

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

CENTRO DE TECNOLOGIA

DESENVOLVIMENTO DE UM DINAMÔMETRO PARA DETERMINAÇÃO
DE DUAS COMPONENTES DA FORÇA DE USINAGEM NO PROCES-
SO DE RETIFICAÇÃO PLANA TANGENCIAL*

ENGº JOSÉ FRANCISCO RIBEIRO CARVALHO

*Trabalho apresentado para obtenção
do título de Mestre em Engenharia
Mecânica, pela Faculdade de Enge-
nharia de Campinas da UNICAMP.

CAMPINAS

-1976-

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

7
C253d
BC

1318

CM-00030154-8

R E S U M O

Estuda-se inicialmente as características de trabalho . Discutem-se o projeto, construção, aferição e ensaios de um dinamômetro para medida de duas componentes da força de usinagem, com elementos de deformação à base de lâminas. Estudo analítico das solicitações nas lâminas. Medida de forças até 50 kgf, através de extensômetros elétricos. Inexistência de interferência de uma direção em outra. Comenta-se o estudo estatístico, curvas de aferição, comportamento estático e dinâmico. Frequência natural do dinamômetro em torno de 1000 HZ. Comenta-se o procedimento experimental, registros de forças para algumas condições de usinagem, comportamento do dinamômetro, considerações e conclusões finais.

A B S T R A C T

The publication deals initially with metal working characteristics. Design, construction and analysis of a special force transducer developed to independently measure forces in two directions in metal grinding are described. Beams under bending with applied strain-gages constitute the measuring elements for forces up to 50 kgf. The analytical solution for the problem of the beam solicitation is also shown. Inexistence of interference from one component on the other. Statistic investigation, gaging curves, static and dynamic test's procedure are commented. Natural frequency of the dynamometer about 1000HZ. Experimental procedure, record of the forces for some machining conditions, dynamometer performance, considerations and conclusion are shown.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no Centro de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, sob a orientação do Prof. Dr. *DINO FERRARESI*, o qual agradeço pelo estímulo, assessoramento, cooperação e apoio que incansavelmente dedicou na orientação deste trabalho.

Agradeço à Divisão de Serviços Técnicos do Centro de Tecnologia, que colaborou conosco de maneira inestimável.

Expresso a minha gratidão, aos funcionários e engenheiros do Centro de Tecnologia da UNICAMP, que tornaram possível a realização deste trabalho.

À Eletrometal Aços Finos S/A, meus agradecimentos pela doação do material necessário para execução do dinamômetro.

Campinas, março de 1976

À meus pais, espôsa e filha

Í N D I C E

	<u>PÁGINA</u>
CAP. I - INTRODUÇÃO.....	01
CAP. II - CONSTRUÇÃO DO DINAMÔMETRO.....	03
2.1 - Estimativa das características de tra- balho.....	03
2.1.1- Condição máxima de trabalho...	03
2.1.2- Condição mínima de trabalho...	03
2.2 - Escolha dos elementos de medida.....	04
2.2.1- Extensômetros elétricos.....	04
2.2.2- Extensômetros de semi-conduto- res.....	11
2.2.3- Medidores indutivos de desloca- mento.....	18
2.2.4- Elementos capacitivos.....	21
2.2.5- Elementos mecânicos.....	21
2.2.6- Elementos pneumáticos.....	22
2.2.7- Elementos hidráulicos.....	23
2.2.8- Transdutores piezoelétricos...	23

	<u>PÁGINA</u>
2.2.9- Elementos ferromagnéticos.....	26
2.2.10- Comentários sôbre os diversos sistemas de medida.....	27
2.3- Projeto do dinamômetro.....	28
2.3.1- Generalidades.....	28
2.3.2- Estudo das dimensões prévias .. das lâminas.....	32
2.3.3- Determinação das tensões máxi-- mas e mínimas na lâmina.....	33
2.3.4- Escolha do material do dinamôme tro.....	36
2.3.5- Determinação das tensões na re- gião de medida das lâminas.....	37
2.3.6- Determinação das deformações da mesa dinamométrica.....	38
2.3.7- Estimativa da constante de mola K.....	39
2.3.8- Estimativa da frequência natural de vibração.....	41
2.3.9- Desenho de conjunto do dinamôme tro.....	42
2.3.10- Escolha do tipo de extensômetro	42
2.3.11- Esquema das ligações dos exten sômetros.....	44
2.3.12- Previsão das características - do sistema de medida, empregan do-se extensômetros elétricos.	46
2.3.13- Estudo analítico das solicita ções nas lâminas.....	48

	<i>PÁGINA</i>
5.2.1- Ensaio de tração	96
5.2.2- Dureza.....	96
5.2.3- Análise química.....	96
5.2.4- Análise metalográfica.....	96
5.3- Ensaio realizado.....	98
5.3.1- Rebôlo utilizado.....	98
5.3.2- Valores obtidos nos ensaios..	98
5.3.3- Considerações sôbre rugosida- de das superfícies.....	104
5.4- Determinação da pressão específica de corte.....	105
<i>CAP. VI- CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</i>	<i>116</i>
<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</i>	<i>119</i>
<i>APÊNDICE.....</i>	<i>123</i>
<i>SIMBOLOGIA UTILIZADA.....</i>	<i>123</i>

C A P Í T U L O I

I N T R O D U Ç Ã O

Este trabalho faz parte de um programa de pesquisas, desenvolvido pelo Centro de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, para a determinação das características de usinagem dos materiais nacionais. Entre os diferentes processos de usinagem, tem-se a operação de retificação plana tangencial. Para o estudo desta operação há necessidade do conhecimento, tão preciso quanto possível, dos diferentes parâmetros envolvidos no processo.

A força de usinagem é uma característica de grande importância, pois permite dimensionar a estrutura e os mecanismos de acionamento das máquinas ferramenta, permite também a determinação da potência de usinagem e o rendimento da máquina operatriz, além de contribuir na determinação das características de usinagem dos materiais.

Para suprir estas exigências acima citadas, há necessidade da construção de dinamômetros que permitam determinar as forças para diferentes condições de retificação. Procuram-se soluções nestas construções; tais que se obtenha grande sensibilidade e rigidez dinâmica satisfatória.

Desta forma foi projetado um dinamômetro, que permite a medida simultânea de duas componentes da força de usinagem (P_a na direção de avanço e P_{ap} na direção perpendicular a direção de avanço no plano de trabalho) A figura 1.1 apresenta as componentes da força de usinagem, para a operação de retificação plana tangencial segundo a norma DIN 6584.

O sistema de medida da força escolhido foi através de extensômetros elétricos, o qual permitiu ótima sensibilidade, além de uma frequência natural do sistema bastante satisfatória. Os extensômetros foram dispostos de tal maneira a permitir medida das duas componentes da força de usinagem, sem que houvesse interferências entre ambas.

O dinamômetro foi construído e aferido após terem sido satisfeitas as exigências de projeto (capítulo II).

Posteriormente foram realizados vários ensaios com o dinamômetro, e constatou-se que o mesmo satisfaz plenamente as características de emprêgo.

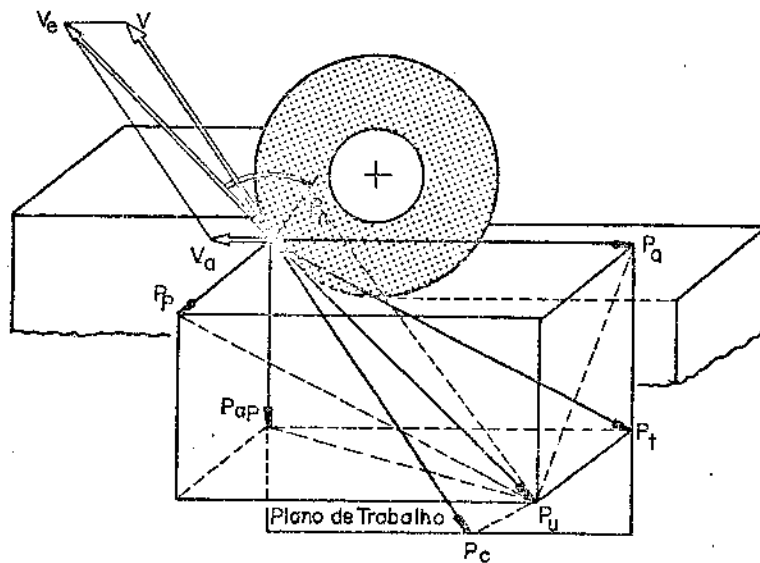


Figura 1.1- Componentes da força de usinagem na retificação plana tangencial, segundo a norma DIN 6584.

C A P Í T U L O I I

C O N S T R U Ç Ã O D O D I N A M Ô M E T R O

2.1- Estimativa das características de trabalho

2.1.1- Condição máxima de trabalho

Para condição máxima de trabalho de usinagem em aço ABNT 1020, foram admitidos: espessura de penetração do rebôlo $e = 0,15$ mm, avanço transversal da mesa $a_t = 10$ mm/curso e velocidade de avanço longitudinal da mesa $v_a = 15$ m/min.

Estimativa da força de avanço P_a e da força de apoio P_{ap} :- Empregando-se o rebôlo NORTON A 46H7VBE de diâmetro $D = 350$ mm, largura $B = 50$ mm e rotação $n = 1700$ rpm, para os valores críticos de trabalho, tem-se respectivamente para a força de avanço P_a e para a força de apoio P_{ap} os valores [1]:

$$P_a \cong 25 \text{ kgf} \quad , \quad P_{ap} \cong 50 \text{ kgf}.$$

2.1.2- Condição mínima de trabalho

Para condições mínimas de trabalho, utilizaram-se inicialmente os valores: $e = 0,001$ mm, $a_t = 4$ mm/curso e $v_a = 5$ m/min.

Para o emprêgo das condições acima citadas e a utilização do mesmo rebôlo, estima-se para força de avanço P_a e força de apoio P_{ap} os respectivos valores [1] :

$$P_a \cong 1 \text{ kgf} , \quad P_{ap} = 2 \text{ kgf}$$

2.2. Escolha dos Elementos de Medida

2.2.1. Extensômetros elétricos

2.2.1.1. Generalidades

Para um estudo mais pormenorizado deste trabalho, teceremos algumas considerações sobre a teoria e aplicação dos extensômetros elétricos [2,3].

Os extensômetros elétricos são baseados no princípio da variação da resistência elétrica de um fio, devido a variação do seu comprimento, sob ação de uma força.

A constituição do extensômetro é baseado fundamentalmente de um fio metálico delgado, enrolado em suporte de papel, baquelite ou qualquer outro material com características mecânicas e elétricas apropriadas. O extensômetro é colado sobre o objeto a ser testado, de modo a acompanhar as deformações da superfície.

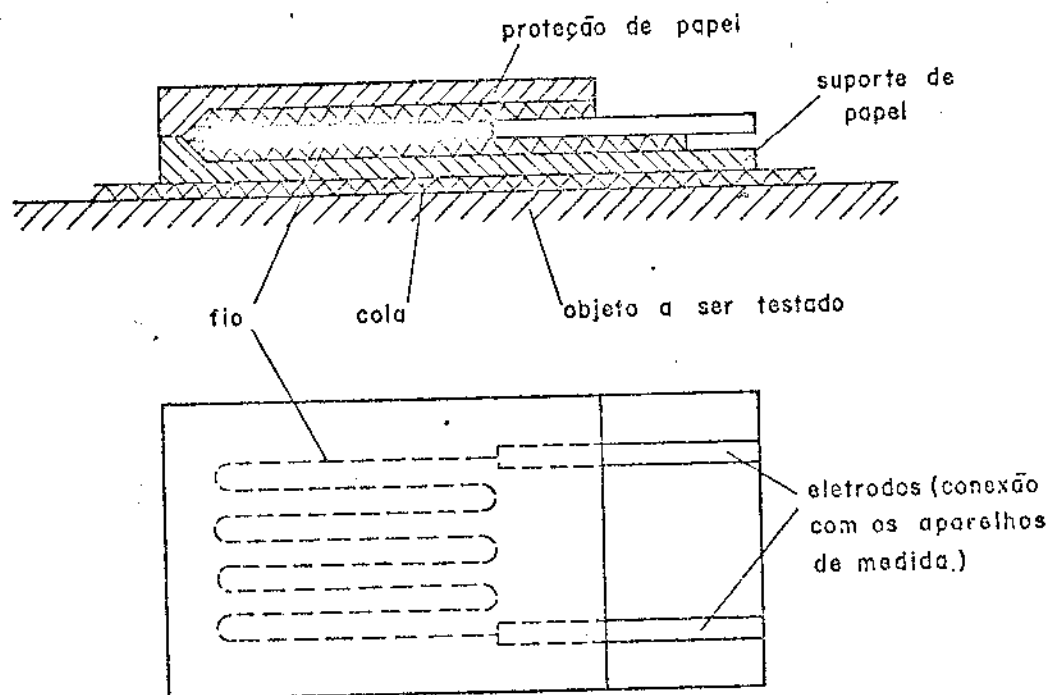


Figura 2.1- Detalhes de um extensômetro

Hã três tipos característicos de extensômetros:

- tipo (I) - desenvolvido em um sô plano, tem a desvantagem de acarretar grandes dimensões para o extensômetro - (fig. 2.2a)
- tipo (II) - desenvolvido em tamanho mais reduzido, o que diminui o espaço ocupado (fig.2.2b)
- tipo (III) - desenvolvido com a vantagem, de não apresentar praticamente variação da resistência em direção perpendicular ao eixo do extensômetro (fig.2.2c).

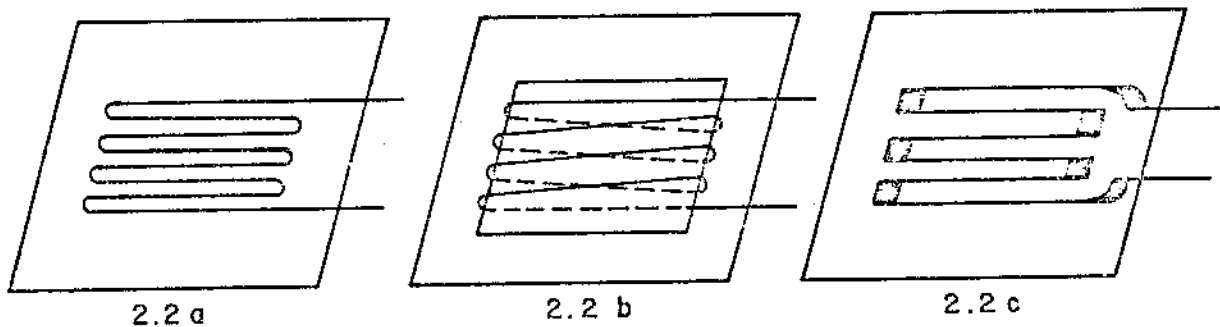


Figura 2.2- Tipos diferentes de extensômetros elétricos

2.2.1.2- Coeficiente de sensibilidade

A resistência R de um extensômetro é determinada pela seguinte expressão :

$$R = \rho \frac{L}{S} , \quad (2.1)$$

onde :

- ρ = resistividade do metal do fio ,
- L = comprimento do fio,
- S = área da secção transversal do fio.

O coeficiente de sensibilidade k do extensômetro é dado pela seguinte expressão:

$$k = \frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dL}{L}} = 1 + 2\nu + \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\frac{dL}{L}}, \quad (2.2)$$

onde ν é o coeficiente de *Poisson*.

O coeficiente de sensibilidade é também denominado fator do extensômetro.

O valor do fator k é próximo de 2, para extensômetros de fios (55% de cobre e 45% de níquel). A tabela II-1 apresenta alguns valores ilustrativos.

Tabela II- 1. Valores do fator k , para alguns tipos de extensômetros:

Material	k
Constantan	1,8 a 2,2
Cromo, níquel vanádio	2,1 a 2,4
Platina	3,5 a 3,9

2.2.1.3. Linearidade

A linearidade do extensômetro é função da constância de k . Na realidade isto nem sempre é possível, resultando uma relação não linear entre a variação específica da resistência e do comprimento. O desvio da linearidade é ilustrado na fig. 2.3.

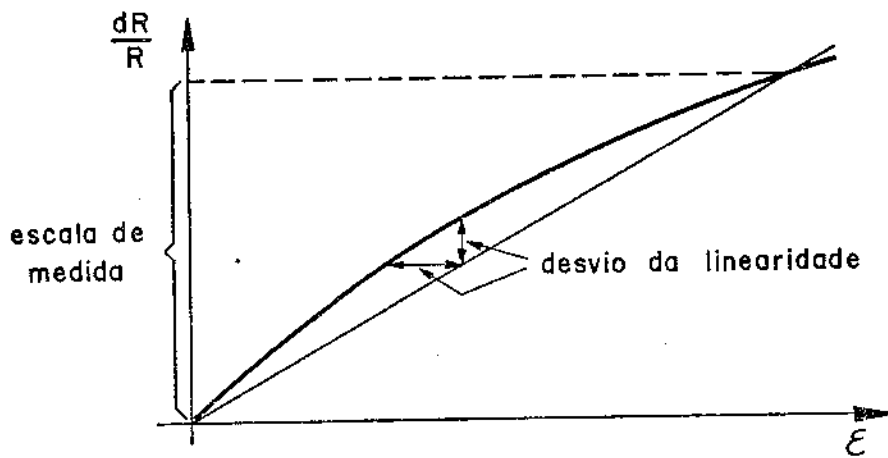


Figura 2.3- Desvio da linearidade

A linearidade não é tão boa em extensômetros / feitos de materiais, cuja variação da resistividade predomina.

2.2.1.4- Sensibilidade transversal

Para uma carga aplicada na direção x temos:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \epsilon_x \quad (2.3)$$

onde ϵ_x é a deformação na direção de x e vale:

$$\epsilon_x = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.4)$$

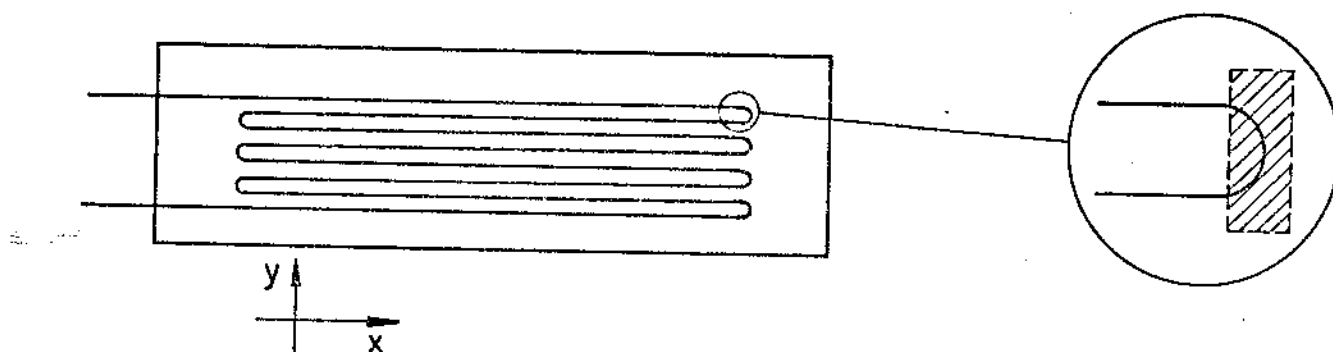


Figura 2.4- Extensômetro de fio

Porém o fio do extensômetro, apresenta-se também na direção transversal.

Pela teoria clássica da elasticidade tem-se:

$$\epsilon_y = - \nu \epsilon_x \quad (2.5)$$

O valor real do coeficiente de sensibilidade / do extensômetro, considerando a deformação nas duas direções da estrutura será:

$$\frac{\Delta R}{R} = k_x \cdot \epsilon_x + k_y \cdot \epsilon_y = (k_x - \nu k_y) \epsilon_x \quad , \quad (2.6)$$

portanto:

$$K = K_x - \nu K_y = K_x \left(1 - \nu \frac{K_y}{K_x} \right) \quad . \quad (2.7)$$

A sensibilidade transversal K_y é muito pequena comparada com a longitudinal, variando entre 0,5 e 2%. Na maioria das aplicações K_x pode ser considerado praticamente/ igual a K .

Para os extensômetros de lâmina (figura 2.5), conseguiu-se praticamente a eliminação da sensibilidade transversal.

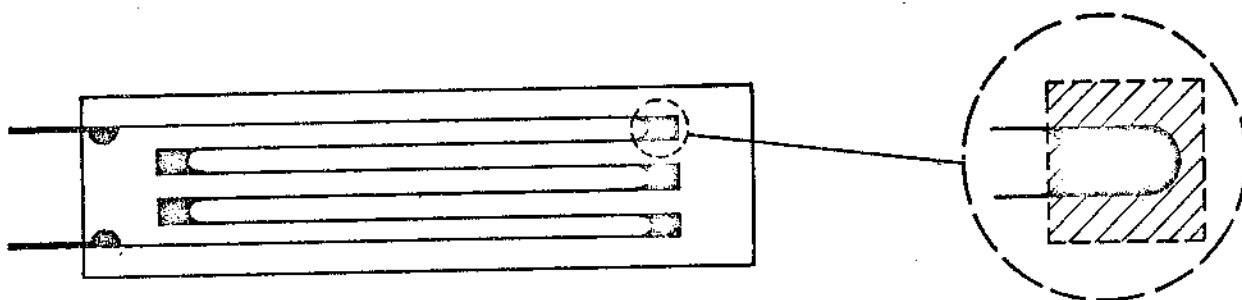


Figura 2.5- Extensômetro de lâmina

2.2.1.5- Coeficiente de Temperatura

A variação de temperatura tem grande influência, no resultado das medições. Três fenômenos ocorrem simultaneamente e devem ser considerados:

- Variação da resistividade do extensômetro.
- Expansão linear do material sob teste .
- Expansão linear do fio do extensômetro.

Sejam : .

T = temperatura [$^{\circ}C$]

α = coeficiente de resistividade [Ω/Ω $^{\circ}C$]

λ_m = coeficiente de dilatação do material sob teste
[μ/m $^{\circ}C$]

λ_e = coeficiente de dilatação do extensômetro [μ/m $^{\circ}C$]

Admitindo inicialmente que a variação da resistividade é nula, isto é, $\alpha = 0$, a variação na resistência do extensômetro é causada pela diferença entre o coeficiente de dilatação do filamento e da estrutura.

Tem-se assim :

$$\begin{aligned} dL_e &= L \cdot \lambda_e \cdot dT && \text{expansão livre do extensômetro,} \\ dL_m &= L \cdot \lambda_m \cdot dT && \text{expansão livre do material da} \\ &&& \text{estrutura.} \end{aligned}$$

Logo, o alongamento efetivo do extensômetro será:

$$\frac{dL}{L} = (\lambda_m - \lambda_e) \cdot dT \quad (2.8)$$

Através das fórmulas (2.3), (2.4) e (2.8) tem-se:

$$\left. \frac{dR}{R} \right|_{\alpha=0} = K \frac{dL}{L} = K (\lambda_m - \lambda_e) \cdot dT \quad (2.9)$$

Supondo $\lambda_m = \lambda_e$, resulta :

$$\left. \frac{dR}{R} \right|_{\lambda_e = \lambda_m} = (\alpha - \lambda_e) dT = c dT \quad (2.10)$$

onde $c = \alpha - \lambda_e$ e é denominado "coeficiente térmico de resistividade" do fio em expansão.

Adicionando os dois efeitos analisados tem-se :

$$\frac{dR}{R} = \left. \frac{dR}{R} \right|_{\alpha=0} + \left. \frac{dR}{R} \right|_{\lambda_e = \lambda_m}$$

$$\frac{dR}{R} = [K (\lambda_m + \lambda_e) + c] \cdot dT , \quad (2.11)$$

mas como

$$\frac{dR}{R} = K \frac{dL}{L} ,$$

tem - se

$$\epsilon = \frac{dL}{L} = \left(\frac{c}{K} + \lambda_m - \lambda_e \right) dT = \alpha_T \cdot dT, \quad (2.12)$$

logo:

$$\epsilon = \alpha_T dT \quad (2.13)$$

α_T - é denominado "coeficiente de temperatura do extensômetro", quando colado sobre um material de coeficiente de dilatação λ_m .

A maioria dos fabricantes especifica os valores de α_T em relação ao aço ($\lambda_m = 11 \mu d/^{\circ}C$).

Para o aço $\alpha_T = - 17 \cdot 10^{-6} \cdot ^{\circ}C^{-1}$

Para o alumínio $\alpha_T = - 5 \cdot 10^{-6} \cdot ^{\circ}C^{-1}$

2.2.2-Extensômetros de semi-condutores

Consiste essencialmente de um filamento cortado de um cristal de silicon, que contém traços cuidadosamente controlados de impurezas, tais como boro e arsênico.

Devido a alta variação da resistência apresentada pelos extensômetros de semi-condutores, a utilização da Ponte de *Wheatstone* não possibilita em muitos casos a linearidade desejada. Essa altíssima variação da resistência em função da deformação, dá aos extensômetros de semi-condutores maior sensibilidade que os extensômetros elétricos comuns. [2,4]

$$K_{\text{semi-condutor}} = K_{\text{elétrico}} \cdot 50$$

Isto permite medir pequenas deformações em torno de 1 a 0,01 μd .

Uma boa aproximação da variação da resistência de um material semi-condutor seria a expressão.

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \left(\frac{T_0}{T} \right) \cdot \epsilon \cdot K_1 + \left(\frac{T_0}{T} \right)^2 \cdot \epsilon^2 \cdot K_2 \quad (2.14)$$

onde :

T e T_0 apresentam as temperaturas de trabalho ,
 K_1 e K_2 são as constantes do semi-condutor ,
 ϵ é a deformação medida.

São produzidos dois tipos de extensômetros de semi-condutores:

tipo P - possui K_1 positivo

tipo N - possui K_1 negativo

Como foi mencionado anteriormente a linearidade dos extensômetros de semicondutores não é perfeita. Os desvios da linearidade podem ser corrigidos pelos seguintes processos:

2.2.2.1- *Compensação com resistência em paralelo*

Pode-se usar uma resistência quando $\Delta R/R$ cresce com o alongamento relativo, obtendo-se assim uma linearidade satisfatória. Entretanto esta correção diminui a sensibilidade de 10 a 30%, conforme figura 2.6.

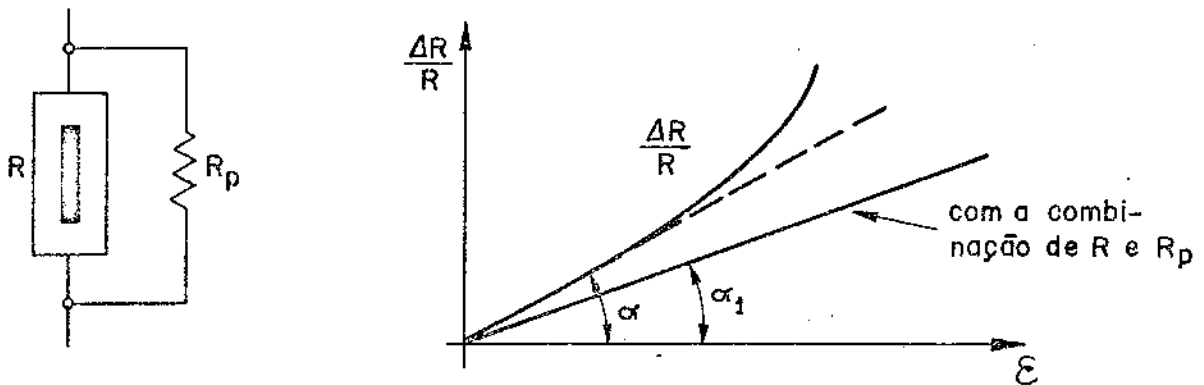


Figura 2.6- Correção do desvio da linearidade, com resistência em paralelo.

2.2.2.2- *Compensação usando circuitos de ponte assimétricos*

A não linearidade de uma ponte completa pode ser influenciada fazendo-se a ponte assimétrica.

A não linearidade da ponte decresce com o aumento da assimetria, aumento de N (fig.2.7). Consegue-se uma ótima compensação por êste processo.

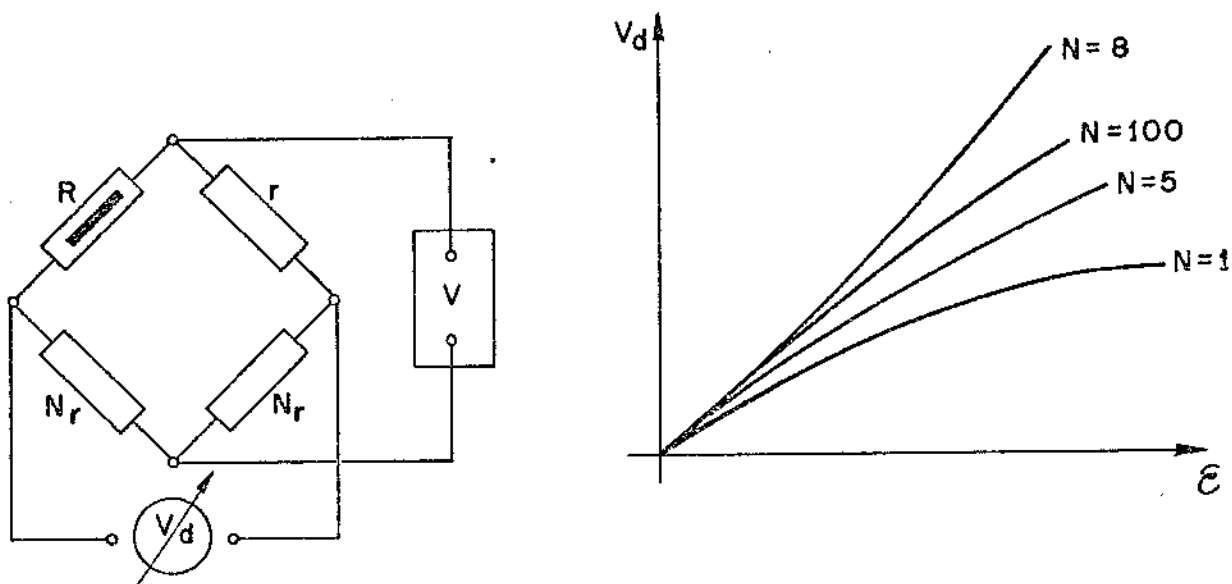
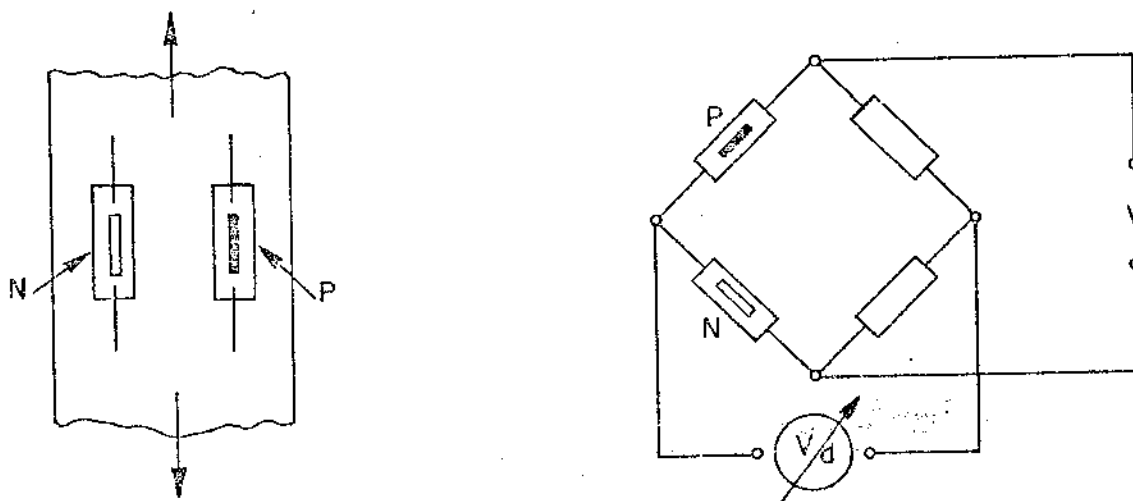


Figura 2.7- Circuito em ponte assimétrica

2.2.2.3- Compensação pela combinação dos tipos P e N

Utilizando-se as características dos semi-condutores P e N, consegue-se a correção da linearidade (fig.2.8)



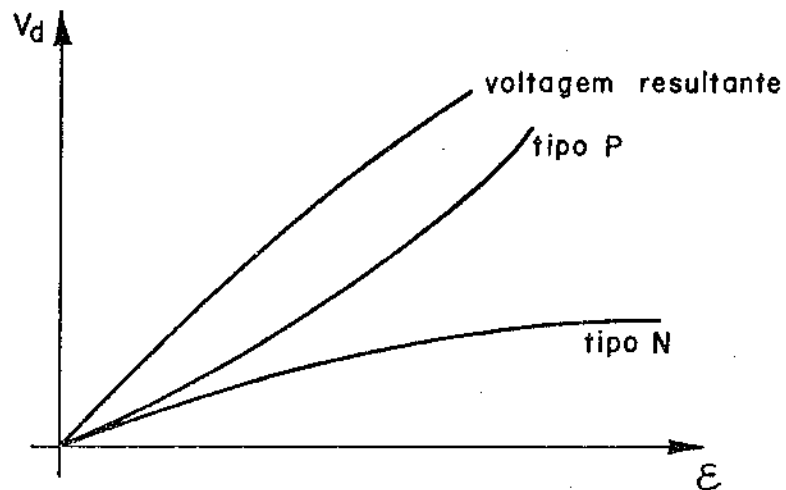
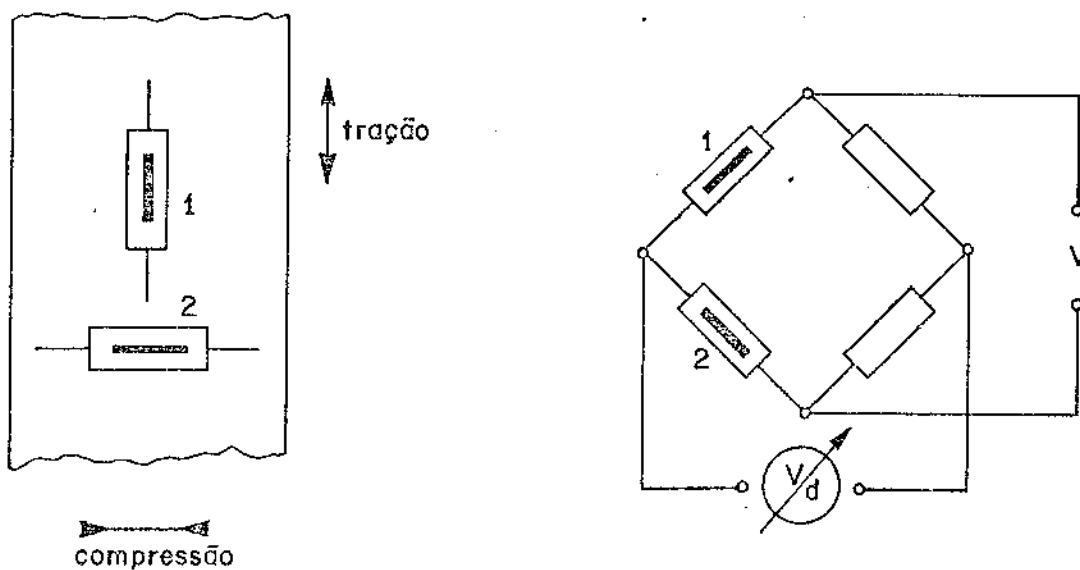


Figura 2.8- Correção da linearidade, com extensômetros tipo P e N.

2.2.2.4- Compensação pela combinação da medida da compressão e tração.

O efeito de compensação é obtido combinando-se os extensômetros com carga de tração e de compressão de modo que os desvios se anulem (fig. 2.9).



