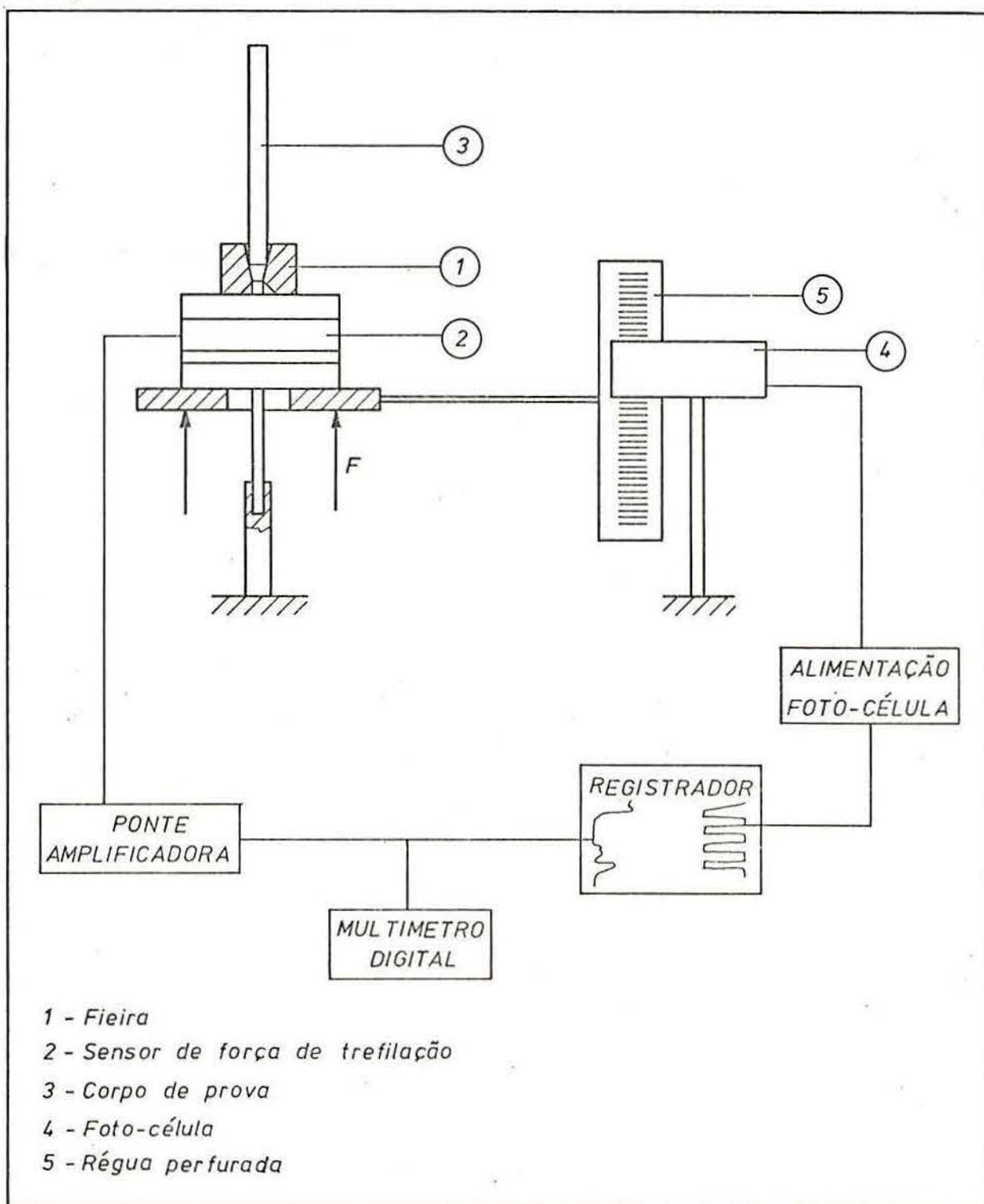


Fig. III-1. equipamento utilizado;diagrama de conjunto

### III-1. Projeto e construção de um sensor para medição da força de trefilação

#### III-1-1. Introdução

Diversos pesquisadores como Lueg e Treptow (3) , Pomp e Gesche (4) e outros utilizaram sensores para a medição de forças de trefilação. Estes sensores foram projetados para os fins específicos dos trabalhos realizados tendo, portanto, sua aplicação limitada.

O projeto do sensor utilizado no presente trabalho norteou-se no sentido da obtenção de um dispositivo mais versátil capaz de, com pequenas modificações, ser adaptado às condições de ensaio em laboratório e às condições industriais. Além disto, seu desenvolvimento permite a utilização numa faixa bastante ampla de forças de trefilação possibilitando seu emprego tanto em trefilação de arames como em trefilação de barras.

#### III-1-2. Projeto

O projeto do sensor de força de trefilação é baseado na flexão de uma placa em forma de anel circular engastada próximo ao diâmetro externo, conforme mostra a figura III-1 .

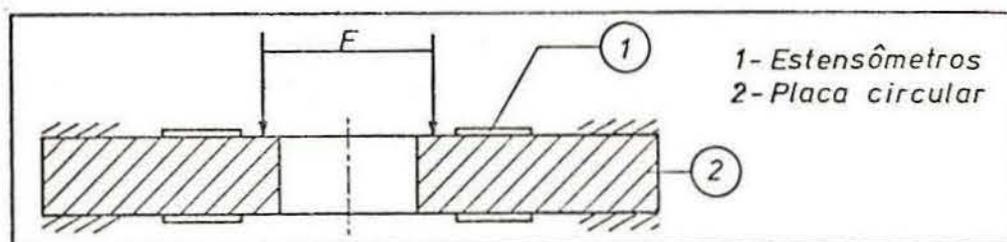


Fig. III-1. placa sensora

A força de trefilação, aplicada no diâmetro interno da placa, causa nesta uma flexão proporcional à sua intensidade. A

deformação causada pela flexão da placa em suas faces superior e inferior relaciona-se com a força aplicada. Esta relação, ou curva de calibração, é obtida aplicando-se forças conhecidas e medindo-se as deformações causadas por elas.

A deformação da placa é medida por extensômetros (strain - gauges) colados em suas faces superior e inferior, no sentido radial. Esta montagem dos strain-gauges apresenta como vantagem um maior sinal de saída possibilitando, ao mesmo tempo, a compensação automática de temperatura, conforme Beckwith e Buck (13).

A deformação dos strain-gauges é medida por uma ponte de Wheatstone (amplificadora de frequência portadora) conforme item III-3.

A escolha da geometria do sensor foi baseada na necessidade de se medir uma faixa bastante ampla de forças de trefilação - com uma sensibilidade razoável. Pela forma construtiva adotada, figura III-2, a mudança da faixa de medição de forças pode ser feita pela simples troca da placa circular 2, permanecendo o restante do sensor inalterado.

O cálculo da espessura da placa circular é feito a partir - da mínima deformação mensurável pela ponte, ou seja, a máxima - sensibilidade utilizável do equipamento de medição da deformação dos extensômetros. A deformação real de um extensômetro ( $\epsilon'$ ) está relacionada com a deformação medida pela ponte através - da seguinte relação, conforme apêndice C :

$$\epsilon' = \frac{1}{n\alpha} \frac{2}{K} c \epsilon \quad \text{III-1}$$

onde  $n$  é o número de braços ativos da ponte

$K$  é o fator do extensômetro (strain-gauge)

$\alpha$  e  $c$  são constantes que dependem da temperatura e do - comprimento dos cabos de alimentação.

Uma vez calculada a mínima deformação mensurável a partir - da relação III-1 e da sensibilidade do equipamento, deve-se - calcular a espessura da placa, de maneira que a deformação cau - sada pela menor força que se deseja medir seja maior ou igual - ao valor de  $\epsilon'$ .

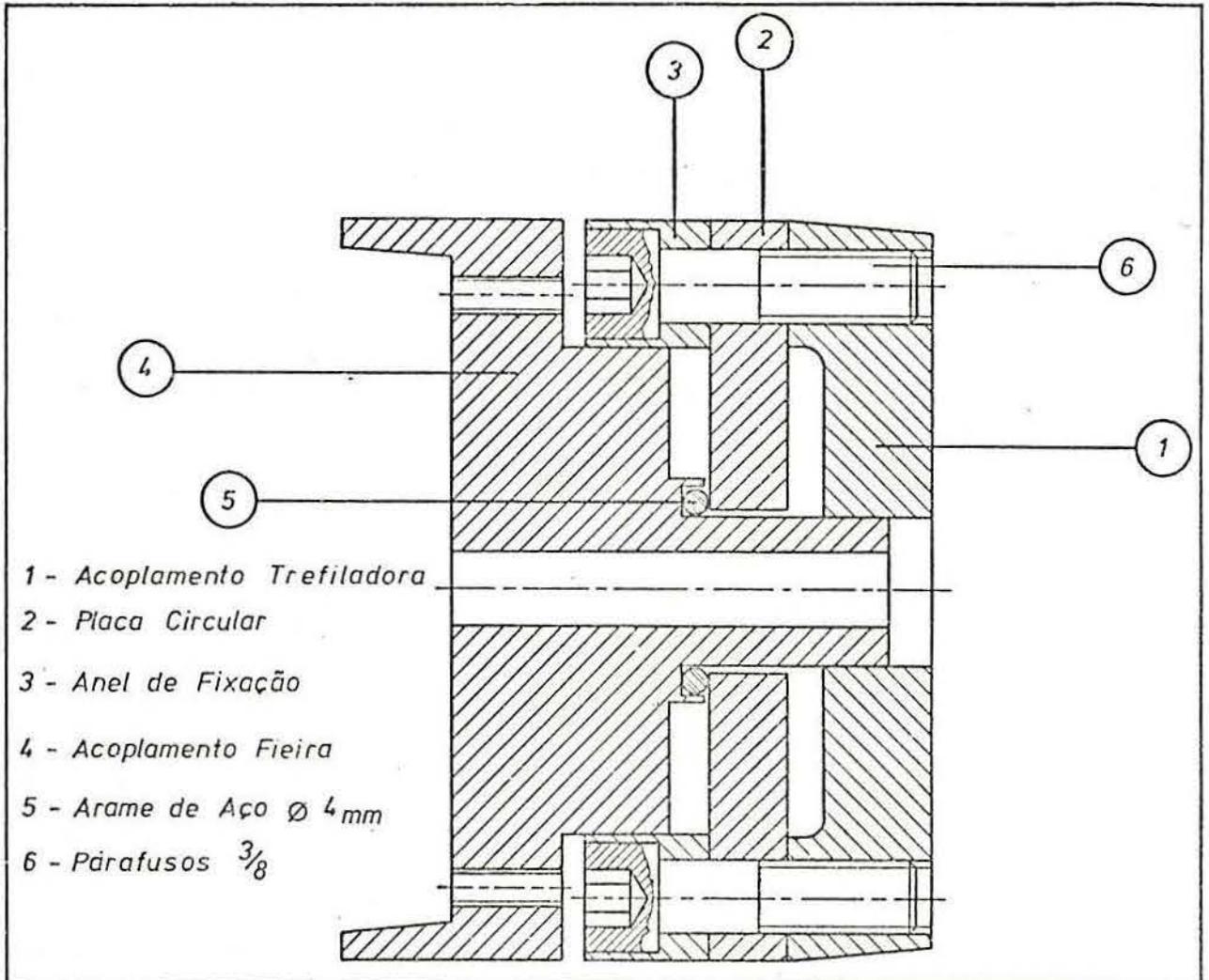


Fig. III-2. sensor de força de trefilação

O cálculo da deformação da placa pode ser feito, segundo Feodosyev ( 14 ) e Timoshenko ( 15 ), através das expressões :

$$\epsilon' = \frac{1}{E} ( \sigma_r + \nu \sigma_t ) \quad \text{III-2}$$

onde  $\epsilon'$  é a deformação da placa no sentido radial,  $\sigma_r$  e  $\sigma_t$  são as tensões radial e tangencial no ponto considerado,  $E$  é o módulo de elasticidade e  $\nu$  o coeficiente de Poisson. As tensões  $\sigma_r$  e  $\sigma_t$  são calculadas através das expressões :

$$\sigma_r^{\text{máx}} = \frac{6 M_r}{c^2} \quad \text{III-3} \quad \text{e} \quad \sigma_t^{\text{máx}} = \frac{6 M_t}{c^2} \quad \text{III-4}$$

onde  $c$  é a espessura da placa,  $M_r$  e  $M_t$  são os momentos radial e tangencial. Estes momentos são avaliados pelas expressões

$$M_r = \frac{F}{4\pi} \left[ \frac{b^2}{b^2-a^2} (1+\nu) \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \ln \frac{b}{a} - (1+\nu) \ln \frac{r}{a} \right] \quad \text{III-5}$$

e

$$M_t = \frac{F}{4\pi} \left[ \frac{b^2}{b^2-a^2} (1+\nu) \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) \ln \frac{b}{a} - (1+\nu) \ln \frac{r}{a} + 1 - \nu \right] \quad \text{III-6}$$

onde  $F$  é a força aplicada no contorno interno da placa,  $b$  é o raio externo,  $a$  é o raio interno e  $r$  é o raio onde estão colados os extensômetros.

