

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

CENTRO DE TECNOLOGIA

"CONTRIBUIÇÃO À DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE USI
NAGEM EM BROCAS HELICOIDAIS "

Engº MANUEL HERNAN CISTERNAS HENRIQUEZ

* TRABALHO APRESENTADO PARA OBTENÇÃO
DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA
MECÂNICA, PELA FACULDADE DE ENGE
NHARIA DE CAMPINAS DA UNICAMP *

CAMPINAS

-1982-

BRUNO

Classif.	T
Autor	C497c
V.	Ex.
Tombo BC/	4702
	BCI

R E S U M O

CM-00034024-1

A presente pesquisa tem por objetivo, fornecer aos que se dedicam ao processo de manufatura, em particular à furação de aços com brocas helicoidais, conhecimentos sobre o comportamento das características de desgaste das brocas e seu relacionamento com os demais parâmetros envolvidos no processo, tais como força de penetração, momento de torção, variação destas grandezas, trepidação da máquina-ferramenta, com o fim de se determinar um critério para o estabelecimento de um desgaste admissível. Através deste índice, são construídas as curvas de vida do par ferramenta-peça, as quais permitem determinar as condições econômicas de usinagem.

Com esta finalidade, foi projetado e construído um dinamômetro para a medição da força de penetração e momento torçor, no processo de furação, como também foram desenvolvidos dispositivos para medição dos desgastes nas brocas. Após um número razoável de ensaios, foi determinado um índice de desgaste admissível e construídas as curvas de vida para um caso particular.

A B S T R A C T

The purpose of this research is to supply those interested in manufacturing processes, mainly steel drilling with helical drills, knowledge on the behavior of characteristics of drill wear and its relationship with other parameters involved in the process, such as penetration force, torsion momentum, variation of these figures, machine-tool vibration to determine a criterion to establish admissible wear. From this index, life curves of the tool-workpiece pair are drawn which will enable the economic conditions of machining to be determined.

With this purpose, a dynamometer has been designed and built to measure the penetration force and torsion momentum in the drilling process, and devices have been developed to measure drill wear. After a reasonable number of tests, an admissible wear index has been determined, and life curves have been drawn for a specific case.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no CENTRO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, sob a orientação do seu Superintendente, Prof.Dr. DINO FERRARESI, ao qual agradeço pelo estímulo, assessoramento, cooperação e apoio que incansavelmente dedicou na orientação e execução deste trabalho.

Agradeço também a equipe da Divisão de Controle de Qualidade do Centro de Tecnologia, onde tive a oportunidade de trabalhar vários anos e desenvolver minhas pesquisas.

À Srta. VÂNIA MARIA TONIN, pela sua dedicação e perfeito trabalho de datilografia.

Expresso também a minha gratidão a todos os engenheiros e funcionários do Centro de Tecnologia, que cooperaram e tornaram possível a realização deste trabalho.

CIDADE UNIVERSITÁRIA ZEFERINO VAZ

-NOVEMBRO DE 1981-

GRACIAS A MIS PADRES

MANUEL

ROSA

A MI QUERIDA ESPOSA

GLADYS

A NUESTROS HIJOS

PATRICIO ESTEBAN

ALEJANDRA SIMONE

A UN AMIGO

Rvdo. Pde. QUINTIN GARCIA

Gracias a la vida que me ha dado tanto,
me ha dado el sonido y el abecedario,
con él las palabras que pienso y declaro:
madre, amigo, hermano y luz alumbrando,
la ruta del alma del que estoy amando.

Í N D I C E

	<u>PÁGINA</u>
CAP. I - INTRODUÇÃO	01
CAP. II - PROJETO E CONSTRUÇÃO DO DINAMÔMETRO	04
2.1- Considerações Gerais	04
2.2- Projeto	08
2.2.1- Momento de Torção	09
2.2.2- Força de avanço	11
CAP. III - AFERIÇÃO DO DINAMÔMETRO	14
3.1- Aferição Estática	14
3.1.1- Construção da balança de aferição	14
3.1.2- Alavanca para aplicação da força de avanço	16
3.1.3- Aferição do dinamômetro para a força de avanço	21
3.1.4- Alavanca para aplicação do momen- to de torção	27
3.2- Aferição Dinâmica	31
3.2.1- Determinação das frequências natu- rais do dinamômetro	31
3.2.1.1- Método da percussão	31
3.2.1.2- Método da oscilação for- çada	34
3.2.2- Determinação do grau de amorteci- mento	43
3.2.2.1- Método da percussão	43
3.2.2.1.1- Direção de corte	43
3.2.2.1.2- Direção de avanço	46

	<u>PÁGINA</u>
3.2.2.2- Método da força pulsante.	47
3.2.2.2.1- Direção de corte	47
3.2.2.2.2- Direção de avanço	50
3.2.3- Fator de amplificação " Φ " para a direção de corte	52
3.2.4- Fator de amplificação " Φ " para a direção de avanço	56
CAP. IV - DESGASTE E VIDA DAS BROCAS HELICOIDAIS .	57
4.1- Considerações sobre a geometria das bro- cas helicoidais	57
4.1.1- Superfícies de uma broca helicoi- dal	57
4.1.2- Arestas cortantes de uma broca ...	57
4.1.3- Ângulos de uma broca helicoidal ..	58
4.1.4- Variação dos ângulos medidos no plano de medida da cunha cortante, ao longo da aresta principal de corte	62
4.2- Considerações sobre afiação das brocas helicoidais	71
4.3- Desgaste e vida das brocas helicoidais .	75
4.3.1- Considerações sobre o desgaste e vida de uma Ferramenta de barra ..	75
4.3.2- Desgaste nas brocas helicoidais ..	81
4.3.2.1- Desgaste relativo à are- sta principal de corte ...	81
4.3.2.2- Desgaste relativo à are- sta transversal de corte .	82
4.3.3.3- Desgaste relativo à are- sta lateral de corte	82