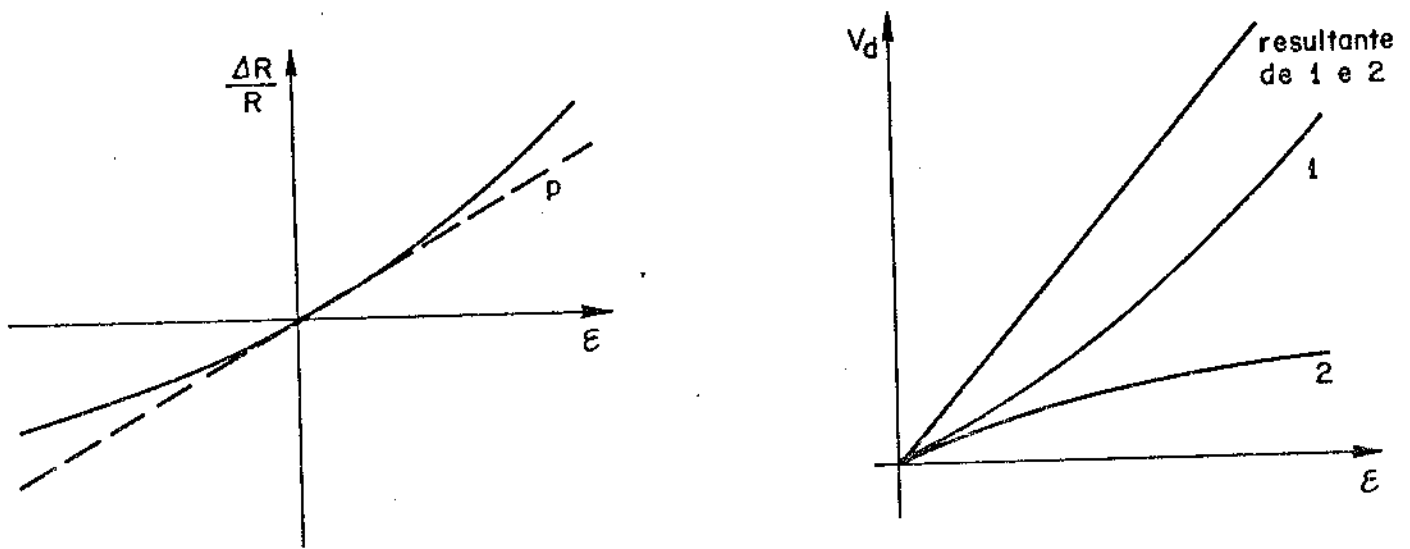


Figura 2.9- Correção da linearidade medindo-se à compressão e à tração.

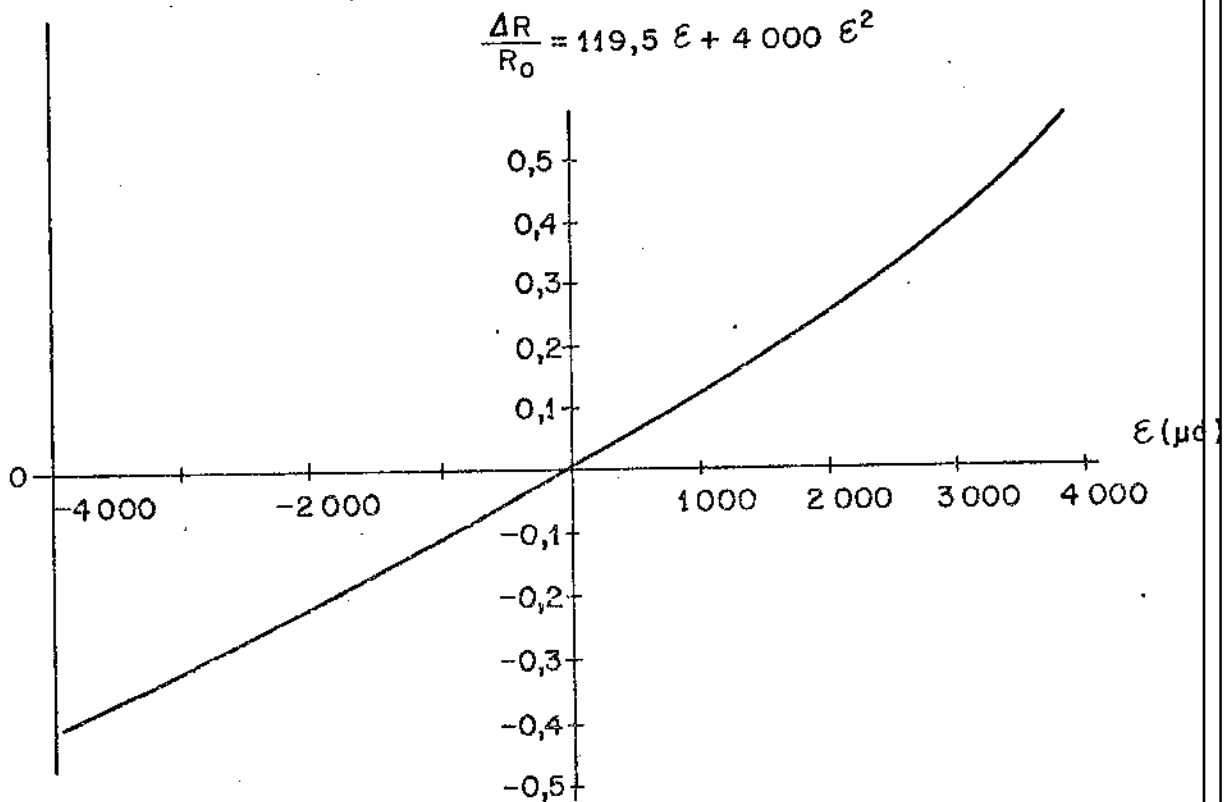


Figura 2.10- Característica de um extensômetro de semi-condutor tipo P.

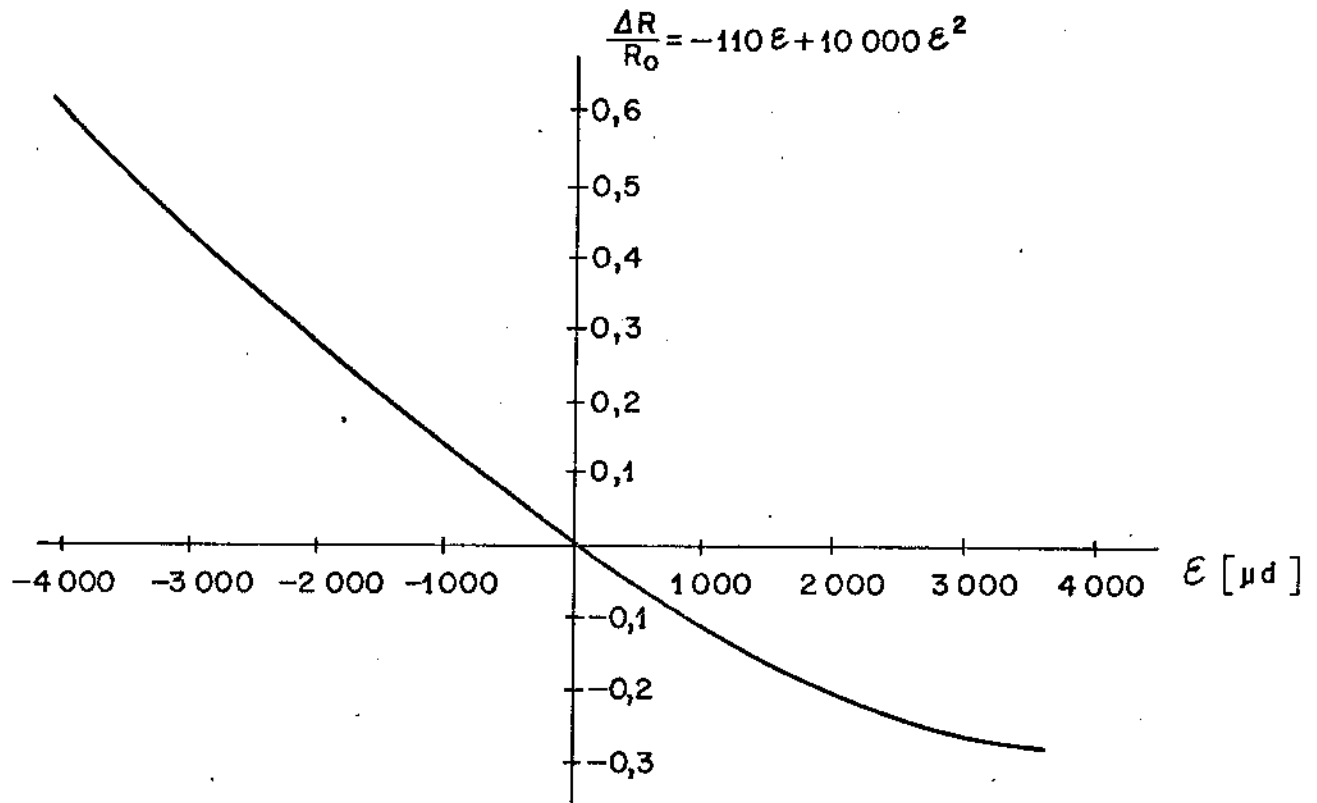


Figura 2.11- Característica de um extensômetro de semi-condutor tipo N.

2.2.2.5- Vantagens e Desvantagens de aplicação

Vantagens :

- 1) sensibilidade K_1 alta. Consegue-se medir pequenas deformações.
- 2) K_1 pode ser positivo ou negativo, isto proporciona uma maior flexibilidade para disposição na ponte de Wheaststone.
- 3) O equipamento de medida é mais barato.

Desvantagens:

- 1) são muito sensíveis às variações de temperatura.
- 2) grande variação dos parâmetros K , R e T de um lote para outro.

- 3) a linearidade não é boa.
- 4) difícil aplicação, requer cuidados especiais na colagem e na solda dos terminais.

2.2.3 - Medidores indutivos de deslocamento

O princípio de medida de deslocamento, consiste na variação da indutância de duas bobinas, pela mudança de posição de um núcleo de ferro no seu interior. O núcleo é fixado através de uma haste à ferramenta, permitindo medir deslocamentos mínimos desta. As bobinas constituem a metade de uma ponte de Wheatstone. A outra metade da ponte de medição encontra-se em um amplificador de medida, ao qual as bobinas estão ligadas. O desequilíbrio da ponte de medição, é diretamente proporcional à variação de indução das bobinas e pode ser lido em um instrumento de medida. Esta proporcionalidade entre o deslocamento do núcleo de ferro e a leitura no amplificador se dá em um grande campo linear de deslocamento do núcleo, de maneira que este processo de medida satisfaz plenamente não só a *medida estática* como também a *medida dinâmica* da força de usinagem (fig.2.12), [5] .

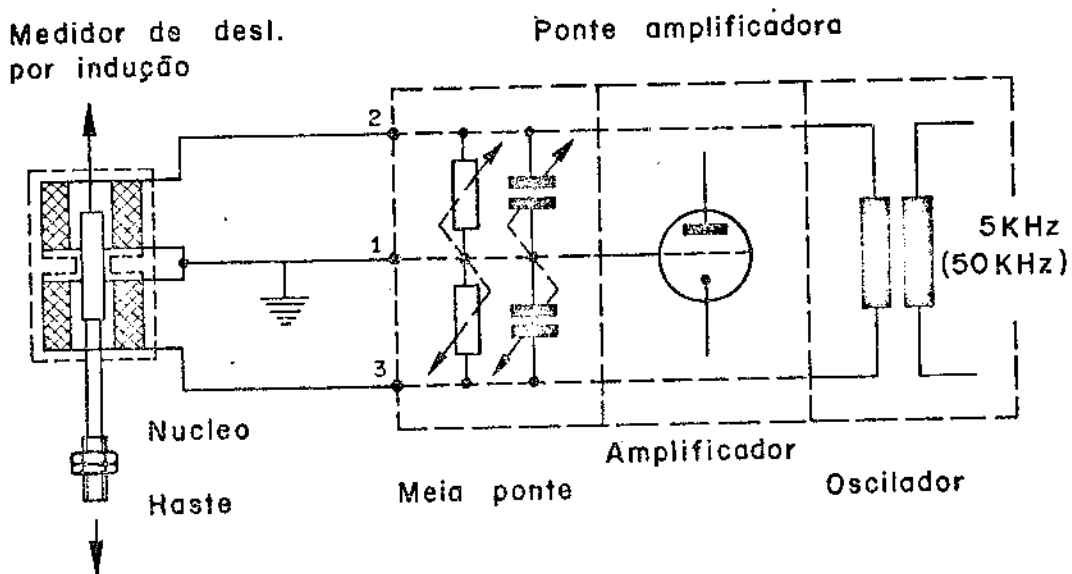


Figura 2.12- Princípio de medida de deslocamento por variação de indução.

A figura 2.13, apresenta o emprêgo de um sistema diferencial constituído por duas bobinas, ligadas em meia ponte. Este sistema permite a obtenção de bõa sensibilidade na construção de dinamômetros, além da leitura da ponte amplificado ra ser linear com o deslocamento. As bobinas podem ser de tamanho reduzido, facilitando a construção dos aparelhos de medida.

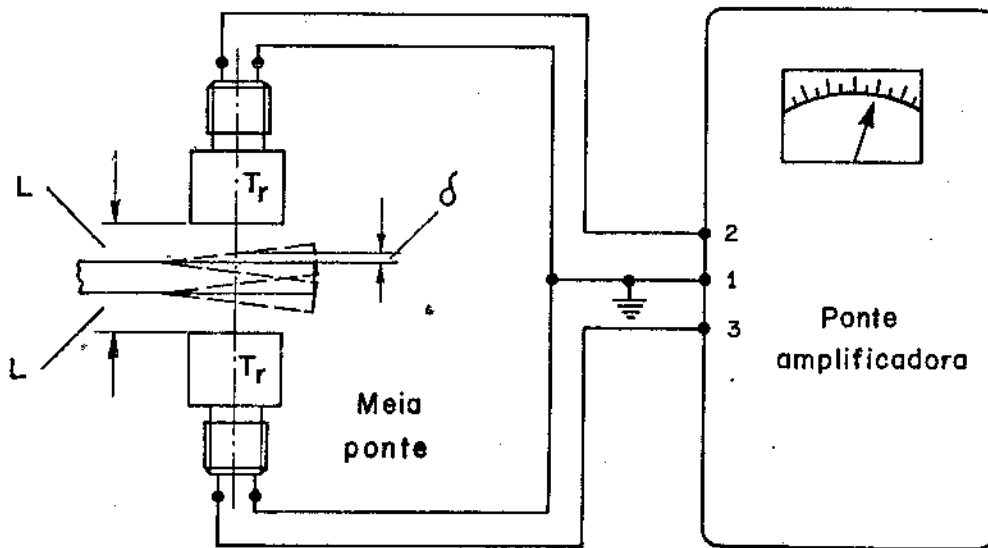
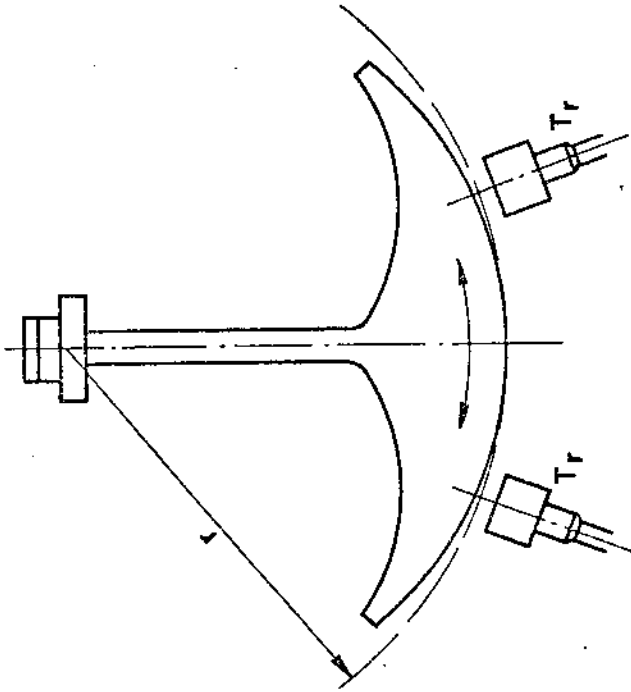
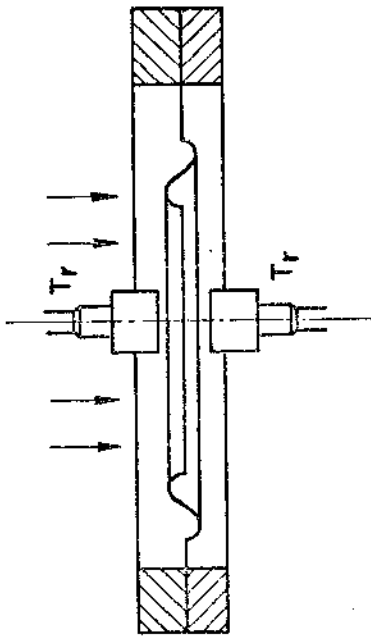


Figura 2.13- Medida de deslocamento através de bobinas separadas, ligadas em meia ponte.

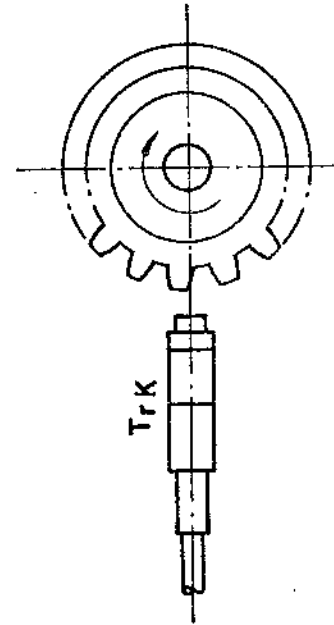
A figura 2.14, apresenta algumas aplicações das bobinas de medida de deslocamento por indução.



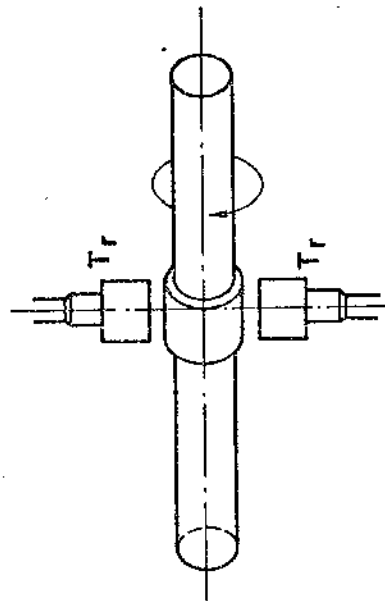
Medida da posição de um pêndulo.



Medida do deslocamento de uma membrana.



Medida da rotação de uma engrenagem.



Medida da amplitude de vibração radial de um eixo.

Figura 2.14- Diferentes aplicações das bobinas de deslocamento por indução.

2.2.4- Elementos Capacitivos

Este princípio consiste na medida da variação da capacidade de um condensador, proveniente da variação da distância entre suas armaduras. A capacitância é inversamente proporcional à distância entre as suas armaduras. A medida da variação da capacidade pode ser realizada, em um caso simples, através de um miliamperímetro e de um voltímetro eletrônico; para medidas dinâmicas a ligação é feita preferivelmente em ponte de Wheatstone, utilizando-se pontes amplificadoras com frequência portadora de 5KHZ (fig.2.15), [5].

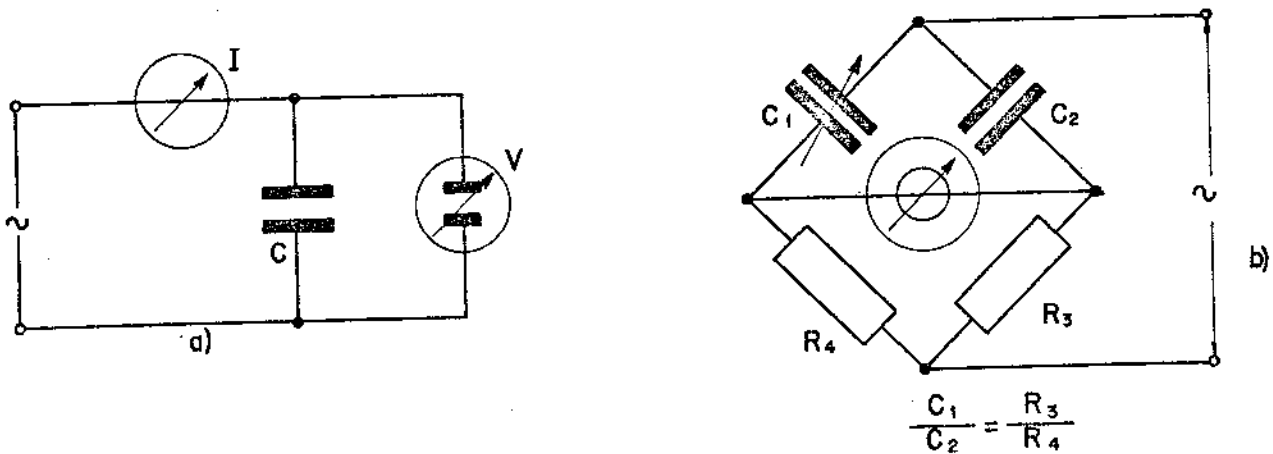


Figura 2.15- Medida da capacidade de um condensador.

2.2.5- Elementos Mecânicos

Os dinamômetros baseados na medida de deslocamento de molas, através de relógios comparadores foram muito utilizados no início deste século. São de construção relativamente simples, porém não permitem a medida dinâmica da força/

de usinagem, mas sim a determinação de um valor médio de força de usinagem P_u . O sistema de registro da força em diagrama é complicado e apresenta grande inércia. [5].

2.2.6- Elementos Pneumáticos

A medida pneumática da força de usinagem está baseada no princípio Solex (fig. 2.16). A deformação de uma mola, provocada pela força de usinagem, origina o deslocamento relativo de duas paredes P_1 e P_2 ; conseqüentemente tem-se uma variação da vazão de ar em S , provocando uma variação de pressão, medida num manômetro sensível M . O ar proveniente de um compressor C é injetado em um reservatório R , cuja finalidade é manter a pressão constante H . Em seguida o ar atravessa um orifício calibrado G , para expandir-se em uma câmara A , antes de escapar pelo orifício S . Quando a saída de ar em S é livre, a pressão h da câmara A , medida pelo manômetro M , é praticamente nula. Porém quando se dificulta a saída de ar em S , a pressão h aumenta progressivamente na câmara A . Logo, as variações da espessura e da lâmina de ar entre as paredes P_1 e P_2 provocam variações correspondentes do nível de água. Quando o orifício G for pequeno, necessita-se uma variação muito pequena de espessura e , para que a pressão h varie dentro de proporções bastante grandes, tendo-se grande sensibilidade. [5].

Está solução se aplica preferencialmente nas medidas estáticas, onde não há necessidade do registro das leituras.

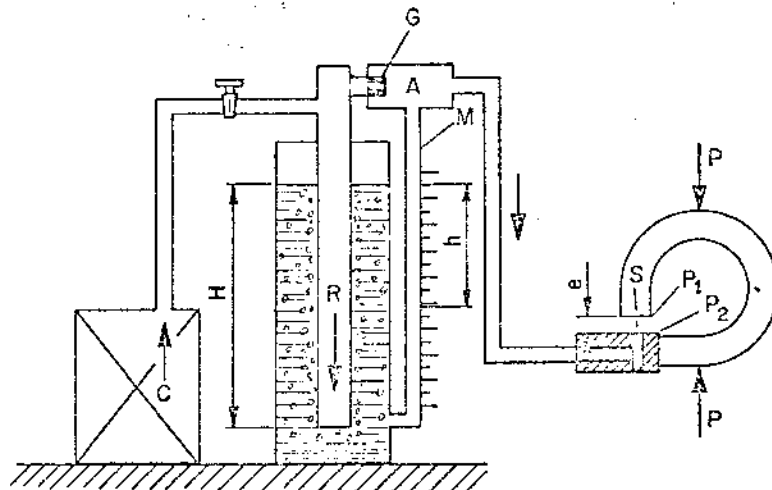


Figura 2.16- Princípio do medidor Solex

2.2.7- Elementos Hidráulicos

Na medida hidráulica a força é transmitida através de um sistema de alavancas a uma membrana, que comprime o óleo do reservatório a um manômetro. Este princípio de medição apresenta o inconveniente de permitir grandes deslocamentos alterando enormemente os resultados da medida. Atualmente este princípio está em completo desuso. [5]

2.2.8- Transdutores Piezoelétricos

Um transdutor é um sistema que converte energia de uma forma em outra, com o objetivo de medi-la ou interpretá-la. [6]

A piezoeletricidade é a propriedade que possuem certos cristais de se polarizarem eletricamente, quando submetidos a esforços mecânicos. Este efeito é reversível; se aplicada uma carga elétrica, o material se deformará mecanicamente. A polarização consiste na liberação no cristal de cargas elétricas iguais e contrárias; a sua soma algébrica é nula.

Os materiais que possuem um significativo e utilizável efeito piezoelétrico são : quartzo, turmalina e certos sais como: o sal de Rochelle, tartarato de potássio, sulfato de lítio e titanato de bário (cerâmica polarizada). Devido possuírem uma estrutura natural assimétrica, os cristais apresentam o efeito sem nenhum processamento posterior. Os materiais cerâmicos devem ser artificialmente polarizados pela aplicação de um forte campo elétrico após aquecidos a uma temperatura acima do ponto de Curie. (temperatura de Curie é a temperatura acima da qual o material perde a sua propriedade/ferro-elétrica). Quando o campo externo é removido após o resfriamento, uma polarização remanescente é retida e o mate-

rial passará a apresentar o efeito piezoelétrico.

Três efeitos piezoelétrico ocorrem no cristal de quartzo, que são: longitudinais, cisalhamento e transversais. O tipo de efeito depende da forma e orientação do corpo em relação aos eixos cristalográficos e da localização / dos elétrodos. Elétrodos metálicos são colocados em faces seccionadas do material piezoelétrico, de modo a conduzir para fora a carga elétrica.

Para o cristal de quartzo, verifica-se a piezoelétricidade em duas direções de aplicação da força : a / direção segundo o eixo x_1 (eixo elétrico) e a direção segundo o eixo y_1 (eixo mecânico). O cristal é cortado em lâminas / perpendiculares a estas direções. Para uma força P aplicada em direção do eixo x_1 , a carga elétrica liberada vale:

$$q_1 = k \cdot P \tag{2.15}$$

Para uma força P aplicada em direção ao eixo y_1 tem-se

$$q_2 = k \frac{l}{2} P \tag{2.16}$$

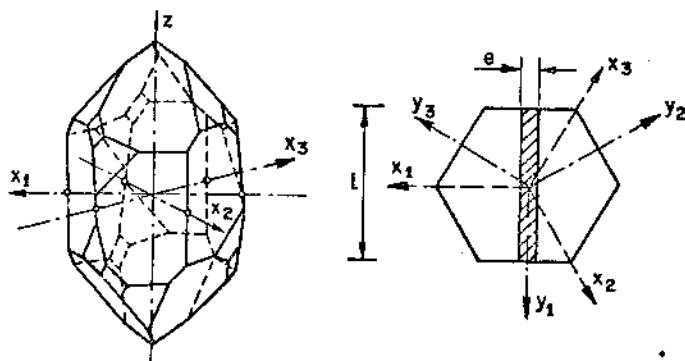


Figura 2.17- Cristal de quartzo

onde l e e são as dimensões segundo os eixos y_1 e x_1 e K é a constante piezoelétrica. Para o quartzo $K = 0,02 \cdot 10^{-9}$ / coul. Esta carga elétrica por sua vez gera uma diferença de potencial entre os elétrodos:

$$V = \frac{q}{c} \quad (2.17)$$

onde c é a capacidade adquirida entre os elétrodos e o cristal. Tem-se então :

$$c = \epsilon \frac{l \cdot e}{e} \quad (2.18)$$

onde,

$$\epsilon = 4,5 \cdot 10^{-13} \text{ Kgf/cm}, \text{ constante dielétrica.}$$

Para se aumentar o valor de V , colocam-se várias lâminas de cristal em paralelo (fig. 2.18).

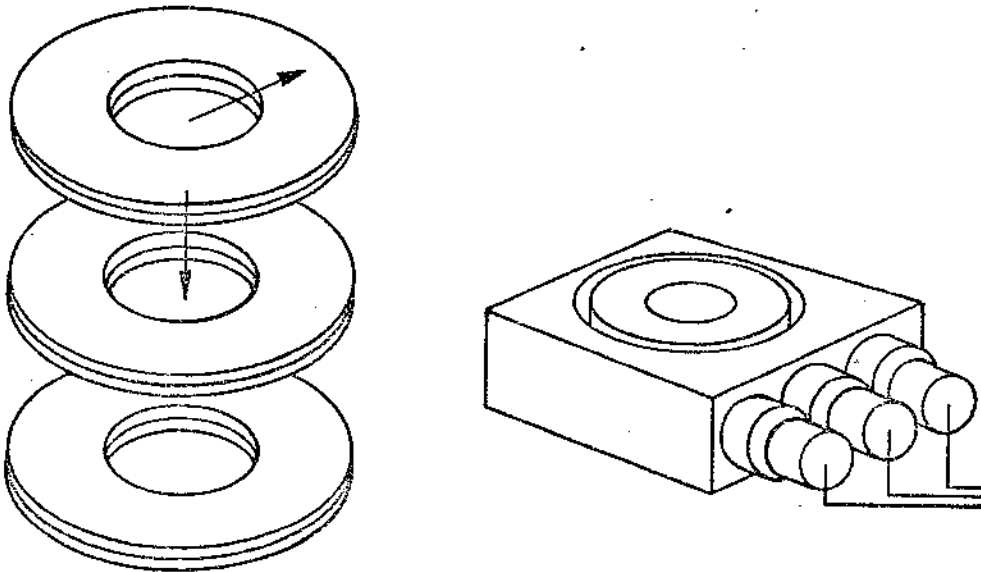


Figura 2.18- Cápsula dinamométrica de quartzo.

Tendo em consideração que é a deformação, a causa da geração elétrica, é conveniente expressar a voltagem ou a carga de saída em termos de deflexão. Para isso devem ser conhecidos os módulos de elasticidade dos materiais piezoelétricos. O valor do módulo de elasticidade do quartzo é $E = 0,8 \cdot 10^6 \text{ kgf/cm}^2$. A frequência natural da cápsula de quartzo é bastante alta.

2.2.9- Elementos Ferromagnéticos

A magneto-extrição ou magneto elasticidade - consiste na variação da permeabilidade de certos materiais ferromagnéticos sob a ação de solicitações mecânicas. Através da variação da permeabilidade magnética pode-se determinar o valor da força perturbadora. A figura 2.19 apresenta a variação da permeabilidade em porcento em função da solicitação de tração para uma liga *Ni - Fe*. Construindo-se uma bobina ao redor de um corpo desse material, pode-se medir a variação de indutância. Logo, através deste método pode-se medir a força de tração, compressão ou torção aplicada a um material magneto-elástico. [5,7]

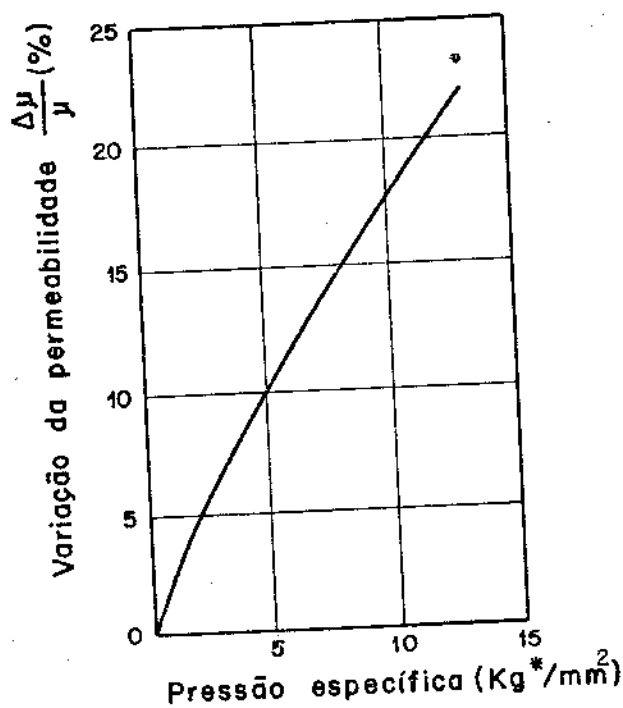


Figura 2.19- Variação da permeabilidade em função da carga para uma liga *Ni - Fe*.

2.2.10- Comentários sobre os Diversos Sistemas de Medida

A aplicação dos extensômetros elétricos no dinamômetro em questão, nos parece a melhor solução, devido às seguintes razões:

Os extensômetros de semi-condutores, apesar de fornecer um coeficiente de sensibilidade muito maior que o dos extensômetros elétricos, são muito sensíveis à variação da temperatura e exigem cuidados especiais na sua aplicação. O coeficiente de sensibilidade elevado permite uma alta rigidez do dinamômetro, sendo indicado preferivelmente aos casos de medida dinâmica da força de usinagem. Para o caso de medida da força de retificação, esta vantagem não é tão significativa, pois a mesma é considerada estática e nos interessa tão somente o valor médio da força de retificação, pois a sua variação é tão pequena, que geralmente não possibilita interpretações práticas. Na construção do dinamômetro preferiu-se que a mesa suporte da peça fosse suficientemente rígida, em relação às molas de medida, não apresentando portanto influências de deformação nestes elementos. Desta forma o emprêgo de semi-condutores em lâminas flexíveis perde as suas vantagens.

Os medidores indutivos de deslocamento poderiam ser empregados, devido às suas excelentes características, quanto à linearidade, sensibilidade e pequena influência, devido à variação de temperatura. Porém preferiu-se que o dinamômetro pudesse ser utilizado também em mesas de retificadoras com fixação magnética.

O emprêgo de elementos capacitivos exige uma tecnologia mais sofisticada, que no momento não tínhamos informações mais precisas. A consulta bibliográfica disponível não/nos forneceu nenhum exemplo de aplicação destes elementos em dinamômetros, para a medida da força de usinagem.

O emprêgo de sistemas pneumáticos de medida da força de usinagem, requer sistemas relativamente complicados para o registro em oscilógrafos, além da instalação de ar com

primido.

Os transdutores piezoelétricos poderiam ser utilizados, porém além de serem sensíveis à variação de temperatura, exigem uma tecnologia sofisticada na construção das cápsulas de cristal. Para a aferição estática, é necessário a utilização de pontes amplificadoras especiais, as quais não dispunhamos.

O emprego de elementos ferromagnéticos de medida não oferece vantagens na sua aplicação, tendo em vista o tamanho dos elementos utilizados, a dificuldade de construção e sensibilidade baixa. Além disto não permitem a utilização em retificadoras com mesas magnéticas.

2.3- Projeto do Dinamômetro

2.3.1- Generalidades

O dinamômetro foi obtido através de usinagens sucessivas de um bloco de aço ABNT-4340, conferindo ao mesmo uma característica de monobloco. Procurou-se evitar na construção do dinamômetro o emprego de parafusos de fixação, assim como a utilização de soldas, obtendo-se assim a maior rigidez possível e evitando concentração de tensões. A figura 2.20 apresenta uma das fases de usinagem do monobloco. O dinamômetro consta essencialmente de quatro lâminas, que se deformam sob a ação das componentes da força de usinagem. Esta deformação é detectada por extensômetros elétricos, colados em regiões previamente estabelecidas e devidamente estudadas. Sobre estas lâminas estão colados dezesseis extensômetros elétricos, que por sua vez estão ligados entre si em circuitos de ponte de Wheatstone, de maneira que as variações das resistências elétricas, devido as variações de seus comprimentos, são acusadas pelo desequilíbrio das pontes. A figura 2.21 apresenta a colagem dos extensômetros elétricos.

A alimentação dos circuitos, assim como a saída do sinal, é efetuada através de pontes amplificadoras.