Uma vez calculada a espessura da placa, fazendo-se  $\epsilon = \epsilon'$ , deve-se verificar se as tensões causadas pela aplicação da força máxima a ser medida não ultrapassam a tensão de escoamento do material (para evitar a deformação permanente da placa).

Assim, para o sensor em questão teremos, conforme a expressão III-1

$$\epsilon' = \frac{1}{2 \times 1} \frac{2}{2} \epsilon = 0,5 \epsilon \quad \text{III-7}$$

pois a montagem utilizada apresenta dois braços ativos ( $n=2$ ), o fator dos extensômetros utilizados ( $K$ ) é igual a 2 e  $\alpha$  e  $c$  são iguais a 1.

Utilizando-se como deformação mínima mensurável pela ponte o valor de  $\epsilon = 0,5 \times 10^{-3}$  teremos por III-7 :

$\epsilon' = 0,25 \times 10^{-3}$ . O valor  $0,5 \times 10^{-3}$  é mensurável com segurança com a ponte utilizada numa escala de sensibilidade média.

A escolha do valor mínimo de deformação, ou seja, a escolha da sensibilidade da ponte é um compromisso entre uma maior sensibilidade de medida e os problemas ocasionados pela utilização das faixas de maior sensibilidade do equipamento, como ruídos e flutuações.

Através das expressões III-5 e III-6 calculam-se os momentos  $M_r$  e  $M_t$  resultando :

$$M_r = 0,02 F \quad \text{III-8} \quad \text{e} \quad M_t = 0,21 F \quad \text{III-9}$$

Das expressões III-5 e III-6 resulta pela substituição de III-8 e III-9 :

$$\sigma_r = \frac{0,12 F}{c^2} \quad \text{III-10} \quad \text{e} \quad \sigma_t = \frac{1,26 F}{c^2} \quad \text{III-11}$$

Substituindo-se estes valores na expressão III-2 obtem-se

$$\epsilon = \frac{1}{E} \left( \frac{0,12 F}{c^2} - 0,3 \frac{1,26 F}{c^2} \right) \quad \text{III-12}$$

Fixou-se para este sensor uma faixa de medida de 1000 kgf a 10000 kgf. Assim, para a força mínima obtem-se pela expressão III-12 o valor da espessura da placa  $c = 7$  mm.

Com esta espessura da placa a tensão tangencial, quando a - 2 plicada a carga máxima de projeto 10000 kgf será :  $\sigma_t = 252 \text{ kgf/mm}^2$  o que ultrapassa o valor da tensão de escoamento do material utilizado (aproximadamente  $140 \text{ kgf/mm}^2$ ). Optou-se então - pela construção da placa com uma espessura da 10 mm, o que o - casiona uma tensão tangencial máxima de  $126 \text{ kgf/mm}^2$ , valor a - baixo da tensão de escoamento do material utilizado. A utiliza - ção de uma placa com espessura de 10 mm resulta numa diminui - ção de sensibilidade do sensor, o que é compensado pela utiliza - ção de uma escala de maior sensibilidade da ponte sendo ne - cessário, dependendo do caso, filtros para eliminar possíveis - ruídos característicos desta faixa de sensibilidade.

Após a construção do sensor os resultados da medição da de - formação da placa apresentaram diferenças, de aproximadamen - te  $10^0\%$  das calculadas, o que ainda está dentro do coeficien - te de segurança usado na avaliação da tensão de escoamento do aço da placa. O dimensionamento final das peças está represen - tado na figura III-3.

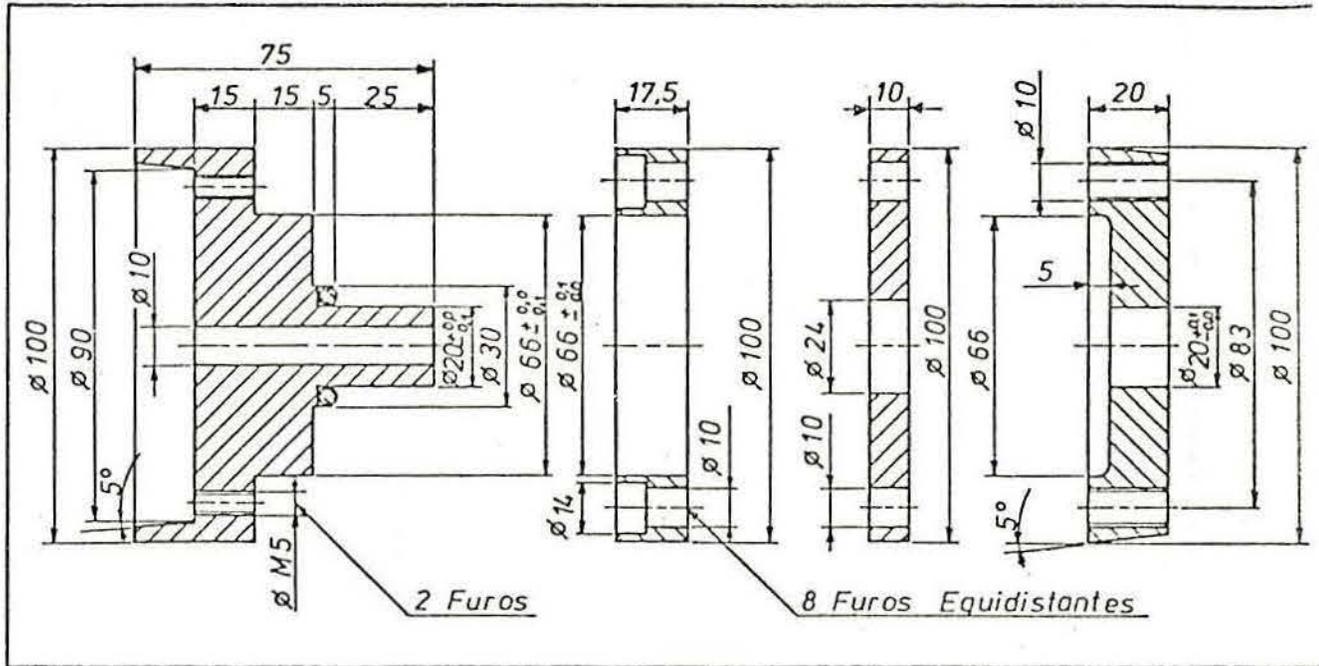


Fig. III-3. dimensionamento final das peças que constituem o sensor

### III-1-3. Construção

Face a necessidade de utilização do sensor em medidas de laboratório e em indústria sua construção foi dirigida no sentido de possibilitar sua adaptação em máquinas de ensaio de tração, usadas nas medidas de laboratório e em máquinas trefiladoras industriais. Assim as peças 1 e 4 da figura III-2 foram projetadas e construídas de maneira a se adaptarem na trefiladora utilizada e nas fieiras industriais, possibilitando tb. sua utilização nas máquinas de ensaio de tração. As peças 1, 3 e 4 são de aço SAE 1020 e a peça 2 (placa circular) de aço SAE D6. Esta foi temperada e revenida, sendo sua dureza final de 50 a 55 Rc. Os extensômetros foram colados sobre a placa circular conforme mostra a figura III-4.

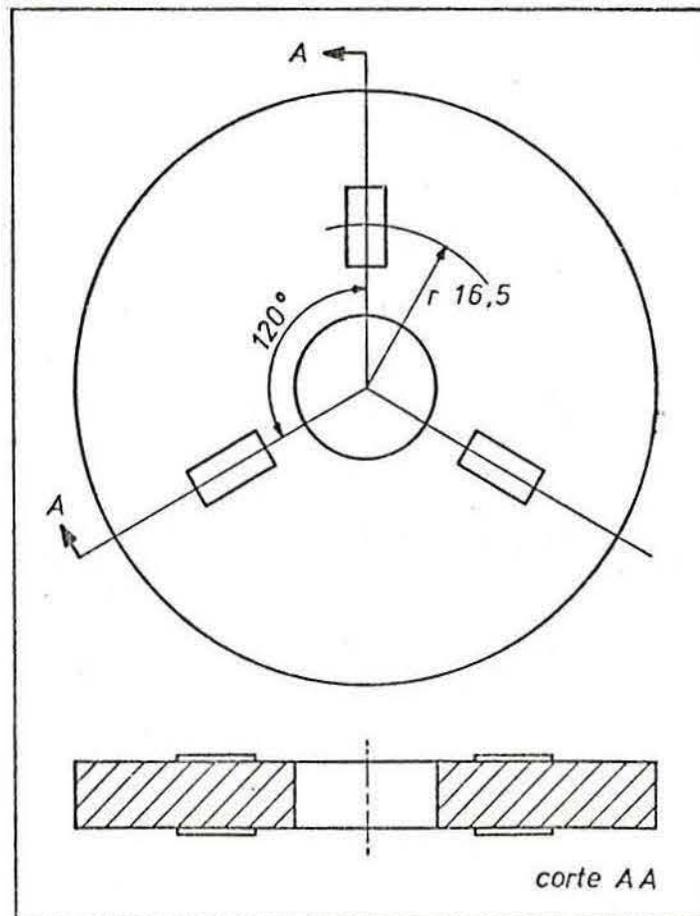


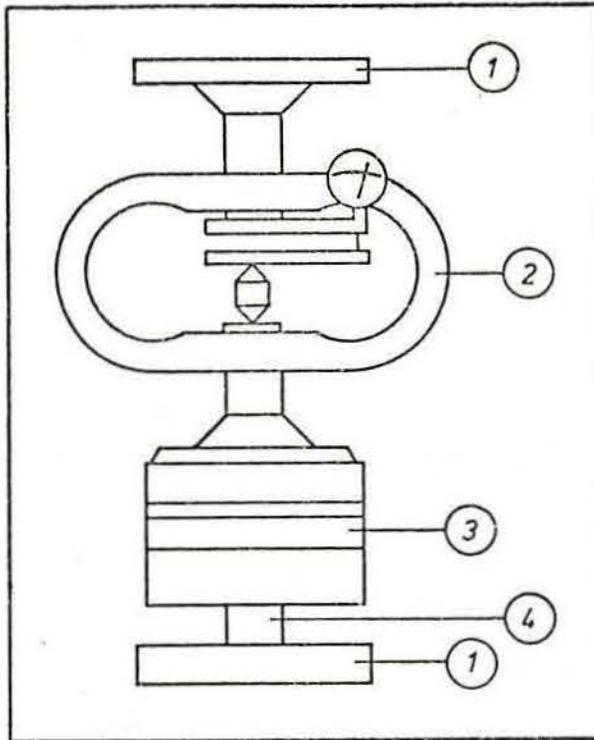
Fig. III-4. posicionamento dos extensômetros na placa circular

#### III-1-4. Calibração

A calibração do sensor foi realizada em uma máquina de ensaio de compressão, utilizando-se para a medição da força um anel dinamométrico padrão com certificado de calibração fornecido pelo fabricante (PGH Kraftmessegeräte Halle). A montagem para a calibração está esquematizada na figura III-5.

A força aplicada pelas placas 1 transmite-se através da fieira 4 até a placa circular do sensor, simulando assim perfeitamente a condição de aplicação da força de trefilação.

A curva de calibração é a correspondência entre os valores de tensão de desbalanço da ponte de medição dos extensômetros e os valores de força medidos pelo anel dinamométrico. A curva de calibração do sensor construído está na figura III-6. Os valores apresentados são a média das curvas obtidas durante antes e após cada ensaio realizado. A incerteza obtida da média-



- 1. placas de compressão da máquina
- 2. anel dinamométrico
- 3. sensor
- 4. fieira

Fig. III-5. montagem para a calibração do sensor

na medição da tensão ( V ) é menor que 3<sup>o</sup>/o o que possibilita a medição de forças com precisão de  $\pm 1,5$  <sup>o</sup>/o .