	<u>PÁGINA</u>
4.3.3- Vida das brocas helicoidais	83
4.4- Medida do desgaste das brocas helicoidais	90
4.4.1- Medida do desgaste I_{\perp} da superfície principal de folga	90
4.4.2- Medida do desgaste I_{\top} da aresta transversal	92
4.4.3- Medida do desgaste I_G da superfície lateral de folga	94
CAP. V - ENSAIOS	96
5.1- Considerações Gerais	96
5.2- Material dos corpos de prova	96
5.3- Broca Helicoidal	97
5.4- Equipamento de Medida	97
5.5- Máquinas de Ensaio	98
5.6- Condições de Ensaio	98
5.7- Resultados dos Ensaios	99
5.8- Determinação das curvas de vida da broca, para o par Ferramenta-peça	115
CAP. VI - CONCLUSÕES	121
BIBLIOGRAFIA	125

CAPÍTULO I

I N T R O D U Ç Ã O

Os primeiros trabalhos científicos sobre o processo de furação iniciaram-se no começo deste século, com a construção do primeiro dinamômetro de furação, que data de 1905 (1).

Posteriormente apareceram na Alemanha os primeiros dinamômetros hidráulicos, desenvolvidos pela firma "Losenhausenwerk", que permitiam a medição simultânea da força de avanço e do momento de torção. Entre os principais pesquisadores destacaram-se Schlesinger (1932) e Schallbroch (1940), este último desenvolvendo seu trabalho junto a uma firma alemã Maschinenfabrik Hermann Kolb, fabricante de furadeiras radiais e de coluna (1 e 2).

A partir de 1950 começaram surgir em número crescente os dinamômetros com sistemas elétricos de medição, permitindo maior sensibilidade na leitura. O pesquisador G. Spur construiu seis modelos deste tipo, na Escola Técnica Superior de Braunschweig, Alemanha (3 e 4).

A primeira pesquisa no Brasil neste campo, foi em 1966 na Escola de Engenharia de São Carlos, U.S.P., realizada por Horst L. A. Daar, tendo como orientador o Prof. Dr. Dino Ferraresi. Tal trabalho consistiu num estudo matemático da geometria das brocas helicoidais, desenvolvimento de dinamômetros, medida da força de avanço e do momento de torção e o estabelecimento preciso das equações analíticas relacionadas, utilizando os recursos do cálculo computacional (5).

No estudo bibliográfico verifica-se que na parte referente aos desgastes das brocas helicoidais, originados na operação de furação, ainda existe pouca informação quanto a um desgaste admissível otimizado, além de diferentes critérios de medição. Este fato dificulta a determinação das condições econômicas de usinagem na operação de furação, utilizadas pela Indústria.

A presente pesquisa tem por objetivo, fornecer aos que se dedicam ao processo de manufatura, em particular à furação de aços com brocas helicoidais, conhecimentos sobre o comportamento das características de desgaste e seu relacionamento com os demais parâmetros envolvidos no processo, tais como força de penetração, momento de torção, variação destas grandezas, vibração na máquina-ferramenta, com o fim de se determinar um critério para o estabelecimento de um desgaste admissível. Através deste índice, são construídas as curvas de vida do par ferramenta-peça, as quais permitem determinar as condições econômicas de usinagem.

Para se conseguir o objetivo proposto, foi desenvolvido primeiramente um dinamômetro de alta rigidez e razoável sensibilidade. Para a medição dos desgastes nas brocas, foram estudados diferentes dispositivos de medida, a fim de fornecer valores significativos de desgaste, aproveitando-se de aparelhos convencionais utilizados em metrologia, tais como: mesa de coordenadas e sistemas óticos com retículos de referência. Estes desgastes, uma vez convencionados, permitem a obtenção de curvas de desgaste nas brocas helicoidais, para diferentes condições de usinagem. Através dos resultados obtidos experimentalmente, utilizando-se como parâmetros a força de avanço, momento torçor, vibração no processo de furação, perda das características de corte, foi estabelecido o valor de um desgaste otimizado. Com isto determinam-se as curvas de vida do par Ferramenta-peça em brocas helicoidais. Estas curvas permitem a obtenção dos percursos de furação, e o conseqüente tempo de usinagem, para diferentes velocidades da broca, com um desgaste otimizado. Com estas informações, pode-se determinar num processo de furação, os valores da velocidade econômica de corte, velocidade máxima produção e velocidade de máximo lucro.

No presente trabalho foi utilizado um único material da peça - aço ABNT 8640, beneficiado - e broca, de aço rápido de 15 mm de diâmetro, porém a técnica desenvolvida para a determinação do desgaste otimizado e a conseqüente elaboração das curvas de vida pode ser estendida facilmente para outros materiais e brocas helicoidais.

Este estudo faz parte de um programa de pesquisas, elaborado pelo Centro de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, para a determinação das características de usinagem dos materiais nacionais.

CAPÍTULO II

PROJETO E CONSTRUÇÃO DO DINAMÔMETRO

2.1- Considerações Gerais

Para a medida e registro do momento de torção e da força de avanço, durante o processo de furação com brocas helicoidais, tornou-se necessária a construção de um dinamômetro de alta rigidez e razoável sensibilidade.

Através de estudos iniciais, determinou-se que as pesquisas deveriam ser conduzidas com brocas de aço rápido de diâmetro variando de 10 a 30 mm, na usinagem em aço-carbono e aço liga.

Foram padronizadas as dimensões dos corpos de prova e estudou-se um sistema de fixação, acoplado ao dinamômetro, permitindo troca rápida do corpo de prova e grande rigidez de fixação. A figura 2.1 apresenta a vista do conjunto.