A base do dinamômetro permite fixá-lo na mesa da máquina ferramenta. A capa protetora de acrílico, indicada na figura 3.1, tem a finalidade de proteger os circuitos dos extensômetros elétricos, tanto quanto à ação do fluido de corte como também à ação causada por agentes mecânicos, além de permitir ótima visibilidade interna do dinamômetro. A figura 2.22 apresenta o dinamômetro com duas pontes amplificadoras e uma leitura digital.

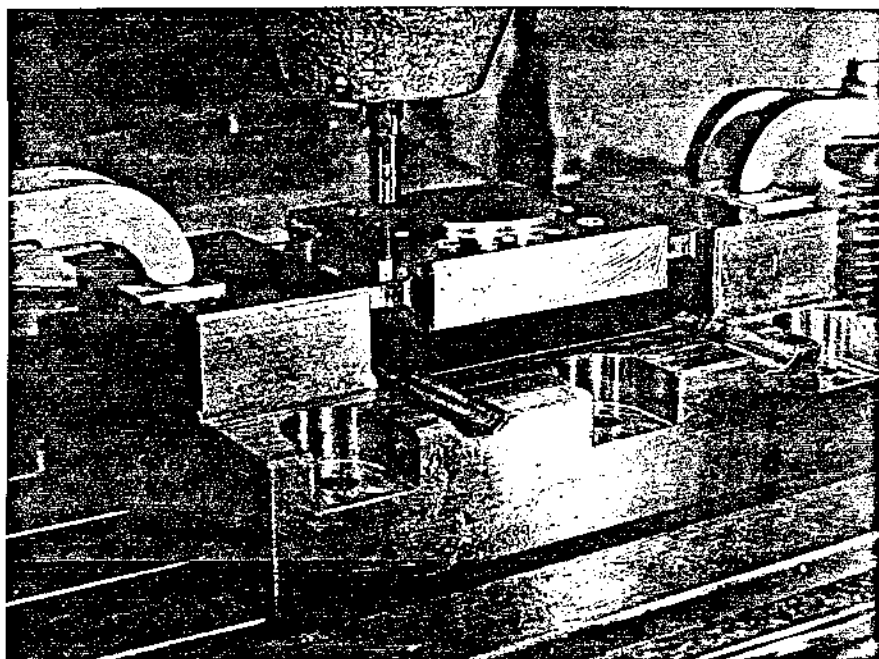


Figura 2.20- Aspectos da usinagem do dinamômetro na fresadora e retificadora DECKEL.

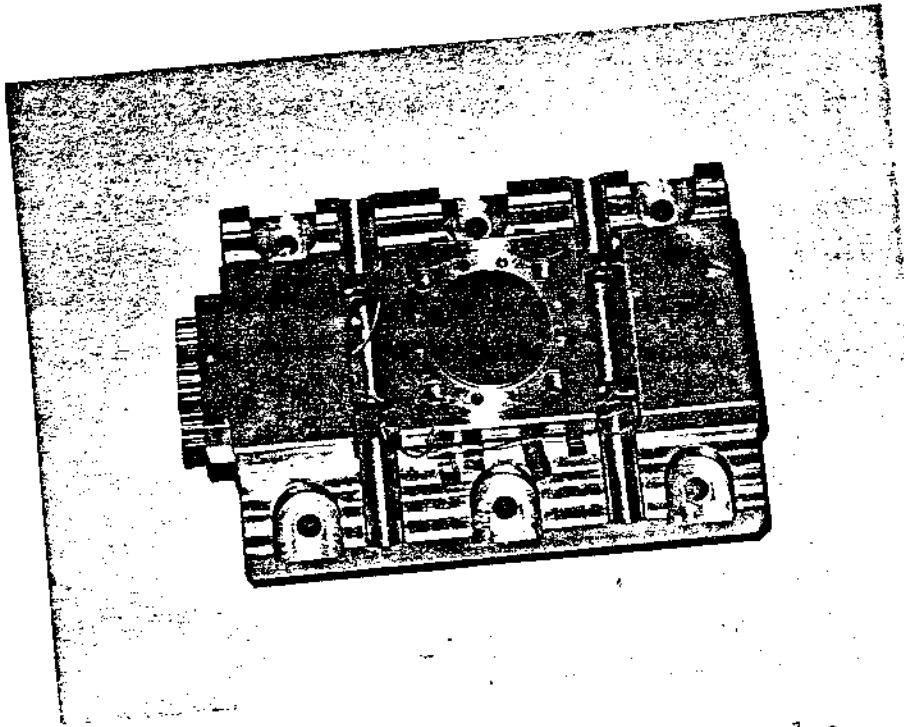


Figura 2.21- Dinamômetro após colagem dos extensômetros.

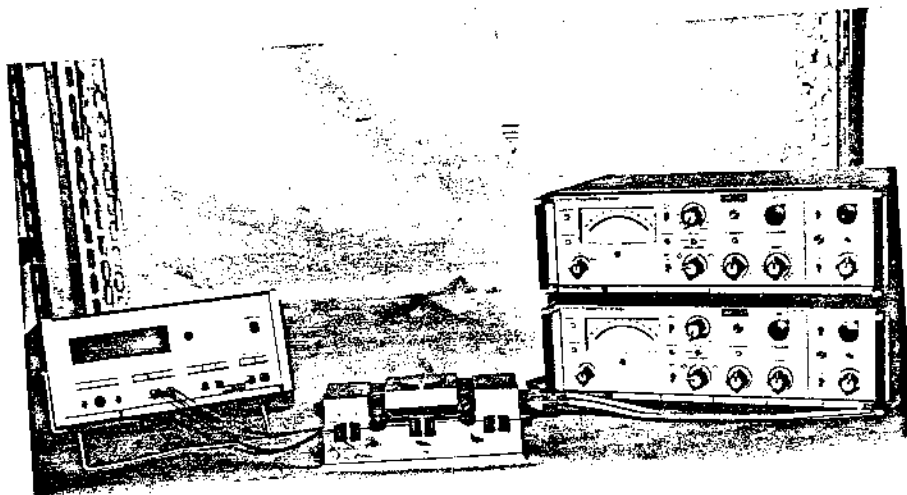


Figura 2.22- Dinamômetro, pontes amplificadoras e leitora digital.

2.3.1.1- Condições limites de trabalho

De acordo com as estimativas realizadas anteriormente temos a tabela abaixo:

Tabela II- 2- Condições limites

	e (mm)	a_t (mm/curso)	v_a (m/min)	P_a (kgf)	P_{ap} (kgf)
condição máxima	0,15	10	15	25	50
condição mínima	0,001	4	5	1	2

2.3.2- Estudo das dimensões prévias das lâminas

Para a construção de dinamômetros, existem requisitos que devem ser satisfeitos plenamente, tais como : *rigidez* : - implica em um alto valor da constante de mola K e portanto dimensões maiores na região de medida; *sensibilidade* : - exige as dimensões menores possíveis na região de medida, que funciona como mola elástica ; *histerese elástica*: requer a escolha de materiais para a construção do dinamômetro que apresentam uma histerese elástica mínima e também linearidade satisfatória. Desta forma procurou-se determinar , as melhores condições para a região de medida do dinamômetro. As dimensões encontradas foram as seguintes (figura 2.23):

comprimento da lâmina $l = 19,9$ mm
 altura da lâmina..... $h = 6,5$ mm
 largura da lâmina..... $b = 5,3$ mm
 comprimento da mesa dinamométrica..... $l_o = 90,0$ mm
 largura da mesa dinamométrica..... $b_o = 90,0$ mm
 altura da mesa dinamométrica..... $h_o = 21$ mm
 distância mínima de aplicação das forças.. $l_1 = 31$ mm

2.3.3- Determinação das tensões máximas e mínimas na lâmina.

De acôrdo com a figura 2.24, as tensões máximas e mínimas devido à aplicação da força P_{ap} , no plano vertical, são aproximadamente [8]:

$$M_{fm\acute{a}x} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{ap\ m\acute{a}x} \cdot l}{2} \cdot \frac{l_0 - l_1}{l_0}$$

$$\sigma_{fm\acute{a}x} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P_{ap\ m\acute{a}x} \cdot l}{b \cdot h^2} \cdot \frac{l_0 - l_1}{l_0} \quad (2.19)$$

$$M_{fmin} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{ap\ min} \cdot l}{2} \cdot \frac{l_1}{l_0}$$

$$\sigma_{fmin} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P_{ap\ min} \cdot l}{b \cdot h^2} \cdot \frac{l_1}{l_0} \quad (2.20)$$

Para o plano horizontal, as tensões máximas e mínimas serão:

$$M_{fmax} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_a\ m\acute{a}x \cdot l}{2} \cdot \frac{l_0 - l_1}{l_0}$$

$$\sigma_{fmax} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P_a\ m\acute{a}x \cdot l}{b^2 \cdot h} \cdot \frac{l_0 - l_1}{l_0} \quad (2.21)$$

$$M_{fmin} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_a\ min \cdot l}{2} \cdot \frac{l_1}{l_0}$$

$$\sigma_{fmin} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P_a\ min \cdot l}{b^2 \cdot h} \cdot \frac{l_1}{l_0} \quad (2.22)$$

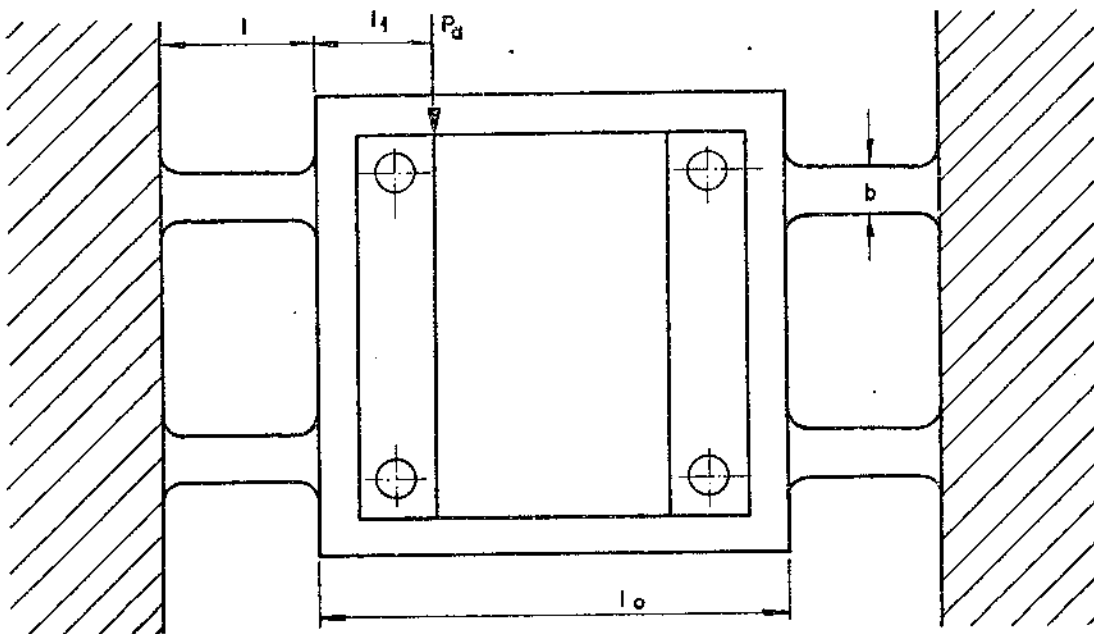
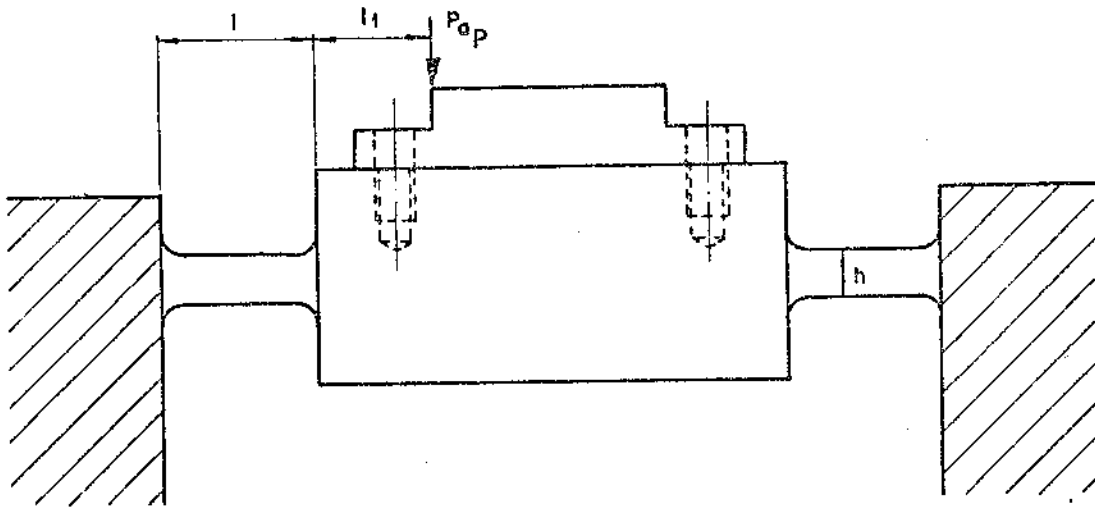


Figura 2.24- Esquema de aplicação das forças P_{ap} e P_a ,
na posição mais desfavorável.

Substituindo-se as equações (2.19) a (2.20) os valores numéricos do item 2.3.2, para a força de apoio P_{ap} , tem-se:

$$\sigma_{fm\acute{a}x} = \frac{3}{2} \cdot \frac{50.19,9}{5,3 \cdot 6,5^2} \cdot \frac{90 - 31}{90}$$

$$\sigma_{fm\acute{a}x} = 4,36 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\sigma_{fm\grave{i}n} = \frac{3}{2} \cdot \frac{2.19,9}{5,3 \cdot 6,5^2} \cdot \frac{31}{90}$$

$$\sigma_{fm\grave{i}n} = 0,091 \text{ kgf/mm}^2$$

Para a fôrça de avanço P_a :

$$\sigma_{fm\acute{a}x} = \frac{3}{2} \cdot \frac{25 \cdot 19,9}{5,3^2 \cdot 6,5} \cdot \frac{90 - 31}{90}$$

$$\sigma_{fm\acute{a}x} = 2,69 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\sigma_{fm\grave{i}n} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1 \cdot 19,9}{5,3^2 \cdot 6,5} \cdot \frac{31}{90}$$

$$\sigma_{fm\grave{i}n} = 0,056 \text{ kgf/mm}^2$$

A tensão máxima ser\u00e1

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 4,36 + 2,69 = 7,05 \text{ kgf/mm}^2$$

2.3.4- Escolha do material do dinamômetro

Como foi visto no item 2.3.2, os dinamômetros devem satisfazer, entre outros os seguintes requisitos [10]:

Histerese - elástica mínima

Linearidade da curva característica

Para que se tenha uma boa *linearidade*, utiliza-se aços cuja curva característica tensão-deformação, seja linear em longo trecho da mesma.

Normalmente estes aços apresentam também pequena *histerese-elástica*. São geralmente aços-liga com limites de elasticidade e fadiga elevados. Quando tratados termicamente, estas características são sensivelmente melhoradas.

Para se ter resultados satisfatórios, a tensão máxima de trabalho deve ser inferior a 1/3 da tensão de escoamento do material.

A tensão máxima de trabalho conforme item / 2.3.3 é $7,05 \text{ kgf/mm}^2$. Portanto de acordo com as considerações acima citadas, empregou-se o aço ABNT-4340, fornecido pela / Eletrometal Aços Finos S/A, cuja curva característica de tensão e deformação encontra-se abaixo (figura 2.25). Os dados abaixo relacionados e a curva características, foram determinados na Divisão de Ensaios de Materiais do Centro de Tecnologia da UNICAMP.

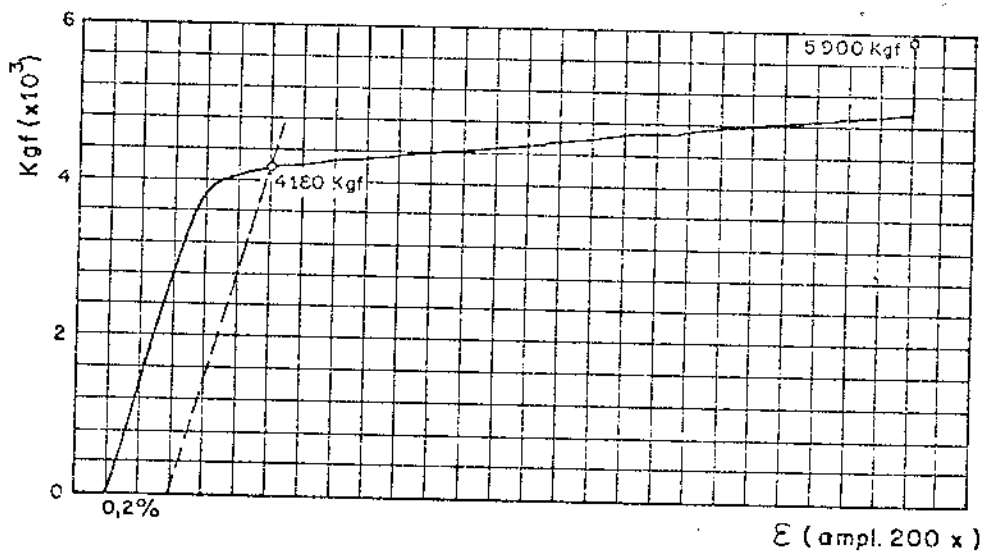


Figura 2.25- Curva característica de tensão e deformação.

Material: Aço ABNT-4340

Limite de escoamento : 57 kgf/mm^2

Limite de resistência : 81 kgf/mm^2

Alongamento - 19%

Estrição-45%

Módulo de elasticidade-2100 kgf/mm^2

A tensão de trabalho admitidas para este aço, segundo comentários anteriores é :

$\sigma_{adm} = 57/3 = 19 \text{ } kgf/mm^2$, satisfazendo plenamente as condições de trabalho.

2.3.5- Determinação das tensões na região de medida das lâminas.

Empregando-se extensômetros elétricos de dimensões 11 x 5 mm, a região média de medida situa-se aproximadamente (figura 2.26) à 4 mm do engastamento. Admitindo-se a distribuição de tensões linear ao longo da lâmina, a redução de tensão para a região média é:

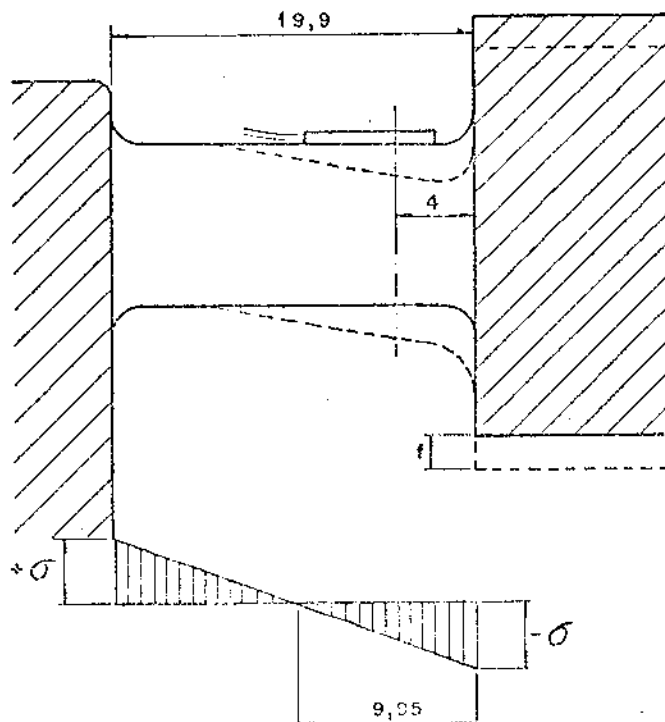


Figura 2.26- Colocação do extensômetro na lâmina.

$$r = \frac{9,95 - 4}{9,95} = 0,597$$

Logo, as tensões na região de medida para a /
fôrça P_{ap} , serão :

$$\sigma_{max} = 4,36 \cdot 0,597 = 2,60 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\sigma_{min} = 0,091 \cdot 0,597 = 0,0543 \text{ kgf/mm}^2$$

Para a fôrça P_a

$$\sigma_{max} = 2,69 \cdot 0,597 = 1,61 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\sigma_{min} = 0,056 \cdot 0,597 = 0,0334 \text{ kgf/mm}^2$$

Tabela II-3-Tensões calculadas na região de medida
do dinamômetro, para as forças de avan-
ço P_a e de apoio P_{ap} .

Componentes da força de usina gem	σ_{max} (kgf/cm ²)	σ_{min} (kgf/cm ²)
P_a	161	3,34
P_{ap}	260	5,43

2.3.6- Determinação das deformações da mesa dinamométrica

As deformações, às quais estarão sujeitos os extensômetros elétricos, não deverão exceder as deformações

máximas permissíveis, tornando-se assim necessária a determinação das deformações na região de medida do dinamômetro, através da equação :

$$\epsilon = \sigma \cdot E^{-1} , \quad (2.23)$$

onde :

$E \rightarrow$ módulo de elasticidade.

Deformações devido a força de avanço P_{α} :

$$\epsilon_{m\acute{a}x} = 161. (2,1 \times 10^6)^{-1} = 77 \mu d ,$$

$$\epsilon_{m\grave{i}n} = 3,34. (2,1 \times 10^6)^{-1} = 1,60 \mu d .$$

Deformações devido à força de apoio P_{ap} :

$$\epsilon_{m\acute{a}x} = 260. (2,1 \times 10^6)^{-1} = 124 \mu d ,$$

$$\epsilon_{m\grave{i}n} = 5,43. (2,1 \times 10^6)^{-1} = 2,60 \mu d .$$

Estes valores estão bem abaixo dos limites de deformações permissíveis pelos extensômetros elétricos.

2.3.7- Estimativa da Constante de Mola K

Para a determinação da constante elástica de mola K do dinamômetro, considerou-se também a lâmina como viga bi-engastada, constituída de uma única peça. A flexa do dinamômetro, devido a uma força de 50 kgf é dada pela expressão (figura 2.26), [8] :

$$f = \frac{P l^3}{b h^3 E} \quad (2.24)$$

Conforme foi visto anteriormente (ver fig.2.23) as dimensões da lâmina são :

$$l = 19,9\text{mm}$$

$$h = 6,5\text{mm}$$

$$b = 5,3\text{mm}$$

Substituindo na expressão (2.24) os valores numéricos acima, tem-se :

$$f = \frac{50 \times (19,9)^3}{4 \times 5,3 \times (6,5)^3 \times 21000}$$

$$f = 3,22\mu\text{m}$$

A constante elástica da mola é dada pela expressão :

$$k = \frac{P}{f} \quad (2.25)$$

Substituindo-se , tem-se :

$$k = \frac{50 \times 10000}{3,22}$$

$$k = 155280 \text{ kgf/cm} .$$

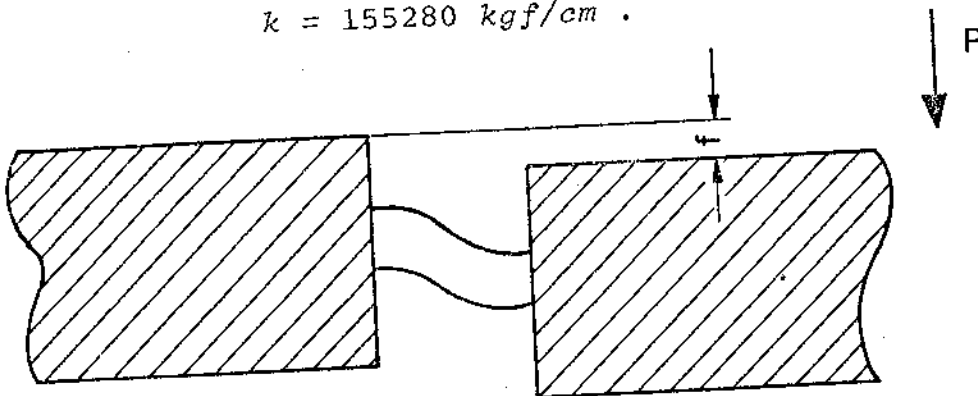


Figura 2.27- Lâmina solicitada por uma força P.

2.3.8- Estimativa da frequência natural de vibração

Como foi visto anteriormente no item 2.3.2 do capítulo II, a rigidez do dinamômetro deverá ser elevada, a fim de manter desprezível o erro dinâmico. Esta grandeza implica em um alto valor da constante de mola, e consequentemente, uma frequência natural de vibração elevada.

Para se estimar as frequências naturais utiliza-se a fórmula aproximada :

$$f_n = \frac{1}{2 \pi} \sqrt{\frac{K}{m}} , \quad (2.26)$$

onde m é a massa equivalente do sistema .

De acordo com a fig. 2.23 tem-se para o cálculo da massa equivalente :

$$m = \frac{V \cdot \rho}{g} , \quad (2.27)$$

onde :

$$V = \text{volume da mesa,} = 9.9.3,9 = 316 \text{ cm}^3 ,$$

$$\rho = \text{pêso específico} = 7,85 \text{ kgf/dm}^3 ,$$

$$g = \text{aceleração da gravidade} , = 980 \text{ cm/s}^2 .$$

$$m = \frac{V \cdot \rho}{g} = \frac{316 \times 7,85}{1000 \times 980} ,$$

$$m = 0,00253 \text{ kgf.s}^2/\text{cm}$$

Substituindo os valores numéricos na expressão (2.26) tem-se:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{155280}{0,00253}} = 1100 \text{ Hz}$$

$$f_n = 1100 \text{ Hz}$$

2.3.9- Desenho de conjunto do dinamômetro

A figura 2.28 nos dá o desenho de conjunto do dinamômetro, onde podemos observar a ligação elétrica dos extensômetros, assim como a capa de acrílico protetora. Os desenhos de detalhes encontram-se na seção de Desenvolvimento de Projetos do Centro de Tecnologia da UNICAMP.

2.3.10- Escolha do tipo de extensômetro

Levando-se em consideração as dimensões reduzidas da lâmina, onde são colados os extensômetros, e do difícil acesso aos mesmos, foram utilizados os extensômetros / PHILIPS tipo PR 9833K/03 Fe cujas características encontram-se relacionadas abaixo: [9]

tipo.....	chapa metálica
resistência nominal.....	121,1 ± 0,25%Ω
coeficiente de sensibilidade K.....	2,00 ± 1%
máxima deformação	acima de 4000 μd
corrente máxima admissível (no aço)	20 mA
largura	5mm
comprimento	11mm

Estes extensômetros foram de um mesmo lote de fabricação, o que possibilitou um balanceamento melhor nas pontes amplificadoras utilizadas.

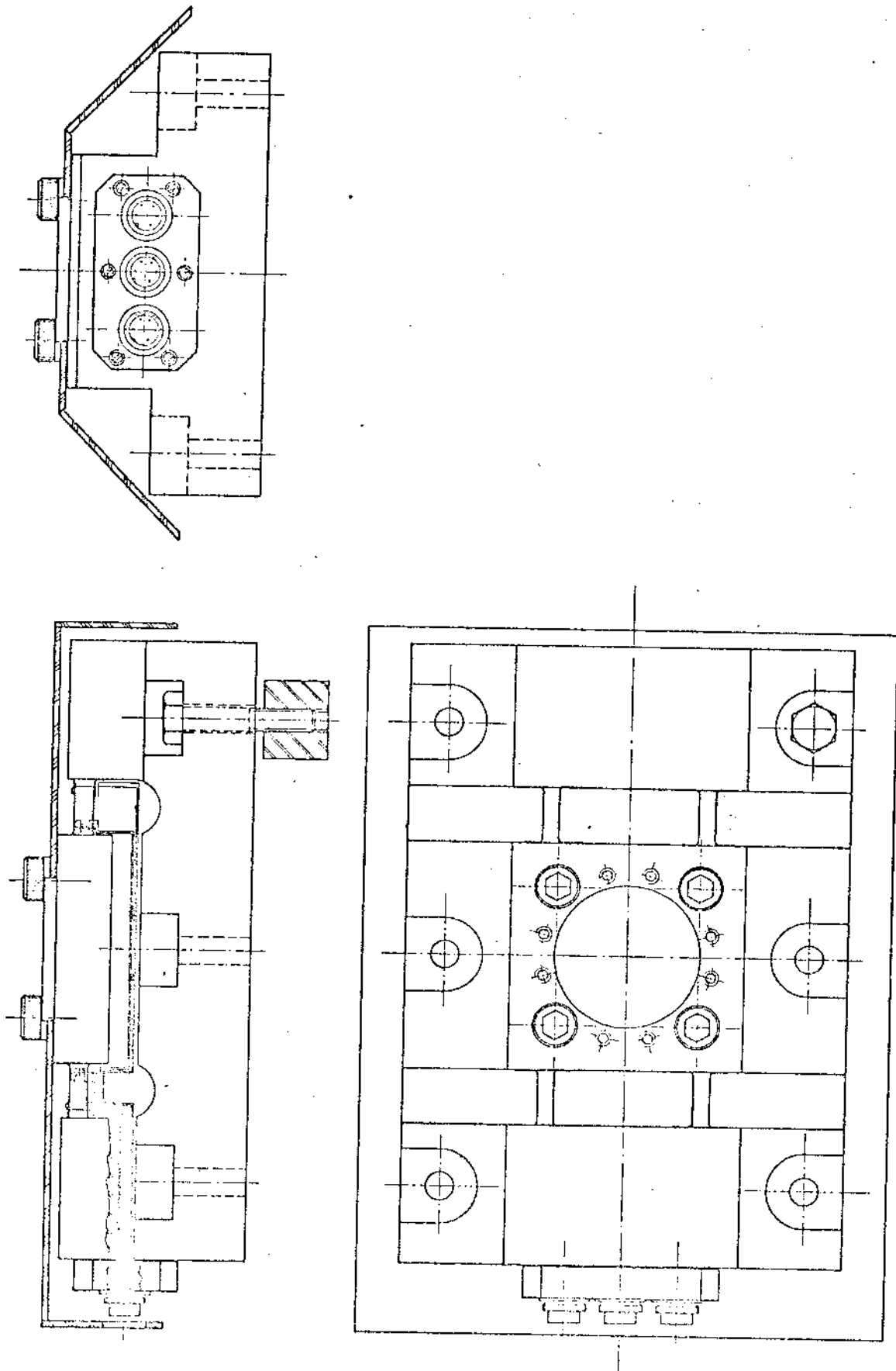


Fig. 2-28- Dinamômetro para determinação de 2 componentes da força de usinagem no processo de retificação plana tangencial.

2.3.11- Esquema das ligações dos extensômetros

2.3.11.1- Para a detecção da força de avanço P_a

A figura 2.29, apresenta esquemáticamente a disposição dos extensômetros na região de medida e o circuito de ligação elétrico utilizado.

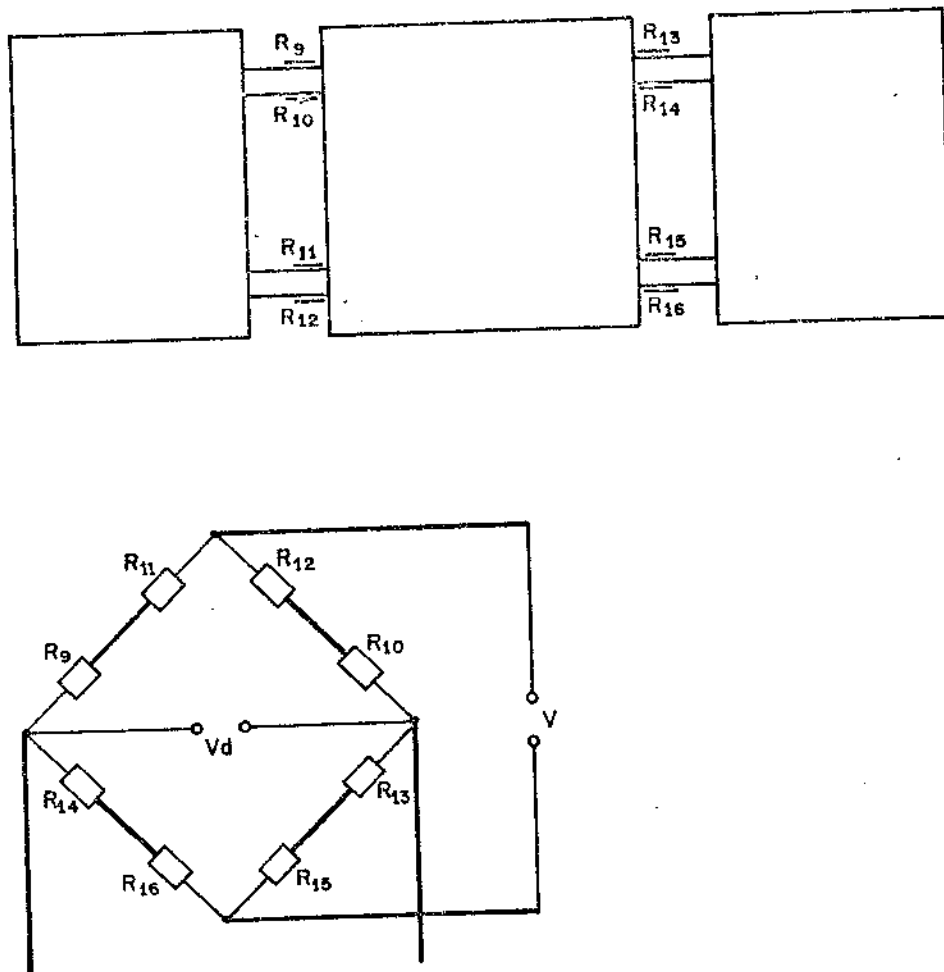


Figura 2.29- Disposição dos extensômetros na lâmina e circuito elétrico utilizado.

No posicionamento e colagem dos extensômetros, foi tomado o cuidado para que não houvesse interferência entre as duas componentes da força, qualidade muito importante na execução de dinamômetros.

A figura 2.29 apresenta o esquema de ligação utilizado para detecção da força de avanço P_a . A variação da tensão de saída é dada pela seguinte equação [2]:

$$\Delta V_d = \frac{1}{2} V \cdot k \cdot \epsilon_\alpha \quad (2.28)$$

2.3.11.2- Para a detecção da força de apoio P_{ap}

As figuras 2.30 e 2.31, apresentam esquemáticamente a disposição dos extensômetros na região da medida e o circuito de ligação elétrico utilizado.

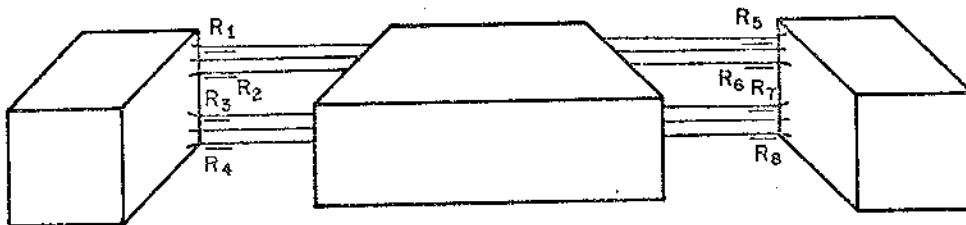


Figura 2.30- Disposição dos extensômetros na lâmina.

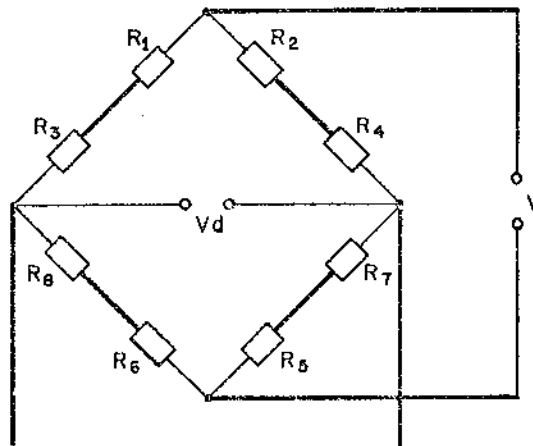


Figura 2.31- Circuito elétrico utilizado.