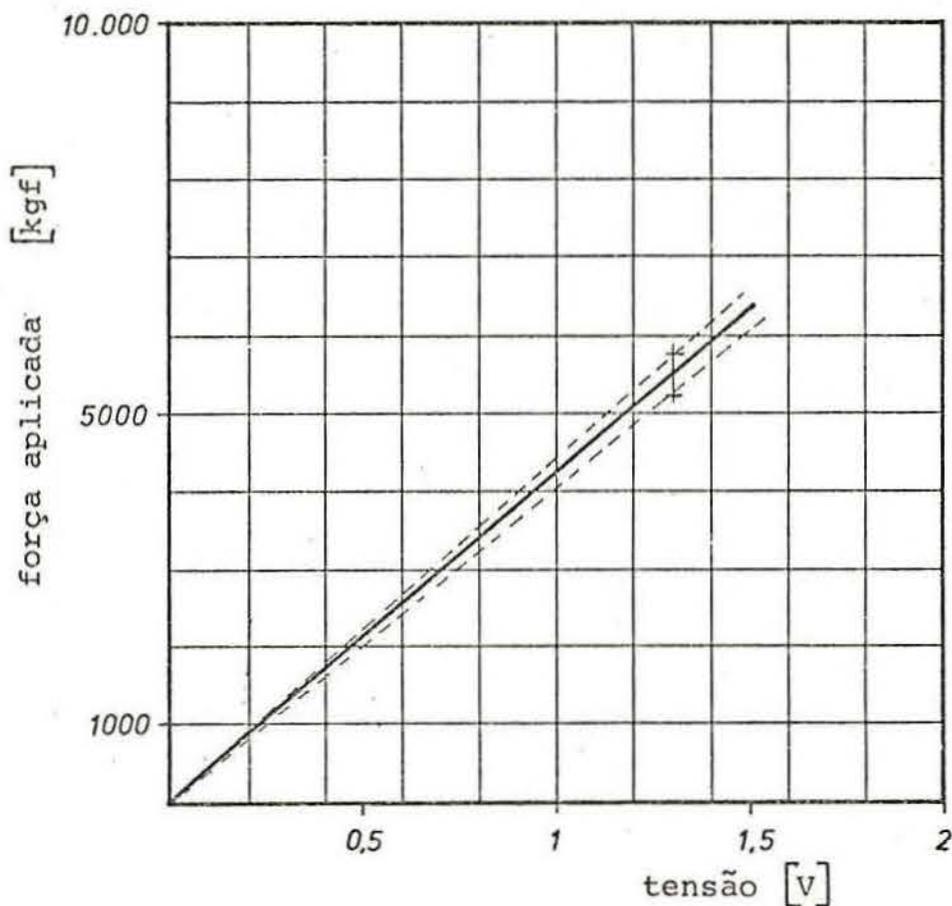


Fig. III-6. curva de calibração do sensor

## III-2. Equipamento utilizado na medição de velocidade

Para a medição de velocidade, nos ensaios de laboratório, utilizou-se um sistema a base de foto-célula constituído de uma régua dotada de rasgos passantes espaçados de 2,5 mm e colocada entre uma fonte de luz e uma foto-célula. A montagem está esquematizada na figura III-7.

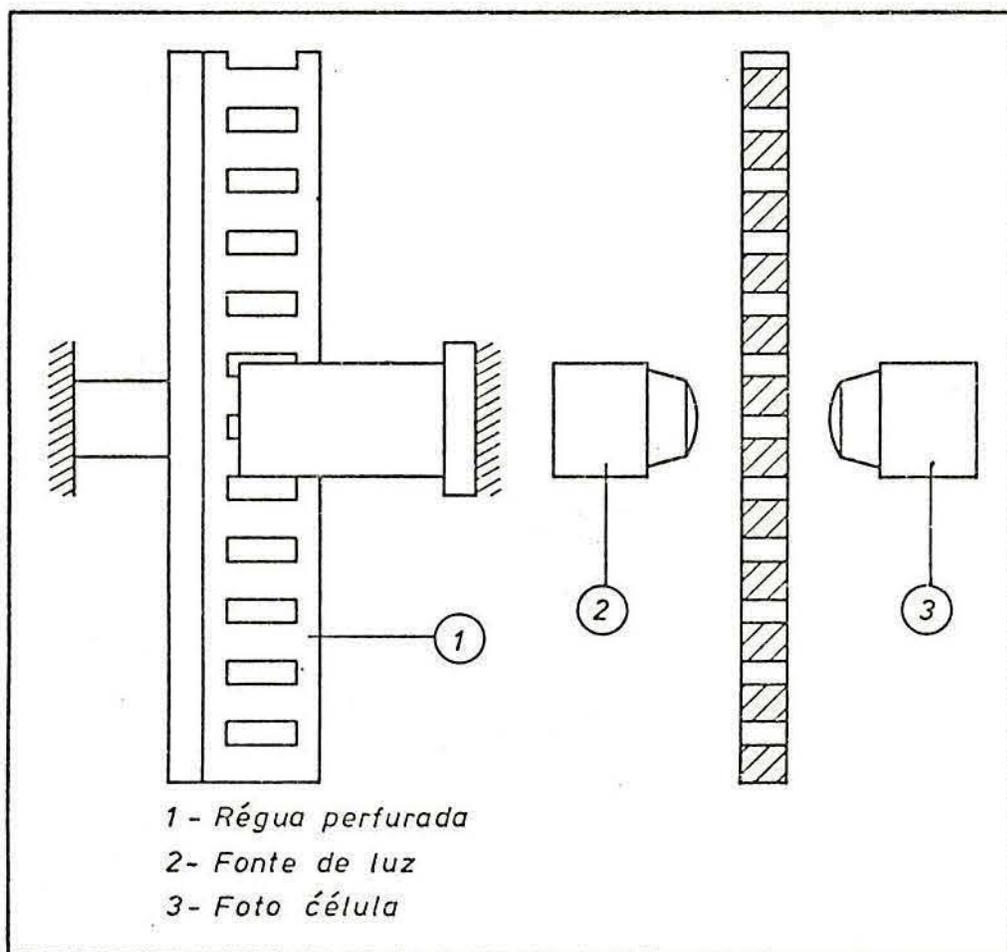


Fig. III-7. montagem para registro de deslocamentos

A régua 3 fixou-se à parte movel da máquina de ensaios - de tração, local onde se apoia o conjunto fieira-sensor. O conjunto da fonte de luz e foto-célula fixou-se à parte fixa da máquina. Os sinais elétricos provenientes da foto-célula, causados pela passagem da luz nos rasgos da regua foram amplificados e registrados em um registrador tipo XxT de velocidade - constante e ajustável.

### III-3. Equipamento utilizado na medição da deformação dos extensômetros

O equipamento utilizado em todos os ensaios para a medição da deformação dos extensômetros no sensor foi uma ponte amplificadora de frequência portadora marca Hottinger-Baldwin, modelo KWS / T-5.

As características desta ponte são:

Frequência portadora	5000 Hz $\pm$ 1 <sup>o</sup> /o
Erro de medição no instrumento de painel	$\pm$ 2 <sup>o</sup> /o
Faixa de frequência permitida para sinais dinâmicos	0...1300 Hz
Sensibilidade (valor de fundo de escala) (tensão de alimentação 4V)	$10^{-4}$ m/m deformação com um extens. ativo
Faixas de medição	10 níveis de $1000 \times 10^{-3}$ a $1 \times 10^{-4}$
Tipo de extensômetros	120 a 1200 $\Omega$
Tensão de alimentação da ponte	5,0 a 6,5 Vrms

### III-4. Registrador

Para a medição e registro dos sinais de força e velocidade foi utilizado um registrador tipo X x T de dois canais marca Philips modelo PM- 8010.

A velocidade de alimentação do papel foi de 50mm/min em todos os ensaios. As escalas utilizadas foram : 1 V para a medição de força e 2 V para a medição de velocidade (valores de fundo de escala)

O registro de força e velocidade foram realizados no mesmo registrador, simultaneamente.

### III-5. Multímetro digital

Para o balanceamento da ponte e calibração do registrador foi utilizado um multímetro digital marca Philips modelo PM - 2421.

## III-6. Equipamento utilizado para a trefilação

A trefilação em laboratório foi realizada em uma máquina - de ensaio de tração e compressão adaptada para a colocação do sensor de força e fieira. A figura III-8 mostra um esquema - desta máquina e a montagem utilizada para a trefilação dos - corpos de prova.

A aplicação da força se faz através do cilindro hidráulico 4 ligado à travessa inferior 2 e à travessa superior 1 onde está apoiado o conjunto fieira-sensor. O corpo de prova 5, após passar pela fieira 6, é fixado à travessa 3 que - permanece fixa durante o ensaio.

A variação de velocidade de trefilação foi obtida pela va- riação da vazão da bomba hidráulica alimentadora do cilindro 4 .

A trefilação em indústria foi realizada em uma máquina tre- filadora tipo bobinadeira de tambor único com tres veloci- des do tipo esquematizado na figura III-9 .

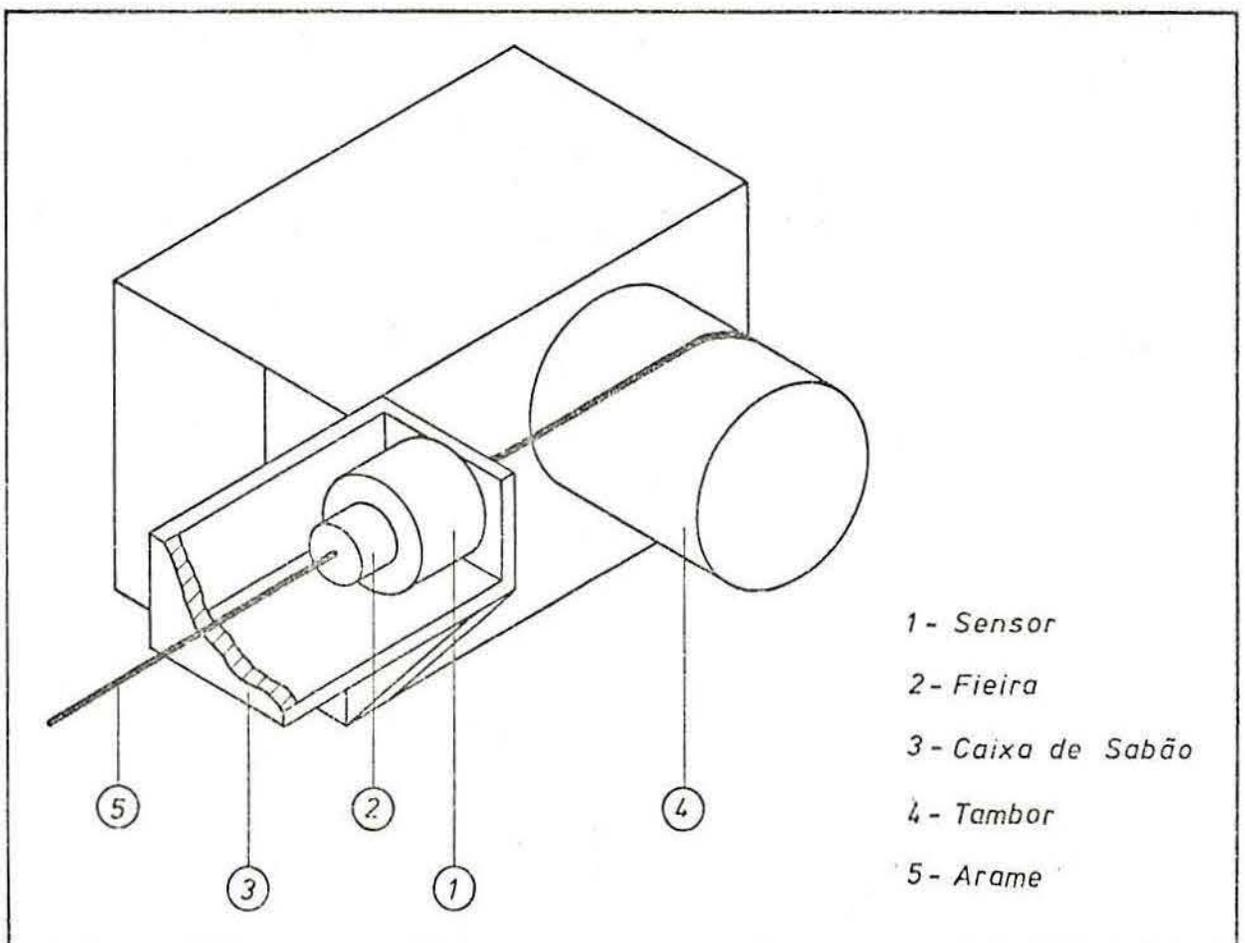
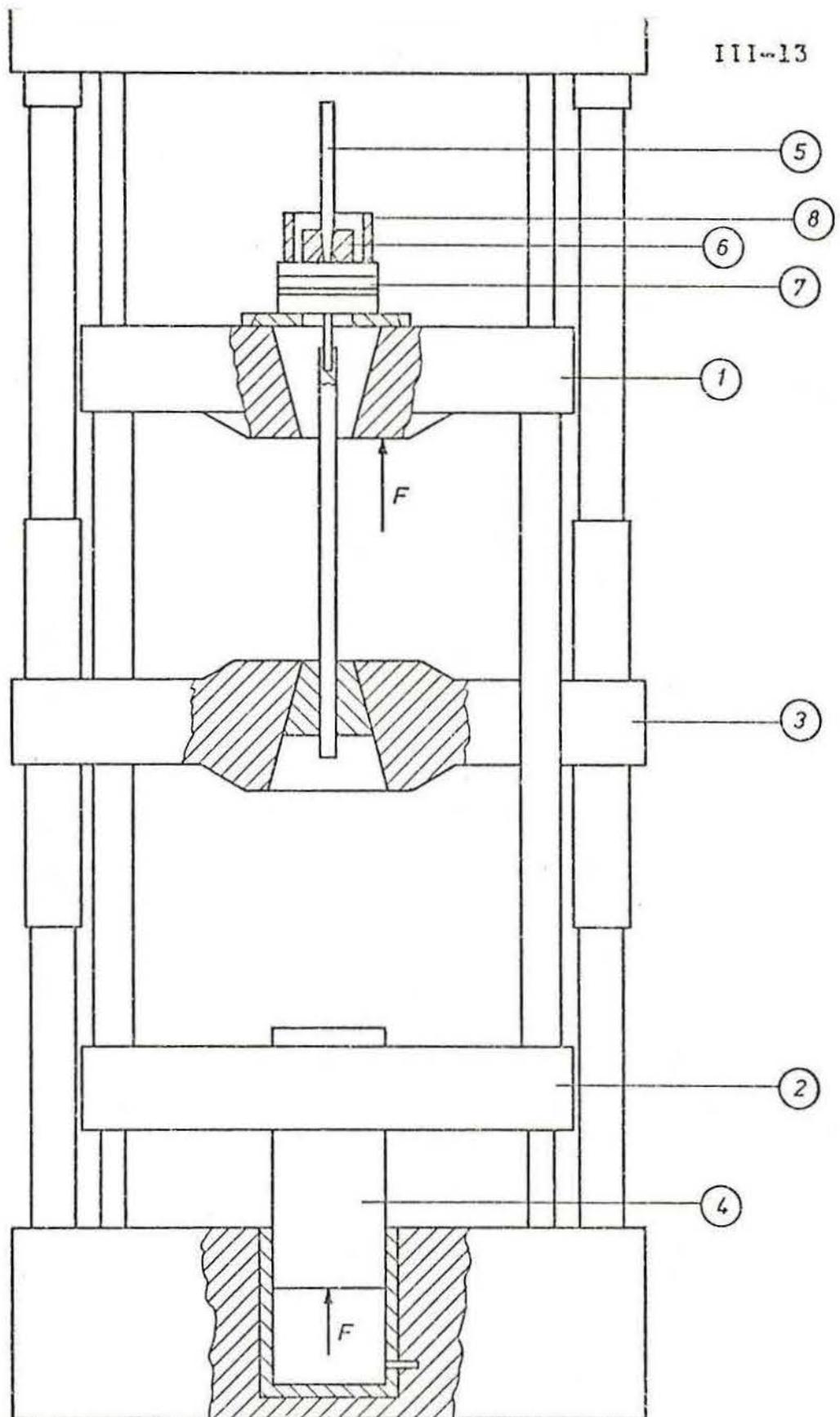