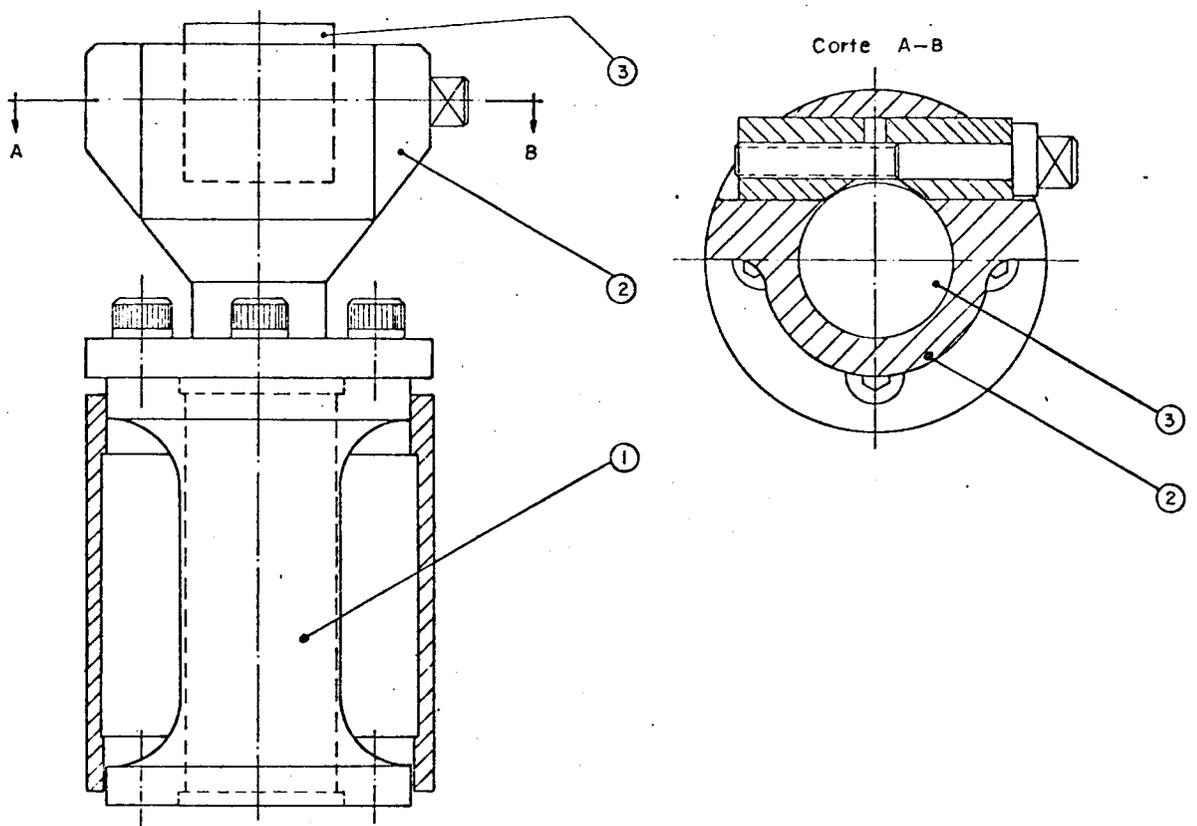


FIGURA 2.1- Esquema do dinamômetro com o dispositivo de fixação do corpo de prova.

Baseando-se nos trabalhos de Schallbroch | 1 | e Daar | 5 |, foi estabelecido previamente o campo de utilização do dinamômetro, para os valores:

$$\text{Momento de torção máximo } M_{t_{\text{m\grave{a}x}}} = 14\,700 \text{ Ncm}$$

$$\text{Força de avanço máxima } P_{a_{\text{m\grave{a}x}}} = 9\,800 \text{ N}$$

O princípio de medição, que a nosso ver melhor preenche as características necessárias para os ensaios em questão, com um custo relativamente pequeno, foi o baseado na medida das deformações elásticas de uma peça tubular, sob a ação das solicitações de torção e compressão, provenientes do processo de furação, utilizando-se extensômetros elétricos ligados em ponte de Wheatstone.

Os extensômetros destinados a medição do momento de torção, foram dispostos segundo direções que formam um ângulo de 45° em relação ao eixo geométrico do dinamômetro. De acordo com a teoria da elasticidade, as tensões de tração e de compressão de uma peça tubular, submetida a um momento de torção, são máximas nestas direções. Com as ligações elétricas em ponte de Wheatstone, têm-se um circuito de 4 ramos ativos, sendo compensados os efeitos da variação de temperatura e da força de avanço (axial). A figura 2.2 apresenta o esquema da disposição e ligação dos extensômetros elétricos.

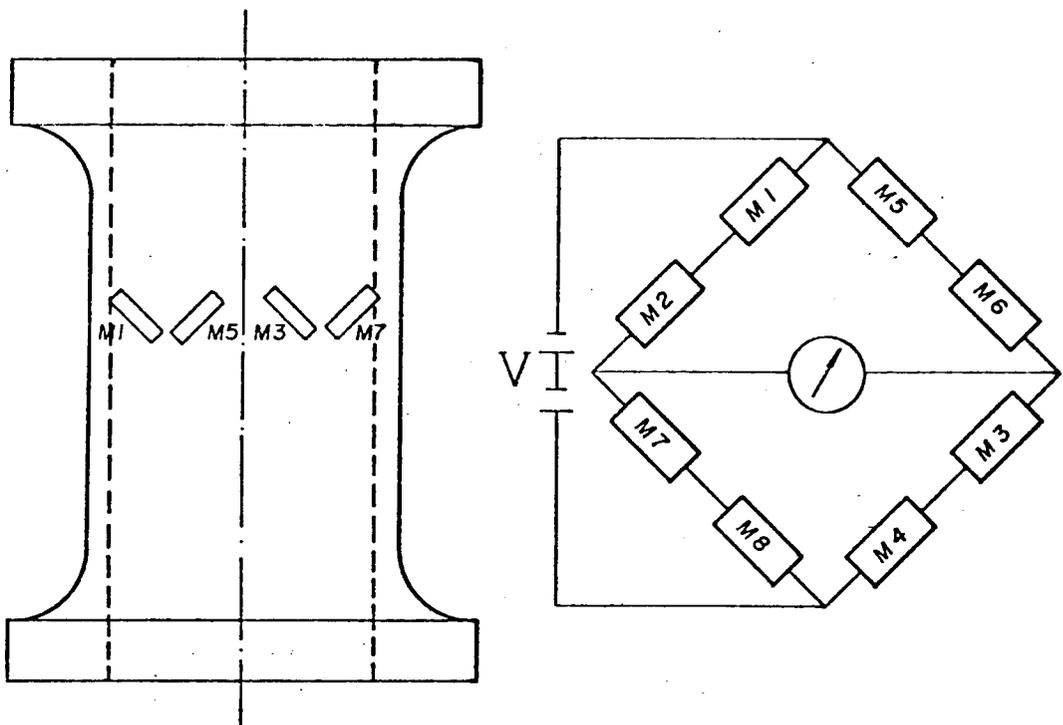
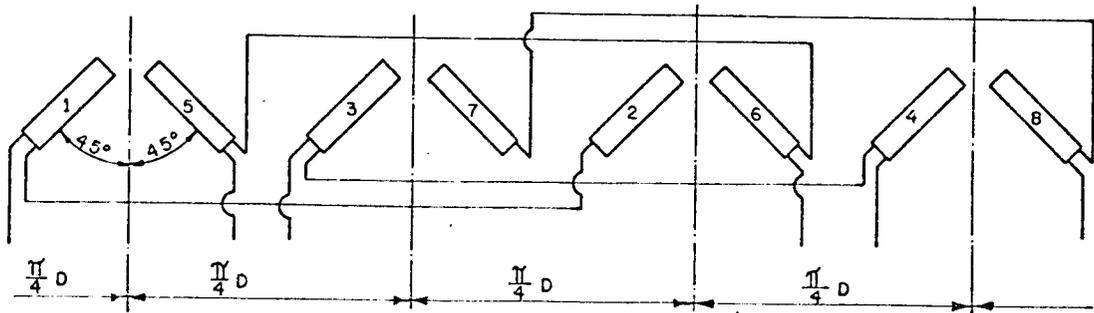