A fig. 2.31 apresenta o esquema de ligação utilizado para detecção da força de apoio P_{ap} . A variação da tensão de saída é dada pela seguinte equação:

$$\Delta Vd = \frac{1}{2} V.K.\epsilon_{ap} \quad (2.29)$$

2.3.12- *Previsão das Características do sistema de medida, empregando-se extensômetros elétricos*

2.3.12.1- *Sensibilidade*

A sensibilidade é definida para um instrumento de medida, como a relação entre a variação da indicação dL e a variação da grandeza a medir dP :

$$S = \frac{dL}{dP}$$

Como o sistema é constituído de dinamômetro, e ponte amplificadora, com características lineares, tem-se a expressão;

$$S = \frac{L}{P} \quad (2.30)$$

L - leitura na ponte amplificadora em divisões, micro-deformações ou milivolts.

P - força aplicada em kgf .

2.3.12.2- Para a força de avanço P_a

Através dos estudos anteriores item 2.3.6, relativo à estimativa das deformações na região de medida, tem-se para uma força $P_a = 25 \text{ kgf}$ a deformação de $77 \mu\text{d}$.

Substituindo os valores numéricos na equação (2.28) do item 2.3.11.1, tem-se a leitura do sinal de saída / para a ponte amplificadora Philips com alimentação de 4 volts, tem-se :

$$\Delta Vd = 0,5 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 77 \cdot 10^{-3} = 0,31 \text{ mV}.$$

Portanto a sensibilidade será :

$$s = \frac{0,31}{25} = 0,31 \cdot 25^{-1} = 0,0124 \text{ mV/kgf}.$$

Utilizando-se uma amplificação de fundo de escala de 1 mV na ponte amplificadora de 50 divisões; a leitura para $P_a = 25 \text{ kgf}$ será de 16 divisões.

Para uma divisão de escala do mostrador a leitura será :

$$P_{a \text{ min}} = 25 \cdot 16^{-1} \approx 1,5 \text{ kgf}$$

Desta forma tem-se o valor da força mínima de avanço, coerente com as condições mínimas de trabalho item / 2.3.1.1. Utilizando-se ampliações maiores, pode-se medir forças de menor valor.

2.3.12.3- Para a força de apoio P_{ap}

De acordo com o item 2.3.6, tem-se para uma força $P_{ap} = 50 \text{ kgf}$, uma deformação de $124 \mu\text{d}$. A leitura na ponte amplificadora será :

$$\Delta V_d = 0,5 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 124 \cdot 10^{-3} = 0,50 \text{ mV.}$$

Portanto a sensibilidade será:

$$S = \frac{0,50}{50} = 0,50 \cdot 50^{-1} = 0,010 \text{ mV/kgf}$$

Utilizando-se uma amplificação de fundo de escala de 1 mV na ponte amplificadora de 50 divisões; a leitura para $P_{ap} = 50 \text{ kgf}$ será de 25 divisões. Para uma divisão da escala do mostrador a leitura será:

$$P_{ap \text{ min}} = 50 \cdot 25^{-1} = 2,0 \text{ kgf}$$

2.3.13- Estudo analítico das solicitações nas lâminas

- $P_{ap i}$ - força devido à força de apoio
- $P_{a i}$ - força devido à força de avanço
- W_i - força devido ao momento proveniente da força de avanço aplicada, acima do plano das lâminas

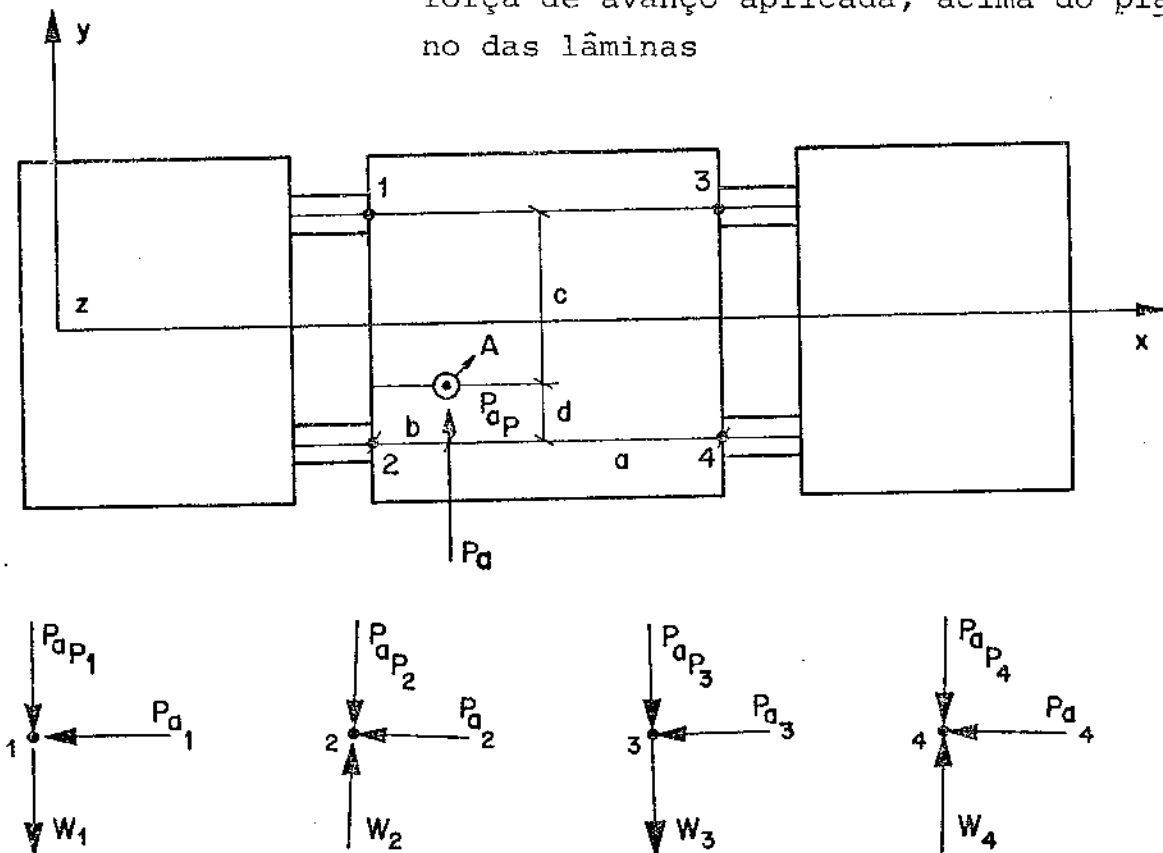
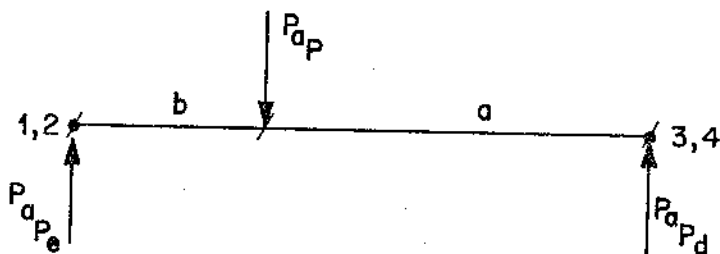


Figura 2.32- Forças aplicadas em um ponto qualquer da mesa dinamométrica.

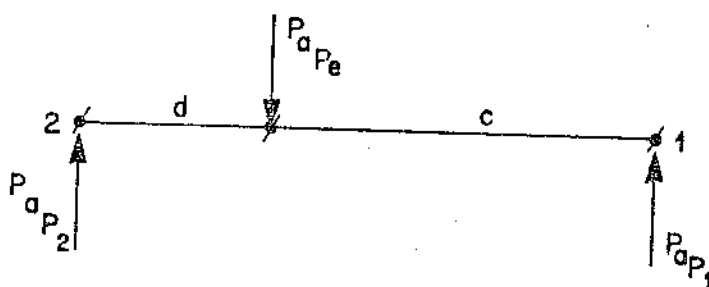
De acordo com a figura 2.32 tem-se as seguintes equações [11] :

Forças nos pontos 1,2,3 e 4 devido à P_{ap}



$$P_{ap_e} (a + b) = P_{ap} \cdot a \rightarrow P_{ap_e} = \frac{P_{ap} \cdot a}{(a + b)} \quad (2.31)$$

$$P_{ap_d} (a + b) = P_{ap} \cdot b \rightarrow P_{ap_d} = \frac{P_{ap} \cdot b}{(a + b)} \quad (2.32)$$



$$P_{ap_2} (c + d) = P_{ap_e} \cdot c \rightarrow P_{ap_2} = \frac{P_{ap_e} \cdot c}{(c + d)} \quad (2.33)$$

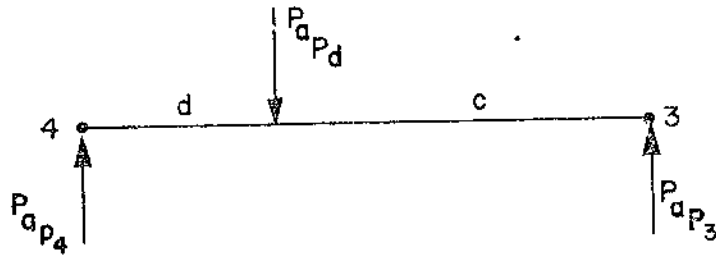
Substituindo-se P_{ap_e} tem-se.

$$P_{ap_2} = \frac{P_{ap} \cdot a \cdot c}{(c + d)(a + b)} \quad (2.34)$$

$$P_{ap_1} \cdot (c + d) = P_{ap_e} \cdot d \rightarrow P_{ap_1} = \frac{P_{ap_e} \cdot d}{(c + d)} \quad (2.35)$$

Substituindo-se P_{ap_e} tem-se :

$$P_{ap_1} = \frac{P_{ap} \cdot a \cdot d}{(c + d)(a + b)} \quad (2.36)$$



$$P_{ap_4} \cdot (c + d) = P_{ap_d} \cdot c \quad \rightarrow \quad P_{ap_4} = \frac{P_{ap_d} \cdot c}{(c + d)} \quad (2.37)$$

Substituindo-se P_{ap_d} tem-se:

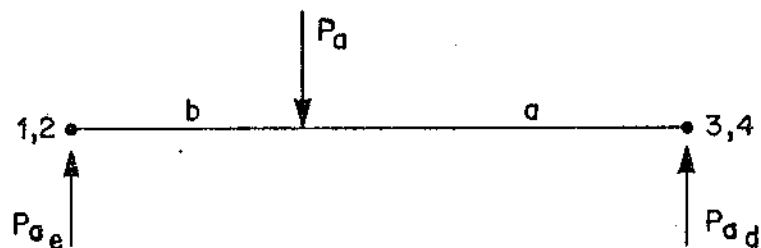
$$P_{ap_4} = \frac{P_{ap} \cdot b \cdot c}{(c + d)(a + b)} \quad (2.38)$$

$$P_{ap_3} (c + d) = P_{ap_d} \cdot d \quad \rightarrow \quad P_{ap_3} = \frac{P_{ap_d} \cdot d}{(c + d)} \quad (2.39)$$

Substituindo P_{ap_d} tem-se:

$$P_{ap_3} = \frac{P_{ap} \cdot b \cdot d}{(c + d)(a + b)} \quad (2.40)$$

Forças nos pontos 1,2,3 e 4 devido à P_a



$$P_{a_e} \cdot (a + b) = P_a \cdot a \quad \rightarrow \quad P_{a_e} = \frac{P_a \cdot a}{(a + b)} \quad (2.41)$$

$$P_{a_d} \cdot (a + b) = P_a \cdot b \quad \rightarrow \quad P_{a_d} = \frac{P_a \cdot b}{(a + b)} \quad (2.42)$$

$$P_{a_1} = x P_{a_e}$$

$$P_{a_2} = y P_{a_e}$$

$$x = y = 1/2$$

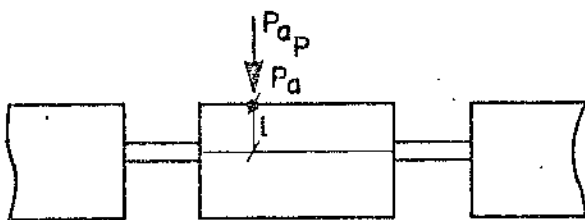
$$x + y = 1$$

$$P_{a_3} = m P_{a_d}$$

$$P_{a_4} = n P_{a_d}$$

$$m = n = 1/2$$

$$m + n = 1$$



$$M_e + M_d = P_a \cdot l$$

$$M_e = P_a \cdot l \cdot p \quad , \quad \text{onde } p = \frac{a}{a + b}$$

$$M_d = P_a \cdot l \cdot q \quad , \quad \text{onde } q = \frac{b}{a + b}$$

$$p + q = 1$$

$$M_e = W_1 (c + d) \rightarrow W_1 = \frac{M_e}{c + d} \quad (2.43)$$

$$W_1 = W_2$$

$$M_e = W_2 (d + c) \rightarrow W_2 = \frac{M_e}{d + c} \quad (2.44)$$

$$M_d = W_3 (c + d) \rightarrow W_3 = \frac{M_d}{c + d} \quad (2.45)$$

$$W_3 = W_4$$

$$M_d = W_4 (d + c) \rightarrow W_4 = \frac{M_d}{d + c} \quad (2.46)$$

As deformações provenientes destas forças serão (fig.2.30)

$$\epsilon_1 = \vec{k} (P_{ap_1} + W_1)$$

$$\epsilon_2 = -\vec{k} (P_{ap_1} + W_1)$$

$$\epsilon_3 = \vec{k} (P_{ap_2} - W_2)$$

$$\epsilon_4 = -\vec{k} (P_{ap_2} - W_2)$$

$$\epsilon_5 = \vec{k} (P_{ap_3} + W_3)$$

$$\epsilon_6 = -\vec{k} (P_{ap_3} + W_3)$$

$$\epsilon_7 = \vec{k} (P_{ap_4} - W_4)$$

$$\epsilon_8 = -\vec{k} (P_{ap_4} - W_4)$$

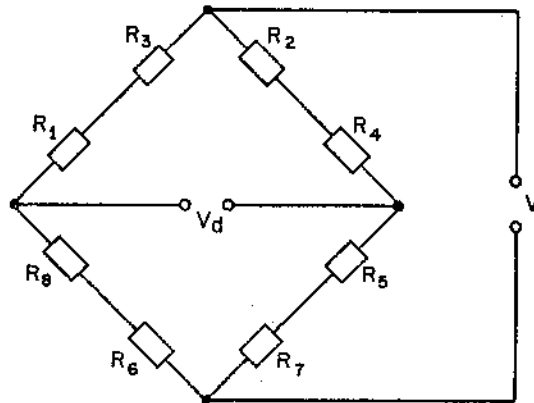


Figura 2.33- Circuito de ligação relativo à força de apoio P_{ap} .

De acôrdo com a fórmula, a leitura na ponte amplificadora será :

$$\begin{aligned} \Delta V_d &= \frac{kV}{4} (\varepsilon_1 + \varepsilon_3 + \varepsilon_5 + \varepsilon_7 - \varepsilon_2 - \varepsilon_4 - \varepsilon_6 - \varepsilon_8) \\ &= \frac{kV}{4} (P_{p_1} + W_1 + P_{p_2} - W_2 + P_{p_3} + W_3 + P_{p_4} - W_4 + P_{p_1} + W_1 + P_{p_2} - W_2 + P_{p_3} + W_3 + P_{p_4} - W_4) \\ &= \frac{kV}{4} (2P_{ap_1} + 2P_{ap_2} + 2P_{ap_3} + 2P_{ap_4} + 2W_1 + 2W_3 - 2W_2 - 2W_4) \end{aligned}$$

Como $W_1 = W_2$ e $W_3 = W_4$,

tem-se :

$$\Delta V_d = \frac{kV}{4} \left(2P_{ap_1} + 2P_{ap_2} + 2P_{ap_3} + 2P_{ap_4} + \frac{2P_a \sqrt{p}}{e+d} + \frac{2P_a \sqrt{q}}{e+d} - \frac{2P_a \sqrt{p}}{e+d} - \frac{2P_a \sqrt{q}}{e+d} \right)$$

$$= \frac{k \cdot V \cdot Z}{A \cdot 2} (P_{ap_1} + P_{ap_2} + P_{ap_3} + P_{ap_4})$$

$$= \frac{k \cdot V}{2} (P_{ap_1} + P_{ap_2} + P_{ap_3} + P_{ap_4})$$

$$P_{ap_1} + P_{ap_2} + P_{ap_3} + P_{ap_4} = \frac{P_{ap} \cdot a \cdot d}{(e+d)(a+b)} + \frac{P_{ap} \cdot a \cdot e}{(e+d)(a+b)} + \frac{P_{ap} \cdot b \cdot d}{(e+d)(a+b)} + \frac{P_{ap} \cdot b \cdot e}{(e+d)(a+b)}$$

$$P_{ap_1} + P_{ap_2} + P_{ap_3} + P_{ap_4} = P_{ap} \left(\frac{ad + ae + bd + eb}{(e+d)(a+b)} \right) = P_{ap} \left(\frac{\cancel{ad} + \cancel{ae} + \cancel{bd} + \cancel{eb}}{\cancel{ad} + \cancel{ae} + \cancel{bd} + \cancel{eb}} \right) = P_{ap}$$

$$\Delta V_d = \frac{kV P_{ap}}{2}$$

$$\Delta V_d = 0,5 \cdot k \cdot V \cdot \epsilon_{ap}$$

Logo, conclui-se que a força de apoio P_{ap} é independente P_a, W, a, b, e, d e l . Isto permite afirmar que a leitura na ponte amplificadora, devido à força de apoio P_{ap} é independente de sua aplicação na mesa dinamométrica, como também da força de avanço P_a .

As deformações provenientes da força de avanço P_a são (fig. 2.28)

$$\begin{aligned} \epsilon_9 &= - \vec{J} P_{a_1} & \epsilon_{13} &= - \vec{J} P_{a_3} \\ \epsilon_{10} &= \vec{J} P_{a_1} & \epsilon_{14} &= \vec{J} P_{a_3} \\ \epsilon_{11} &= - \vec{J} P_{a_2} & \epsilon_{15} &= - \vec{J} P_{a_4} \\ \epsilon_{12} &= \vec{J} P_{a_2} & \epsilon_{16} &= \vec{J} P_{a_4} \end{aligned}$$

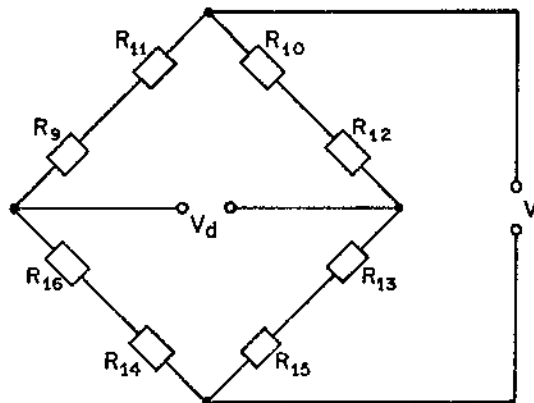


Figura 2.34- Circuito de ligação relativo à força de avanço P_a .

A leitura correspondente, na ponte amplificada ra será :

$$\Delta V_d = \frac{Vk}{4} (\epsilon_9 + \epsilon_{11} + \epsilon_{13} + \epsilon_{15} - \epsilon_{10} - \epsilon_{12} - \epsilon_{14} - \epsilon_{16})$$

$$\Delta V_d = \frac{Vk}{4} (-P_{a_1} - P_{a_2} - P_{a_3} - P_{a_4} - P_{a_1} - P_{a_2} - P_{a_3} - P_{a_4})$$

$$\Delta V_d = \frac{Vk}{4} (-2P_{a_1} - 2P_{a_2} - 2P_{a_3} - 2P_{a_4})$$

$$\Delta V_d = -\frac{Vk}{2} (P_{a_1} + P_{a_2} + P_{a_3} + P_{a_4})$$

$$P_{a_1} + P_{a_2} + P_{a_3} + P_{a_4} = \frac{P \cdot a \cdot x}{(a+b)} + \frac{P \cdot a \cdot y}{(a+b)} + \frac{P \cdot b \cdot m}{(a+b)} + \frac{P \cdot b \cdot r}{(a+b)}$$

$$P_{a_1} + P_{a_2} + P_{a_3} + P_{a_4} = \frac{(x+y)(P \cdot a)}{(a+b)} + \frac{(m+n)(P \cdot b)}{(a+b)}$$

$$P_{a_1} + P_{a_2} + P_{a_3} + P_{a_4} = \frac{P_a \cdot a + P_a \cdot b}{(a + b)}$$

$$P_{a_1} + P_{a_2} + P_{a_3} + P_{a_4} = P_a$$

$$\Delta V_d = \frac{V k P_a}{2}$$

$$\Delta V_d = - 0,5 \cdot V \cdot k \cdot \epsilon_a$$

Da mesma forma anterior, a força avanço P_a é independente de P_{ap} , W , a , b , d e l . Portanto as leituras na ponte amplificadora, devidas à força de avanço P_a , independem da sua aplicação na mesa dinamométrica.

C A P Í T U L O I I I

A F E R I Ç Ã O E S T Á T I C A D O D I N A M Ô M E T R O

3.1- Generalidades

Na construção de dinamômetros, torna-se necessário a determinação das *curvas de aferição* do mesmo. Estas curvas de aferição, indicam a relação existente entre as leituras nas pontes amplificadoras e as forças aplicadas.

Para a determinação destas curvas de aferição, foi construído um dispositivo (fig. 3.1), destinado à aferição da força de avanço e da força de apoio. Este dispositivo, possui na direção de avanço, um anel dinamométrico de capacidade 50 *kgf*, ao qual estão colados extensômetros ligados em circuito de ponte de Wheaststone; previamente aferido. A estrutura e a haste metálica são de construção rígida, afim de se manter pequenas as deformações elásticas. O rolamento autocompensador é utilizado, afim de reduzir o erro proveniente do atrito. Este rolamento autocompensador é perfeitamente posicionado na haste metálica. Na direção perpendicular à direção de avanço foi construída uma balança de construção relativamente simples porém rígida, a qual aplica carga no dinamômetro diretamente, através de cutelo.

Os esforços são exercidos, utilizando-se pêsos, previamente aferidos no Instituto de Pêsos e Medidas de Campinas.

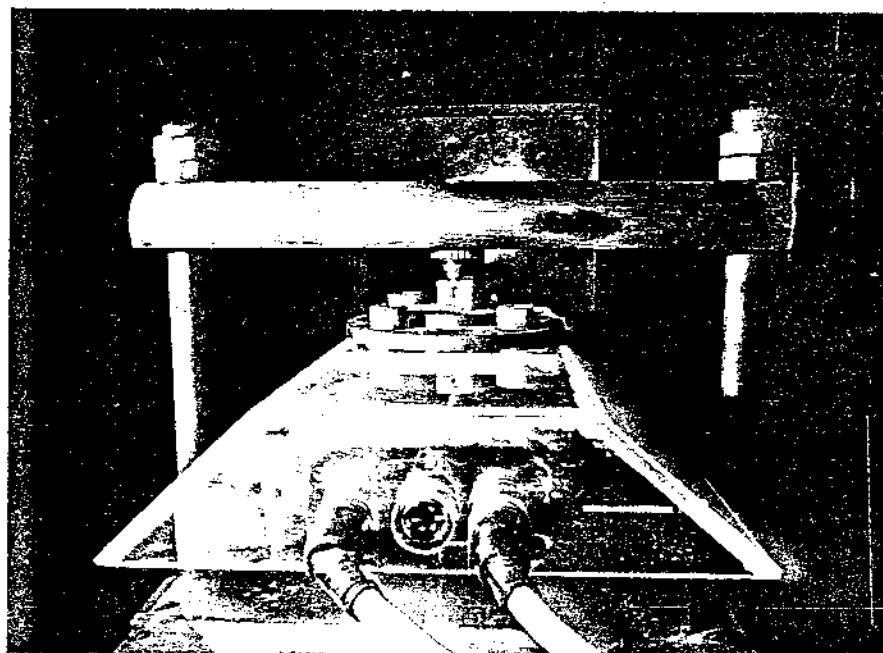
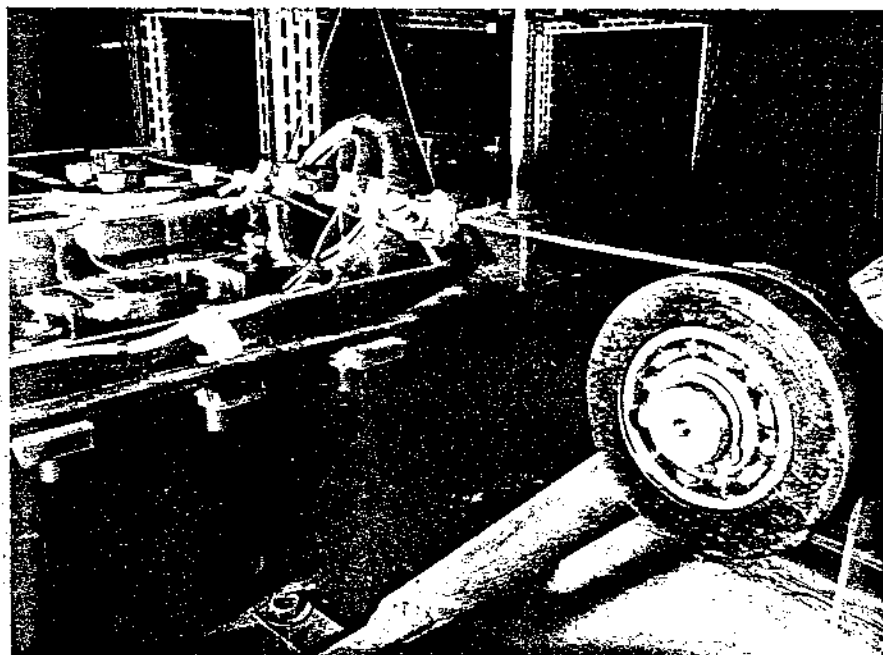


Figura 3.1- Dispositivos de aferição do dinamômetro.

3.2- Análise de regressão

Pares de valores, foram obtidos durante a aferição estática do dinamômetro e do anel dinamométrico. Para representar da melhor maneira estes conjuntos, foram determinadas as retas médias aplicando-se a análise de regressão [12].

Uma análise de regressão consiste em obter a função na forma linear:

$$y(x) = \phi(x) + \xi \sigma \quad (3.1)$$

Como observamos, no modelo da análise de regressão, o valor $y(x)$ é suposto formado pela adição de duas componentes :

1) A componente funcional $\phi(x) = \mu(y/x)$; ou regressão, que representa a influência da variável independente x sobre o valor de y e define o eixo da nuvem de pontos representativa da lei estatística.

2) A componente aleatória $\xi \sigma$, que representa a influência de outros fatores, além da variável independente e também os erros existentes na medição de y . Esta componente determina o afastamento entre cada ponto e o eixo da nuvem representativa da lei estatística.

3.2.1- Regressão linear

Seja a função que se quer obter :

$$y(x) = \alpha + \beta (x - \bar{x}) + \xi \sigma \quad (3.2)$$

onde a partir de uma amostra de n pares de valores, nos dá a distribuição de y para cada x [13]

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$$
$$y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$$

onde α , β e σ são os parâmetros da distribuição. Designemos por a , b e S as estimativas de α , β e σ , respectivamente.

Fazendo-se n medidas de uma grandeza, e sendo / possível considerar essas n medidas como de mesma precisão, o valor mais provável da grandeza é a média aritmética dos valores obtidos.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \tag{3.3}$$

Aplicando os teoremas da média e da variância e o método dos mínimos quadrados, tem-se os valores :

$$a = \bar{y} = \frac{\sum y_i}{n} \tag{3.4}$$

$$b = \frac{\sum y_i (x_i - \bar{x})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \tag{3.5}$$

resultando, para a estimativa da regressão

$$y_{i \text{ calc.}} = \bar{y} + b(x_i - \bar{x}) \tag{3.6}$$

podemos então obter a estimativa da média de y .

$$\mu(y) = \alpha + \beta(x_i - \bar{x}) \tag{3.7}$$

apresentando uma distribuição por amostragem de variância.

$$\sigma^2(y_{i_{calc}}) = \sigma^2(\bar{y}) + (x_i - \bar{x})^2 \sigma^2 = \sigma^2 \left[\frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{S_{xx}} \right] \quad (3.8)$$

Sendo as variáveis $y_{i_{calc}}$, \bar{y} e b , os resultados da soma das variáveis aleatórias independentes, deverão/pelo teorema do limite central, apresentar distribuição / normal em grandes amostras. Pode-se então calcular o intervalo de confiança das mesmas, com probabilidade p . Aplicando esta conclusão, temos os seguintes intervalos de - confiança:

$$\bar{y} - \xi_p \frac{\sigma}{\sqrt{n}} < \alpha < \bar{y} + \xi_p \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3.9)$$

$$b - \xi_p \frac{\sigma}{\sqrt{S_{xx}}} < \beta < b + \xi_p \frac{\sigma}{\sqrt{S_{xx}}} \quad (3.10)$$

$$y_{i_{calc}} - \xi_p \sigma \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{S_{xx}}} < \mu (y/x_i) < y_{i_{calc}} + \xi_p \sigma \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{S_{xx}}} \quad (3.11)$$

onde :

$$S_{xx} = \sum (x_i - \bar{x})^2 = \sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n} \quad (3.12)$$

$$S_{xy} = \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \cdot \sum y_i}{n} \quad (3.13)$$

$$S_{yy} = \sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n} \quad (3.14)$$

$$b = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad (3.15)$$

Podemos aplicar estas equações substituindo σ por sua estimativa S ; quando esta for calculada a partir de uma grande amostra $n > 30$ (mais do que 30 graus de liberdade).

$$s^2 = \frac{S_{yy} - b^2 S_{xx}}{n - 2} = \frac{S_{yy} - b S_{xy}}{n - 2} = \frac{S_{yy} - (S_{xy})^2 / S_{xx}}{n - 2}$$

$$S = \sqrt{\frac{S_{yy} - \frac{(S_{xy})^2}{S_{xx}}}{n - 2}} \quad (3.16)$$

Quando temos uma estimativa S de σ , obtida a partir de uma pequena amostra, podemos substituir σ por S e $\xi_p /$ por t_p . O valor de t_p é obtido em tabela com 95% de confiança, em função do número de graus de liberdade de S , que no caso da regressão linear é igual a $n - 2$.

Temos então os intervalos de confiança:

$$\bar{y} - t_p \frac{S}{\sqrt{n}} < \alpha < \bar{y} + t_p \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (3.17)$$

$$b - t_p \frac{S}{\sqrt{S_{xx}}} < \beta < b + t_p \frac{S}{\sqrt{S_{xx}}} \quad (3.18)$$

$$y_{i\text{ calc}} - t_p S \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{S_{xx}}} < \mu(y/x_i) < y_{i\text{ calc}} + t_p S \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{S_{xx}}} \quad (3.19)$$

O intervalo de confiança de $\mu(y/x_i)$, por sua vez permite calcular entre que limites estará $\mu(y)$ para um dado x_i , bastando substituir na expressão deste intervalo $y_{i\text{ calc}}$ por seu valor $\bar{y} + b(x_i - \bar{x})$.

Analisando este intervalo de confiança, obtemos algumas conclusões de interesse prático. Assim a previsão da estimativa de $\mu(y/x_i)$ de um modo geral, será tanto maior / quanto :

a) menor for S , isto é, quanto mais reduzida / for a dispersão dos valores observados na amostra sobre a regressão.

b) maior for n , isto é, o número de observações da amostra.

c) maior for $S_{xx} = \sum (x_i - \bar{x})^2$, isto é, a dispersão dos valores observados de x_i sobre sua média \bar{x} .

Por outro lado, a precisão na estimativa de $\mu(y/x_i)$ depende do valor de x_i , sendo tanto menor quanto maior for $(x_i - \bar{x})$.

3.2.1.1- Inversão da reta regressão

A reta de regressão dada pela expressão.....
 $y_i = f(x_i)$, onde y_i é uma variável aleatória, correspondente / a um dado valor de x_i variável não aleatória; para a inversão da reta de regressão torna-se necessária a determinação / da função $x_i = f(y_i)$. O intervalo de confiança da função ...
 $x_i = f(y_i)$ é estimado utilizando o teorema de Fieller [14,15].

Seja a reta regressão

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

obtida a partir do conjunto de pontos

$$\begin{array}{ccccccc} x_1 & - & y_{11} & , & y_{12} & \dots\dots\dots & y_{1n_1} \\ x_2 & - & y_{21} & , & y_{22} & \dots\dots\dots & y_{2n_2} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_k & - & y_{k1} & , & y_{k2} & \dots\dots\dots & y_{kn_k} \end{array}$$

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

Aplicando o *teorema de Fieller* tem-se a equação da *reta inversa*.

$$x_i = \bar{x} + \frac{b(\hat{y}_i - a)}{b^2 - \frac{t^2 S_*^2}{k \sum_{i=1} n_i (x_i - \bar{x})^2}} , \quad (3.20)$$

O erro de x_i será dado por:

$$\Delta x_i = \frac{t S_*}{b^2 - \frac{t^2 S_*^2}{k \sum_{i=1} n_i (x_i - \bar{x})^2}} \left\{ \left[b^2 - \frac{t^2 S_*^2}{k \sum_{i=1} n_i (x_i - \bar{x})^2} \right] \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{n} \right) + \frac{(\hat{y}_i - a)^2}{k \sum_{i=1} n_i (x_i - \bar{x})^2} \right\}^{1/2} . \quad (3.21)$$

\bar{y}_i - média baseada em m observações, todas elas pressupostas como provenientes de um mesmo, porém desconhecido valor de x_i .

Tem-se as relações :

$$n = \sum_{i=1}^k n_i, \quad (3.22)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i x_i}{n}, \quad (3.23)$$

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}}{n_i}, \quad (3.24)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^k y_i}{k}, \quad (3.25)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^k n_i (x_i - \bar{x}) y_i}{\sum_{i=1}^k n_i (x_i - \bar{x})^2}. \quad (3.26)$$

Como vimos anteriormente :

$$\begin{aligned} t &= \xi_p && \text{para } n > 30 \\ t &= t_p && \text{para } n < 30 \end{aligned}$$

$$S_*^2 = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{n - k} \quad (3.27)$$

3.3- Aferição do Anel Dinamométrico

Foi projetado e construído um anel dinamométrico, com capacidade de 50 Kgf e adotadas as dimensões abaixo / descritas:

diâmetro externo de (mm) - 64

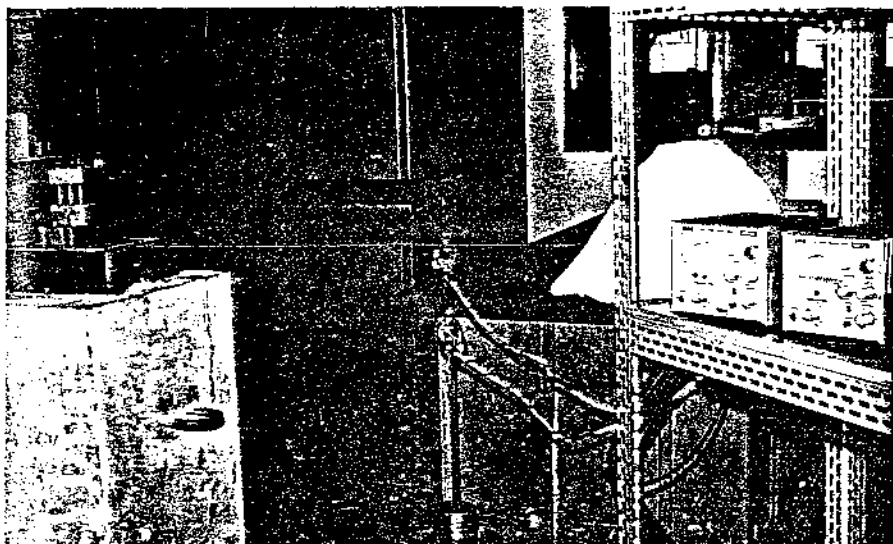
diâmetro interno d_i (mm) - 56

largura b_1 (mm) - 7

espessura e_1 (mm) - 4

material ABNT - 4340.