Fig. III-9. tipo de trefiladora utilizada



1 - Travessa superior  
 2 - Travessa inferior  
 3 - Travessa fixa  
 4 - Cilindro hidráulico

5 - Corpo de prova  
 6 - Fieira  
 7 - Sensor de força  
 8 - Deposito do lubrificante

Fig. III-8 montagem para a trefilação em laboratório

## IV- CORPOS DE PROVA PARA ENSAIOS DE LABORATÓRIO

## IV-1. Material e tratamento térmico

Foram utilizados nas experiências dois aços ao carbono SAE 1015 e SAE 1045, laminados a quente com o diâmetro original de 16,5 mm.

A análise química destes aços apresentou resultado mostrado na tabela IV-1 . ( em % )

	Aço SAE 1015	Aço SAE 1045
C	0,13	0,45
Si	0,08	0,30
Mn	0,40	0,79
P	0,02	0,02
S	0,03	0,02

Tabela IV-1. composição química dos aços utilizados

Após serem cortados da mesma barra laminada, os corpos de prova de ambos os materiais sofreram um recozimento com o seguinte ciclo: aquecimento até a temperatura de 700°C durante 30 minutos e permanência em temperatura na faixa de 690°C a 700°C durante 120 minutos. Em seguida foram resfriados em ar parado. Este tratamento visou a obtenção de uma homogeneidade de estrutura em todos os corpos de prova.

## IV-2. Micro-estrutura

A análise da micro-estrutura dos corpos de prova após o recozimento revelou uma estrutura perlítica com zonas de ferrita, conforme mostram as figuras IV-1 ( aço 1015 ) e IV-2 ( aço 1045 ). Foram realizadas medições de dureza em todos os corpos de prova, não se encontrando variações que pudessem significar alguma variação de micro-estrutura.

## IV-3. Dimensões e construção



Fig. IV-1 aço SAE 1015  
aumento 200X

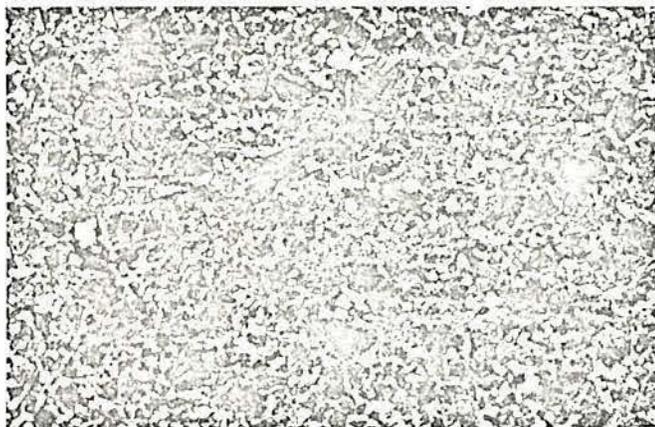


Fig. IV-2 aço SAE 1045  
aumento 200X

Os corpos de prova foram usinados nas dimensões da figura IV-3

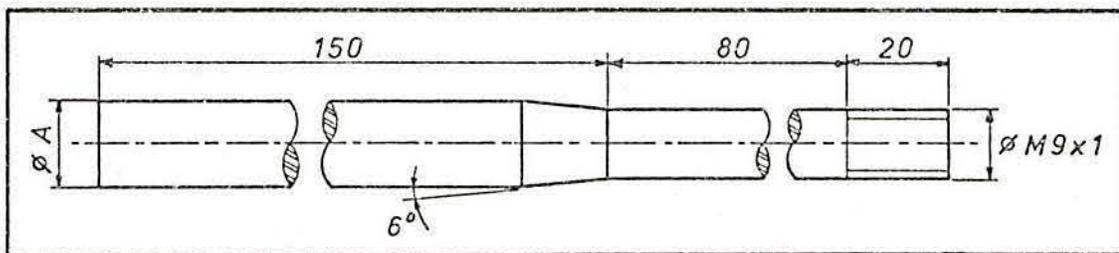


Fig. IV-3. corpos de prova

A dimensão "A" varia de acordo com a redução de cada ensaio. Os corpos de prova foram torneados entre pontos e os retificados o foram em uma retífica cilíndrica.

IV-4. Curvas de resistência ao escoamento -  $k_f$ 

O valor de  $k_f$  ( ou tensão de escoamento do material medido em um ensaio de tensões uniaxiais ) medido em função da deformação logarítmica resulta em uma curva característica de cada material e de suas propriedades. Esta curva é denominada curva  $k_f$  ou curva de escoamento. Permite calcular o valor médio de  $k_f$ , ou seja,  $k_{fm}$  para cada grau de redução.

Foram obtidas curvas  $k_f$  para os materiais usados nos ensaios segundo o método descrito no Apêndice A. O resultado destes ensaios de  $k_f$  está representado nas figuras IV-4. e IV-5 .

O valor de  $k_f$  do material encruado, ou seja, após a trefilação é obtido diretamente da curva lendo-se o valor de tensão (  $k_f$  ) correspondente à deformação obtida na conformação.

Curva de escoamento

Aço SAE 1015

Composição química ( % )

C 0,13

Si 0,08

Mn 0,40

P 0,02

S 0,03

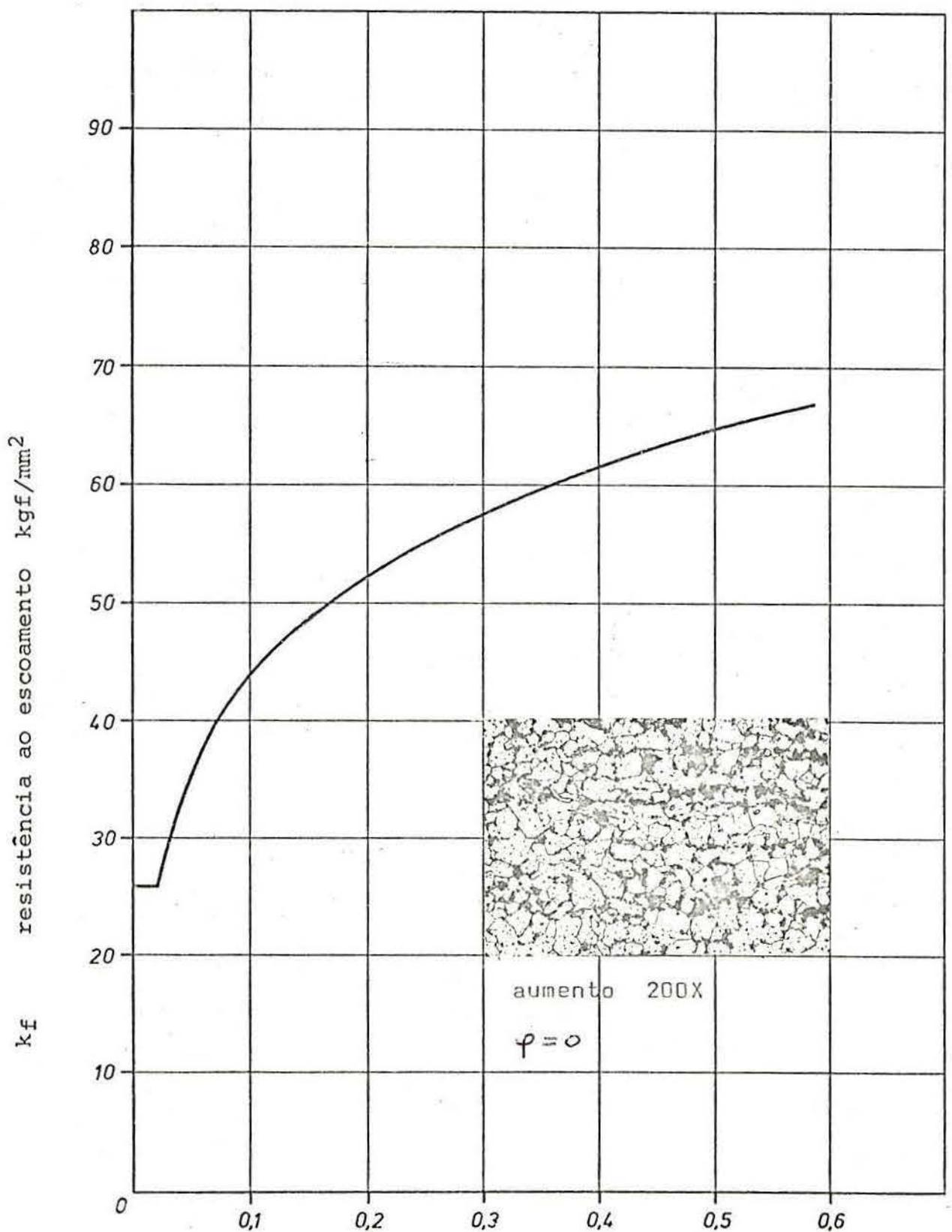
Tensão de escoamento 26 kgf/mm<sup>2</sup>

Fig. IV-4.

$$\varphi_A = \ln \frac{h_0}{h_1}$$

Curva de escoamento

Aço SAE 1045

Composição química ( % )

C 0,45

Si 0,30

Mn 0,79

P 0,02

S 0,02

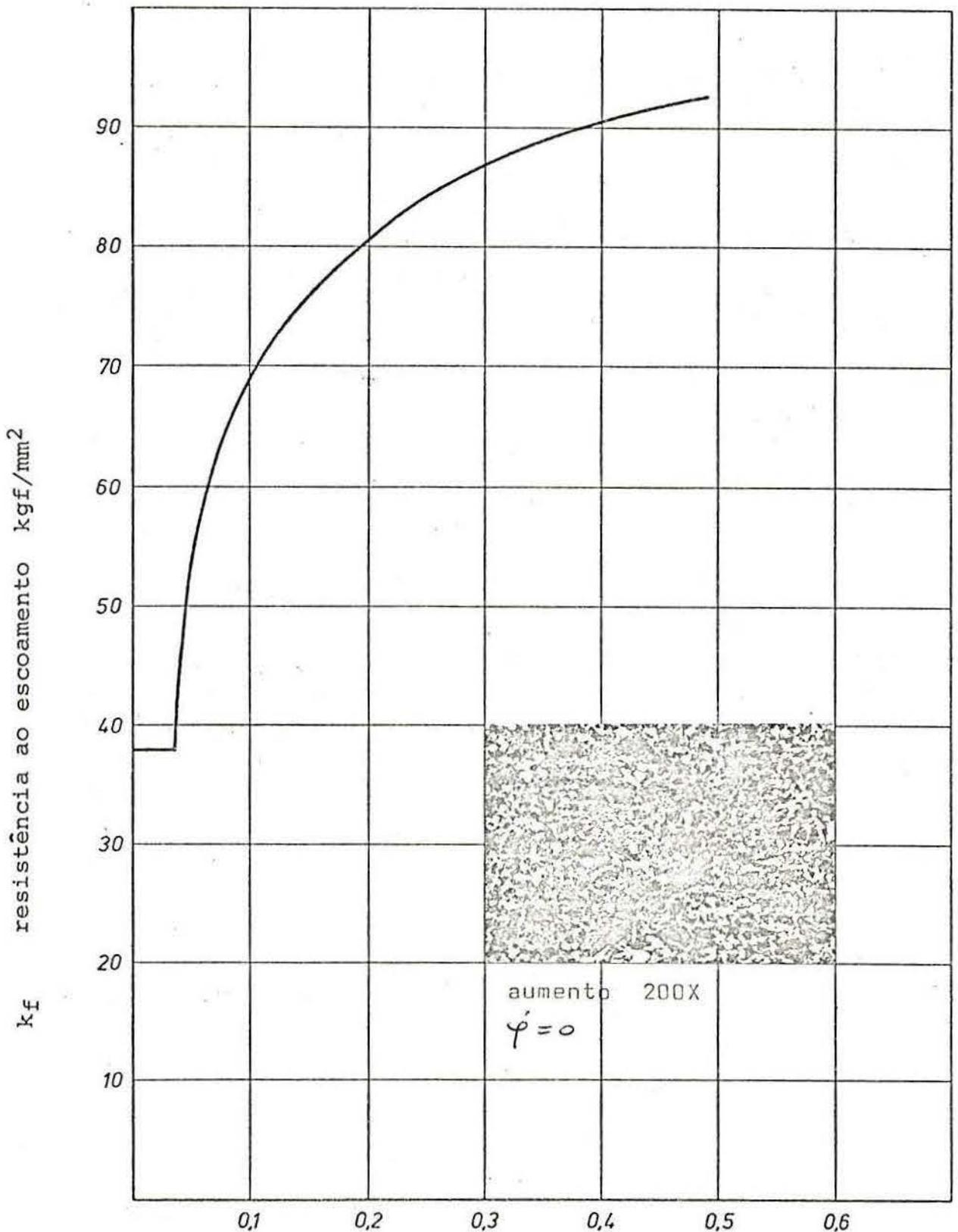
Tensão de escoamento 38 kgf/mm<sup>2</sup>