FIGURA 2.2- Esquema de ligação e disposição dos extensômetros elétricos para a medida do momento de torção.

Para a medida da força de avanço, foram dispostos 4 extensômetros na direção axial e 4 extensômetros na direção perpendicular ao eixo geométrico do dinamômetro. Com a ligação em ponte de Wheatstone têm-se 2 ramos com extensômetros trabalhando à compressão e dois ramos trabalhando à tração, devido ao efeito de Poisson. A figura 2.3 apresenta esquematicamente o circuito e a posição dos extensômetros.

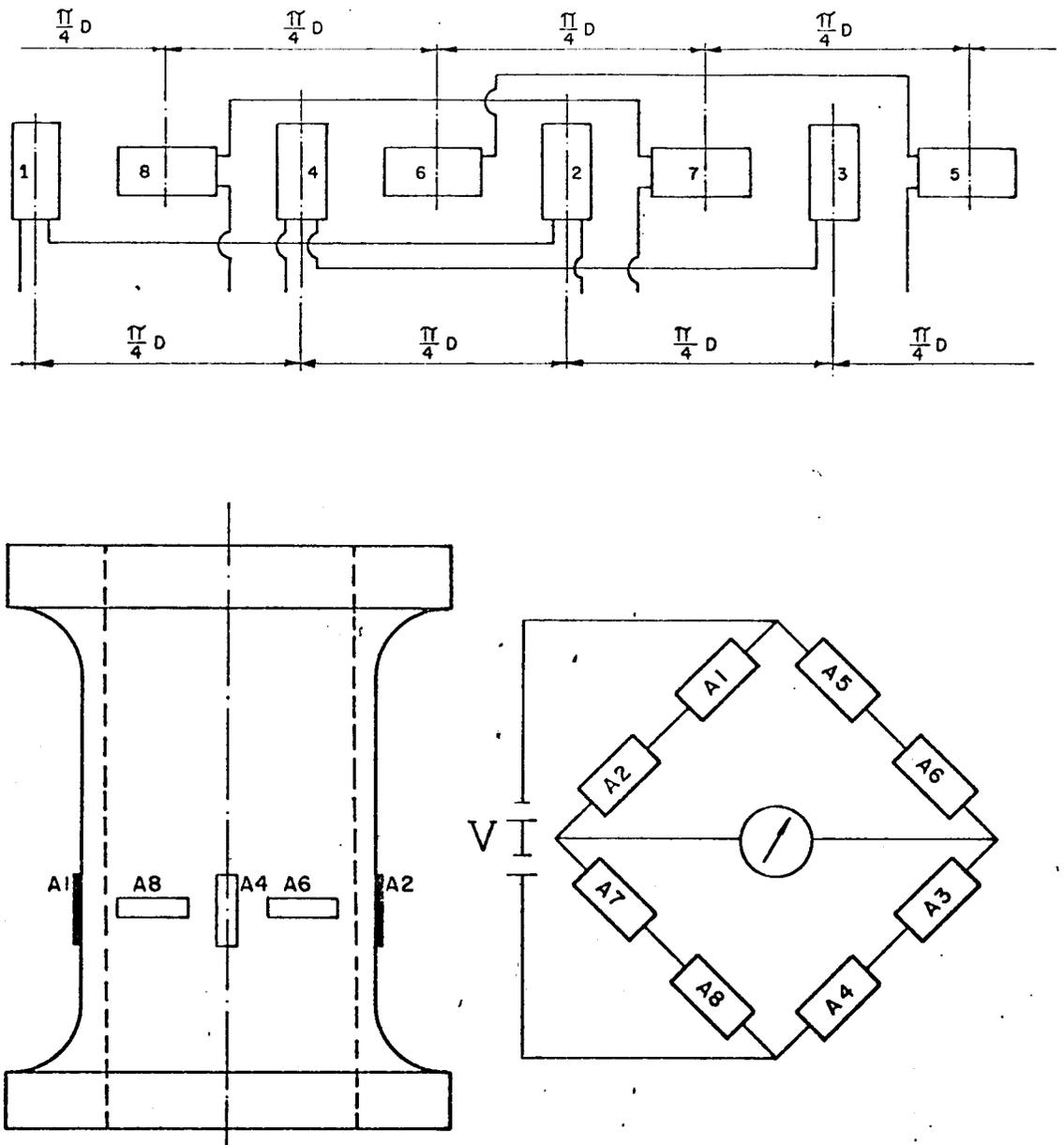


FIGURA 2.3- Esquema de ligação e disposição dos extensômetros elétricos para medida da força de avanço.