A aferição do anel dinamométrico foi realizada, utilizando-se uma ponta amplificadora *Philips* PR9307 e colocando-se no anel quatro extensômetros elétricos *Philips* PR9833K/03Fe em circuito de ponte de Wheatstone, conforme esquema abaixo.



Para os pares de valores P_i (carga aplicada no dinamômetro em kgf) e L_i (leitura na ponte amplificadora em milivolts), determinou-se a reta média utilizando o teorema de *Fieller* (item 3.2.1.1). A amplificação utilizada na ponte amplificadora, foi de 5 mV para o fundo da escala.

Tabela III-1- Valores das leituras obtidas na aferição do anel

Carga (Kgf)	Leitura (mV)	Leitura (mV)	Leitura (mV)	Leitura (mV)	\bar{y}_i
0	0,00	0,05	0,00	0,05	0,025
2	0,30	0,30	0,30	0,30	0,300
4	0,60	0,60	0,55	0,60	0,587
6	0,90	0,85	0,85	0,85	0,862
8	1,15	1,15	1,15	1,15	1,150
9	1,30	1,30	1,30	1,30	1,300
10	1,45	1,50	1,45	1,50	1,400
12	1,75	1,75	1,70	1,75	1,737
14	2,00	2,05	2,00	2,05	2,025
16	2,30	2,30	2,30	2,30	2,300
17	2,45	2,45	2,45	2,45	2,450
18	2,60	2,60	2,60	2,60	2,600
20	2,90	2,90	2,90	2,90	2,900
22	3,15	3,20	3,15	3,20	3,175
24	3,45	3,45	3,45	3,45	3,450
25	3,60	3,60	3,60	3,60	3,600
26	3,75	3,75	3,80	3,75	3,762
28	4,00	4,05	4,00	4,05	4,025
30	4,30	4,30	4,30	4,30	4,300
32	4,60	4,60	4,60	4,60	4,600
33	4,75	4,75	4,75	4,75	4,750

tem-se assim :

$$k = 21 (\text{número de variáveis independentes})$$

$$n_i = 4 (\text{número de observações para cada carga})$$

$$n = 84 (\text{número total de observações})$$

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

Aplicando o teorema de *Fieller* às equações
(3.22) à (3.27) tem-se :

$$\sum_{i=1}^k n_i (x_i - \bar{x}) y_i = 1168,648$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i x_i}{n} = \frac{4 \times 356}{84} = 16,95$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^k \bar{y}_i}{k} = \frac{51,298}{21} = 2,44$$

$$\sum_{i=1}^k n_i (x_i - \bar{x})^2 = 8026$$

$$S_*^2 = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{n - k} = \frac{0,044}{63} = 0,00069$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^k n_i (x_i - \bar{x}) y_i}{\sum_{i=1}^k n_i (x_i - \bar{x})^2} = \frac{1168,648}{8026} = 0,145$$

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{i,j} - \bar{y}_i)^2 = 0,044$$

$$n - k = 63$$

$$m = 1$$

Substituindo os valores obtidos nas equações.. (3.20) e (3.21) tem-se :

$$P_i = 16,95 + 6,94 (L_i - 2,44) , \quad (3.28)$$

$$\Delta P_i = 2,46 \sqrt{0,0211 + \frac{(L_i - 2,44)^2}{8026}} , \quad (3.29)$$

onde :

L_i = leitura na ponte amplificadora em milivolts

P_i = carga aplicada no anel, em kgf

ΔP_i = erro da carga aplicada P_i , em função de uma determinada leitura L_i no anel.

Para leituras na ponte amplificadora superiores a 1,5 mV, o erro relativo da carga P_i aplicada no anel é inferior a 3,5%, com 95% de confiança , conforme figura 3.3.

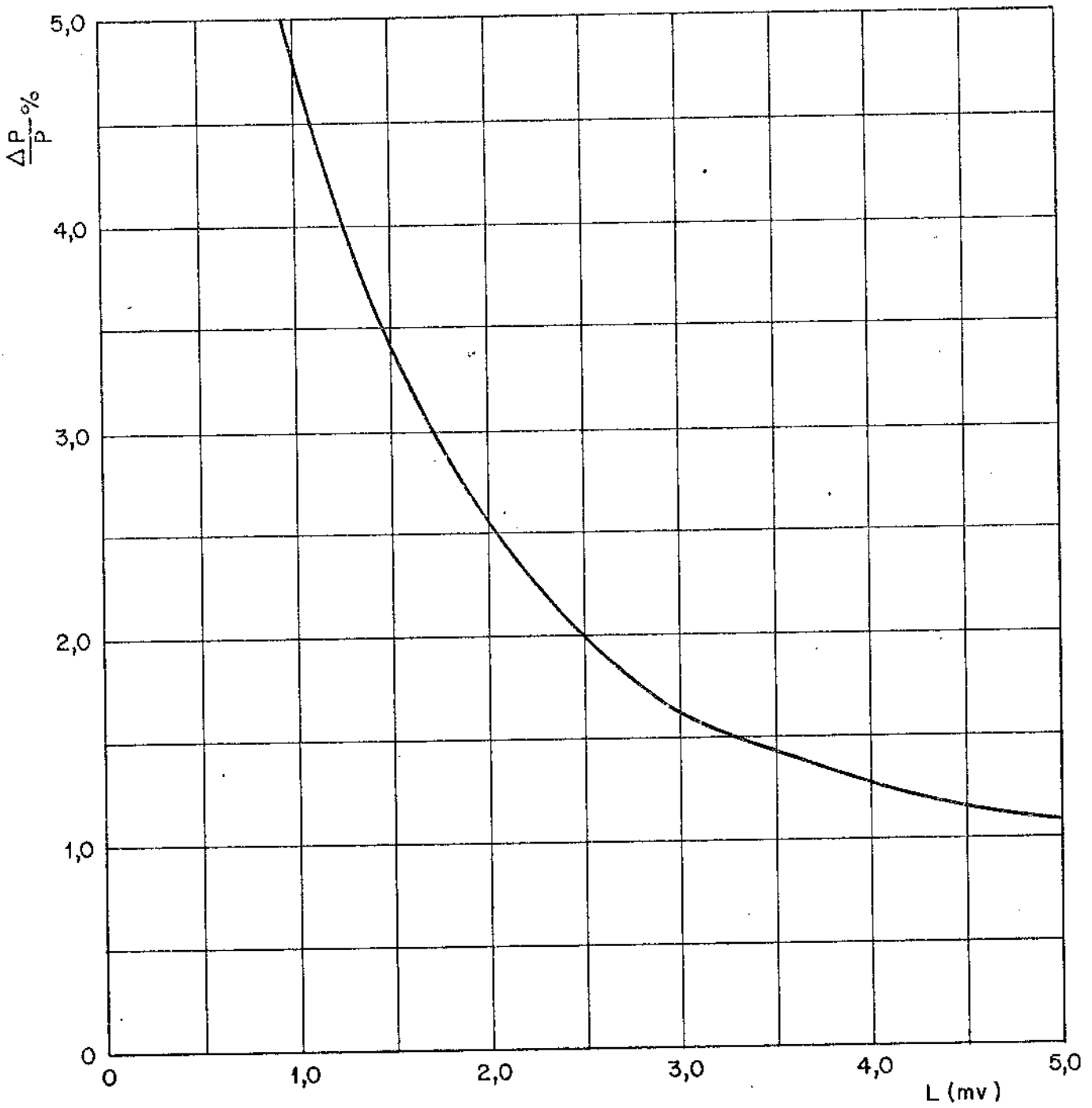


Figura 3.3- Variação do erro relativo do anel dinamométrico em função da leitura na ponte amplificadora.

3.4- Aferição do Dinamômetro

Para a aferição do dinamômetro, foram utilizadas pontes amplificadoras *Philips* PR9308, cuja finalidade é / registrar os sinais provenientes das deformações dos extensômetros na região de medida do dinamômetro. As tabelas III-2 e III-3 apresentam os valores experimentais de força X registro, obtidos durante a aferição estática do dinamômetro.

3.4.1- Curva de Aferição para a Força de apoio P_{ap}

A amplificação utilizada na ponte foi a correspondente à 1 *mV* para o fundo de escala. Para os pares valores P_i (carga aplicada no anel em *kgf*) e L_i (leitura na ponte / amplificadora em *mV*), determina-se a reta média utilizando-se *Fieller* (3.30).

Tabela III-2 Valores das leituras obtidos na aferição Estática para Direção Vertical.

Carga (kgf)	Leitura (mV)	Leitura (mV)	Leitura (mV)	Leitura (mV)	\bar{y}_i
0	0,0	0,0	0,0	0,01	0,0025
2	0,04	0,04	0,04	0,03	0,0325
4	0,07	0,07	0,06	0,06	0,0650
6	0,10	0,10	0,09	0,09	0,0950
8	0,13	0,13	0,12	0,12	0,1250
9	0,14	0,14	0,13	0,13	0,1350
10	0,16	0,16	0,16	0,16	0,1600
12	0,19	0,19	0,19	0,19	0,1900
14	0,22	0,22	0,22	0,22	0,2200
16	0,25	0,25	0,25	0,25	0,2500
17	0,26	0,26	0,26	0,26	0,2600
18	0,28	0,28	0,28	0,28	0,2800
20	0,32	0,31	0,31	0,31	0,3125
22	0,35	0,35	0,34	0,34	0,3450
24	0,38	0,38	0,37	0,37	0,3750
25	0,39	0,39	0,38	0,38	0,3850
26	0,41	0,40	0,40	0,40	0,4025
28	0,44	0,44	0,44	0,43	0,4375
30	0,47	0,47	0,47	0,46	0,4675
32	0,50	0,50	0,50	0,49	0,4975
33	0,51	0,51	0,50	0,50	0,5050
34	0,53	0,53	0,53	0,52	0,5275
36	0,57	0,56	0,56	0,56	0,5625
38	0,60	0,59	0,59	0,59	0,5925
40	0,63	0,62	0,62	0,62	0,6225
42	0,66	0,66	0,65	0,65	0,6550
44	0,69	0,68	0,68	0,68	0,6825
45	0,70	0,69	0,69	0,69	0,6925
46	0,72	0,72	0,71	0,71	0,7150
48	0,74	0,74	0,74	0,74	0,7400
50	0,77	0,77	0,77	0,77	0,7700

Tem-se assim

$$k = 31$$

$$n = 124$$

$$n_i = 4$$

$$t = 1,96 .$$

Obteve-se as seguintes equações:

$$P_{ap} = 25,13 + 64,2(L_i - 0,39) , \quad (3.30)$$

$$\Delta P_{ap} = 13,9 \sqrt{0,00024 + \frac{(L_i - 0,39)^2}{26534}} . \quad (3.31)$$

A figura 3.4 nos mostra que o erro relativo da força de apoio P_{ap} é inferior a 2% para leituras superiores a 0,2 mV, com 95% de confiança.

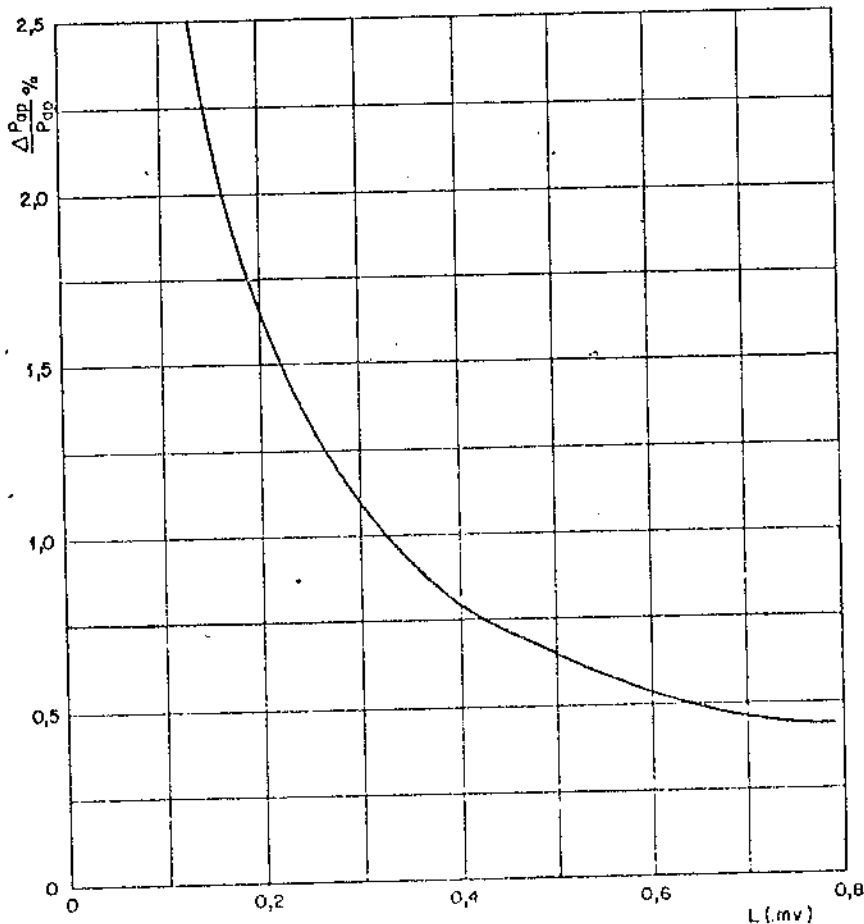


Figura 3.4- Erro relativo da força de apoio P_{ap} , em

Verificou-se que este erro quando representado/ em coordenada logarítmica, se distribue aproximadamente em linha reta como mostra a figura 3.5. Devido a esta propriedade, tem-se um cálculo gráfico na determinação do erro resultante, para diferentes leituras em milivolts.

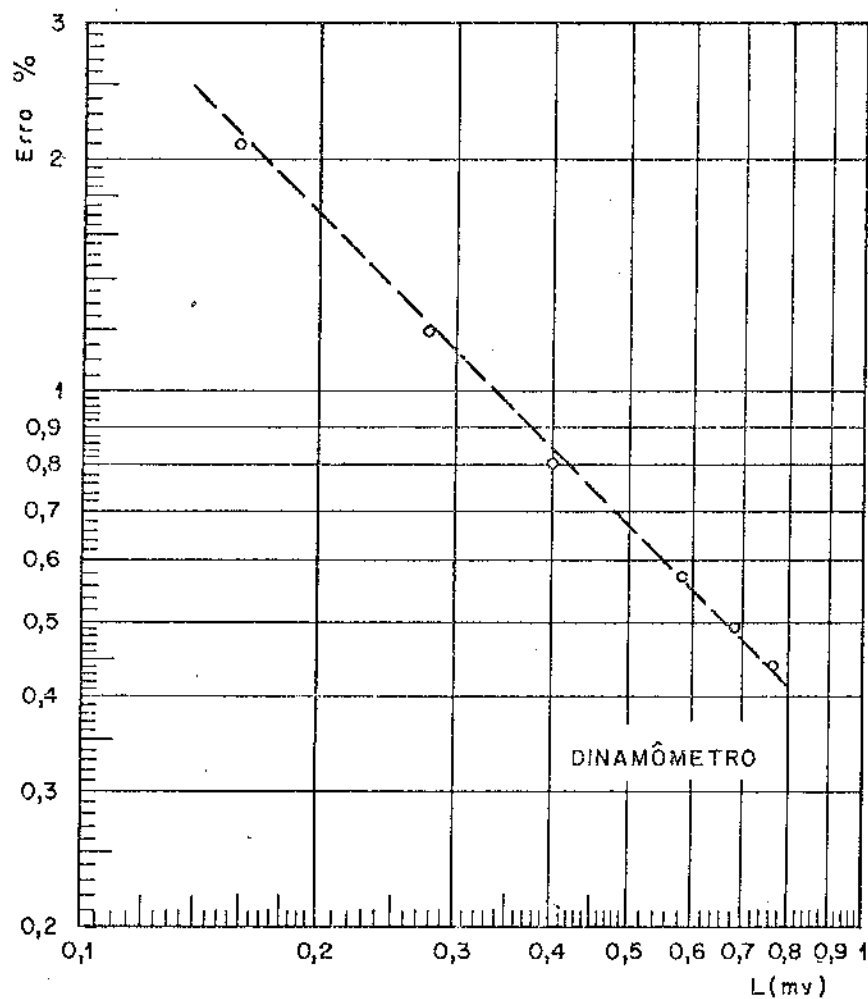


Figura 3.5- Erro representado em coordenada logarítmica.

A figura 3.6 apresenta a curva de aferição do / dinamômetro para a força de apoio, com o respectivo erro, em função das leituras da ponte amplificadora em milivolts, com 95% de confiança.

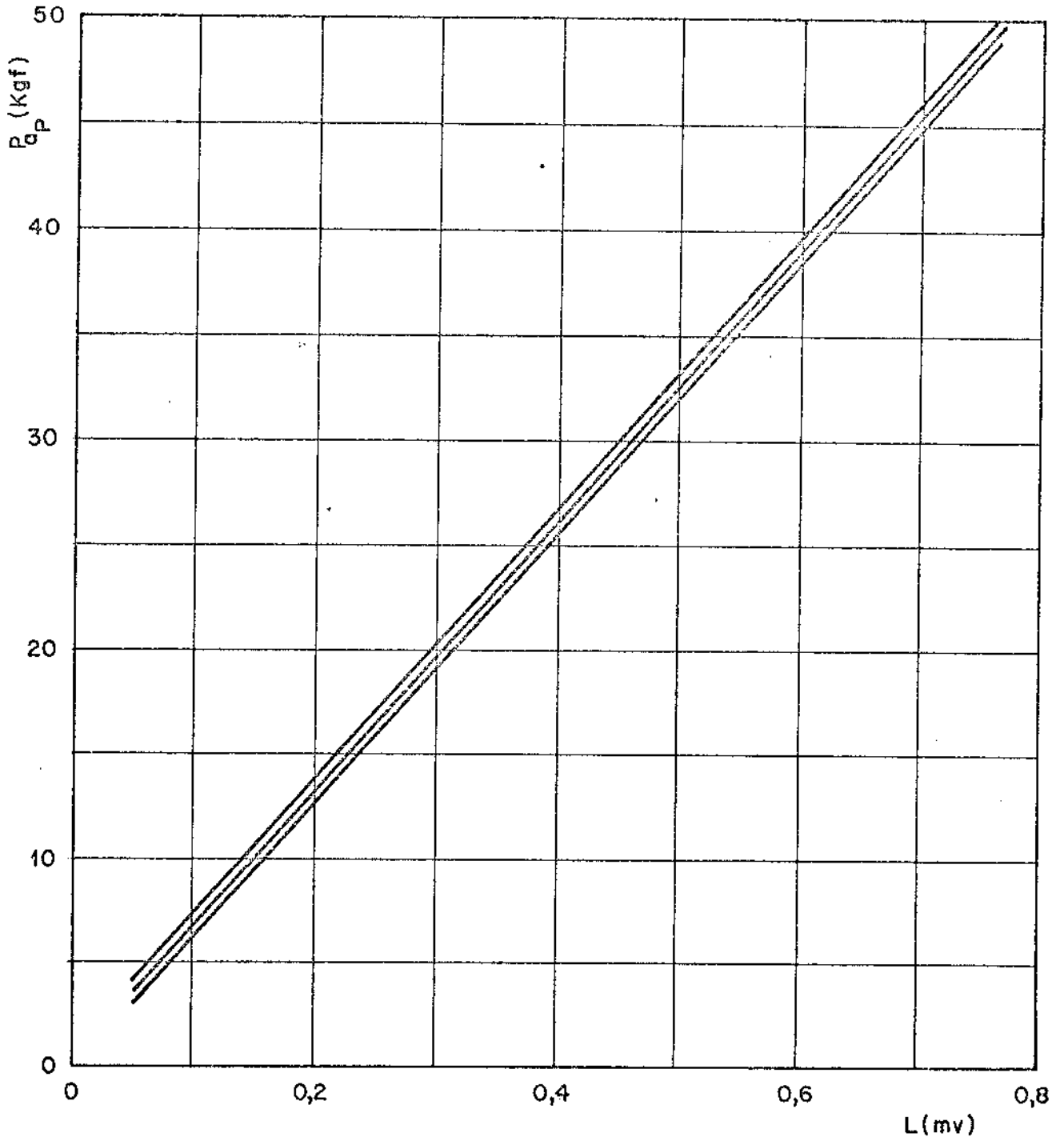


Figura 3.6- Curva de aferição do dinamômetro com os respectivos erros, força de apoio P_{ap} .

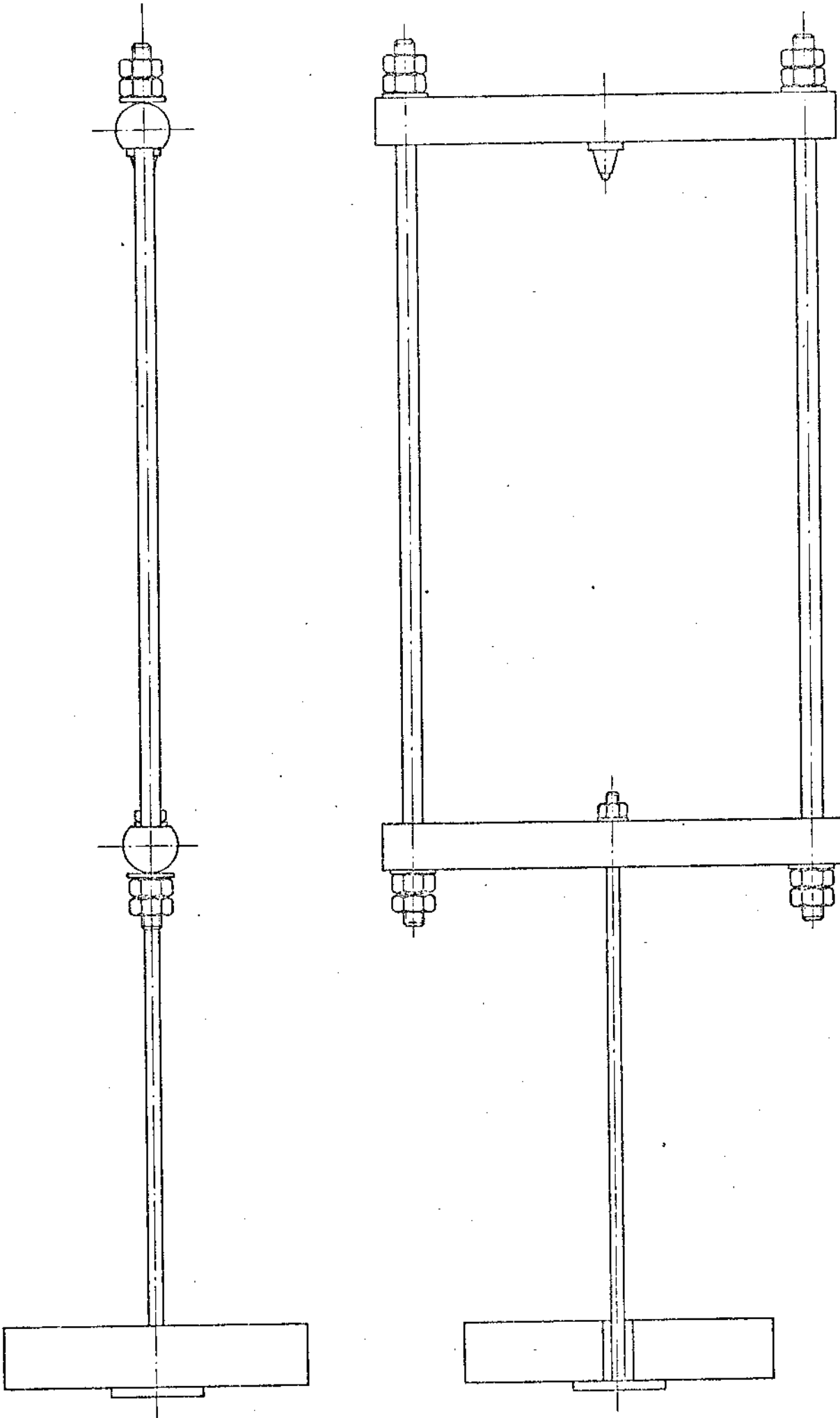


Fig. 3-7— Balança utilizada para aferição de força de Apoio P_p

3.4.2- Curva de aferição para a força de avanço P_a .

A amplificação utilizada na ponte foi a correspondente à 1 mV para o fundo de escala.

Procedendo de maneira análoga ao item 3.4.1, / tem-se a reta média:

$$P_a = 16,15 + 77,06(L_i - 0,21) \quad , \quad (3.32)$$

$$\Delta P_a = 47,7 \sqrt{0,00017 + \frac{(L_i - 0,21)^2}{7050}} \quad . \quad (3.33)$$

Tabela III-3- Valores das leituras obtidos na aferição estática para direção horizontal.

Carga (kgf)	Leitura (mV)	Leitura (mV)	Leitura (mV)	Leitura (mV)	\bar{y}_i
0	0,0	0,0	0,01	0,0	0,0025
2	0,02	0,03	0,02	0,02	0,0225
4	0,05	0,05	0,05	0,05	0,0500
6	0,07	0,08	0,07	0,07	0,0725
8	0,10	0,10	0,10	0,10	0,1000
9	0,11	0,11	0,11	0,11	0,1100
10	0,13	0,13	0,12	0,13	0,1275
12	0,15	0,16	0,15	0,15	0,1525
14	0,18	0,18	0,17	0,18	0,1775
16	0,20	0,21	0,20	0,20	0,2025
17	0,22	0,22	0,21	0,22	0,2175
18	0,23	0,23	0,23	0,23	0,2300
20	0,26	0,26	0,25	0,25	0,2550
22	0,29	0,29	0,28	0,28	0,2850
24	0,31	0,31	0,31	0,31	0,3100
25	0,33	0,33	0,32	0,32	0,3250
26	0,34	0,34	0,34	0,33	0,3375
28	0,36	0,36	0,36	0,36	0,3600
30	0,39	0,40	0,39	0,39	0,3925
32	0,42	0,42	0,42	0,42	0,4200

$$k = 20$$
$$n = 80$$
$$n_i = 4$$
$$t = 1,96$$

A figura 3.8 mostra que o erro relativo da força de avanço P_a é inferior a 4%, para leituras superiores a 0,2 mV, com 95% de confiança.

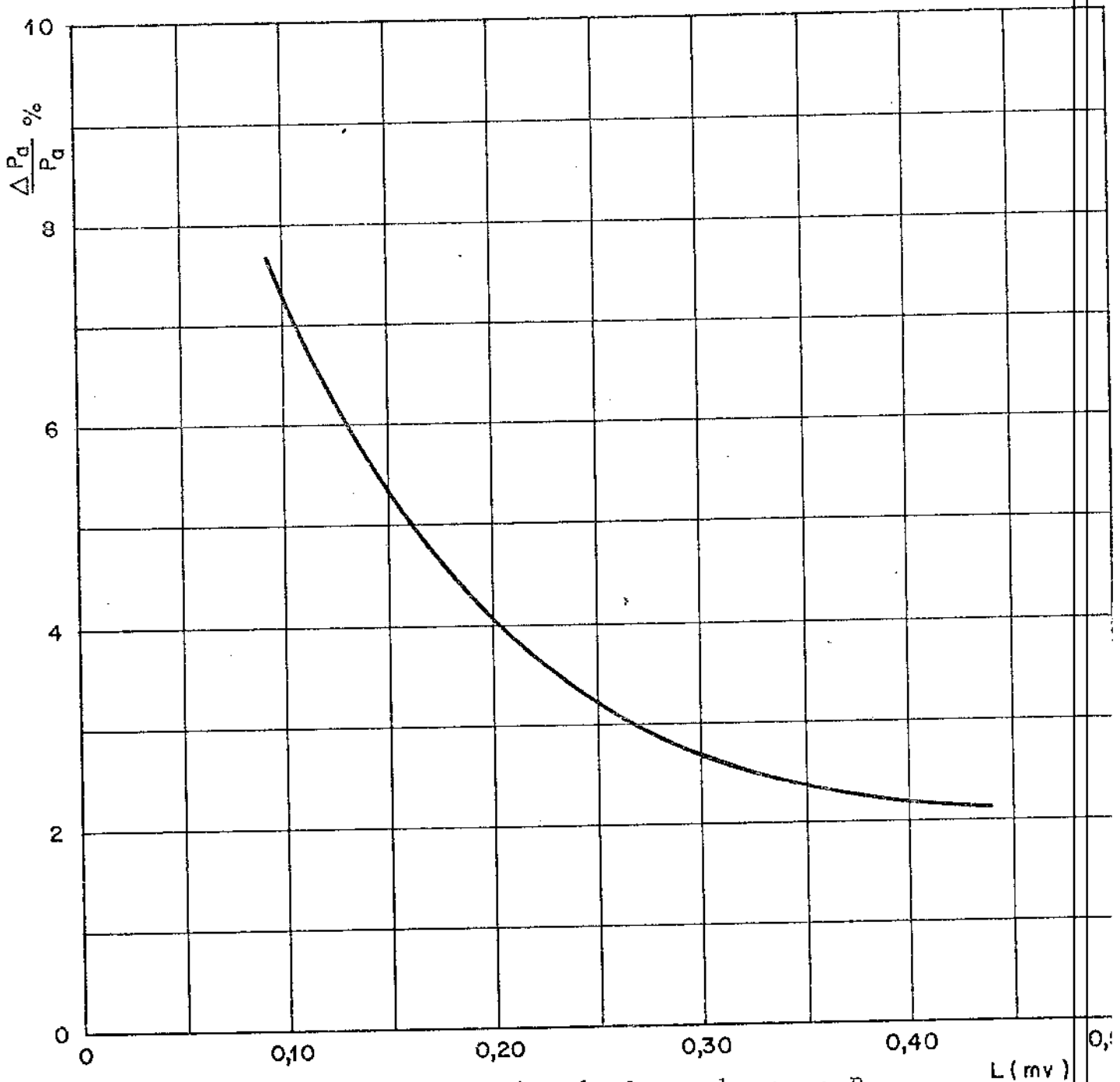


Figura 3.8- Erro relativo da força de avanço P_a , em função das leituras na ponte.

O erro acumulado devido às duas aferições intermediárias (anel dinamométrico e dinamômetro) é determinado através da expressão:

$$\Delta = (\Delta a^2 + \Delta^2 d)^{1/2}$$

Δ = erro total ,

Δa = erro do anel ,

Δd = erro do dinamômetro.

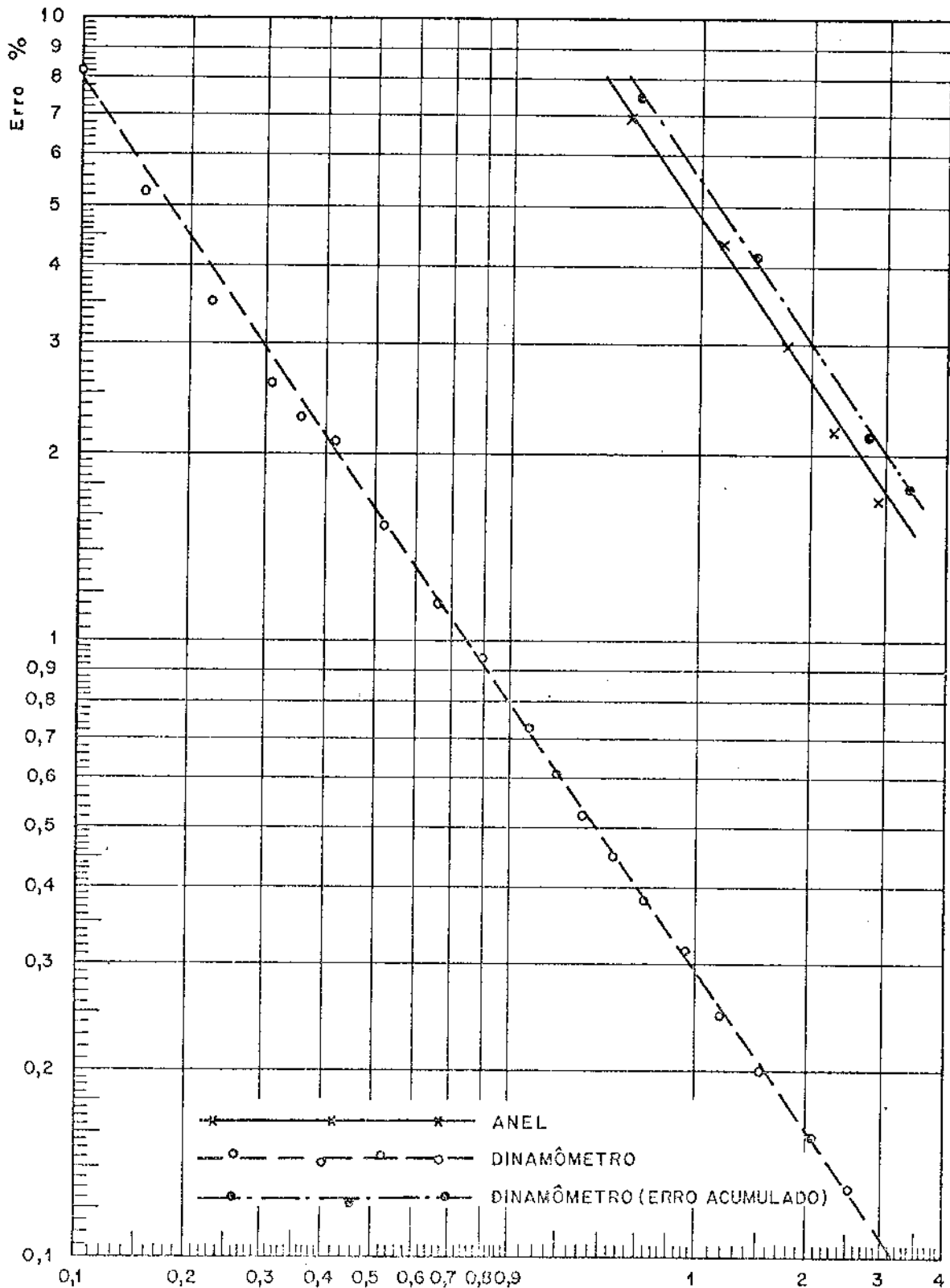


Figura 3.9- Erro acumulado para a força de avanço P_a , em função das leituras na ponte amplificadora.

A figura 3.9 mostra em coordenadas logarítmas , os êrros de aferição do anel dinamométrico e dinamômetro, além do êrro resultante.

A figura 3.10 apresenta a curva de aferição do/ dinamômetro para a fôrça de avanço, com o respectivo êrro, em função das leituras da ponte em milivolts, com 90% de confian_ça.