Fig. IV-5.

$$\varphi_A = \ln \frac{h_0}{h_1}$$

## V- MÉTODO DE ENSAIO

## V-1. Plano de experiências

Para a avaliação da influência real de cada parâmetro de trefilação foi montada uma bateria de experimentos em que se variou, em cada experiência, um só parâmetro. Os parâmetros variados foram: o ângulo da fieira, o coeficiente de atrito, a redução e o valor de  $k_f$ . Além destes parâmetros, presentes em todos os modelos teóricos, variou-se também a velocidade de trefilação e a rugosidade superficial do material a ser trefilado. Os ensaios foram divididos em dois grupos diferenciados pelo material. Assim, na primeira série trefilou-se aço SAE 1045 e na segunda aço SAE 1015. Na primeira série variaram-se todos os parâmetros e na segunda, face aos resultados obtidos na primeira, optou-se pela fixação de um único ângulo de fieira obtendo-se assim um maior número de ensaios (maior amostragem) nas determinadas condições. Este aumento de ensaios visou a diminuição da incerteza final dos resultados. O conjunto de experiências realizadas e as condições em que foram realizadas está demonstrado na tabela V-1.

experimento	ângulo da fieira	lubrificação	redução	acabamento superficial	nº de ensaios
AÇO SAE - 1045					
1	4	sabão	0,20	retificado	2
2	4	óleo	0,20	ret/tor	4
3	6	sabão	0,20	ret/tor	4
4	6	óleo	0,20	ret/tor	4
5	6	sabão	0,10	ret/tor	4
6	6	óleo	0,10	ret/tor	4
7	8	sabão	0,20	ret/tor	4
AÇO SAE - 1015					
8	6	óleo	0,10	retificado	3
9	6	óleo	0,10	torneado	4
10	6	sabão	0,10	retificado	3
11	6	sabão	0,10	torneado	4
12	6	óleo	0,20	retificado	3
13	6	óleo	0,20	torneado	4
14	6	sabão	0,20	retificado	3
15	6	sabão	0,20	torneado	4

Tab. V-1 plano de experiências

## V-2. Variação dos parâmetros

### A. Variação do ângulo da fieira:

Foram construídas três fieiras com semi-ângulos de  $4^{\circ}$ ,  $6^{\circ}$  e  $8^{\circ}$ . A construção destas fieiras está desenvolvida no apêndice-B.

### B. Variação do coeficiente de atrito:

Foram utilizados dois tipos de lubrificantes, um seco (sabão) e um úmido (óleo). Estes lubrificantes são os utilizados industrialmente na trefilação de arames e barras respectivamente.

### C. Variação da redução:

A variação da redução foi obtida pela variação da dimensão inicial do material a ser trefilado, uma vez que as fieiras utilizadas possuem o mesmo diâmetro final de 10mm. Os diâmetros iniciais utilizados foram de 10,65 e 11,15 mm que resultam em reduções de área de  $10\%$  e  $20\%$  respectivamente.

### D. Variação de $k_f$ :

Foram utilizados dois aços de baixo e médio carbono com tensões de escoamento e curvas  $k_f$  diferentes. (ver item IV-4)

### E. Variação da rugosidade superficial:

Foi obtida pela variação do acabamento de usinagem dos corpos de prova. A superfície mais rugosa foi obtida por torneamento e a de rugosidade mais baixa por retificação.

## V-3. Realização das experiências em laboratório

Os corpos de prova foram trefilados em uma máquina de ensaio de tração a qual foram adaptados os sistemas de medição de força e velocidade. (desenhos no item III-6)

Um resultado típico destes ensaios está representado na figura V-1 onde estão graficados os valores da força de trefilação e os pontos de medida da velocidade de trefilação.

A partir da curva de calibração do sensor, item III-1-4, determina-se o valor da força de trefilação. Para tanto, determina-se o valor da tensão (em  $V$ ) no registro e procura-se na

curva de calibração o valor de força correspondente. A avaliação da velocidade de trefilação é feita pela medição da distância entre os picos correspondentes à passagem de luz nos rasgos da régua graduada, conforme item III-2. Sabendo-se a velocidade de registro no registrador, calcula-se a velocidade média em cada estágio do ensaio.

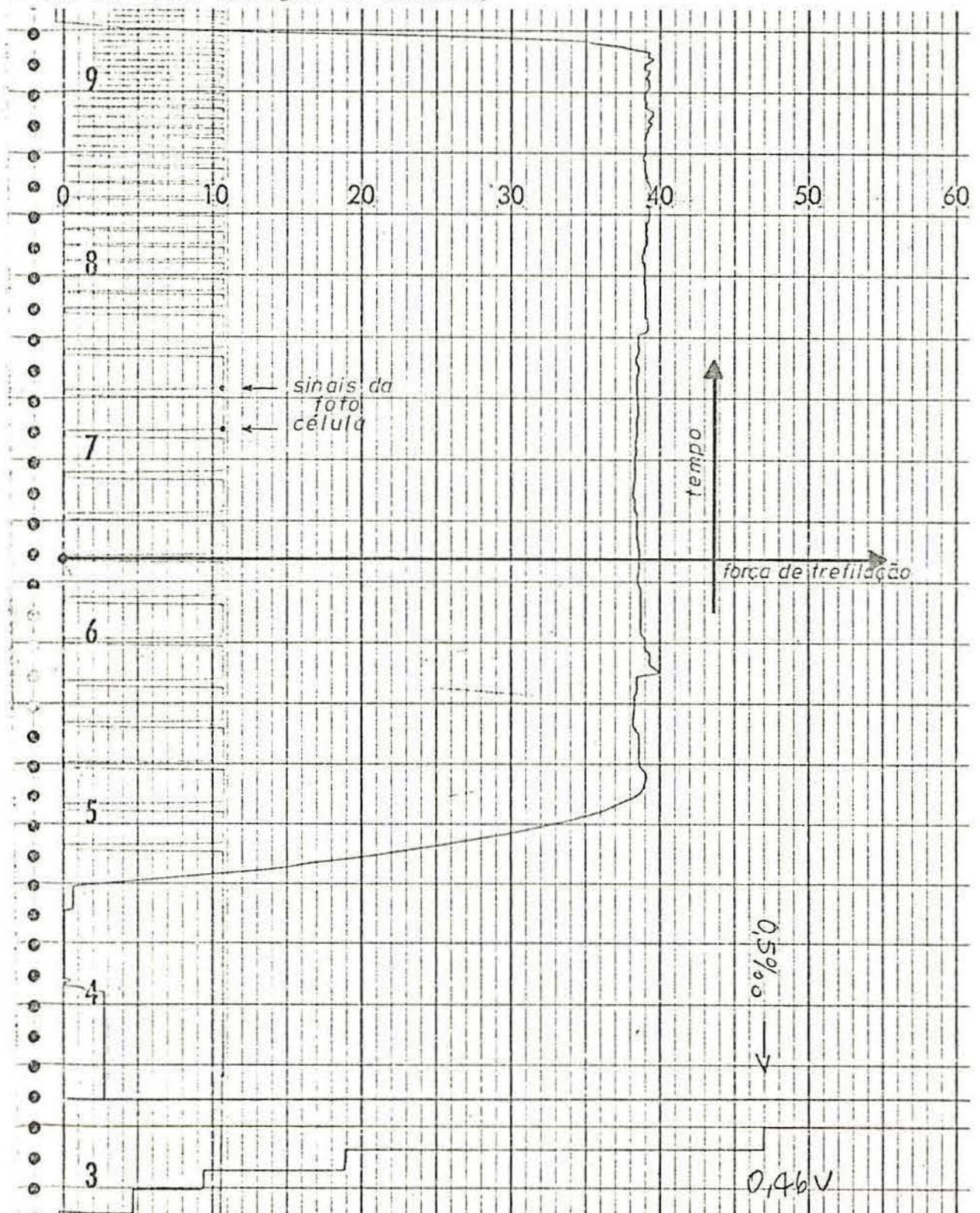


Fig. V-2. ensaio típico de trefilação em laboratório

## V-4. Realização dos ensaios em indústria

O sensor (item III-1) foi montado no interior da caixa de sabão de uma trefiladora industrial (item III-6) permanecendo a fieira apoiada diretamente no sensor. A tensão fornecida pela ponte foi medida no multímetro digital (item III-5).

A medida da velocidade de trefilação foi realizada pela cronometragem do tempo de trefilação de comprimentos determinados do arame.

O valor da força de trefilação foi obtido da curva de calibração do sensor pela leitura do valor de força correspondente ao valor de tensão medido.

As condições em que foram realizados estes ensaios são:

Lubrificação: sabão

Redução : 20<sup>o</sup>/o

Rugosidade superficial do material antes de ser trefilado : alta (material recozido e decaçado)

Ângulo da fieira : 12<sup>o</sup>

Material : aço SAE 1045

## VI- APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

## VI-1. Resultados da força de trefilação nas experiências de laboratório

O valor da força de trefilação, medida em cada ensaio está demonstrado na tabela VI-1 para os aços SAE 1015 e SAE 1045. Nesta tabela estão também relacionados os valores do ângulo da fieira, da redução, da pressão média  $q_m$  e o valor de  $k_{fm}$  obtido das curvas das figuras IV-4 e IV-5. As condições em que foram realizados os diversos ensaios estão relacionadas no item V-1.

A imprecisão que acompanha os valores da força de trefilação é obtida pela diferença entre os valores máximo e mínimo, ocorridos durante cada ensaio e o valor médio. O valor tabelado é o valor médio.

força de trefilação para cada condição de ensaio.

Observações:

1. Os ensaios 1/1, 1/2, 10/1, 12/1, 12/3 e 13/2 não foram completados por ter ocorrido ruptura do corpo de prova durante a trefilação. O ensaio 14/1 não foi considerado por apresentar defeitos de usinagem no corpo de prova.

2. Os corpos de prova dos ensaios 10/2, 10/3 e 12/2 apresentaram, após a trefilação, uma superfície bastante riscada, proveniente do empastamento da fieira. Os valores da força destes ensaios estão, por esta razão, acrescidos de uma maior imprecisão de modo a englobarem um possível aumento da força de trefilação proveniente do empastamento.

3. Os valores da força de trefilação para os ângulos  $4^\circ$  e  $8^\circ$  nos ensaios realizados com aço SAE 1045 estão relacionados apenas para informação, não se tecendo considerações posteriores sobre seus valores ( veja item V-1 ).