2.2- Projeto

O presente dinamômetro foi construído nas oficinas do Centro de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas.

A figura 2.4 apresenta o esquema do elemento de medida, com as dimensões principais. Empregou-se na sua construção o aço ABNT 4340, com tratamento térmico conveniente, de características:

Composição Química (ABNT NB-82)

C: 0,41 %	Si: 0,33 %	Mn: 0,73 %
Cr: 0,77 %	Ni: 1,69 %	Mo: 0,24 %
P: 0,011 %	S: 0,019 %	

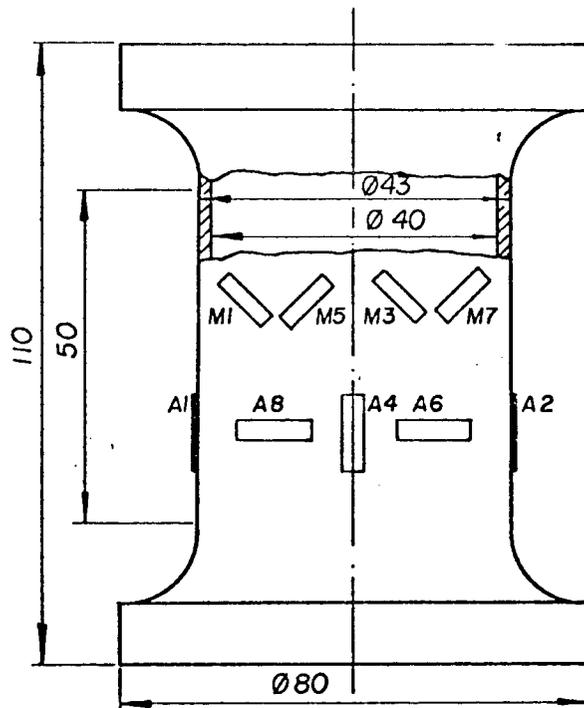


FIGURA 2.4- Elemento de medida do dinamômetro com as dimensões principais.

Propriedades Físicas

Limite de resistência σ_t : 83888 N/cm²

Limite de escoamento σ_e : 64190 N/cm²

Módulo de elasticidade E : 20,58 x 10⁶ N/cm²

2.2.1- Momento de Torção

A tensão de cisalhamento de uma peça tubular cilíndrica de seção circular, submetida a um momento de torção, é dada pela expressão | 6 e 7 | :

$$\tau_{\max} = M_{t_{\max}} \frac{16 D}{\pi (D^4 - d^4)} , \quad (2.1)$$

onde:

$M_{t_{\max}}$ = momento de torção máximo, = 14 700 Ncm

D = diâmetro externo, = 4,30 cm

d = diâmetro interno, = 4,00 cm.

Substituindo-se, resulta:

$$\tau_{\max} = 14\,700 \frac{16 \cdot 4,30}{\pi (4,30^4 - 4,00^4)}$$

$$\tau_{\max} = 3\,748,55 \text{ N/cm}^2$$

Desta forma, a tensão de cisalhamento a torção do elemento de medida do dinamômetro, permite grande linearidade na sua faixa de trabalho.

A deformação dos extensômetros, colados no elemento de medida, conforme figura 2.2, é dada pela expressão | 6 e 7 |:

$$\epsilon_{e_{\max}} = \frac{M_{t_{\max}} \cdot D}{4 \cdot J_p \cdot G}, \quad (2.2)$$

onde:

$$\begin{aligned} M_{t_{\max}} &= 14\,700 \text{ Ncm} \\ D &= 4,30 \text{ cm} \\ J_p &= 8,43 \text{ cm}^4 \\ G &= 8\,134\,000 \text{ N/cm}^2. \end{aligned}$$

Substituindo-se, resulta:

$$\epsilon_{e_{\max}} = 230 \text{ } \mu\text{m/m}$$

Empregou-se para esta medição os extensômetros elétricos de características:

$$\begin{aligned} \text{Fabricante:} & \text{ Philips - Holanda} \\ \text{Tipo} & : \text{ PR 9840 K/10 FE} \\ i_{m_{\max}} & : \text{ 20 mA} \\ R & : \text{ 120,7 } \pm \text{ 0,5 } \% \Omega \\ k & : \text{ 1,99 } \pm \text{ 1 } \% \\ V & : \text{ 4 V} \\ \epsilon_{e_{\max}} & : \text{ 1 500 } \mu\text{m/m} \end{aligned}$$

A leitura prevista na ponte amplificadora, é dada pela fórmula | 8 | :

$$\Delta V_d = \frac{n}{4} V \cdot k \cdot \epsilon_e, \quad (2.3)$$

onde:

n = número de ramais ativos, = 4

V = tensão de alimentação, = 4 V

k = constante do tipo de extensômetro, = 1,99 ,

resultando:

$$\Delta V_d = 1,83 \text{ mv.}$$

Logo, a sensibilidade prevista pelo dinamômetro é | 9 |:

$$S = \frac{\Delta V_d}{M_t} = \frac{1,83}{14\ 700} = 0,000124 \text{ mV/Ncm.} \quad (2.4)$$

Empregando-se ponte amplificadora de fabricação Philips-Holanda e ajustando-se a amplificação de 50 divisões de fundo de escala do mostrador para um sinal de 2mV, teremos no caso em questão, para o momento máximo de 14 700 Ncm, a leitura de 45,75 divisões.