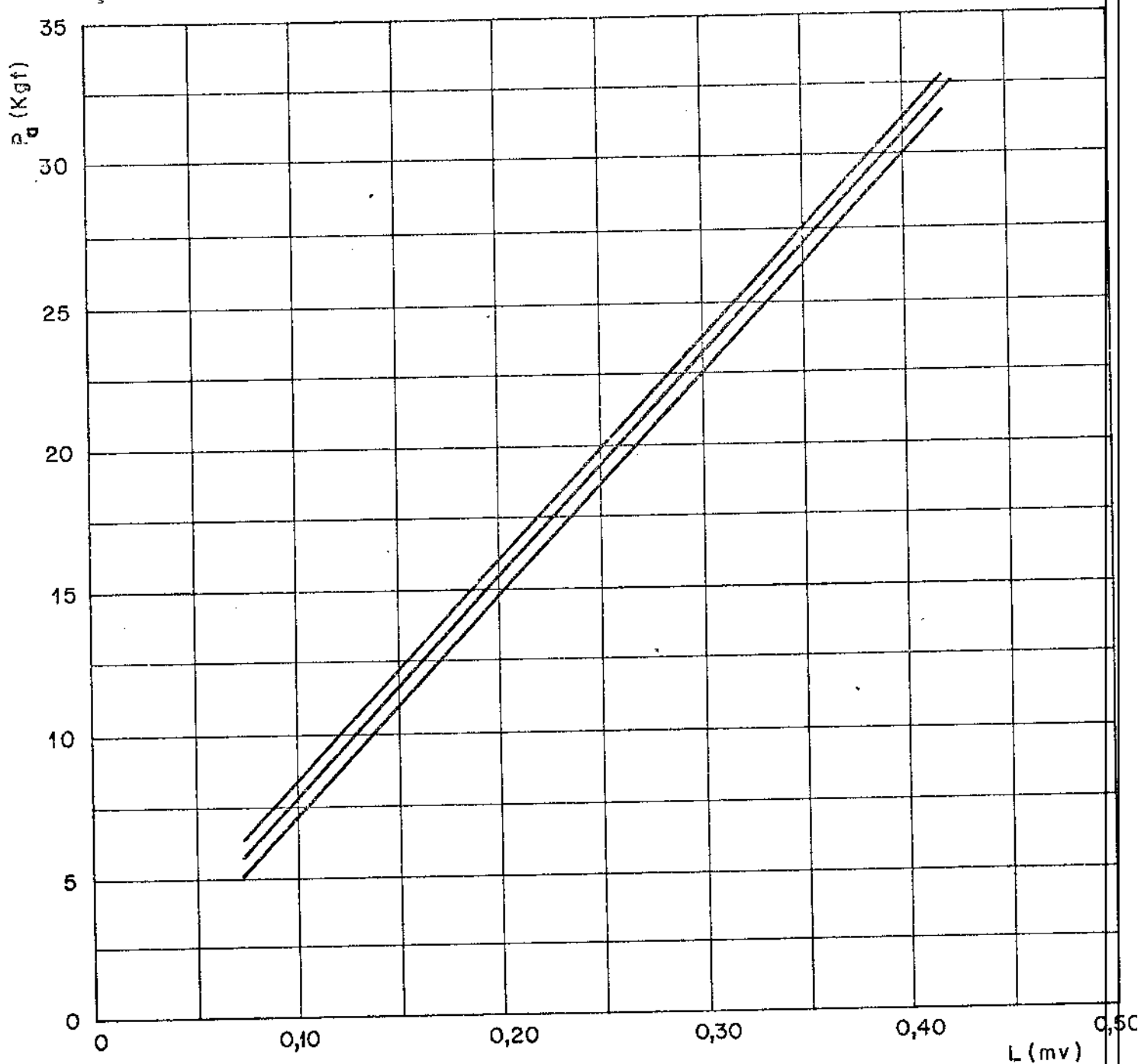


Figura 3.10- Curva de aferição do dinamômetro com respectivos erros , força de avanço P_a .

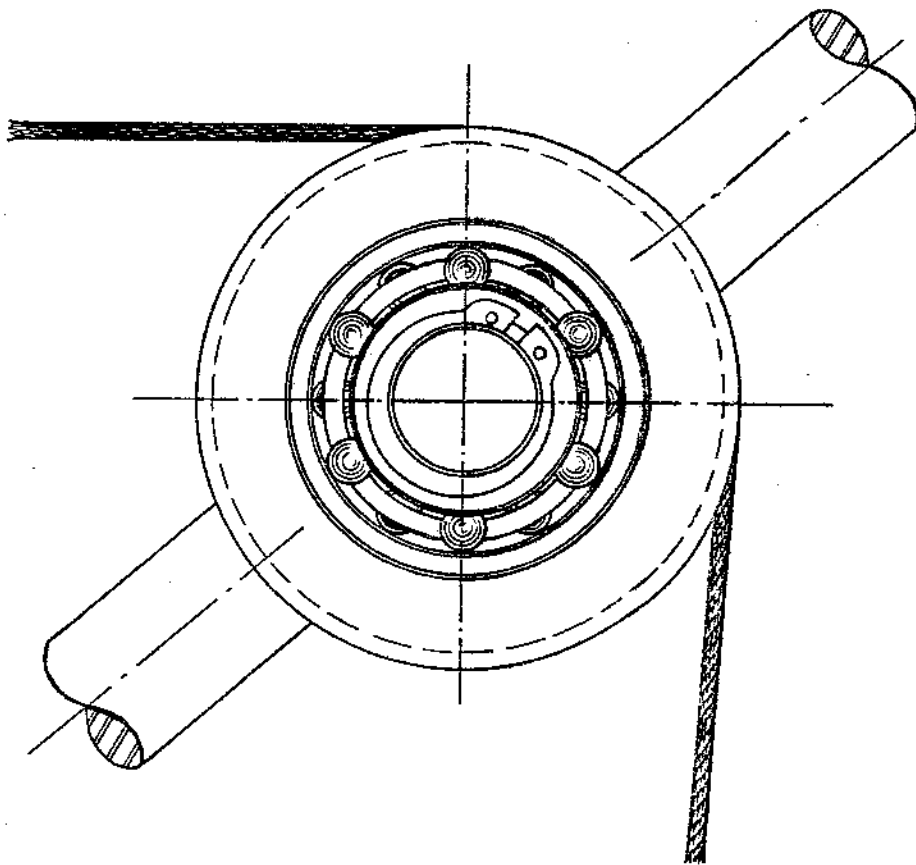


Figura 3.11- Dispositivo utilizado para aferição da força de avanço P_a .

3.4.3- Comentários

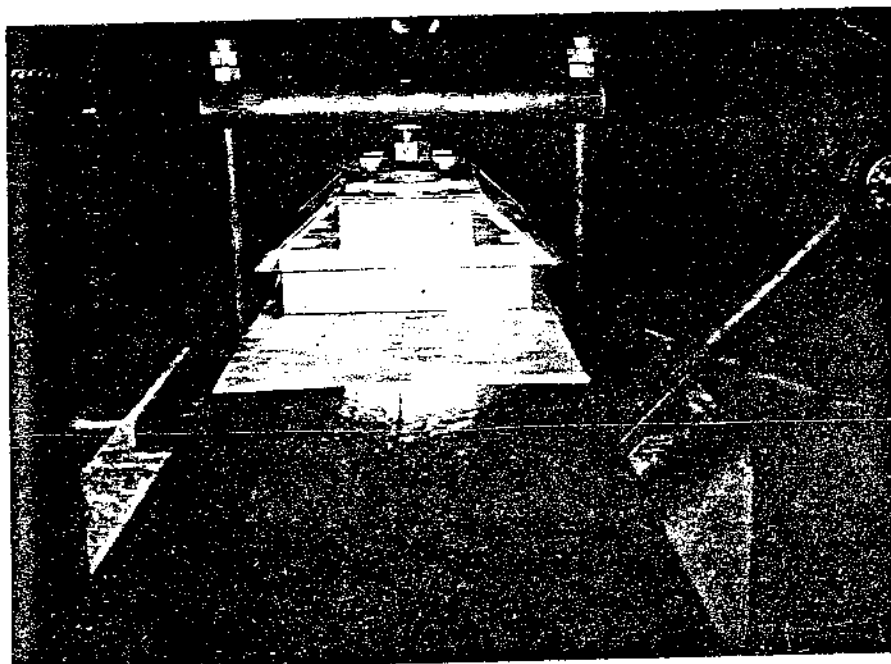
No parágrafo 2.3.13; foi feito o estudo analítico onde é constatada a completa inexistência de interferência entre a força de avanço P_a e a força de apoio P_{ap} .

Durante a aferição estática, este estudo foi

em uma determinada direção, sôbre a medida da força em outra direção.

Tabela III-4- Equações para força de apoio P_{ap} e força de avanço P_a , conforme (3.30), (3.31), (3.32) e (3.33).

$P_{ap} = 25,13 + 64,2 (L_i - 0,39)$
$\Delta P_{ap} = 13,9 \sqrt{0,00024 + \frac{(L_i - 0,39)^2}{26534}}$
$P_a = 16,15 + 77,06 (L_i - 0,21)$
$\Delta P_a = 47,7 \sqrt{0,00017 + \frac{(L_i - 0,21)^2}{7050}}$



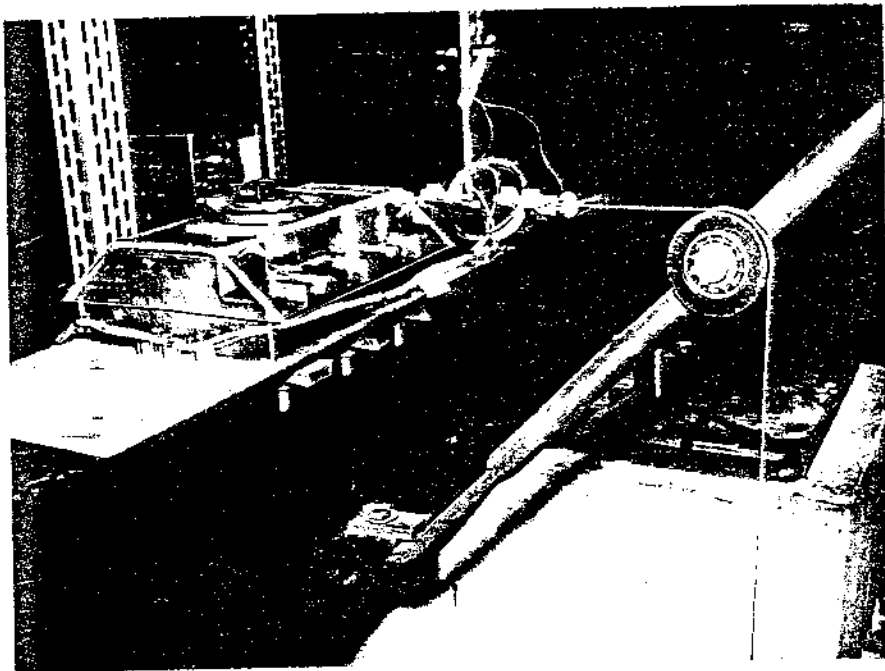
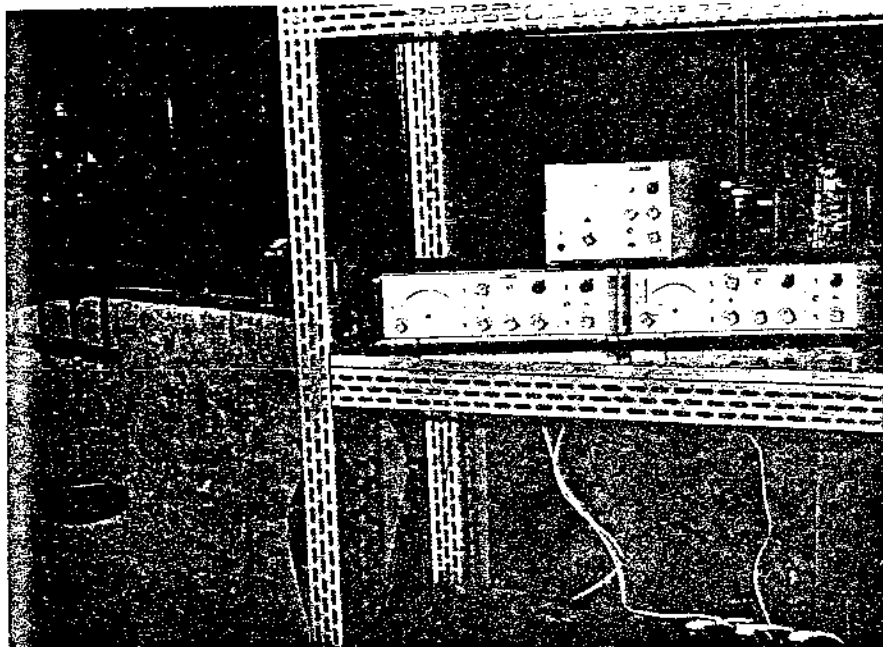


Figura 3.12- Aspéctos da aferição



C A P Í T U L O I V

A F E R I Ç Ã O D I N Â M I C A D O D I N A M Ô M E T R O

4.1- *Generalidades*

Como foi visto no item 2.3.2, além de outros requisitos importantes na construção de dinamômetros, dois requisitos em especial devem ser levados em consideração: *rigidez e sensibilidade*.

Uma sensibilidade alta, possibilita a medida / de pequenos esforços, e isto é conseguido através de uma baixa rigidez. Em um processo de usinagem em que os esforços de / corte são variáveis com o tempo, deve-se ter do aparelho alta rigidez e conseqüentemente altas frequências naturais. Vê-se aí o cuidado em que o projetista, tem que tomar ao procurar uma solução satisfatória.

A determinação da frequência natural e do grau de amortecimento, permite obter com qual erro dinâmico de ampliação se trabalha [16]

4.2- *Determinação das frequências naturais por diferentes processos.*

4.2.1- *Método da Percussão*

4.2.1.1- *Direção horizontal*

PR 9308 e enviado a um osciloscópio Philips PM 3250, onde é fotografado.

Este sinal é obtido através de uma percussão no corpo de prova; fixado ao dinamômetro. A figura 4.1 mostra a oscilação amortecida do dinamômetro.

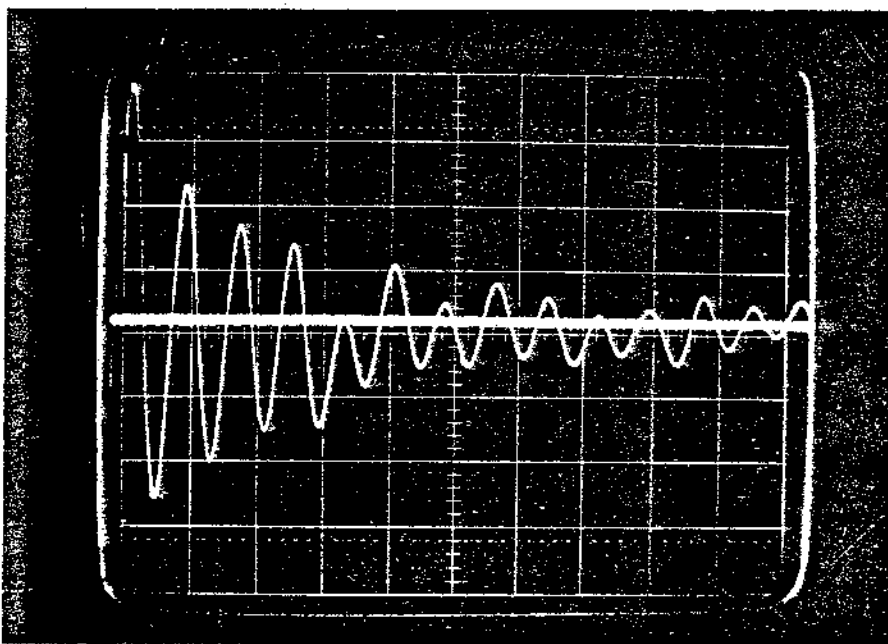


Figura 4.1- Oscilação amortecida do dinamômetro, relativa à direção horizontal.

A amplitude utilizada no osciloscópio Philips foi de 0,1 V/div. para um tempo/divisão do osciloscópio igual a 1 ms, foi medido o período T em um projetor NIKON conforme figura 4.2.

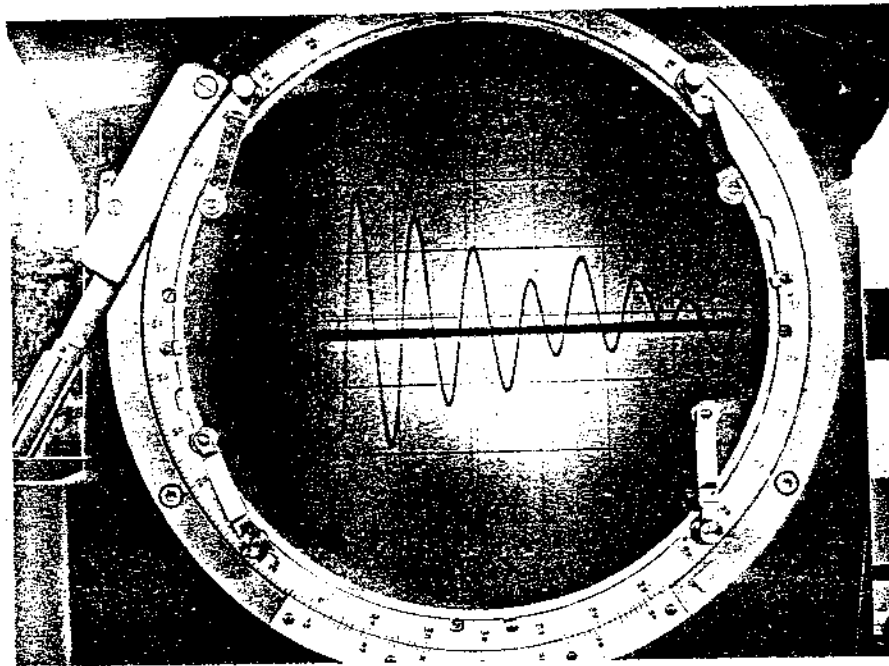


Figura 4.2- Medida do período T em um protetor NIKON

Tem-se então 1 divisão igual a 2,08 mm.

Para um tempo/divisão do osciloscópio igual a 1 ms, tem-se;

$$\frac{1}{2,08} \text{ ms/mm}$$

Portanto o período será:

$$T = 1,762 \times \frac{1}{2,08} = 0,85 \text{ ms}$$

A frequência é dada pela fórmula:

$$f = \frac{1}{T}$$

substituindo tem-se:

$$f = \frac{1}{0,85 \times 10^{-3}} = 1176 \text{ Hz}$$

Portanto, a frequência natural relativa à direção horizontal é 1176 Hz.

4.2.1.2- Direção vertical

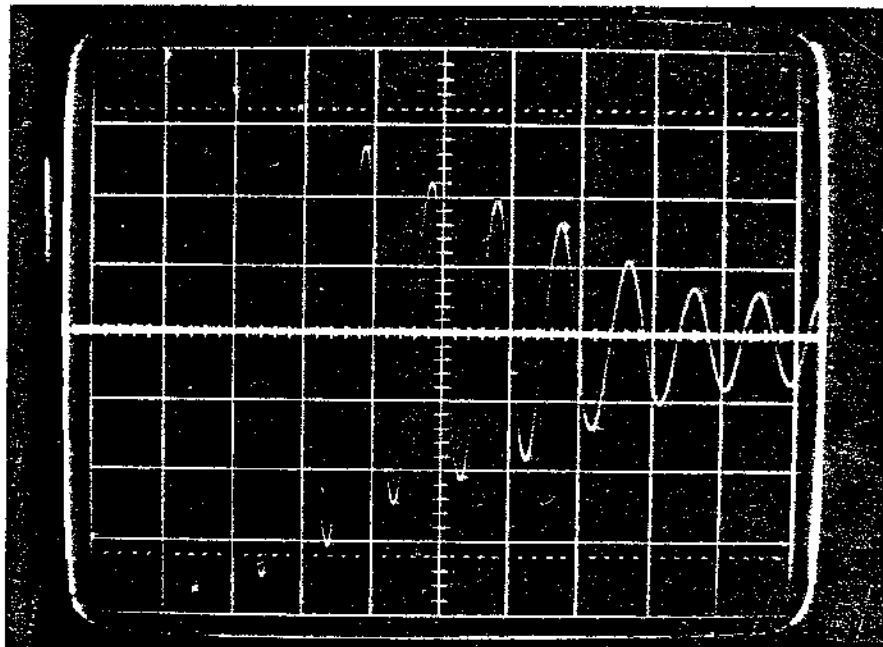


Figura 4.3- Oscilação amortecida do dinamômetro, relativa à direção vertical

Determinando-se o período T no projetor NIKON,

com uma divisão igual a 1 ms, tem-se:

ou ainda

$$f = 1076 \text{ HZ}$$

Portanto, a frequência natural relativa à direção vertical é 1076 HZ.

4.2.2- Método de Aplicação da Força Pulsante

Para a determinação das frequências naturais, através do método de aplicação da força pulsante, utilizou-se a montagem vista na figura 4.4.

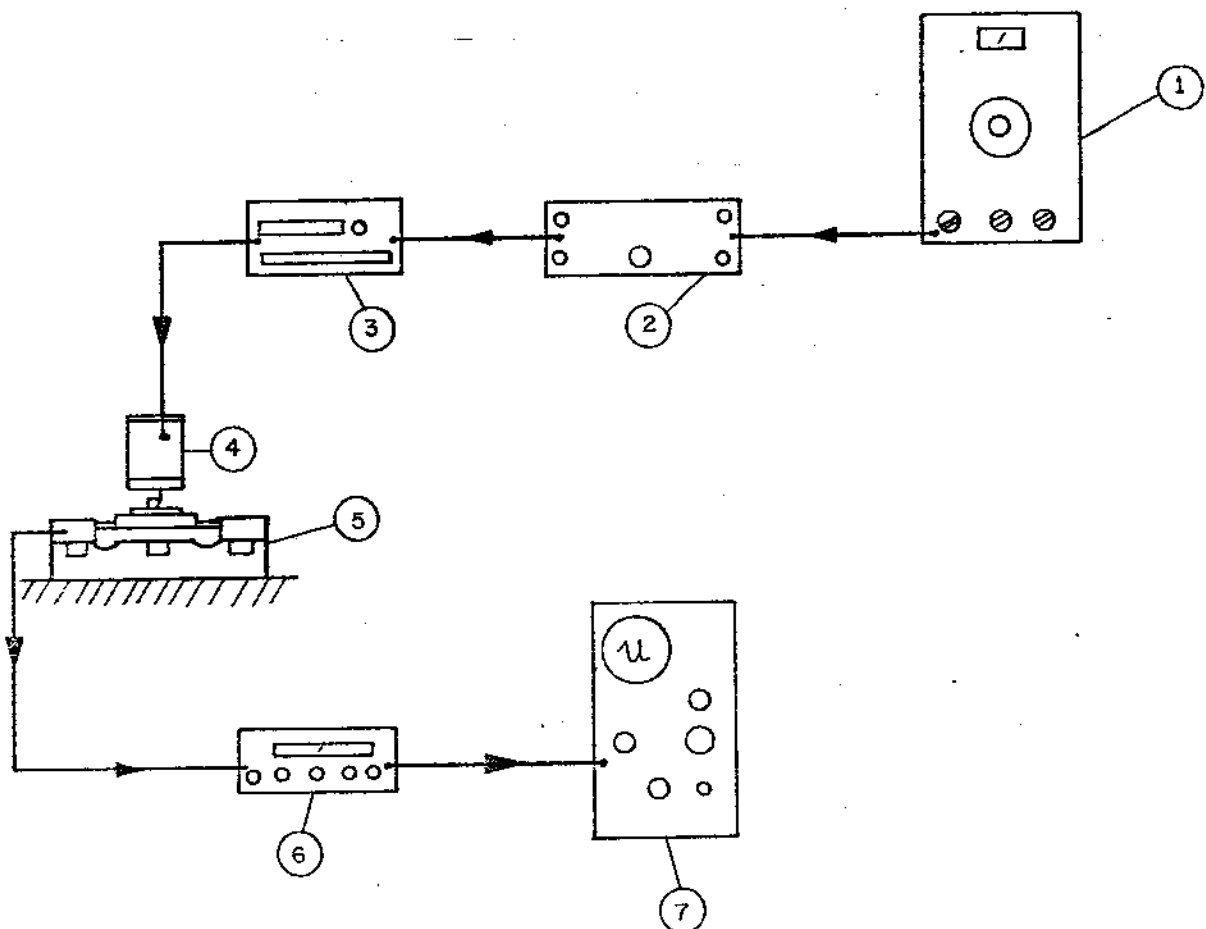


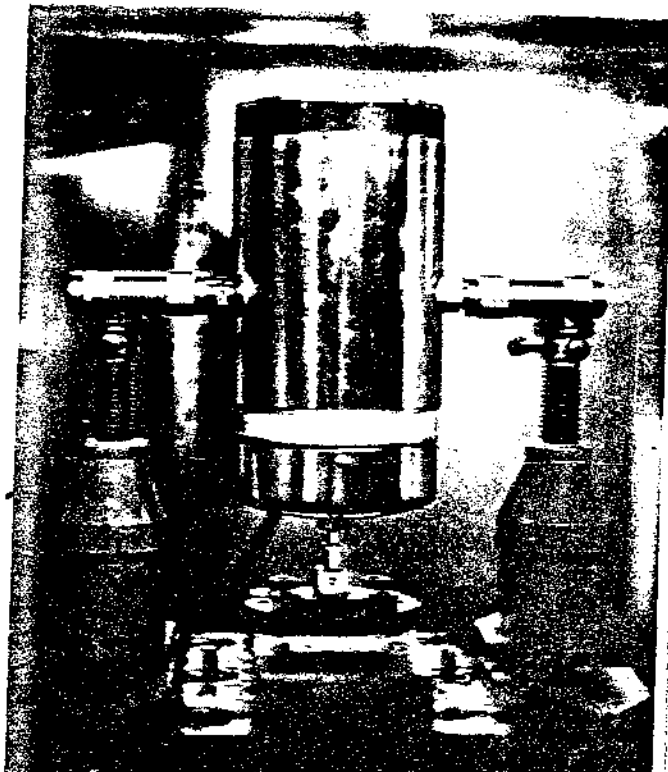
Figura 4.4 - Esquema da montagem dos equipamentos.

Equipamento utilizado:

- 1) gerador de frequências-Brüel-Kjaer-2010;
- 2) amplificador Philips-129043;
- 3) amperímetro Philips-PM 2421;
- 4) excitador de vibrações Philips PR 9270/01 ;
- 5) dinamômetro de retificação tangencial plana-C.T;
- 6) ponte amplificadora Philips PR 9308 ;
- 7) osciloscópio universal de duplo traço-Philips-PM 3250 .

Através desse método, determinou-se as seguintes frequências naturais, conforme mostra as figuras 4.7 e 4.8.

940 HZ para a força de apoio
1230 HZ
1025 HZ para a força de avanço
1300 HZ



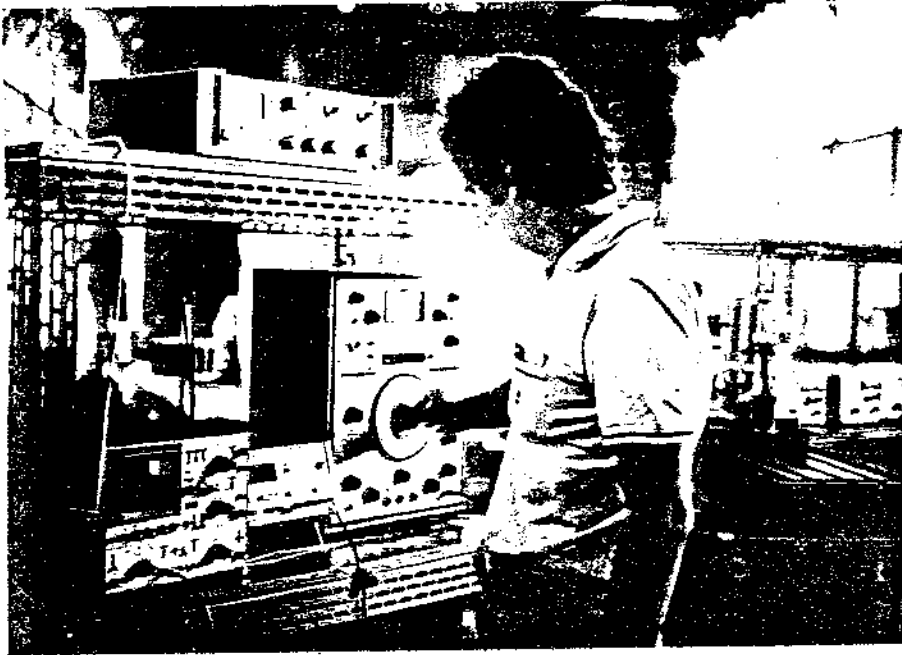
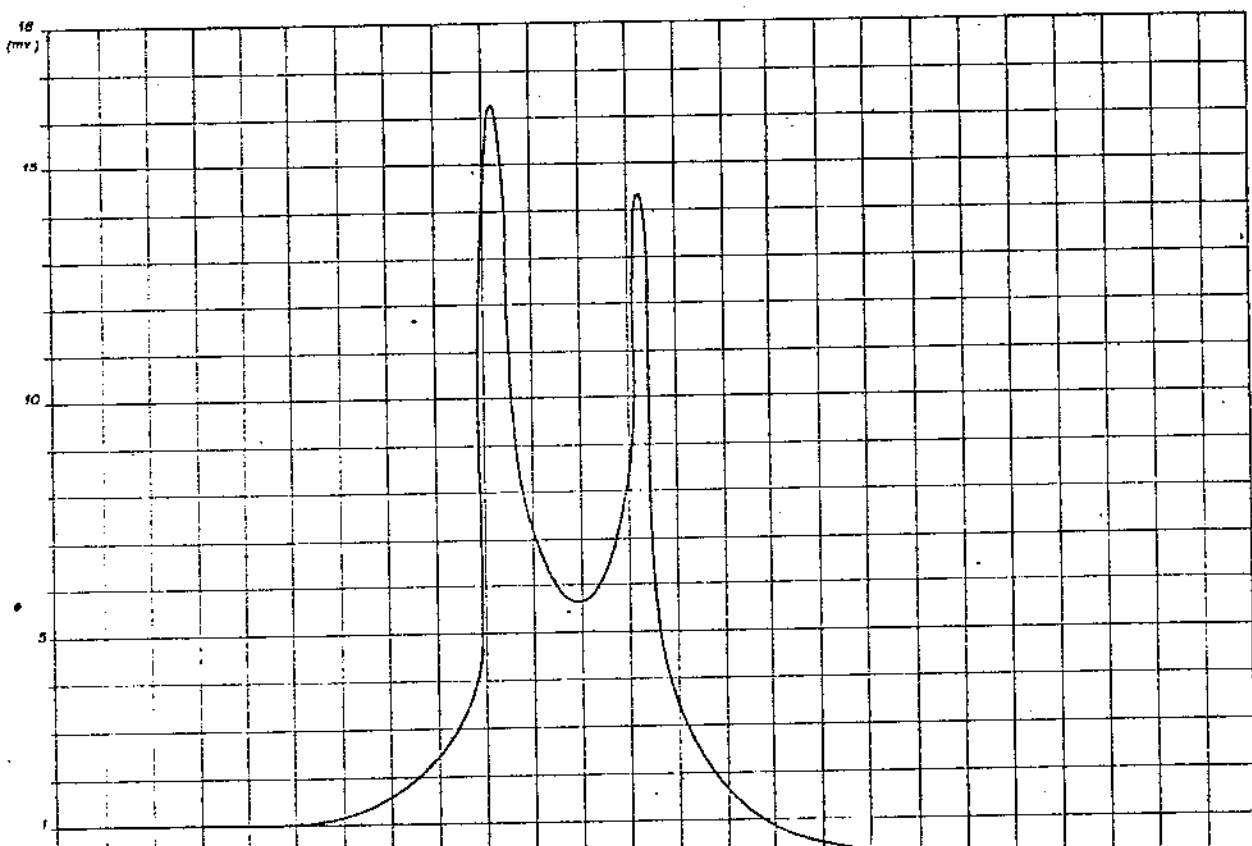


Figura 4.6- Vista geral do ensaio realizado.



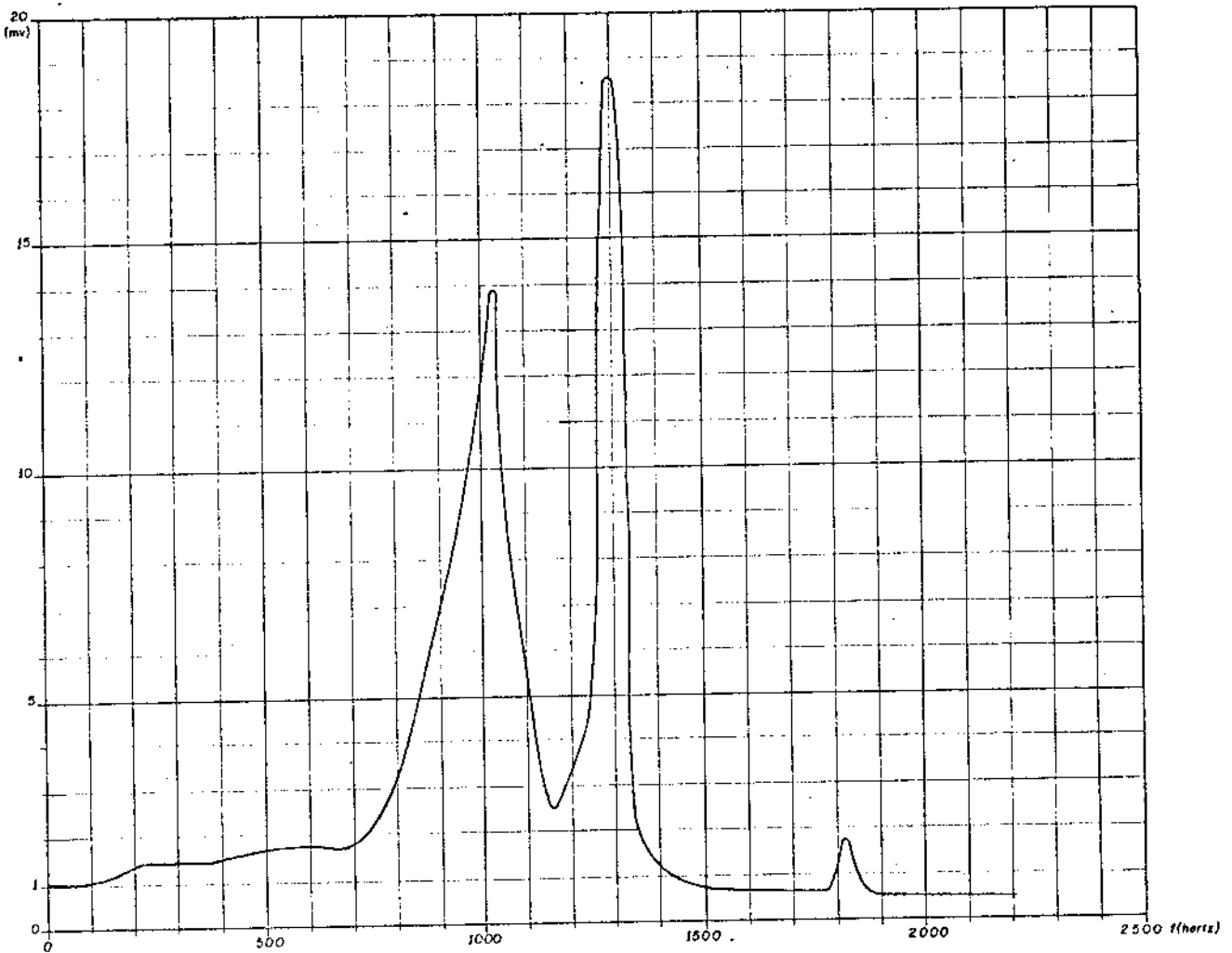


Figura 4.8- Curva de ressonância para a força de avanço, obtida através da montagem indicada na figura 4.4.

4.2.3- Espectro de Frequências

Para a determinação do espectro de frequências, utilizou-se os equipamentos abaixo relacionados: [17].