## VI-2. Resultados da força de trefilação nas medidas em trefiladoras industriais

O resultado da média de vários ensaios realizados nas condições descritas no item V-4 foi de 1800 kgf .

ensayo	tipo de aço	anelo da fleira	redução $\phi_a$	$k_{fm}$	lubrificação	$Q_m$	superfície	força P	incerteza $\Delta F$	$\mu$ Siebel	$\mu$ Sachs	$\mu$ Colejl	incerteza $\Delta \mu$	
1/3	AÇO SAE-1045	4°	0,16	57,0	salão	59,8	R	1560	+ 40	0,04	0,05	0,05	+0,005	
1/4		4°	0,17	57,0	salão	59,8	R	1560	+ 40	0,04	0,05	0,05	+0,005	
2/1		4°	0,17	57,0	óleo	60,5	T	1560	+ 40	0,04	0,05	0,05	+0,005	
2/2		4°	0,17	57,0	óleo	60,7	T	1550	+ 40	0,04	0,05	0,05	+0,005	
2/3		4°	0,18	57,4	óleo	59,6	R	1880	+ 80	0,06	0,07	0,07	+0,005	
2/4		4°	0,17	57,0	óleo	58,0	P	1800	+ 60	0,06	0,07	0,07	+0,005	
3/1		6°	0,17	57,0	salão	58,8	T	1810	+ 50	0,10	0,10	0,10	+0,010	
3/2		6°	0,18	57,4	salão	64,3	T	1600	+200	0,06	0,05	0,05	+0,005	
3/3		6°	0,18	57,4	salão	66,3	T	1800	+100	0,08	0,09	0,09	+0,010	
3/4		6°	0,19	57,7	salão	64,9	R	1850	+ 50	0,08	0,09	0,09	+0,010	
4/1		6°	0,18	57,4	óleo	65,8	T	1700	+ 40	0,07	0,08	0,07	+0,005	
4/2		6°	0,19	57,7	óleo	71,1	T	1900	+ 80	0,08	0,10	0,09	+0,010	
4/3		6°	0,19	57,7	óleo	61,8	R	2200	+120	0,12	0,14	0,14	+0,015	
4/4		6°	0,19	57,7	óleo	61,8	R	2200	+140	0,12	0,14	0,14	+0,020	
5/1		6°	0,10	53,8	salão	74,5	T	910	+ 40	0,04	0,04	0,03	+0,010	
5/2		6°	0,10	53,8	salão	71,0	R	1125	+ 20	0,10	0,08	0,08	+0,005	
5/3		5°	0,10	53,8	salão	70,6	P	1140	+ 20	0,10	0,09	0,09	+0,005	
5/4		5°	0,10	53,8	salão	67,8	R	1150	+ 20	0,10	0,09	0,09	+0,005	
6/1		6°	0,10	53,8	óleo	59,7	T	1135	+ 20	0,10	0,09	0,10	+0,005	
6/2		6°	0,10	53,8	óleo	63,4	R	1380	+ 20	0,15	0,15	0,15	+0,005	
6/3		6°	0,11	54,3	óleo	68,7	R	1400	+100	0,13	0,15	0,15	+0,020	
6/4		6°	0,10	53,8	óleo	65,9	R	1370	+ 90	0,15	0,16	0,16	+0,020	
7/1		8°	0,20	58,0	salão	72,8	T	1740	+ 20	0,06	0,05	0,06	+0,005	
7/2		8°	0,19	57,7	salão	74,0	T	1620	+ 20	0,05	0,05	0,05	+0,005	
7/3	8°	0,19	57,7	salão	69,3	R	1740	+ 20	0,07	0,07	0,07	+0,005		
7/4	8°	0,19	57,7	salão	69,3	R	1740	+ 20	0,07	0,07	0,07	+0,005		
8/1	AÇO SAE-1015	6°	0,11	36,0	óleo	45,8	R	830	+ 20	0,11	0,12	0,11	+0,010	
8/2		6°	0,11	36,0	óleo	43,8	R	1000	+ 50	0,17	0,16	0,19	+0,020	
8/3		6°	0,09	35,0	óleo	44,2	R	815	+ 20	0,16	0,17	0,16	+0,010	
9/1		6°	0,10	35,5	óleo	40,1	T	740	+ 10	0,10	0,10	0,09	+0,010	
9/2		6°	0,10	35,5	óleo	45,7	T	730	+ 10	0,10	0,10	0,09	+0,010	
9/3		6°	0,09	35,0	óleo	47,2	T	710	+ 10	0,11	0,11	0,11	+0,010	
9/4		6°	0,10	35,5	óleo	45,1	T	770	+ 25	0,11	0,11	0,10	+0,010	
10/1		6°	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
10/2		6°	0,08	34,8	salão	44,0	R	830	+100	0,18	0,19	0,18	+0,020	
10/3		6°	0,10	36,0	salão	45,6	R	860	+100	0,13	0,15	0,15	+0,020	
11/1		6°	0,10	35,5	salão	45,0	T	838	+ 20	0,14	0,13	0,14	+0,010	
11/2		6°	0,10	36,0	salão	45,2	T	840	+ 20	0,12	0,13	0,12	+0,010	
11/3		6°	0,12	36,8	salão	38,9	T	990	+ 10	0,17	0,15	0,14	+0,010	
11/4		6°	0,10	35,5	salão	44,2	T	840	+ 20	0,14	0,15	0,14	+0,010	
12/1		6°	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
12/2		6°	0,19	40,0	óleo	42,8	R	1740	+190	0,15	0,20	0,19	+0,030	
12/3		6°	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
13/1		6°	0,17	39,3	óleo	45,9	T	1050	+ 20	0,06	0,07	0,06	+0,010	
13/2		6°	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
13/3		6°	0,17	39,3	óleo	48,7	T	980	+ 10	0,04	0,05	0,04	+0,010	
13/4		6°	0,17	39,3	óleo	46,3	T	1050	+ 20	0,06	0,07	0,06	+0,010	
14/1		6°	0,05	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
14/2		6°	0,20	40,3	salão	43,1	R	1390	+ 20	0,09	0,10	0,10	+0,010	
14/3		6°	0,20	40,3	salão	44,3	R	1430	+ 10	0,09	0,11	0,11	+0,010	
15/1	6°	0,16	39,0	salão	44,8	T	1190	+ 10	0,09	0,11	0,10	+0,010		
15/2	6°	0,20	42,5	salão	46,1	T	1370	+ 40	0,07	0,08	0,07	+0,010		
15/3	6°	0,19	40,0	salão	43,3	T	1290	+ 35	0,08	0,09	0,08	+0,010		
15/4	6°	0,16	38,8	salão	44,9	T	1090	+ 35	0,08	0,09	0,08	+0,010		

Tab. VI-1. resultados finais da força de trefilação e coeficiente de atrito nos ensaios de laboratório.

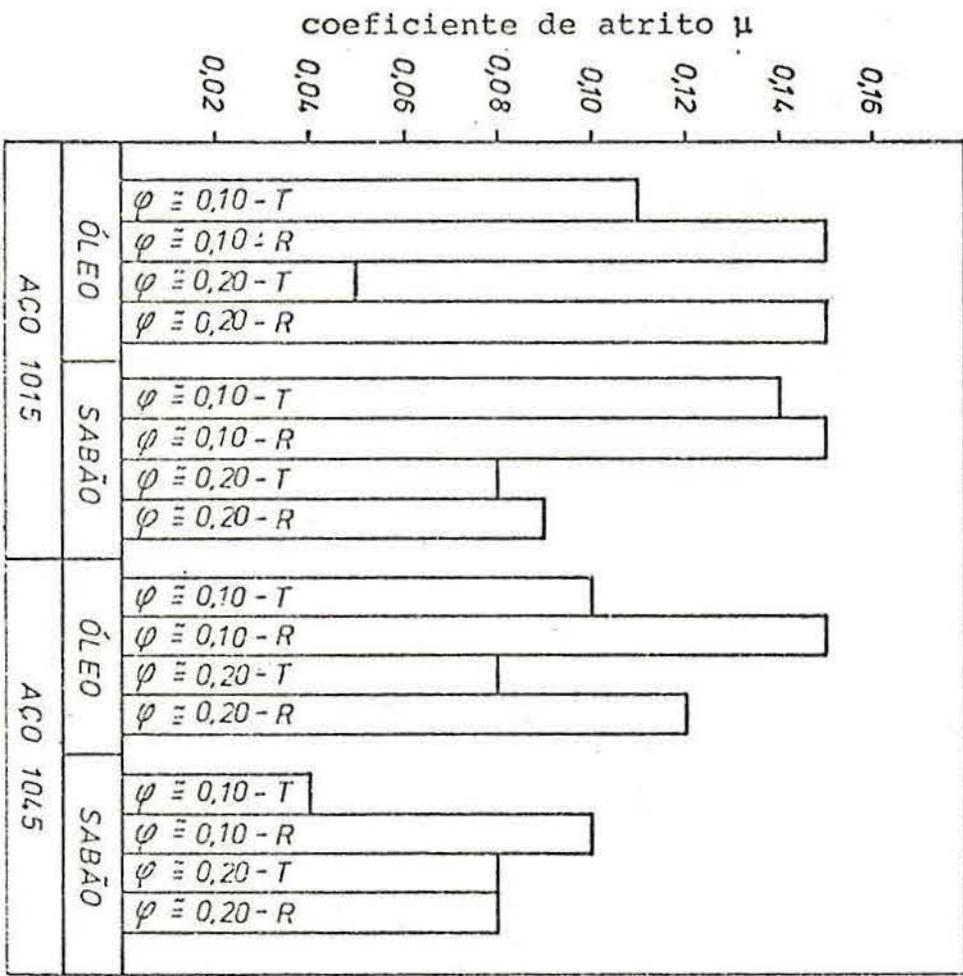


Fig. VI-2 Valores do coeficiente de atrito para as várias condições de ensaio

R- retificado  
T- torneado

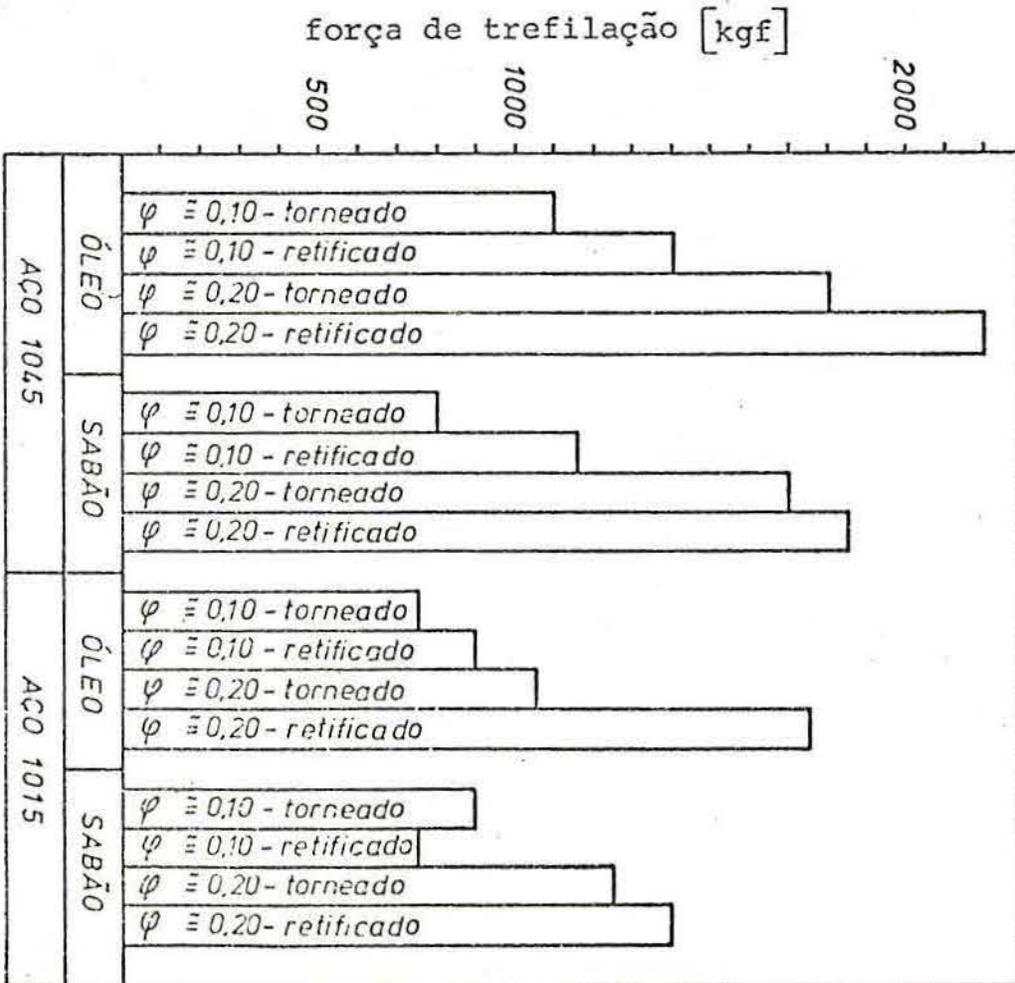


Fig. VI-1 Valores da força de trefilação para as várias condições de ensaio

### VI-3. Resultados do coeficiente de atrito nas experiências de laboratório

A partir do modelo de Siebel para o cálculo da força de trefilação, item II-2, calculou-se o valor do coeficiente de atrito através da equação II-18.

Os valores de  $\mu$  assim obtidos nos diversos ensaios se encontram na tabela VI-1, juntamente com a incerteza respectiva de cada ensaio. A incerteza calculada é devida unicamente à variação da força de trefilação durante o ensaio, que é maior do que a incerteza de medida. As incertezas provenientes da medição das demais variáveis da equação II-18 não foram consideradas por serem, em todos os casos, bastante inferiores do que a incerteza proveniente da força de trefilação.

Na tabela VI-1 estão ainda relacionados os valores de coeficiente de atrito calculados pelos modelos teóricos de Sachs e Geleji. O cálculo do coeficiente de atrito através do modelo de Sachs foi obtido da equação II-30 (item II-3) usando-se um método iterativo convencional, por não ser possível se estabelecer uma relação simples para o cálculo direto. O cálculo do coeficiente de atrito através do modelo de Geleji foi obtido da expressão II-37 (item II-4).

Os valores do coeficiente de atrito calculados pelos três modelos não diferem em mais de 10% entre si, o que impede uma comparação entre os modelos face a incerteza final dos resultados.

A figura VI-2 e a tabela VI-2 mostram os valores finais médios do coeficiente de atrito para as diversas condições de ensaio.