O momento torçor mínimo para uma divisão, será nesta escala de amplificação:

$$M_{t_{\min}} = \frac{14\ 700}{45,75} \text{ Ncm/div,}$$

$$M_{t_{\min}} = 321,31 \text{ Ncm/div.}$$

2.2.2- Força de Avanço

Para a força de avanço máximo de 9.800 N, obteve-se de acordo com as dimensões do corpo tubular elástico do dinamômetro, figura 2.4, a tensão de compressão:

$$\sigma_{\max} = \frac{P_{\max}}{A} = \frac{P_{\max}}{\Pi_4 (D^2 - d^2)}, \quad (2.5)$$

onde:

$$P_{\bar{m}ax} = 9.800 \text{ N}$$

$$D = 4,30 \text{ cm}$$

$$d = 4,00 \text{ cm}$$

Substituindo-se resulta:

$$\sigma_{\bar{m}ax} = 5\,011,14 \text{ N/cm}^2$$

A deformação correspondente, será:

$$\epsilon = \frac{\sigma_{\bar{m}ax}}{E}, \quad (2.6)$$

onde:

$$\sigma_{\bar{m}ax} = 5\,011,14 \text{ N/cm}^2,$$

$$E = 20,58 \times 10^6 \text{ N/cm}^2.$$

Substituindo-se, resulta:

$$\epsilon = 243 \text{ } \mu\text{m/m}.$$

Empregou-se para esta medição, extensômetros elétricos de características:

Fabricante : Philips - Holanda
Tipo : PR 9834 K/05 FE
 $i_{\bar{m}ax}$: 20 mA
R : $299,0 \pm 0,25 \%$ Ω ,
k : $2,03 \pm 1 \%$,
V : 10 V,
 $\epsilon_{e\bar{m}ax}$: 1 500 $\mu\text{m/m}$.

A leitura prevista na ponte amplificadora Philips - Holanda, para esta deformação e tipo de ligação, é dada pela fórmula |8| :

$$\Delta V_d = \frac{n}{4} \cdot V \cdot k \cdot \epsilon , \quad (2.7)$$

onde:

n = número de ramais ativos, = $2(1 + \nu)$

V = tensão de alimentação, = 10 V

k = constante do tipo de extensômetro, = 2,03

ν = coeficiente de Poisson para o aço, = 0,3.

$$\Delta V_d = \frac{2(1 + 0,3) \cdot 10 \cdot 2,03 \cdot 243}{4}$$

$$\Delta V_d = 3,20 \text{ mV}$$

A sensibilidade prevista pelo dinamômetro, é:

$$S = \frac{\Delta V_d}{P} = \frac{3,20}{9.800} , \quad (2.8)$$

$$S = 0,000326 \text{ mV/N}$$

Para 50 divisões da escala do mostrador e uma amplificação de 5 mV, a leitura para uma força axial de 9.800 N, será de 32 divisões da escala. A força axial mínima, para uma divisão do mostrador e uma amplificação de 5 mV será:

$$P_{\min} = \frac{9.800}{32} = 306,25 \text{ N/div.}$$

CAPÍTULO III

AFERIÇÃO DO DINAMÔMETRO

3.1- Aferição Estática

3.1.1- Construção da balança de aferição

Para a aferição estática do dinamômetro, tornou-se necessária a construção de uma balança especial, a qual permitia aplicar simultaneamente e independentemente, o momento de torção e a força de avanço.

Neste sentido foi projetado a balança para uma força de 9 800 N e um torque de 14.700 Ncm.

A aplicação da força de avanço P_a é efetuada através da alavanca (2), carregando-se na sua extremidade pesos aferidos. A aplicação do momento torçor M_t é obtida através da alavanca (3), carregada também com pesos aferidos.

A figura 3.1 apresenta o desenho do conjunto e a figura 3.2 mostra a balança construída, na Oficina Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas.