- 1) gerador de frequências-Brüel-Kjaer;
- 2) amplificador de potência-Brüel-Kjaer;
- 3) vibrador-Brüel-Kjaer;
- 4) transdutor de força-Brüel-Kjaer;
- 5) dinamômetro de retificação tangencial plana-C.T;
- 6) amplificador de sinal-Brüel-Kjaer;

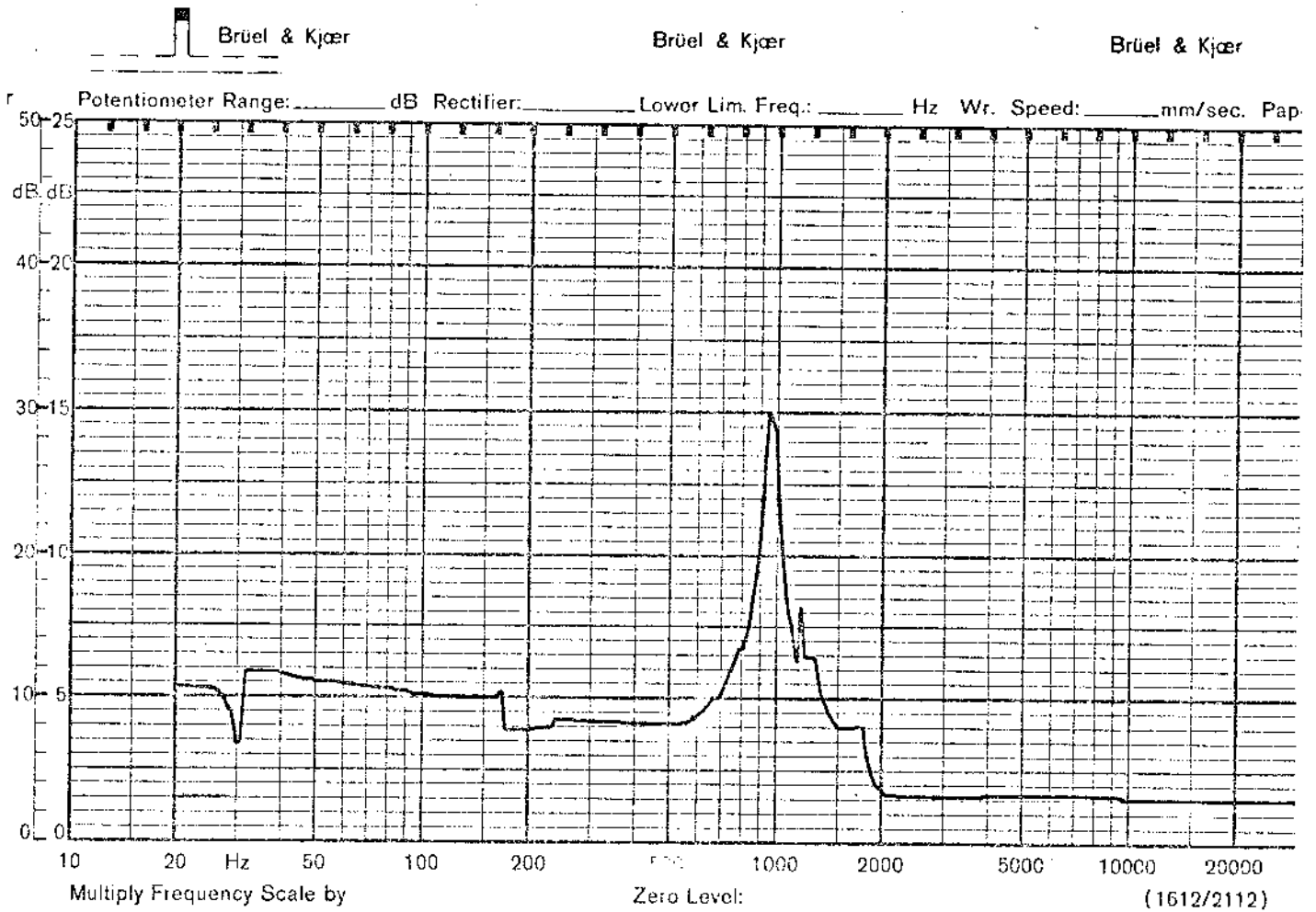


Figura 4.10- Registro automático das frequências.

Através do espectro, determinou-se as frequências naturais mais significativas $f_1 = 940 \text{ Hz}$ e $f_2 = 1230 \text{ Hz}$.

4.3- Comentários

No item 4.2.1, procurou-se determinar a frequência mais baixa através do método da percussão. Os valores obtidos por este método foram os seguintes:

1176 Hz - relativo à direção horizontal

1076 Hz - relativo à direção vertical

No item 4.2.2 foi utilizado o método de aplicação da força pulsante. Através desse método, determinou-se as seguintes frequências naturais :

$1025H_2$ e $1300H_2$ - relativa à direção horizontal.

$940H$ e $1230H$ - relativa à direção vertical.

No item 4.2.3, utilizou-se o espectro de frequências, que dá o registro automático das frequências. Os valores obtidos foram $940HZ$ e $1230HZ$, para a direção vertical.

Contatou-se que os valores das frequências, determinados pelos diferentes métodos são praticamente os mesmos; é possível que a massa da parte móvel do excitador tenha influido, no sentido de diminuir ligeiramente os valores das frequências próprias.

CAPÍTULO V

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

5.1- Generalidades

Este capítulo tem por finalidade, a verificação do comportamento do dinamômetro desenvolvido, durante operações de retificação, para diferentes condições de usinagem. Para se alcançar tal objetivo, não há necessidade de um grande número/ de ensaios, mas o suficiente para garantir que, em um estudo / de retificação, o dinamômetro se comporta de um modo satisfat \bar{o} rio. Para tanto foram realizados alguns ensaios experimentais. [18] .

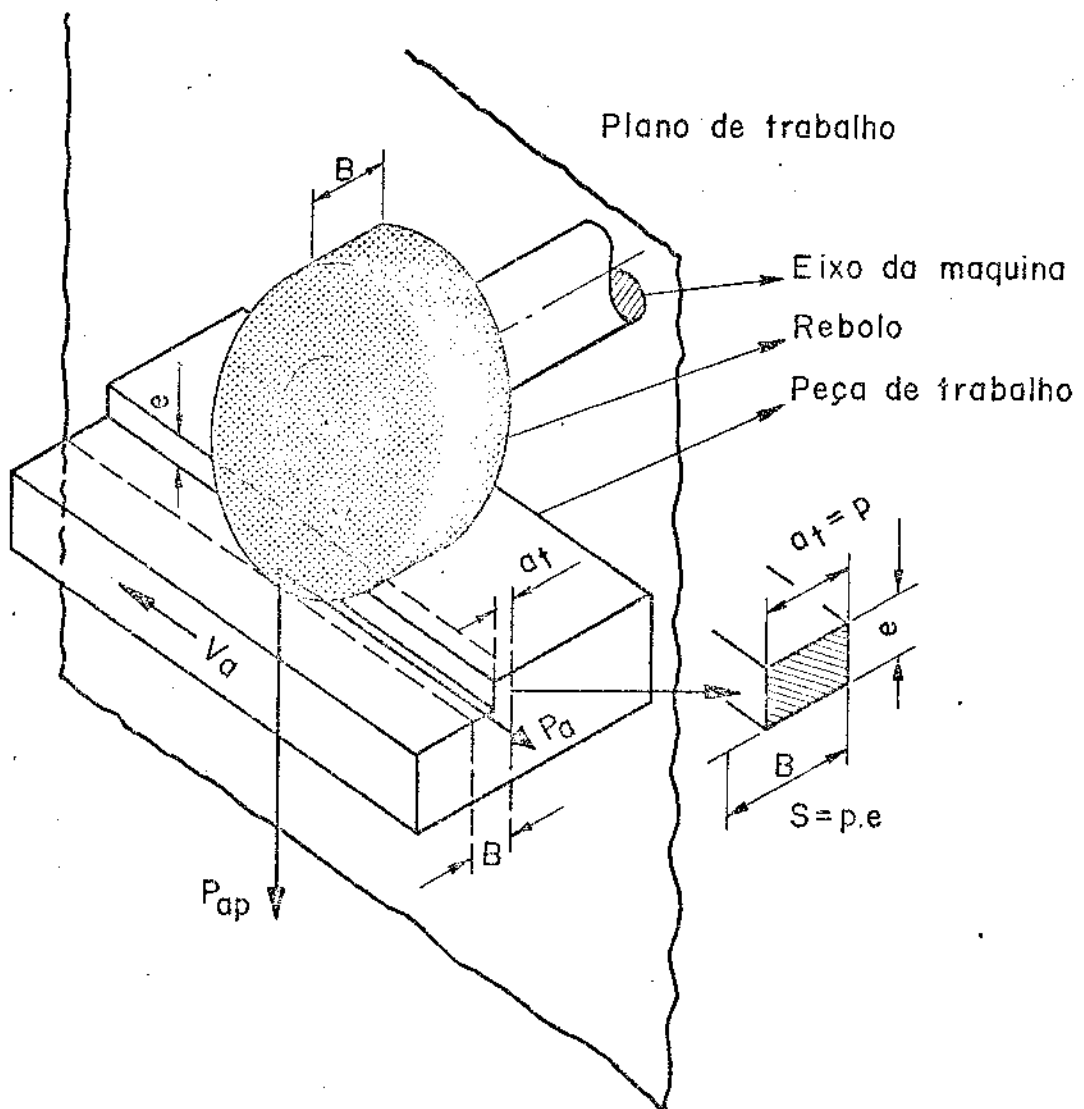


Figura 5.1- Aspecto da retificação tangencial plana.

5.2- Características do material a ser usinado

Os corpos de prova foram feitos com aço ABNT - 1020, sendo que os mesmos são rigidamente fixados à mesa do / dinamômetro. Este aço foi ensaiado na Divisão de Ensaio de Materiais do Centro de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, o qual forneceu as seguintes características do aço:

5.2.1- Ensaio de tração

limite de escoamento -	42,80 kgf/mm ²
limite de resistência -	41,27 kgf/mm ²
alongamento -	39%
estrição -	72,96%

5.2.2- Dureza

111 Brinell

5.2.3- Análise Química

Enxofre	0,05%
Carbono	0,20%

5.2.4- Análise Metalográfica

Na figura 5.2, observamos a fotografia da estrutura do aço na qual os grãos escuros são de perlita e os claros de ferrita. O tamanho do grão segundo a norma A.S.T.M., é o número 8, [19] .

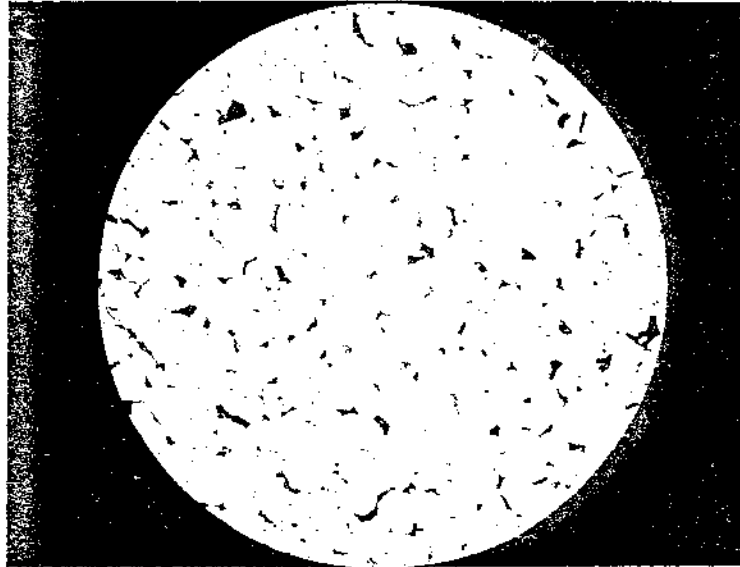


Figura 5.2- Aço com 0,2% de carbono ataque: nital 200X.

5.3- Ensaios realizados

Os ensaios foram realizados em uma retificadora BLOHM-HFS-6, conforme figura 5.3. A força de avanço P_a tem a direção horizontal longitudinal, e a força de apoio P_{ap} tem a direção vertical. O dinamômetro foi fixado rigidamente na mesa da retificadora. Todos os ensaios foram realizados com refrigerante de corte. O dinamômetro foi ligado às duas pontes amplificadoras PR 9308, as quais por sua vez aos canais de um registrador PT 5031R/04B, de fabricação Philips.

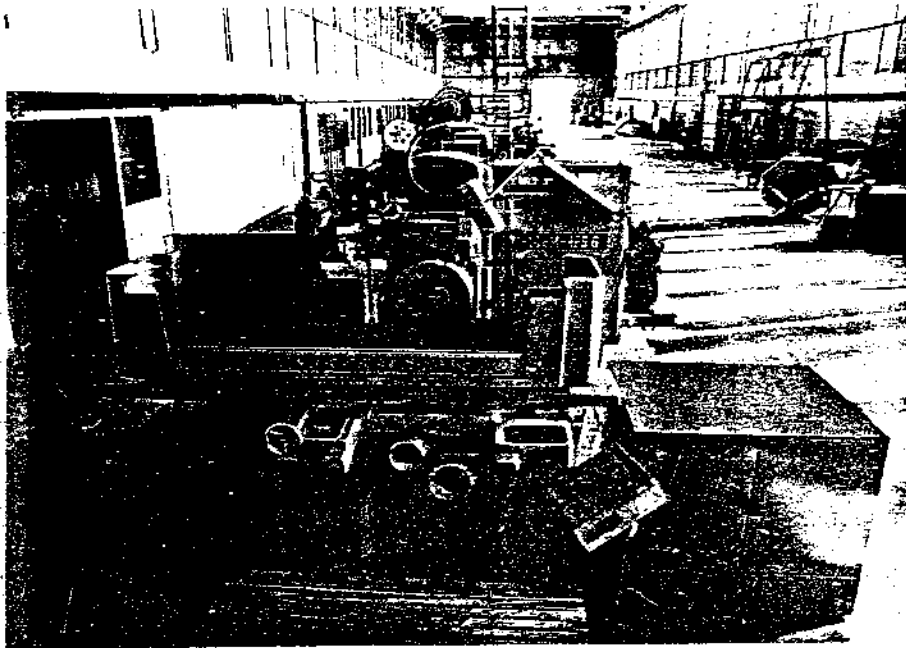


Figura 5.3- Retificadora Blohm-HFS-6

5.3.1- Rebôlo utilizado

Utilizou-se um rebolo NORTON A46H7 VBE, de diâmetro $D = 350$ mm, largura $B = 50$ mm e rotação de trabalho do rebolo $n = 1700$ rpm [20].

5.3.2- Valores obtidos nos ensaios

A tabela V.1 apresenta os valores obtidos nos ensaios. Na mesma tabela encontram-se também os valores das forças P_a e P_{ap} , obtidas através das características do dinamômetro. As figuras 5.4 apresenta o dinamômetro em trabalho e a figura 5.5 o equipamento utilizado.

Tabela V.1- Valores obtidos nos ensaios de retificação plana tangencial.

a (mm)	a_t (mm/course)	V_d (r/min)	E_c (mV)	E_p (mV)	P_a (kgf)	P_{cp} (kgf)
0,010	2	15	0,010	0,015	$0,75 \pm 0,62$	$1,06 \pm 0,22$
0,010	5	15	0,014	0,025	$1,05 \pm 0,62$	$1,69 \pm 0,22$
0,010	7	15	0,030	0,045	$2,28 \pm 0,62$	$2,98 \pm 0,22$
0,010	2	20	0,012	0,017	$0,89 \pm 0,62$	$1,18 \pm 0,22$
0,010	5	20	0,025	0,035	$1,89 \pm 0,62$	$2,34 \pm 0,22$
0,010	7	20	0,040	0,055	$3,05 \pm 0,62$	$3,62 \pm 0,22$
0,016	2	15	0,022	0,030	$1,66 \pm 0,62$	$2,02 \pm 0,22$
0,016	5	15	0,040	0,055	$3,05 \pm 0,62$	$3,62 \pm 0,22$
0,016	7	15	0,050	0,075	$3,82 \pm 0,62$	$4,91 \pm 0,22$
0,016	2	20	0,025	0,040	$1,89 \pm 0,62$	$2,66 \pm 0,22$
0,016	5	20	0,050	0,070	$3,82 \pm 0,62$	$4,59 \pm 0,22$
0,016	7	20	0,060	0,075	$4,59 \pm 0,62$	$4,91 \pm 0,22$
0,020	2	15	0,020	0,030	$1,51 \pm 0,62$	$2,02 \pm 0,22$
0,020	5	15	0,060	0,075	$4,59 \pm 0,62$	$4,91 \pm 0,22$
0,020	7	15	0,065	0,080	$4,98 \pm 0,62$	$5,23 \pm 0,22$
0,020	2	20	0,030	0,040	$2,28 \pm 0,62$	$2,66 \pm 0,22$
0,020	5	20	0,060	0,075	$4,59 \pm 0,62$	$4,91 \pm 0,22$
0,020	7	20	0,070	0,090	$5,36 \pm 0,22$	$5,87 \pm 0,22$
0,050	2	15	0,045	0,060	$3,43 \pm 0,62$	$3,94 \pm 0,22$
0,050	5	15	0,12	0,17	$9,21 \pm 0,62$	$11,00 \pm 0,22$
0,050	7	15	0,15	0,19	$11,53 \pm 0,62$	$12,30 \pm 0,22$
0,050	2	20	0,050	0,065	$3,82 \pm 0,62$	$4,27 \pm 0,22$
0,050	5	20	0,11	0,14	$8,44 \pm 0,62$	$9,10 \pm 0,22$
0,050	7	20	0,14	0,18	$10,75 \pm 0,62$	$11,65 \pm 0,22$
0,10	2	15	0,075	0,11	$5,75 \pm 0,62$	$7,15 \pm 0,22$
0,10	5	15	0,19	0,25	$14,61 \pm 0,62$	$16,14 \pm 0,22$
0,10	7	15	0,21	0,27	$16,15 \pm 0,62$	$17,43 \pm 0,22$
0,10	2	20	0,10	0,14	$7,67 \pm 0,62$	$9,10 \pm 0,22$
0,10	5	20	0,22	0,28	$16,92 \pm 0,62$	$18,10 \pm 0,22$
0,10	7	20	0,23	0,30	$17,52 \pm 0,62$	$19,40 \pm 0,22$
0,10	5	19	0,19	0,25	$14,60 \pm 0,62$	$16,40 \pm 0,22$
0,10	7	19	0,21	0,27	$16,15 \pm 0,62$	$17,26 \pm 0,22$
0,10	10	19	0,23	0,28	$17,10 \pm 0,62$	$18,43 \pm 0,22$
0,10	10	15	0,15	0,20	$11,20 \pm 0,62$	$13,14 \pm 0,22$
0,15	10	8	0,21	0,28	$15,30 \pm 0,62$	$18,05 \pm 0,22$
0,15	10	10	0,28	0,38	$21,21 \pm 0,62$	$24,76 \pm 0,22$
0,15	10	20	0,34	0,44	$26,43 \pm 0,62$	$28,82 \pm 0,22$
0,15	10	15	0,30	0,42	$23,05 \pm 0,62$	$26,74 \pm 0,22$

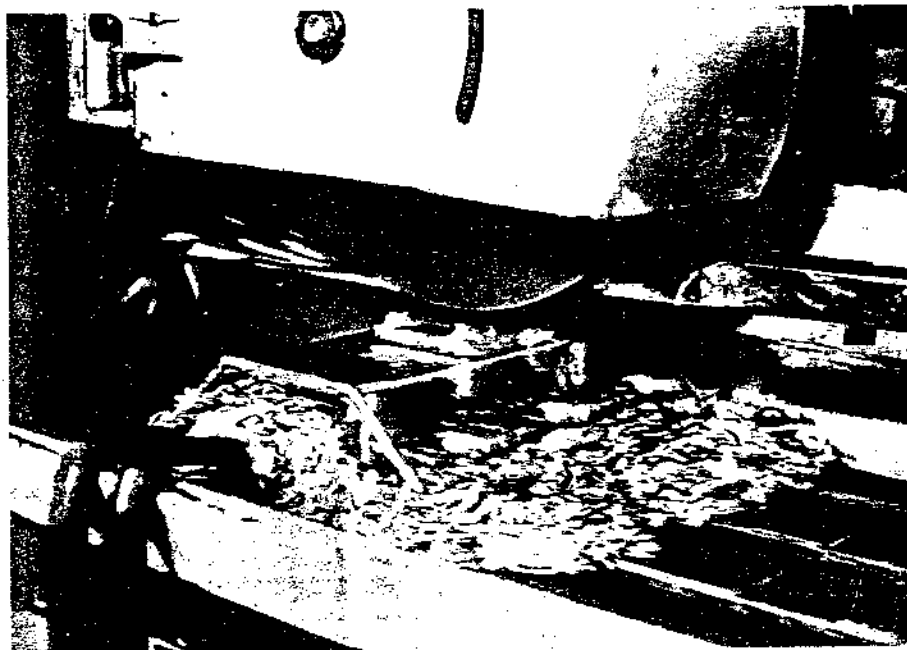


Figura 5.4- Dinamômetro trabalhando.

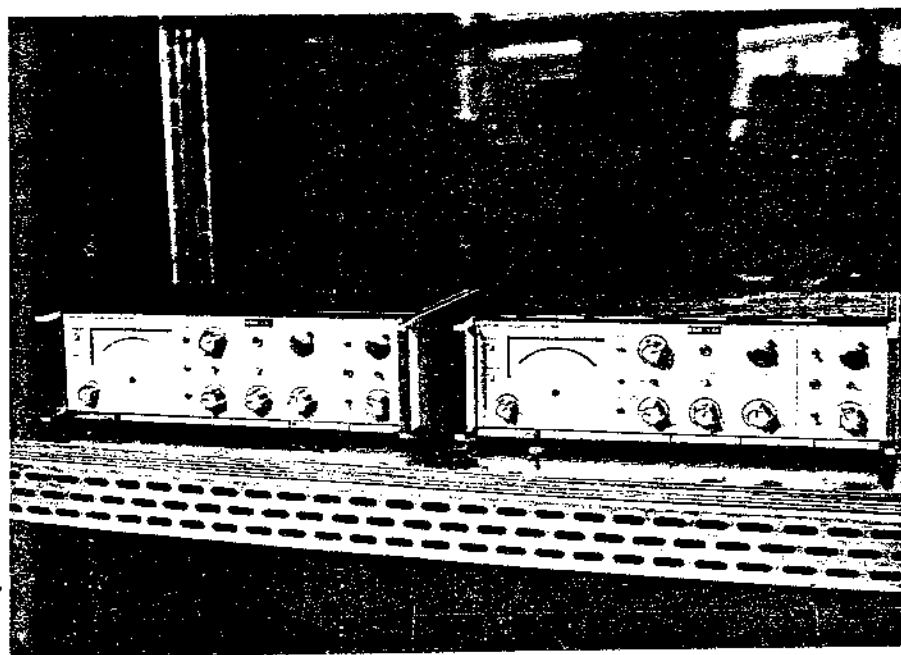
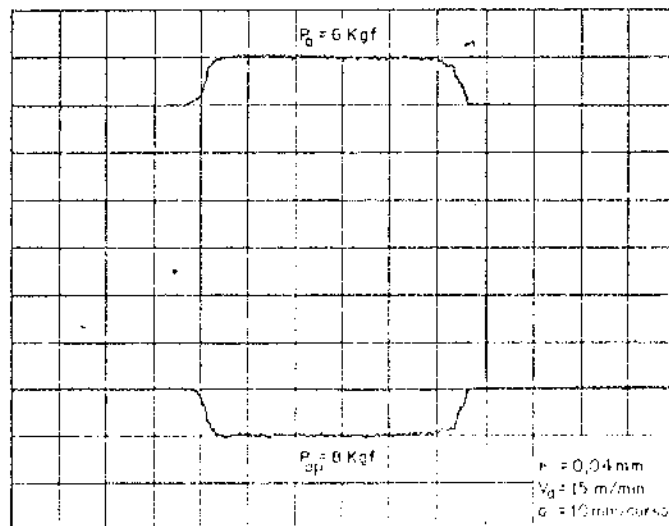
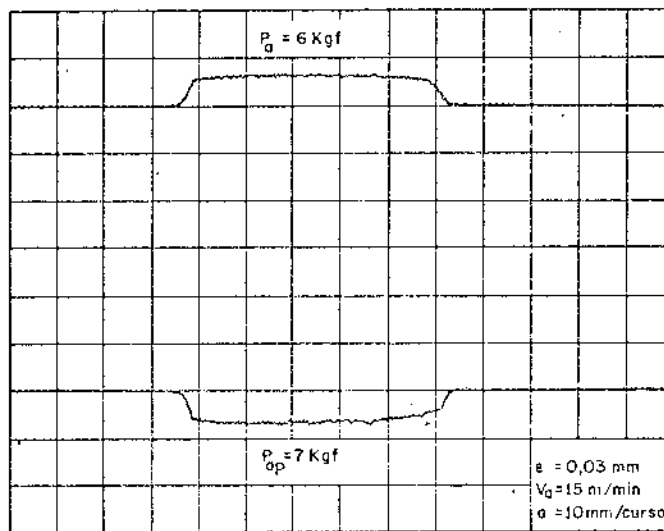
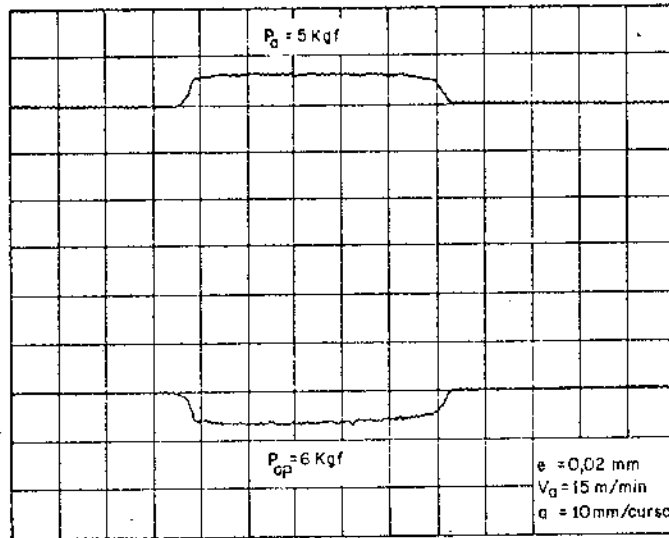
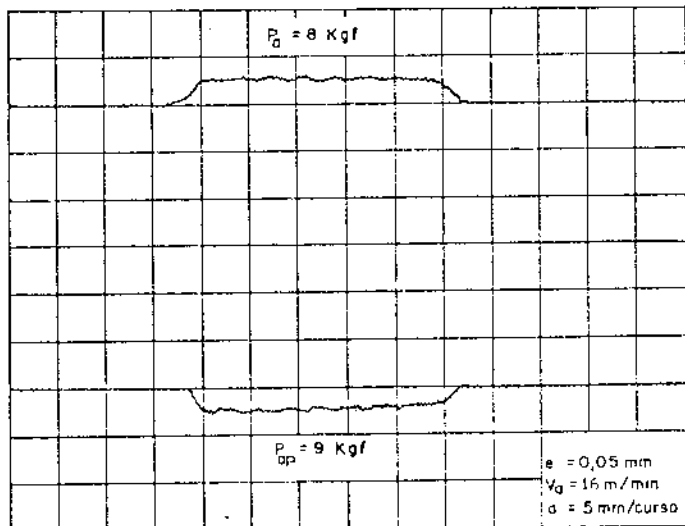
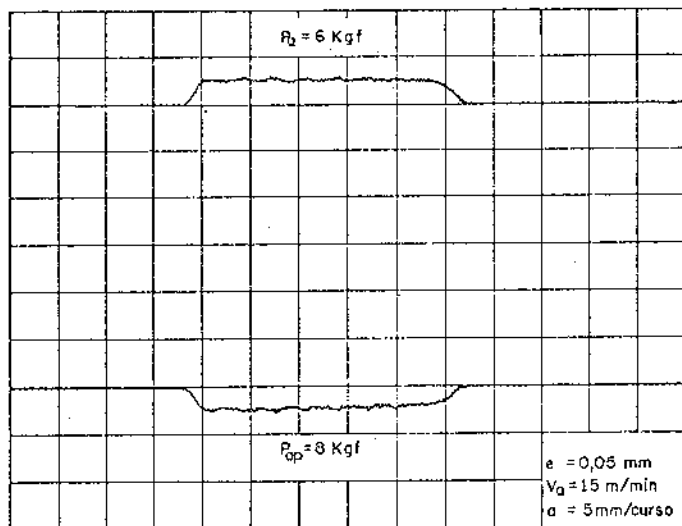
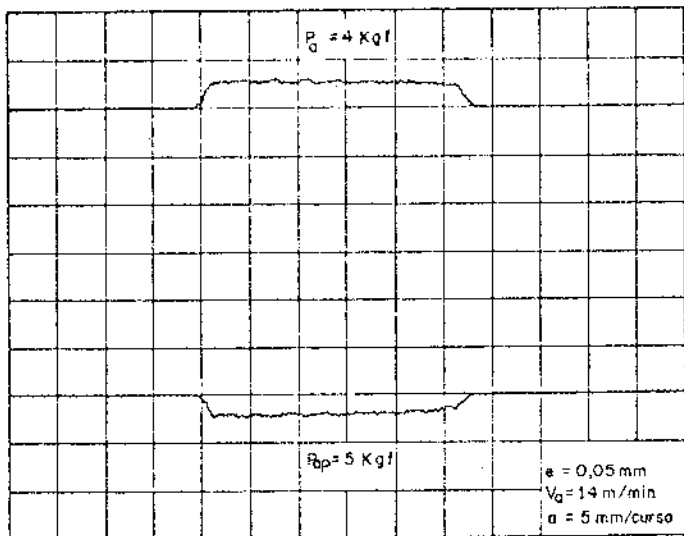


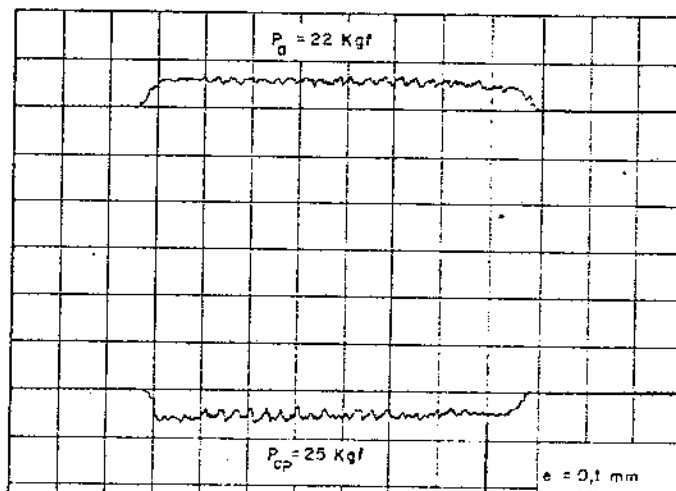
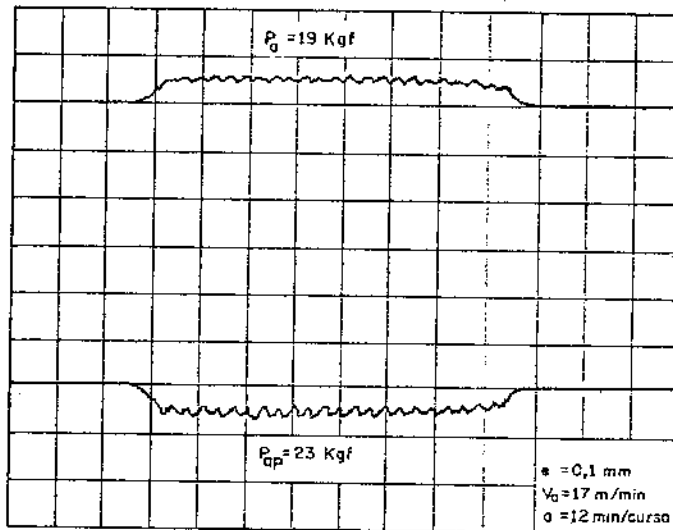
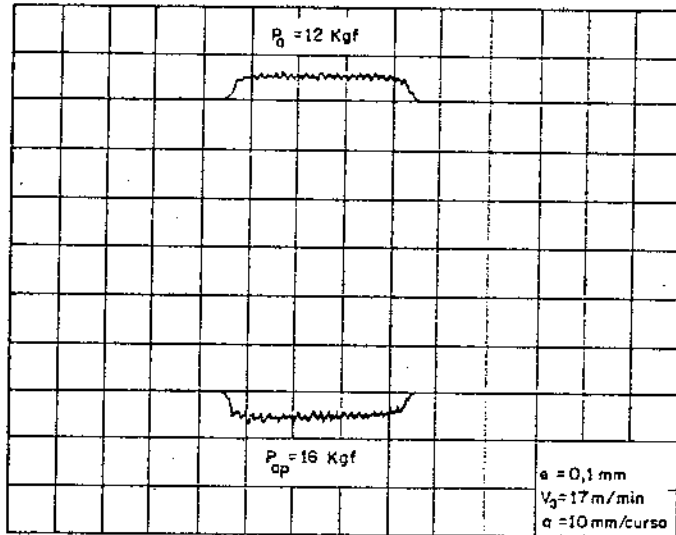
Figura 5.5- Pontes amplificadoras utilizadas.

Conforme o item 5.3, utilizou-se um registra-

registros obtidos durante os ensaios para diferentes condições de usinagem.





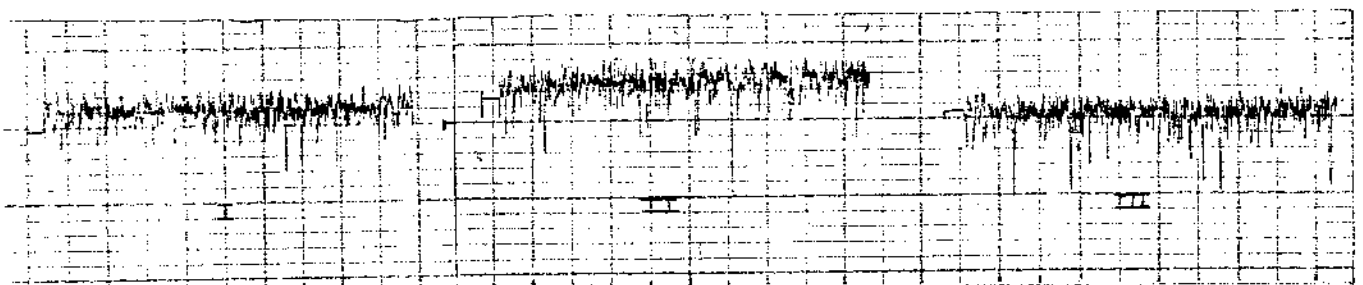


5.3.3- Considerações sôbre rugosidade das superfícies

As superfícies das peças, por mais perfeitas - que sejam, sempre apresentam irregularidades em relação à superfície geométrica. A rugosidade influe no comportamento / das superfícies em várias de suas utilizações, tais como : desgaste, atrito, ajuste, corrosão, resistência à fadiga , / aparência, propriedades óticas, superfícies de medição, etc,. Em vista disso foi realizado na Divisão de Metrologia do Centro de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, algumas determinações da rugosidade de superfícies de alguns corpos de prova, através de um rugosímetro Perth-O-Meter, conforme figura 5.7 e figura 5.8 . Os valores obtidos encontram-se na tabela V.2 [5].