### VI-4. Resultados do coeficiente de atrito nas medidas em trefiladoras industriais

O cálculo do coeficiente de atrito a partir da força de trefilação medida em trefiladora industrial apresentou como resultado o valor de 0,08 calculado pelo modelo de Siebel, nas condições descritas no item V-4.

$\alpha = 6^\circ$			$\psi \approx 0,10$		$\psi \approx 0,20$	
			$\mu$	$\Delta \mu$	$\mu$	$\Delta \mu$
AÇO 1015	ÓLEO	T	0,11	$\pm 0,01$	0,05	$\pm 0,01$
		R	0,15	$\pm 0,01$	0,15	$\pm 0,03$
	SABÃO	T	0,14	$\pm 0,01$	0,08	$\pm 0,01$
		R	0,15	$\pm 0,04$	0,09	$\pm 0,01$
AÇO 1045	ÓLEO	T	0,10	$\pm 0,01$	0,08	$\pm 0,01$
		R	0,15	$\pm 0,02$	0,12	$\pm 0,02$
	SABÃO	T	0,04	$\pm 0,01$	0,08	$\pm 0,02$
		R	0,10	$\pm 0,01$	0,08	$\pm 0,01$

Tab. VI-2. valores do coeficiente de atrito médio para as várias condições de trefilação

#### VI-5. Resultados das medidas de velocidade

Nos ensaios de laboratório as velocidades de trefilação nos diversos ensaios variaram de 0,5mm/s a 1,7mm/s enquanto que nos ensaios realizados na indústria a velocidade de trefilação variou de 200 mm/s a 400 mm/s.

## VII - CONCLUSÕES

1. Face aos resultados obtidos na calibração do sensor e em sua utilização em laboratório e indústria, pode-se concluir - ser este equipamento capaz de realizar medições de força de trefilação com uma precisão de  $\pm 1,5^0/o$  .

2. Os valores de coeficiente de atrito obtidos nos ensaios realizados variaram de 0,05 a 0,15 para as diversas condições de trefilação. A incerteza final dos resultados foi estimada - em média, em  $\pm 0,02$ , tendo em vista os resultados obtidos nos vários ensaios.

Dentro desta incerteza obtém-se um coeficiente de atrito - de  $0,08 \pm 0,02$  para lubrificação com sabão para todas as condições levando-se em conta o item VI-3.

O coeficiente de atrito na lubrificação a óleo variou de - 0,05 a 0,15, dependendo das condições de trefilação.

3. Nos ensaios realizados com lubrificação a óleo nota-se uma elevação no valor do coeficiente de atrito de, aproximadamente,  $30^0/o$  para as superfícies retificadas em relação a superfícies torneadas.

Esta variação é explicada pela maior facilidade de penetração do óleo na fieira quando se utiliza uma superfície dotada de sulcos transversais como é uma superfície torneada. O óleo se posiciona nos sulcos antes da entrada na fieira e é carregado por estes durante a trefilação. As superfícies torneadas e retificadas podem ser identificadas com as superfícies de materiais laminados e trefilados, isto é, as superfícies dos materiais antes e após o primeiro passe de trefilação.

Nos ensaios realizados, lubrificados com sabão, não se nota variação do coeficiente de atrito com relação a rugosidade superficial, o que pode ser explicado pela viscosidade bastante mais elevada do sabão em relação ao óleo, o que impede a sua penetração nas ranhuras da superfície.

Estas conclusões estão de acordo com Siebel ( 9) que verificou elevações do coeficiente de atrito após o primeiro passe de trefilação para lubrificantes úmidos (óleo) e uma pequena diminuição para lubrificantes secos (sabão).

Nota-se também que o coeficiente de atrito para superfícies retificadas lubrificadas com óleo é mais elevado do que o coeficiente de atrito de superfícies lubrificadas com sabão ( 0,15 contra 0,08 ),concluindo-se ser vantajosa a utilização de sabão na trefilação de materiais de menor rugosidade superficial.

4. O coeficiente de atrito não varia (Tab,VI-2)na trefilação de aço SAE 1015 e aço SAE 1045,para as mesmas condições de trefilação.A variação da pressão média  $q_m$  calculada em 45 kgf/mm<sup>2</sup> para o aço SAE 1015 e 65 kgf/mm<sup>2</sup> para o aço SAE 1045,deveria ocasionar uma elevação no valor do coeficiente de atrito,conforme Lueg e Treptow (3).Isto,no entanto,não se verificou nos ensaios realizados.

Note-se porém que as pressões médias de 45 kgf/mm<sup>2</sup> e 65 kgf/mm<sup>2</sup> estão abaixo das pressões médias de 120 kgf/mm<sup>2</sup> a 240 kgf/mm<sup>2</sup> utilizadas por Lueg e Treptow.

5. Não há variação do coeficiente de atrito na faixa de velocidades utilizadas de 0,5 mm/s a 1,7 mm/s em laboratório.

Nas medidas realizadas em trefiladoras industriais não houve variação do coeficiente de atrito para o sabão ( 0,08 ) até uma velocidade de 400 mm/s .

6. Face a incerteza final dos resultados ser maior do que as variações verificadas no coeficiente de atrito calculadas pelos modelos teóricos de Siebel, Sachs e Geleji,não é possível fazer-se comparações entre estes modelos quanto ao coeficiente de atrito.

## VIII- SUGESTÕES DE CONTINUIDADE DO TRABALHO

1. Face a elevada incerteza obtida, proveniente da variação da força de trefilação, sugere-se a realização de mais uma série de ensaios nas mesmas condições, para a diminuição desta incerteza.
2. Notou-se, durante as experiências, uma tendência a elevação do coeficiente de atrito em deformações mais baixas, o que não encontra explicação nos modelos teóricos existentes. Uma pesquisa mais profunda neste sentido poderia demonstrar uma falha nestes modelos na avaliação da importância relativa da deformação no cálculo da força de trefilação.
3. É necessário a realização de ensaios de trefilação com ângulos de fiação de  $4^{\circ}$  e  $8^{\circ}$  para comparação com os resultados obtidos com o ângulo de  $6^{\circ}$ .
4. Sugere-se a realização de ensaios com pressões médias  $q_m$  mais elevadas (da ordem de  $150 \text{ kgf/mm}^2$ ) para comparação com os resultados obtidos, com a finalidade de verificar a verdadeira influência desta pressão no coeficiente de atrito.

## APÊNDICE A - DETERMINAÇÃO DE CURVAS DE ESCOAMENTO

A determinação das curvas de escoamento foi realizada em uma máquina de ensaio de compressão de capacidade até 10 ton.

A medição da força de compressão foi realizada pela medição da deformação de um anel circular através de extensômetros colados em sua superfície externa. Este anel foi calibrado por comparação com um anel dinamométrico padrão.

A medida de deformação foi realizada por um dispositivo projetado e construído para este fim específico, baseado na flexão de uma chapa de aço de pequena espessura dobrada em forma de "U". A deformação causada na chapa pela sua flexão foi medida por extensômetros colados sobre ela e comparada com valores de deformação causados por flexões conhecidas.

A montagem do sistema está esquematizada na figura A-1.

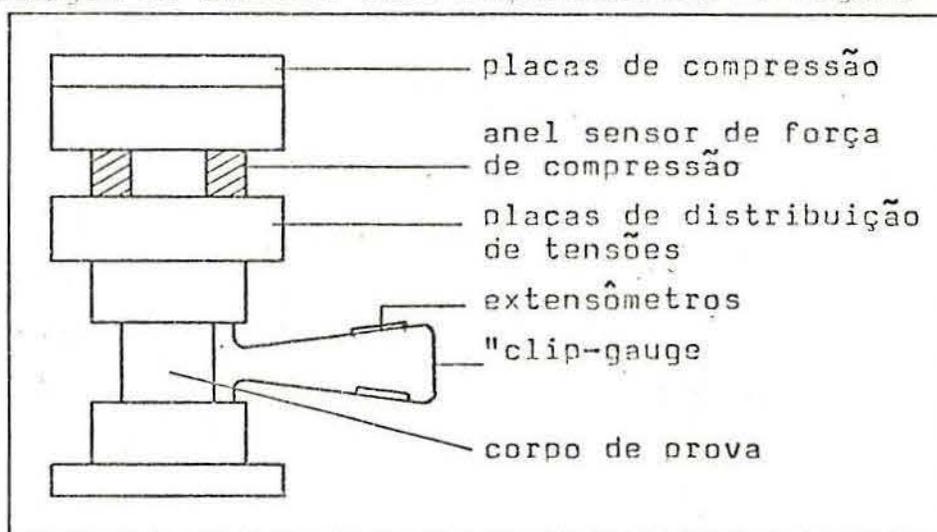


Fig. A-1. montagem para medição de  $k_f$

Estando o dispositivo (clip-gauge) montado bastante próximo ao corpo de prova, a deformação de ambos será idêntica. Com a diminuição da altura do corpo de prova as placas do "clip-gauge" sofrerão uma flexão que, por sua vez, causarão uma deformação no extensômetro. Esta deformação é analisada em uma ponte amplificadora e registrada. O valor da força de compressão também é registrada simultaneamente.

Uma vez obtidos os valores da força e da deformação, são calculadas as áreas instantâneas e, através delas, o valor da tensão instantânea.

Colocando-se em um gráfico as tensões instantâneas e as de de formações correspondentes, obtem-se as curvas de escoamento.

Observação:

Os corpos de prova utilizados foram usinados nas dimensões de 14 mm de diâmetro e 21 mm de altura.

## APÊNDICE B - CONSTRUÇÃO DE FIEIRAS

As fieiras foram construídas conforme figura B-1, sendo o ângulo  $\alpha$  de  $4^\circ$ ,  $6^\circ$  e  $8^\circ$ .

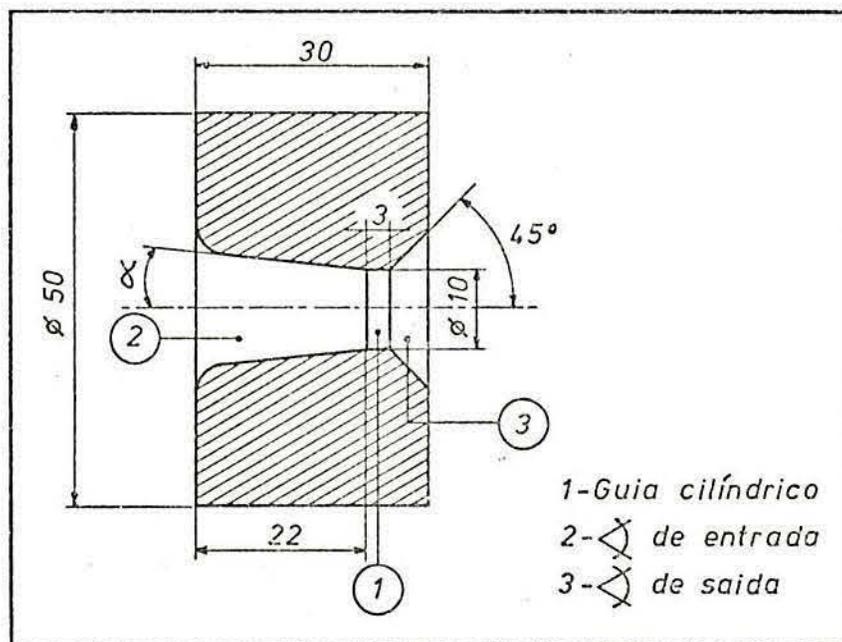


Fig. B-1. fieira

As dimensões da guia cilíndrica e do ângulo de saída foram calculadas conforme Knoche (16). As fieiras foram torneadas em aço SAE D6 (Vilares VC-131), temperadas e revenidas. A dureza final obtida foi de 55/58 Rc. Antes do tratamento térmico realizado em banho de sal, as fieiras receberam um recobrimento de cobre para evitar a formação de "pittings" pelo ataque do banho. Após o tratamento térmico as fieiras foram polidas manualmente em um torno a uma rotação de aproximadamente 2000 rpm, utilizando-se peças de madeira com o formato aproximado da fieira. Estas peças de madeira funcionam como porta abrasivos.

A sequência de polimento utilizada foi a seguinte:

1. pó de esmeril grão 150
2. pó de esmeril grão 360
3. polimento final com pasta de diamante até a obtenção de uma superfície espelhada.

Observação: durante os ensaios realizados, quando houve necessidade de um novo polimento, devido ao empastamento das fieiras, repetiu-se apenas o polimento final utilizando-se duas pastas de diamante de granulometria diferente para desbaste e acabamento.

APÊNDICE- C - MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO PELA UTILIZAÇÃO DE EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA

C - 1. Extensômetros de resistência ( strain-gauges)

Extensômetros de resistência são dispositivos utilizados - para a medição de pequenas deformações ( até 3% ) cujo funcionamento está baseado na variação de resistência de um condutor quando este é deformado.

Os extensômetros de resistência, atualmente fabricados, são constituídos de um condutor depositado sobre uma base de papel ou plástico. Este conjunto é após coberto com outra fina camada de plástico conforme mostra a figura C-1.