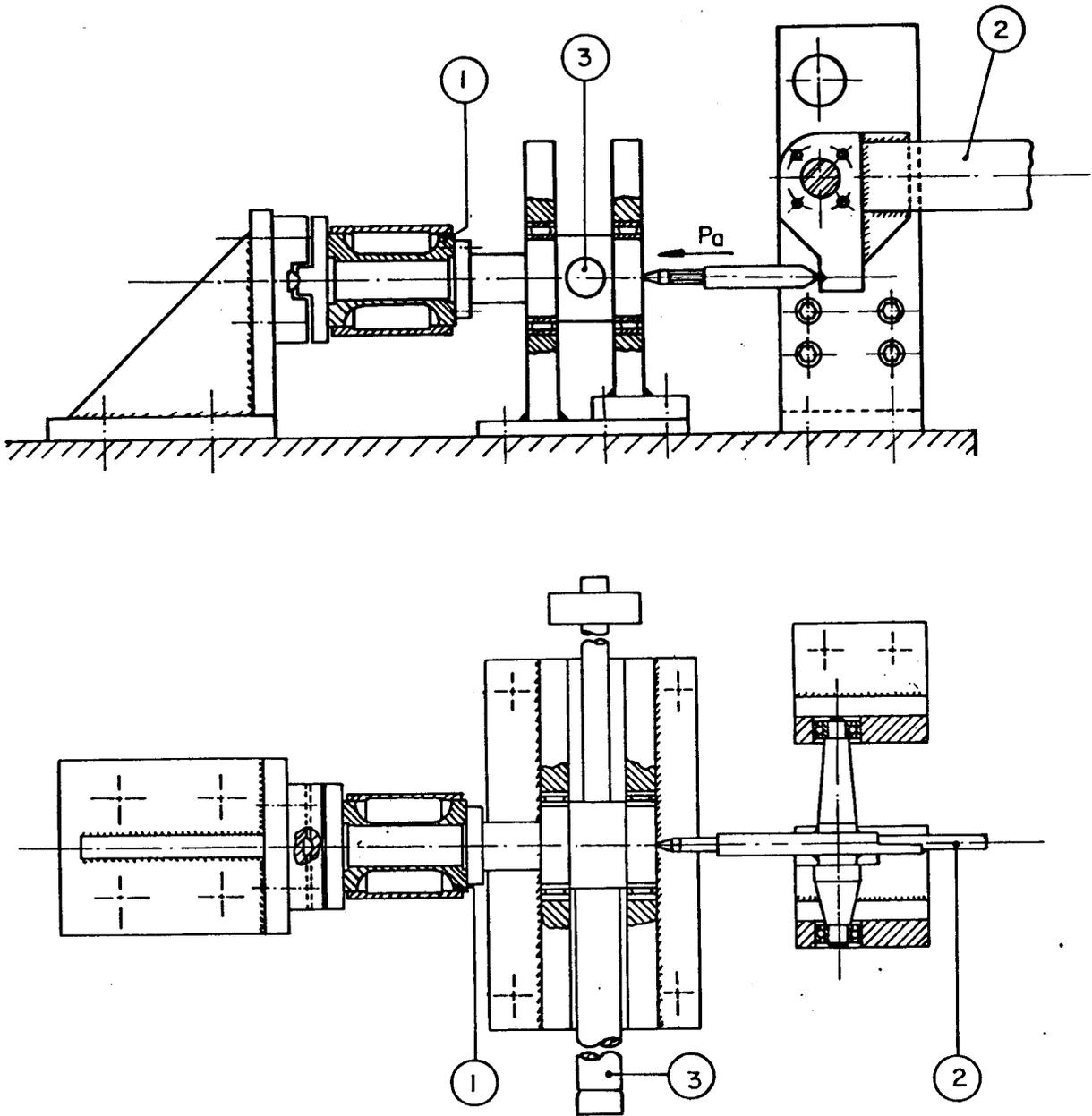


FIGURA 3.1- Desenho do conjunto da balança de aferição do dinamômetro.

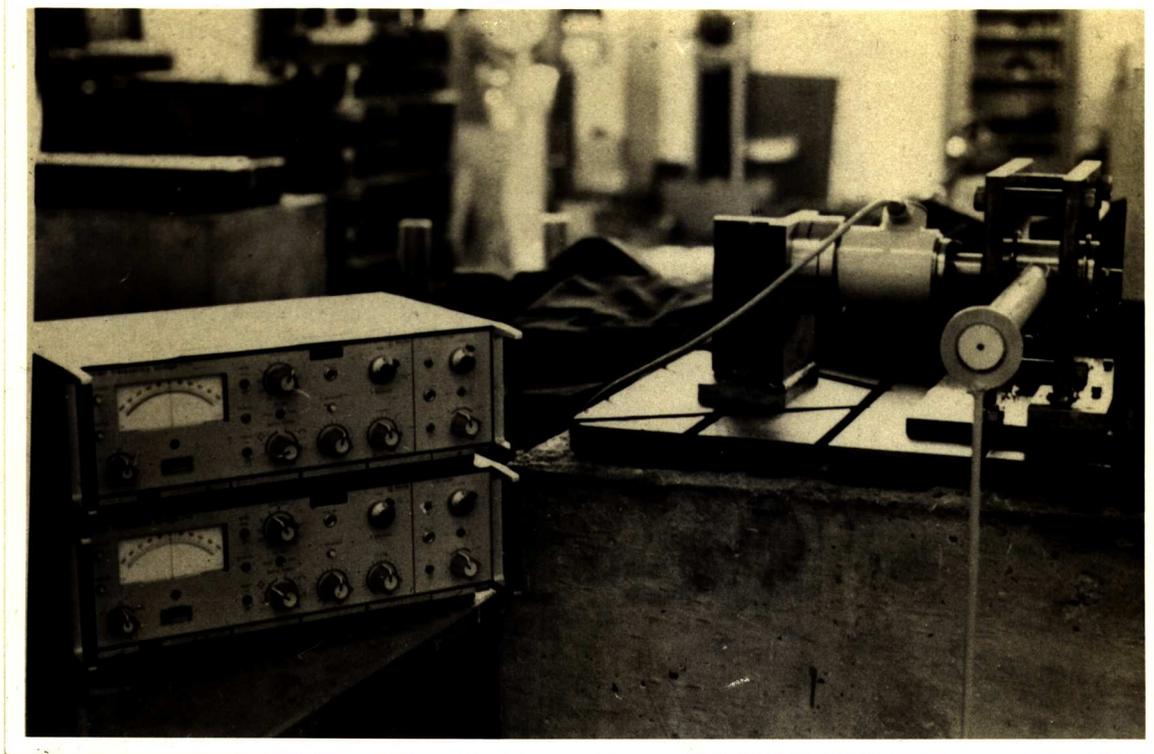


FIGURA 3.2- Vista da balança de aferição.

3.1.2- Alavanca para aplicação da força de avanço

Para calibrar a alavanca, foi utilizado um anel dinamométrico. Inicialmente o mesmo foi aferido em uma prensa de laboratório, de fabricação Mohr-Fedarhaff, previamente aferida . As figuras 3.3 e 3.4 mostram as curvas de aferição do anel dinamométrico, obtidas pela aplicação do teorema de Fieller , com auxílio de um programa computacional | 10 e 11 | .