Tabela V.2- Rugosidade R_a obtida nos ensaios

Corpo de Prova	Rugosidade (R_a) μ_m	Condições de usinagem		
		e (mm)	a_t (mm/curso)	v_a (m/min)
I	0,10	0,01	4	7
II	0,12	0,02	5	10
III	0,18	0,04	7	11
IV	2,50	0,10	10	20
V	2,50	0,12	9	19
VI	2,50	0,09	7	15



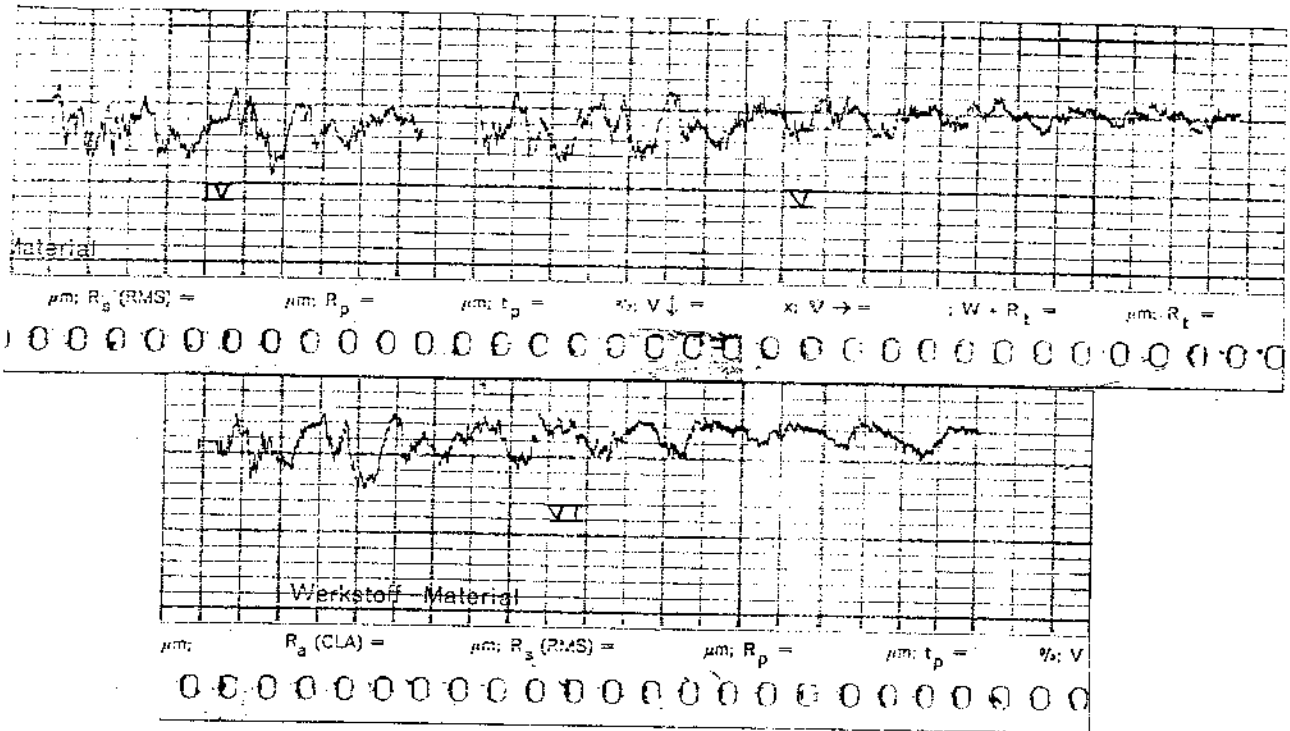


Figura 5.8- Registros IV, V e VI, obtidos no registrador Perth-O-Meter.

5.4- Determinação da Pressão Específica de Corte [1,23]

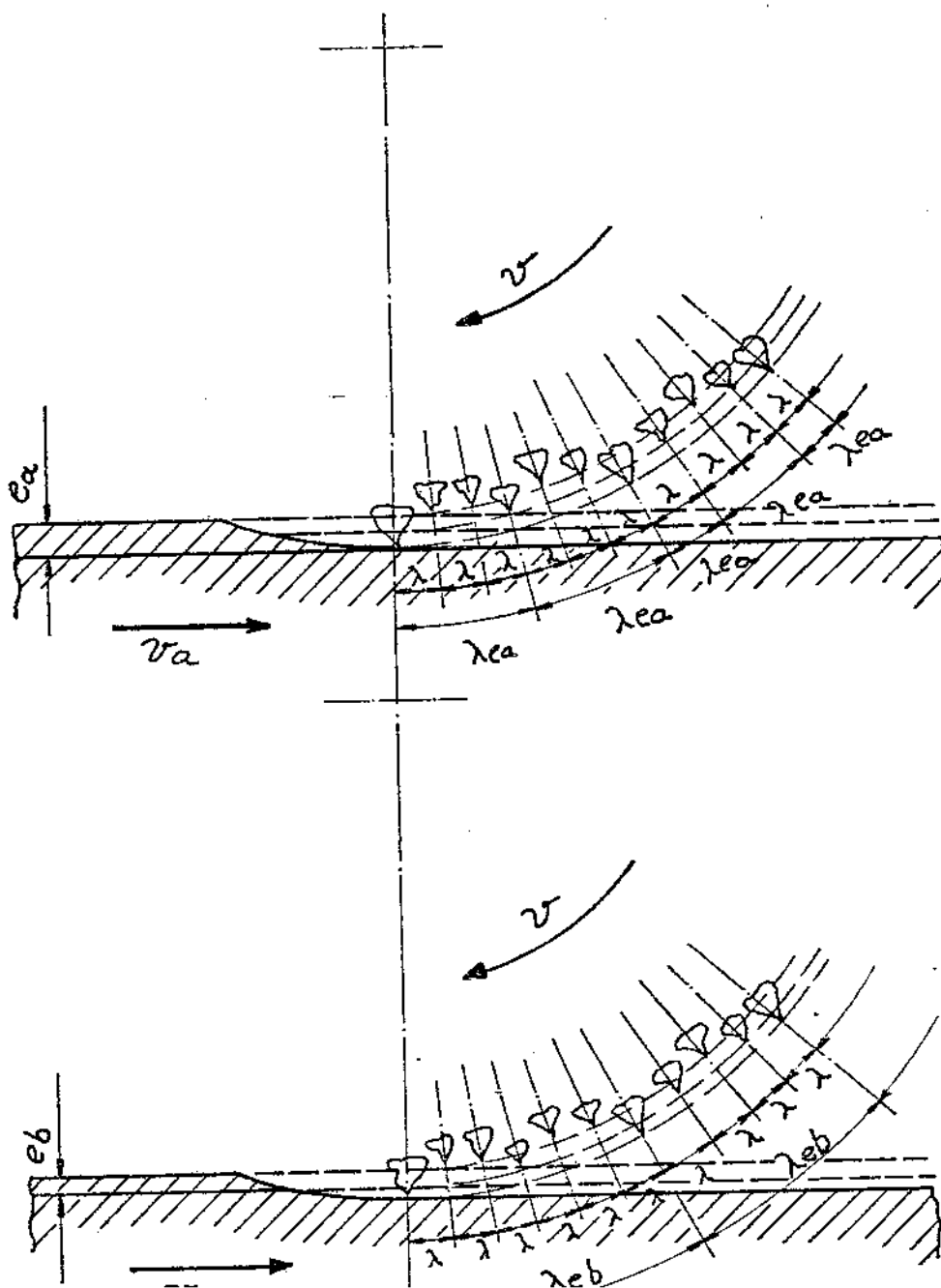
Na retificação, a determinação do número de / grãos ativos depende de uma série de fatores, tais como: tamanho do grão, distribuição dos mesmos no rebôlo, profundidade de penetração, dureza do rebôlo, forma do rebôlo, velocidade de avanço, velocidade de corte, etc. Denominando-se / de λ_e a distância efetiva média entre dois grãos ativos / tem-se :

$$\lambda_e = \frac{\pi D}{Z_e} \quad (5.1)$$

onde:

A figura 5.9 mostra a dependência da distância efetiva λ_e com a espessura e penetração. Na mesma ve-se claramente que com o aumento do valor de e , o número de grãos ativos aumenta e conseqüentemente o valor de λ_e diminui.

A figura 5.10 apresenta os valores da distância média efetiva dos grãos λ_e em função da espessura de penetração e das características do rebôlo, segundo trabalhos realizados na Technische Hochschule de Aachen [1].



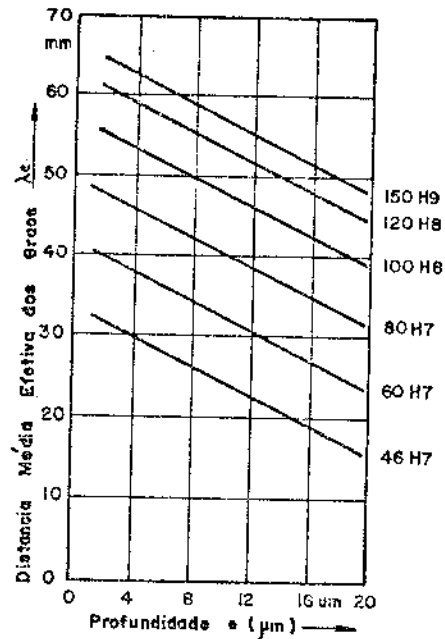


Figura 5.10- Distância média efetiva dos grãos λ_e , em função da espessura de penetração e e das características do rebolo.

A espessura média de corte h_m (figura 5.11), na operação de retificação, é definida pela relação (Curso Pós-Graduação "Usinagem por Abrasão", ministrado pelo Prof. Dr. Dino Ferraresi na UNICAMP [23]):

$$h_m = \lambda_e \frac{v_a}{60 \cdot v} \sqrt{\frac{e}{D}} \quad (5.2)$$

onde:

- h_m = espessura média de corte, em mm
- λ_e = distância média efetiva dos grãos, em mm
- v_a = velocidade de avanço, em m/min
- v = velocidade de corte, em m/s
- e = espessura de penetração, em mm
- D = diâmetro do rebolo, em mm.

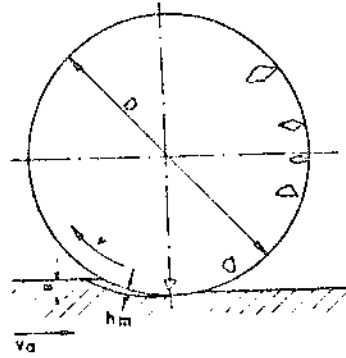


Figura 5.11- Espessura média de cavaco h_m

A força de avanço P_a , na retificação plana tangencial, pode ser confundida com a força tangencial média P_{tm} do rebôlo, tendo-se a expressão [23] :

$$P_a = k_m \cdot e \cdot a_t \frac{v_a}{v \cdot 60} \quad (5.3)$$

onde:

k_m = pressão específica média de corte, em kgf/mm^2 ;

a_t = avanço transversal ou largura de corte, em $mm/curso$.

Substituindo-se os valores experimentais da / tabela V.1 nas equações 5.2 e 5.3, pode-se determinar os valores da espessura média de corte h_m e da pressão específica média de corte, k_m conforme mostra a tabela V.3.

Segundo KIENZLE, a pressão específica de corte, para a operação de torneamento com espessura de corte de 0,1 a 1,4 mm e profundidade de corte maior ou igual a 4 vezes o avanço, é dada praticamente pela relação [5]:

$$k_m = k_{s_1} \cdot h^{-Z} \quad (5.4)$$

Tabela V.3- Determinação da pressão específica média de corte k_m e da espessura média de cavaco h_m , para diferentes condições de ensaio.

ENSAIO	v (m/s)	v_a (m/min)	e (mm)	a_t (mm/curso)	P_a (kgf)	k_m (kgf/mm ²)	h_m (mm)
I	31	15	0,010	2	0,75	4650	0,00103
II	31	15	0,010	5	1,05	4334	0,00103
III	31	15	0,010	7	2,28	4038	0,00103
IV	31	20	0,010	2	0,89	4138	0,00138
V	31	20	0,010	5	1,89	3515	0,00138
VI	31	20	0,010	7	3,05	4052	0,00138
VII	31	15	0,016	2	1,66	6432	0,00100
VIII	31	15	0,016	5	3,05	5692	0,00100
IX	31	15	0,016	7	3,82	4411	0,00100
X	31	20	0,016	2	1,89	5493	0,00131
XI	31	20	0,016	5	3,82	4441	0,00131
XII	31	20	0,016	7	4,59	3811	0,00131
XIII	31	15	0,02	2	1,51	5681	0,00101
XIV	31	15	0,02	5	4,59	4727	0,00101
XV	31	15	0,02	7	4,98	4229	0,00101
XVI	31	20	0,02	2	2,28	5301	0,00130
XVII	31	20	0,02	5	4,59	4269	0,00130
XVIII	31	20	0,02	7	5,36	3560	0,00130

onde:

k_{s_1} = constante específica do metal para uma secção de corte de 1 mm de espessura por 1mm de largura;

Z = coeficiente angular da reta.

As grandezas k_{s_1} e Z dependem do material da peça e das condições de usinagem.

Esta expressão foi aplicada posteriormente / para a operação de fresamento, verificando-se a validade da mesma em faixas de trabalho normalmente utilizadas nesta / operação [35].

Admitindo-se que a fórmula de KIENZLE seja válida também para a operação de retificação, teríamos a expressão:

$$k_m = k_{s_1} \cdot h_m^{-Z} \quad (5.5)$$

onde:

h_m seria a espessura média de corte.

A equação (5.5) expressa logaritmicamente resulta:

$$\log k_m = \log k_{s_1} - Z \cdot \log h_m \quad (5.6)$$

Representando-se graficamente em coordenadas logarítmicas (ou em progressões geométricas) tem-se uma reta definida pelos parâmetros k_{s_1} e Z . A figura 5.12 apresenta os valores obtidos através da tabela V.3, para os avanços / transversais $a_t = 2,5$ e 7 mm/curso. Utilizando-se o método estatístico da regressão linear, obtem-se as retas médias representativas da função acima, para os diferentes avanços, onde os coeficientes de determinação c_d assumem os valores:

1) $a_t = 2\text{mm/curso}$

$c_d = 0,30$

2) $a_t = 5\text{mm/curso}$

$c_d = 0,56$

3) $a_t = 7 \text{ mm/curso}$

$c_d = 0,50$

Verifica-se ainda que se não considerassemos a influência do avanço transversal a_t , isto é, se tomassemos todos os pontos de ensaio para a obtenção das retas representativas da função acima, o coeficiente de determinação c_d seria 0,22, portanto menos significativo.

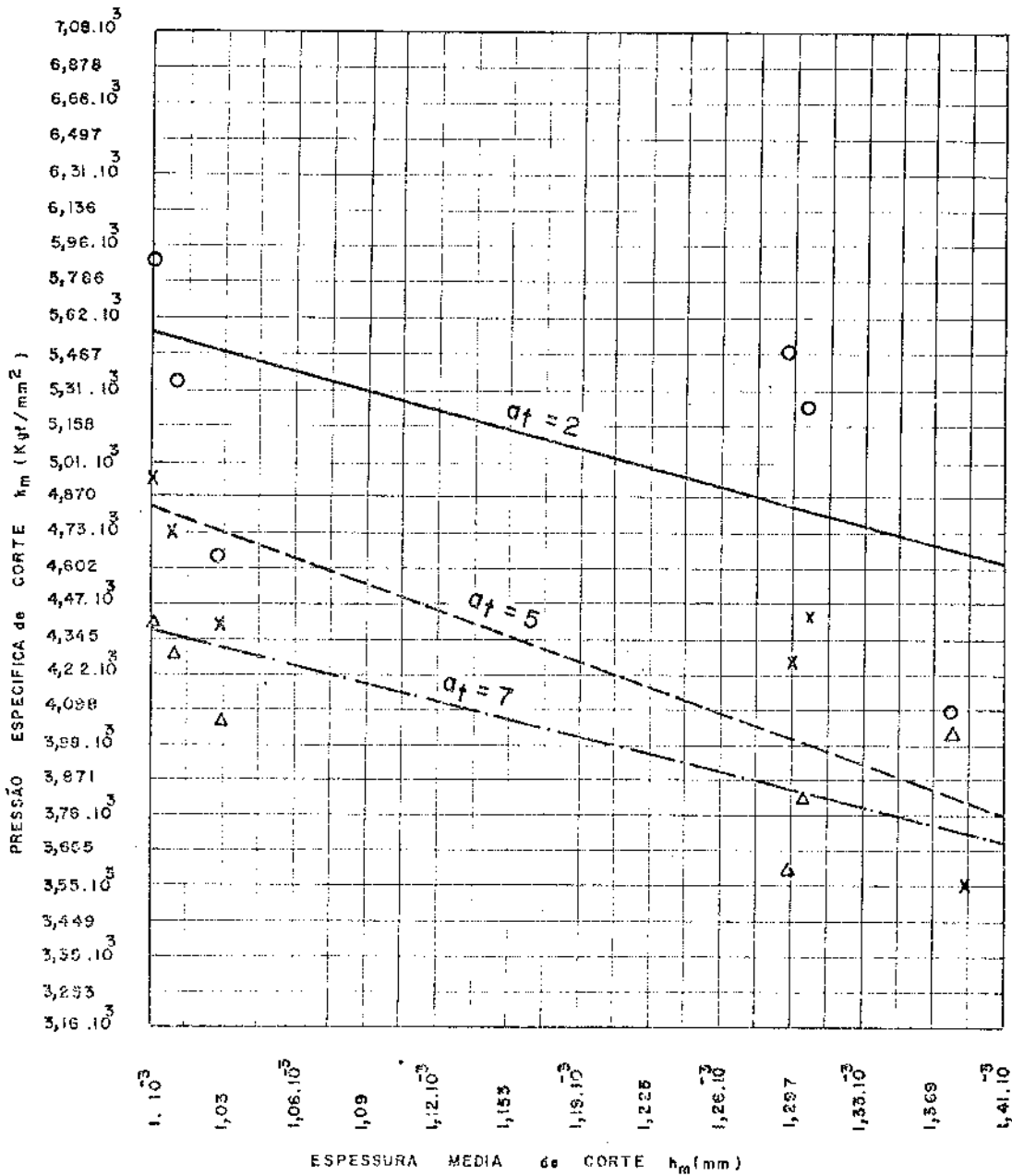


Figura 5.13- Variação da pressão específica média de corte k_m com a espessura média de corte h_m .

Segundo PREGGER, para a aplicação da fórmula de KIENZLE no processo de retificação, deve-se levar em conta, além do material da peça e da espessura média de corte h_m , o ângulo de saída γ do grão, o qual varia de 6° a 60° . Verifica-se que, quanto maior o tamanho do grão, maior o ângulo negativo γ . Desta forma este pesquisador introduz na fórmula de KIENZLE um fator corretivo f_γ ao valor de k_{s_1} , obtido na operação de torneamento.

A nosso ver deve ser introduzido também um fator corretivo f_α , para levar em conta o avanço transversal. Devido ao fato que a espessura de penetração e na operação de retificação é relativamente pequena e o rebôlo sofre uma deformação elástica, a parte $B-a_t$ do rebôlo também trabalha. Logo a pressão específica de corte k_{s_1} varia com o valor de a_t (figura 5.1).

Se numa primeira aproximação, foi utilizada a fórmula de KIENZLE para os parâmetros obtidos na operação de torneamento, agora na operação de retificação, a expressão corrigida seria:

$$k_m = k_{s_1} \cdot h_m^{-Z} \cdot f_\gamma \cdot f_\alpha \quad (5.7)$$

Num processo menos aproximado, deveriam ser determinados os parâmetros k_{s_1} e Z da fórmula 5.5, para as condições de usinagem especificadas.

Segundos ensaios realizados pela Divisão de Máquinas Ferramentas do Centro de Tecnologia da UNICAMP, para a operação de torneamento com aço ABNT 1020, de mesmas propriedades do material ensaiado, obtiveram-se os valores:

$$\begin{aligned} v &= 100 \text{ m/min} \\ p &= 3 \text{ mm} \\ \alpha &= 6^\circ \\ \gamma &= 12^\circ \\ \lambda &= 60^\circ \\ k_{s_1} &= 140 \\ Z &= 0,3 \end{aligned}$$

A figura 5.13 apresenta a representação gráfi-
ca desta função, para a operação de torneamento, e a repre-
sentação das funções anteriores para a operação de retifica-
ção.

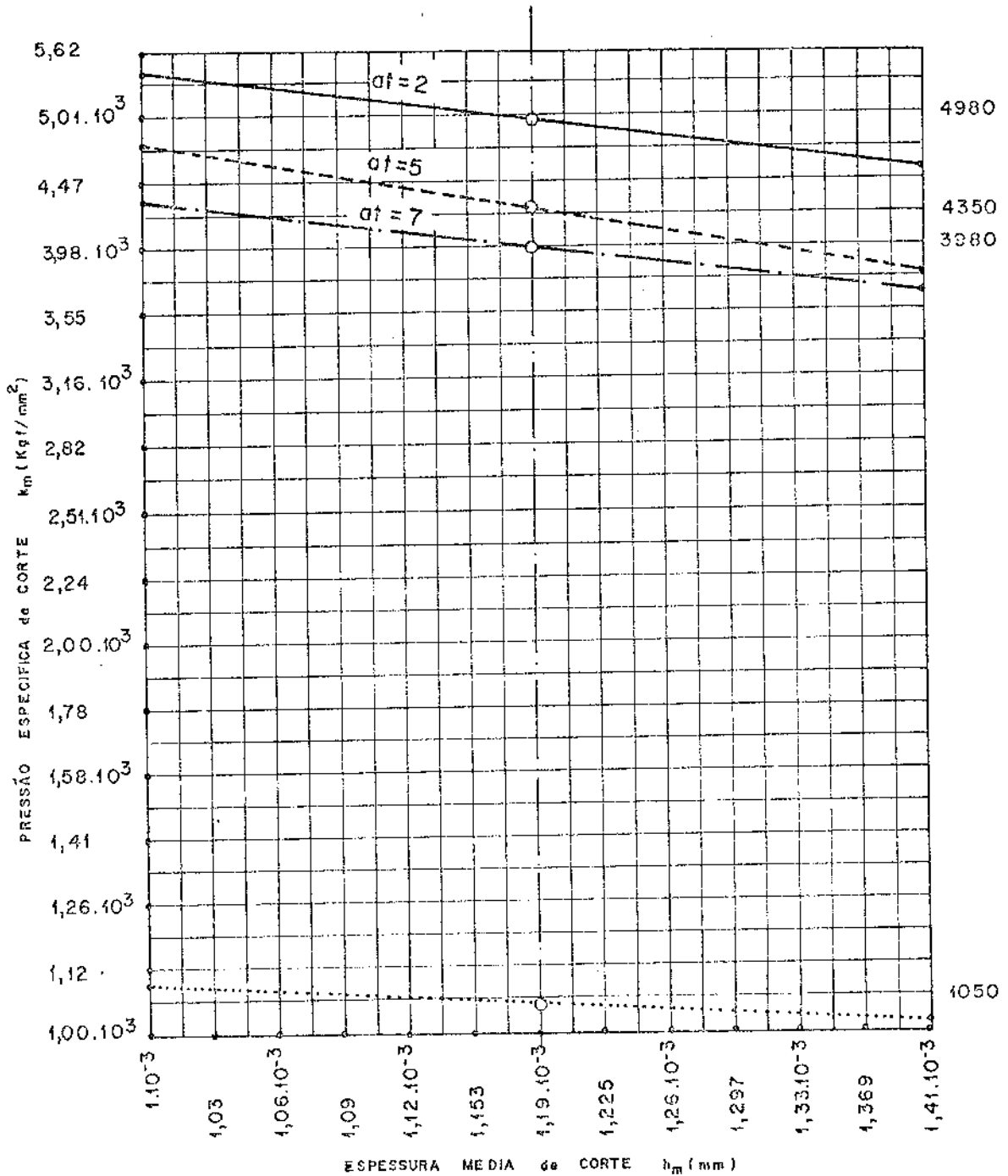


Figura 5.13- Variação da pressão específica média de corte k_m com a espessura média de corte h_m , para operações de retificação e torneamento.

Introduzindo-se a correção de PREGER, devido a influência da geometria da ferramenta dada pelo gráfico da figura 5.14, ou seja $f_Y = 4,9$, pode-se determinar aproximadamente quais seriam as correções f_a , devido ao avanço transversal, na faixa normal de utilização na operação ($h_m = 1,0 \cdot 10^{-3}$ a $1,41 \cdot 10^{-3}$ mm).

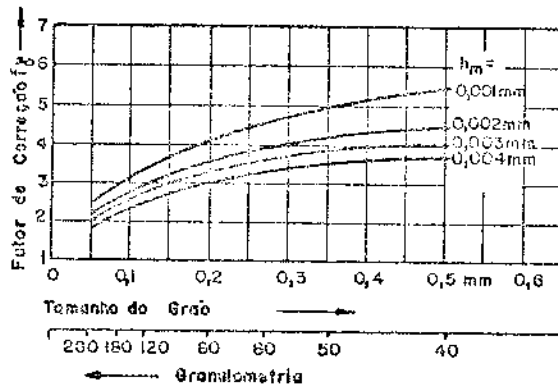


Figura 5.14- Fator de correção f_Y para o cálculo da pressão-específica de corte, em função da granulometria do rebolo, segundo Preger [1].

Desta forma, as correções medias de f_a para uma espessura de corte $h_m = 1,19 \cdot 10^{-3}$ mm, seriam:

1) avanço transversal $a_t = 2$ mm

$$k_m \text{ (torneamento)} = 1050 \text{ kgf/mm}^2$$

$$k_m \text{ (retificação)} = 4980 \text{ kgf/mm}^2$$

$$f_Y = 4,9$$

$$f_a = \frac{4980}{1050 \cdot 4,9} = 0,96$$

2) avanço transversal $a_t = 5$ mm

$$k_m \text{ (torneamento)} = 1050 \text{ kgf/m}^2$$

$$k_m \text{ (retificação)} = 4350 \text{ kgf/m}^2$$

$$f_Y = 4,9$$

$$f_a = \frac{4.350}{1050 \cdot 4,9} = 0,84$$

3) avanço transversal $a_t = 7 \text{ mm}$

$$k_m \text{ (torneamento)} = 1050 \text{ kgf/mm}^2$$

$$k_m \text{ (retificação)} = 3980 \text{ kgf/mm}^2$$

$$f_\gamma = 4,9$$

$$f_a = \frac{3980}{1050 \cdot 4,9} = 0,77$$

Desta forma, quanto menor o avanço transversal a_t (ou largura de corte b), maior o valor de f_a , indicando / maior a influência da parte restante do rebôlo $B - a_t$ no aumento da força tangencial de retificação, como mencionado anteriormente. O fator f_a leva em conta também uma pequena influência da chamada profundidade de corte p na operação de torneamento. Pois verifica-se nesta operação que o valor de p / também influe na pressão específica de corte k_s [15 , 34].

C A P Í T U L O VI

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1- O presente trabalho teve como objetivo, contribuir para o aumento dos conhecimentos acêrca da construção, aferição e ensaios de dinamômetros para operação de retificação.

6.1.1- Inicialmente executou-se um projeto, no qual / procurou-se satisfazer as condições préviamente estabelecidas e as exigências quanto ao funcionamento do dinamômetro.

6.1.2- Posteriormente, satisfeitas as condições acima, iniciou-se a construção do dinamômetro, tomando-se um cuidado em especial com a usinagem das lâminas do mesmo. Para a aferição estática do dinamômetro, houve a necessidade da construção de um dispositivo especial, o qual permitiu a aplicação independente e simultânea das forças de aferição, em duas direções ortogonais.

6.1.3- Na aferição estática; o dinamômetro mostrou o seu comportamento linear, uma sensibilidade satisfatória e a não interferência entre as duas componentes da força de usinagem. Foi verificado também, que para diferentes pontos de / aplicação das cargas na mesa dinamométrica, os resultados de medida foram os mesmos.

6.1.4- A análise estatística dos resultados de ensaio, nos permitiu a determinação dos erros das componentes da força de usinagem, assim como os intervalos de confiança.

6.1.5- Na determinação da frequência própria do dinamômetro foram utilizados diferentes processos; os quais conduziram a resultados condizentes com os previstos no estudo teórico anterior. O valor encontrado para esta frequência, permite a utilização do dinamômetro em condições normais de operação em diferentes materiais.

6.1.6- Quando em operação, o dinamômetro se comportou satisfatoriamente. Os ponteiros indicadores das pontes amplificadoras permaneceram estáveis na posição de medida.

6.1.7- No procedimento experimental foi verificado que, além da influência da granulometria do rebôlo (trabalhos de - PREGER), o avanço transversal (ou largura de corte) exerce - também uma influência na determinação da força tangencial de retificação. Desta forma foi proposto um coeficiente corretivo f_a na fórmula deste pesquisador.

6.1.8- Sugere-se numa fase posterior a este trabalho, a realização de um número razoável de ensaios de diferentes - materiais, com diferentes rebôlos, sob condições de usinagem - variáveis, a fim de determinar os parâmetros das fórmulas 5.2 e 5.7. (λ_e , k_{s_1} , f_γ e f_a).

Provavelmente uma fórmula mais prática para expressar a relação entre as grandezas envolvidas no processo de retificação plana tangencial, seria:

$$P_t = K \cdot e^x \cdot a_t^y \cdot \left(\frac{v_a}{v} \right)^{2(1-x)},$$

obtida através das equações (5.2, 5.3 e 5.7),
onde:

P_t = força tangencial de corte, aproximadamente igual a força de avanço;

e = espessura de penetração do rebôlo;

a_t = avanço transversal ou largura de corte;

v_a = velocidade de avanço da mesa;

v = velocidade tangencial do rebôlo;

k, x, y = coeficientes que variam com o material da peça, o tipo e dimensões do rebôlo.

Na continuação de suas pesquisas, o autor se propõe realizar o estudo experimental dos fatores envolvidos neste processo de usinagem, assim como determinação dos parâmetros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PREGER, K.T. - Zerspantechnik. Braunschweig, F. Vieweg, 1970.
- [2] SARTORI, S. - Uma contribuição ao estudo das medidas das tensões em estruturas e ao ensaio de motoniveladoras. Campinas, Centro de Tecnologia-UNICAMP, 1970.
- [3] LOEWEN, E.G. ; MARSHALL, E.R. & SHAW, M.C. - Electric strain gage tool dynamometers. Proc. Am. Soc. Exp. stress Analysis, 1951. v.8.
- [4] TUPPENY, W.H. & KOBAYASHI, A.S. - Manual on experimental stress analysis. Washington, Society for experimental stress analysis, 1965.
- [5] FERRARESI, D. - Fundamentos da usinagem dos metais. São Paulo, Edgard Blücher. 1970. v.1.
- [6] SARTORI, S. - Transdutores piezoelétricos. Campinas, Centro de Tecnologia-UNICAMP, 1970.
- [7] DOVE, R.C. & ADAMS, P.H. - Experimental stress analysis and motion measurement. Columbus, Charles E. Merrill Books, 1964.
- [8] MANUAL del ingeniero de taller, trad. de Manuel Company. Barcelona, Gustavo Gili, 1962.
- [9] PHILIPS Catalogue. - Electrical measurement of mechanical quantities, 1970/1971.

- [10] CHIAVERINI, V. - Aços-carbono e aços-liga. São Paulo, Associação Brasileira de Metais, 1971.
- [11] TIMOSHENKO, S. - Strength of materials. New York, D. Van Nostrand, 1948. v.2.
- [12] LEME, R.A.S. - Curso de estatística. Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico, 1969.
- [13] SPIEGEL, M.R. - Estatística. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1971.
- [14] MARQUES, R.M. & BERQUÓ, E. - Análise de variância. São Paulo, Dep. Estatística Aplicada da Fac. de Higiene e Saúde Pública-USP, 1963.
- [15] ARAUJO, S. - Dinamômetro para medidas de forças no torneamento. Campinas, Centro de Tecnologia, 1974. tese (mestrado) - Centro de Tecnologia da Univ. Est. de Campinas.
- [16] SANTEN, G.W.V. - Introduction to a study of mechanical vibration. Amsterdam, N.V. Wed. J. Ahrend & Z N, 1958.
- [17] BRÜEL & KJAER - Complex modulus apparatus.
- [18] ARMAREGO, E.J.A. & BROWN, R.H. - The machining of metals. New Jersey, Prentice-Hall, 1969.
- [19] COLPAERT, H. - Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. São Paulo, Edgard Blücher, 1959.
- [20] NORTON - Manual de retífica. São Paulo.
- [21] PANKINE, A.V. - Usinage des metaux par la coupe. Moscow, École Superieure, 1970.

- [22] KOTTHAUS, H. - Processos e dispositivos de produção. São Paulo, Polígono, 1959.
- [23] FERRARESI, D. - Retificação. São Carlos, Escola de Eng. de São Carlos-USP, 1965.
- [24] NASH, W.A. - Resistência dos materiais. New York, Schaum, 1964.
- [25] LUCCHESI, D. - Rectificado y acabado. Barcelona, Labor, 1973.
- [26] CHEVALIER, A. & LABILLE, R. - Mecanizado com abrasivos. Madrid, TEA, 1971.
- [27] AMERICAN Society for Metals-Machining. Ohio, Metals Park, 1967. (Metals handbook, 3.)
- [28] GAVRYUSHIN, A. ; LISITSYN, & TRIFONON, O. - Metal-cutting machine tools. Moscow, MIR, 1967.
- [29] RODIN, P. - Design and production of metal-cutting tools. Moscow, MIR, 1968.
- [30] POTMA, T. - Strain gauges, theory and application. London, Paperbacks, 1967.
- [31] RUFFINO, R.T. - Algumas considerações sobre as forças de usinagem no torneamento de aço-carbono. Escola de Engenharia de São Carlos, 1971. tese (doutoramento) - Esc. Eng. São Carlos da Univ. de São Paulo.
- [32] GVENIS, B. ; DOCTOR L. & TERGAN, V. - Trabajos in las rectificadoras cilindricas. Moscow, MIR, 1970.

- [33] DAAR, H.L.A. - Uma contribuição ao conhecimento do processo de furação dos aços com brocas helicoidais. Escola de Engenharia de São Carlos, 1967. tese (doutoramento) - Esc. Eng. São Carlos da Univ. de São Paulo.
- [34] KUNKEL, H. - Das dynamische Verhalten des systems Hauptspindel-Lagerung einer Werkzeugmaschine. Industrie-Anzeiger, Aachen, 89(6):25-28, 1967.
- [35] FERRARESI, D. - Usinagem dos metais; furação, alargamento, fresamento e processos não convencionais. São Paulo, Associação Brasileira de Metais, 1973.

A P Ê N D I C E - I

Simbologia Utilizada

a_t	- avanço transversal da mesa	<i>mm/curso</i>
A	- amplitude	
B	- largura do rebôlo	<i>mm</i>
b	- largura da lâmina	<i>mm</i>
b_o	- largura da mesa dinamométrica	<i>mm</i>
b_1	- largura do anel dinamométrico	<i>mm</i>
e	- coeficiente térmico de resistividade	
d	- decremento logarítmico	
$d_{e,i}$	- diâmetro do anel dinamométrico	<i>mm</i>
e	- espessura de penetração do rebôlo	<i>mm</i>
e_1	- espessura do anel	<i>mm</i>
E	- módulo de elasticidade	<i>kgf/mm²</i>
f	- flecha	<i>um</i>
f_u	- fator de correção	
f_n	- frequência natural	<i>HZ</i>
g	- aceleração da gravidade	<i>cm/s²</i>
h	- altura da lâmina	<i>mm</i>
h_o	- altura da mesa dinamométrica	<i>mm</i>
h_m	- espessura média de corte	<i>mm</i>
k	- constante elástica de mola	<i>kgf/cm</i>
k_m	- pressão específica média de corte	<i>kgf/mm²</i>
k_{s_1}	- pressão unitária de corte	<i>kgf/mm²</i>

l	- comprimento da lâmina	mm
L_i	- leitura na ponte amplificadora	mV
M_f	- momento fletor	kgf.cm
P_a	- força de avanço	kgf
P_{ap}	- força de apoio	kgf
S^2	- estimativa da variância	
T_o	- temperatura	$^{\circ}C$
t_p	- coeficiente de probabilidade para pequenas amostras	
T	- período	seg
V_a	- velocidade de avanço longitudinal da mesa	m/min
V	- velocidade de corte	m/s
α	- coeficiente de resistividade	$\Omega/\Omega^{\circ}C$
α_T	- coeficiente de temperatura do extensômetro	$^{\circ}C^{-1}$
β	- fator de amortecimento	
γ	- ângulo de saída do grão do rebôlo	
ϵ	- deformações	
λ_e	- distância média efetiva dos grãos do rebôlo	mm
ν	- coeficiente de Poisson	
ξ_p	- coeficiente de probabilidade para grandes amostras	
ρ	- peso específico	kgf/dm ²
σ	- tensões normais	
ϕ	- fator de amplificação	
[]	- referência bibliográfica	
()	- numeração das equações	
0,1,2	- índices	