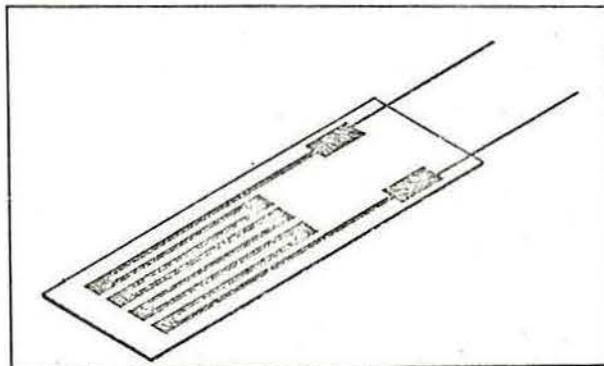


fig. C-1. Extensômetro de resistência

Dependendo da deformação que deve ser medida os extensômetros de resistência são construídos com diferentes formas geométricas de maneira a se ter a máxima deformação do condutor na direção da medida.

Para a medição de deformação de peças, os extensômetros são colados firmemente sobre estas de maneira que as deformações da peça se reproduzam na base do extensômetro e produzam a deformação do condutor, variando a sua resistência. A relação entre a variação de comprimento de um extensômetro e a correspondente variação de sua resistência é dada pelo fator do extensômetro (gauge factor), conforme a expressão C-1.

$$\frac{\Delta l}{l} = \epsilon = \frac{1}{K} \frac{\Delta R}{R} \quad \text{C-1}$$

onde  $\Delta l$  é a variação de comprimento (mm)  
 $l$  é o comprimento inicial (mm)

$\Delta R$  é a variação de resistência ( $\Omega$ )  
 $R$  é a resistência inicial do extensômetro ( $\Omega$ )  
 $K$  é o fator do extensômetro ( $\Omega/\Omega/\text{mm}/\text{mm}$ )

Pela expressão C-1 pode-se medir a deformação de um extensômetro pela medida da variação correspondente de sua resistência. Esta medida da variação da resistência, da ordem de  $10^{-4}$ , só pode ser feita através de uma ponte de resistências, sendo a mais utilizada a ponte de Wheatstone.

#### C - 2. Ponte de Wheatstone

A ponte de Wheatstone é constituída de quatro resistências montadas conforme mostra o esquema da figura C-2.

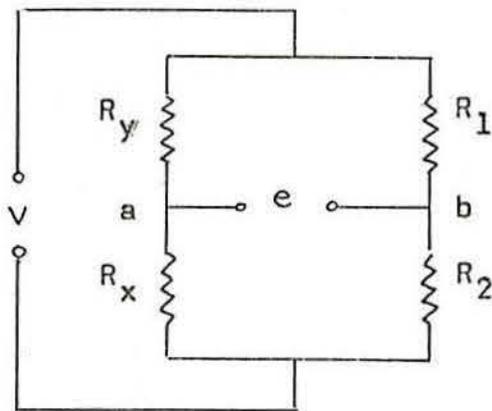


fig. C-2. Ponte de Wheatstone

onde  $V$  é a tensão de alimentação da ponte  
 $e$  é a tensão de desbalanço

$R_x, R_y, R_1$  e  $R_2$  são resistências e ou impedâncias

$$\text{A tensão no ponto } a \text{ é } V_a = \frac{R_x}{R_x + R_y} V \quad \text{C-2}$$

$$\text{e a tensão no ponto } b \text{ é } V_b = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V \quad \text{C-3}$$

de modo que a tensão de desbalanço  $e$  será  $e = V_a - V_b$ , ou seja :

$$e = \frac{R_x R_2 - R_y R_1}{(R_x + R_y)(R_1 + R_2)} \quad V = \frac{(R_x/R_y) - (R_1/R_2)}{(1 + R_x/R_y)(1 + R_1/R_2)} V \quad C-4$$

Introduzindo o parâmetro "razão da ponte B" definido por

$$B = R_1/R_2 \quad \text{a equação C-4 fica :}$$

$$\frac{e}{V} = \frac{(R_x/R_y) - B}{(1+B)(1+R_x/R_y)} \quad C-5$$

que é a equação geral de uma ponte de resistores, isto é, relaciona a tensão de saída  $e$  com as resistências da ponte - para uma dada tensão de alimentação  $V$ .

A ponte de resistências pode ser utilizada de duas maneiras: como ponte de comparação ou de balanço nulo ou como ponte de deflexão. O primeiro tipo é utilizado para comparar resistências ou impedâncias e o segundo para medir variações - relativas de resistências, ou impedâncias.

Da equação C-5 obtém-se, para  $e=0$  (ponte de balanço nulo),  $R_x = B R_y$  que é a equação fundamental da ponte de balanço nulo. Assim, se a tensão de saída da ponte for igual a zero ( $e=0$ )  $R_x$  pode ser comparada com  $R_y$  conhecendo-se apenas o valor de  $B$ .

### C - 3. Ponte de deflexão ou de variação

#### C-3-1. Variação de um só dos quatro resistores

Se o valor de  $R_x$  se modifica para  $R_x \pm \Delta R_x$ , com a ponte - em torno do balanço nulo, a tensão de saída se modifica para  $\Delta e$  dado pela expressão C-5.

$$\frac{(\Delta e)_x}{V} = \frac{(R_x \pm \Delta R_x)/R_y - B}{(1+B)(1+R_x/R_y \pm \Delta R_x/R_y)} \quad C-7$$

pois no balanço a equação C-6 é satisfeita. Multiplicando - se e dividindo a equação C-7 por  $R_y/R_x$  obtém-se:

$$\frac{(\Delta e)_x}{V} = \frac{1}{(1+B) \left( \frac{1}{B} + 1 \pm \frac{\Delta R_x}{R_x} \right)} \frac{\Delta R_x}{R_x} \quad \text{C-8}$$

Da mesma forma obtém-se relações semelhantes para a variação de qualquer uma das resistências da ponte.

Define-se sensibilidade da ponte por:

$$S = \frac{\Delta e/V}{\Delta R/R} \quad \text{que é função de } \Delta R/R .$$

A sensibilidade inicial, ou seja quando  $\Delta R$  tende a zero, é constante e vale

$$S_0 = \lim_{\Delta R/R \rightarrow 0} S = \frac{B}{(1+B)^2} \quad \text{C-10}$$

note-se, porém, que a sensibilidade irá variar com a variação de  $\Delta R/R$ . As pontes comerciais, usualmente, são fabricadas com  $B \cong 1$  de modo que  $S_0 = 1/4$ .

C-3-2. Variação simultânea de dois resistores (ponte de dupla variação)

$$\text{Supondo-se } R_1 \text{ e } R_2 \text{ fixos e } B=1 \text{ e se } \pm \frac{\Delta R_x}{R_y} = \pm \frac{\Delta R_y}{R_y}$$

nota-se que, pelo princípio da superposição teremos:

$$\frac{\Delta e}{V} = \left( \frac{\Delta e_x}{V} \right) + \left( -\frac{\Delta e_y}{V} \right) = 0 \quad \text{ou seja a ponte não se desbalança.}$$

Supondo-se, agora,  $R_1$  e  $R_2$  fixos com  $B=1$  mas fazendo-se:

$$\pm \frac{\Delta R_x}{R_x} = \mp \frac{\Delta R_y}{R_y} \quad \text{mostra-se, através da equação C-5 que}$$

$$\frac{\Delta e}{V} = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta R_{x,y}}{R_{x,y}} \quad \text{ou seja a sensibilidade será:}$$

$S = S_0 = 1/2$ , de modo que, além de dobrar a sensibilidade

de, a ponte de dupla variação apresenta ainda uma linearidade entre a variação de resistência e o sinal de saída. Como este tipo de ponte apresenta a propriedade de simetria, ou seja o valor da tensão de desbalanço é o mesmo para variações iguais de  $R_x$  e  $R_y$  ou  $R_1$  e  $R_2$ , pode-se simular variações de um braço da ponte ( $R_x - R_y$ ) pela variação das resistências do braço oposto ( $R_1 - R_2$ ).

C-4. Utilização de uma ponte de dupla variação para medição de deformação de extensômetros de resistência.

Montando-se extensômetros em um braço de uma ponte de Wheatstone pode-se medir suas deformações pela medida da tensão de desbalanço. Uma vez que a sensibilidade da ponte é fixa e está limitada pela máxima tensão que se pode aplicar nos extensômetros é necessário a utilização de amplificadores acoplados na saída da ponte para se obter valores de sensibilidade na faixa necessária para a medição de pequenas deformações elásticas. Um bom procedimento é excitar a ponte com uma tensão (ou corrente) alternada o que oferece as seguintes vantagens:

- a- cancela efeitos termoelétricos provenientes de juntas na ligação dos extensômetros
- b- permite o uso de amplificadores sintonizados na frequência de excitação rejeitando, desta forma, ruídos indesejáveis e aumentando a razão "sinal/ruído".

Na figura C-3 tem-se o esquema usual de uma ponte amplificadora de frequência portadora.

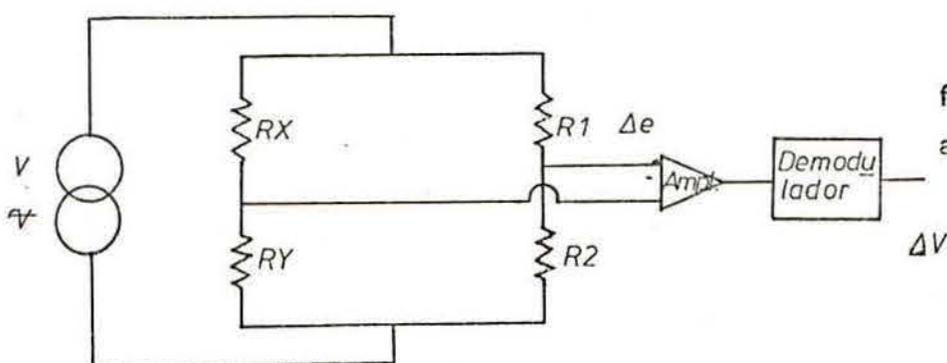


fig. C-3. Ponte amplificadora

Como os valores iniciais de  $R_x$  e  $R_y$  não são sempre iguais é necessário prover a ponte de um sistema de variação de  $R_1$  e  $R_2$  para ajustar seus valores de maneira a se obter o balanço da ponte. Além do ajuste na parte resistiva é necessário a inda um ajuste para se obter o balanço da parte indutiva, uma vez que os extensômetros, quando montados, terão indutâncias diferentes. Desta maneira além de  $R_1$  e  $R_2$  são necessárias duas indutâncias variáveis para se obter o balanço.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ( 1 ) - G.D.S. MacLellan - A Critical Survey of Wire-Drawing Theory - Journal of the Iron and Steel Institute, março-1948, pags. 347 a 356
- ( 2 ) - W. Lueg e K. Treptow - Schmierstoffe und Schmierstoffeträger beim Ziehen von Stahldraht - 1ª parte - Stahl und Eisen - 72-1952 , pags. 399 a 416
- ( 3 ) - W. Lueg e K. Treptow - Schmierstoffe und Schmierstoffeträger beim Ziehen von Stahldraht - 2ª parte - Stahl und Eisen - 76-1956 .pags. 1107 a 1116
- ( 4 ) - A. Pomp e G. Gesche - Die Anwerdbarkeit der Isotherm Härtung bei der Herstellung unlegierter Stahldrähte Stahl und Eisen - 70-1950 , pags. 52 a 57
- ( 5 ) - A. Leider e J. Gräbner - Ziehe Kraftmessung beim Drahtziehen - Drahtwelt - 59-1973 nº 9 ,pags.394 a 398
- ( 6 ) - A. Geleji - Bildsame Formgebung der Metalle Akademie -Verlag. Berlin 1967
- ( 7 ) - R. Hill e S.J. Tupper - A New Theory of the Plastic Deformation in Wire-Drawing - Journal of the Iron and Steel Institute - Agosto-1948 , pags.353 a 359
- ( 8 ) - V. Piispanen e R. Piispanen - Some New Equations for the Drawing Force in Wire-Drawing - The Wire - Industry - Janeiro-1966
- ( 9 ) - E. Siebel - Der derzeitige Stand der Erkenntnisse über die mechanischen Vorgänge beim Drahtziehen Stahl und Eisen -66/67 -1947, pags. 171 a 180
- (10 ) - O. Mahrenholtz - Zur Theory des Drahtziehens - Draht Welt - 47-1951 nº 4 e 5 ,pags. 318 a 324 e 413 a 418
- (11 ) - P. Funke - Herstellung von Stahldraht -parte 1 Verlag Stahleisen M.B.H.,Düsseldorf-1969
- (12 ) - K. Hoffmann - Grundlagen der Dehnungsmessstreifen HBM , VM 73002 -1973

- (13 ) - T.G. Beekwith e N.L. Buck - Mechanical Measurements  
Addison-Wesley -1965
- (14 ) - V. Feodosyev - Strenght of Materials - Mir Publi -  
shers- Moscow -1973
- (15 ) - S.P. Timoshenko - Theory of Elasticity -McGraw-Hill  
1970
- (16 ) - H.J. Knoche - Herstellung von Stahldraht - parte 1  
Verlag Stahleisen M.B.H. Düsseldorf -1969
- (17 ) - L.F. Coffin - Fundamentals of Deformation Processing  
Syracuse University Press -1964