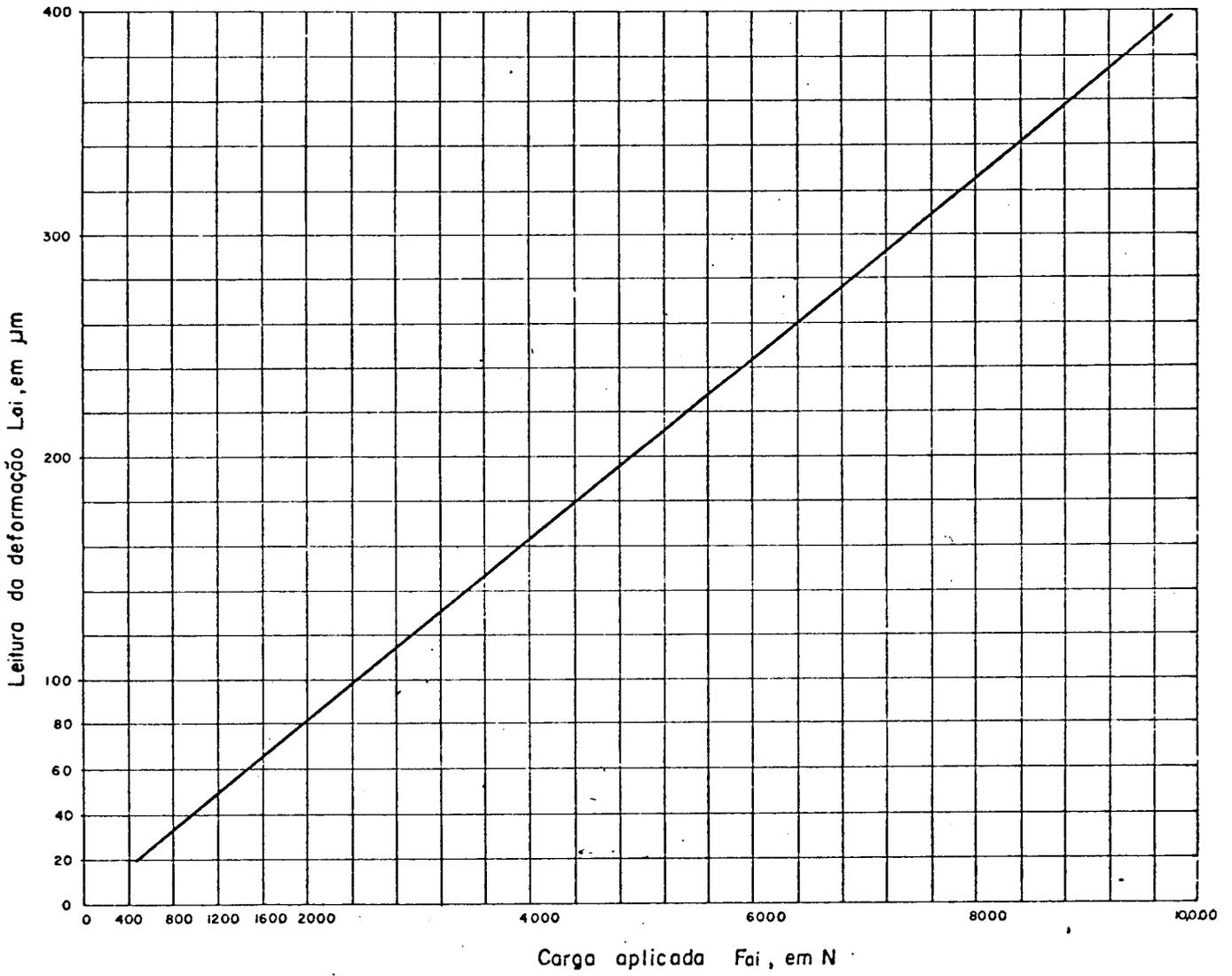


FIGURA 3.3- Curva de aferição do anel dinamométrico.

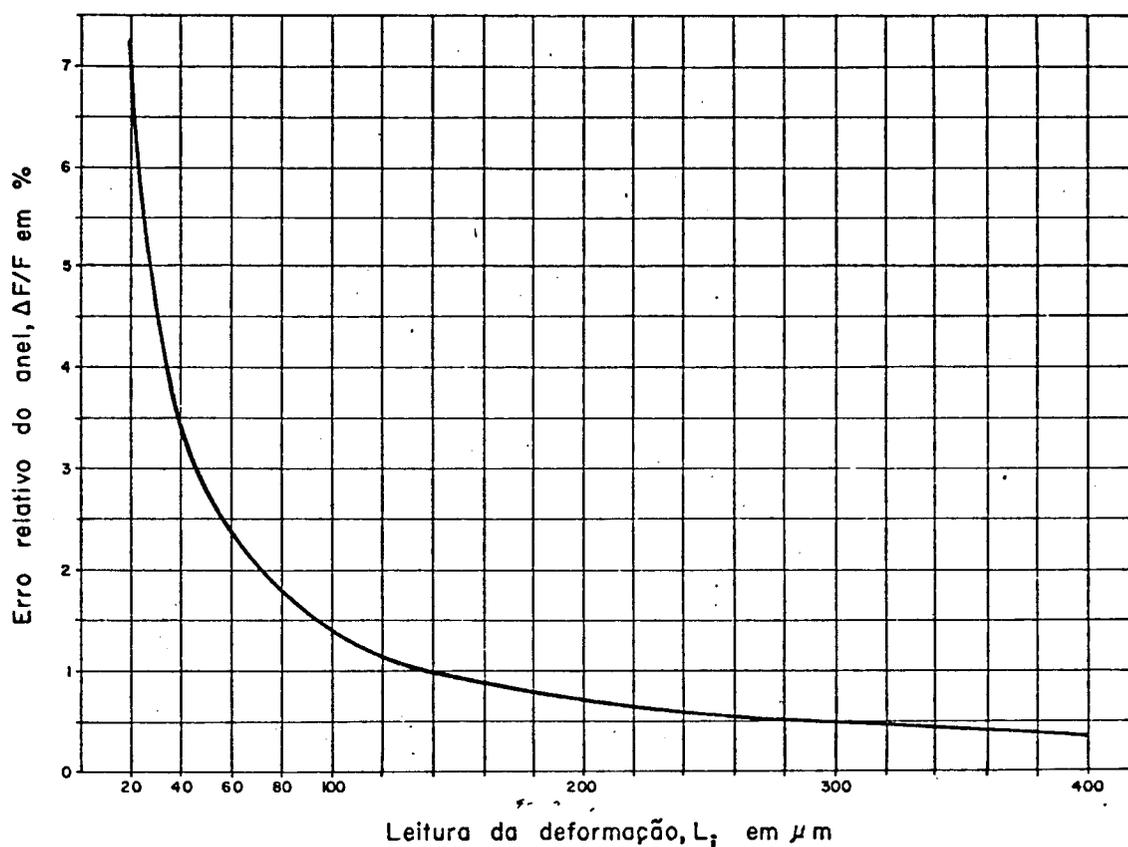


FIGURA 3.4- Curva do erro em função da leitura no relógio com parador do anel dinamométrico.

Para 95% de confiança, chegou-se a equação:

$$P_a = 11,713 + 24,526 L_i , \quad (3.1)$$

onde:

P_a = força de avanço, em N,

L_i = leitura do relógio comparador, em μm .

Uma vez aferido o anel dinamométrico, o mesmo foi levado à balança de aferição, para a calibração da alavanca. Foram aplicadas cargas convenientemente aferidas, e efetuadas as leituras correspondentes no relógio comparador do anel dinamométrico. A figura 3.5 apresenta a montagem do anel na balança de aferição.

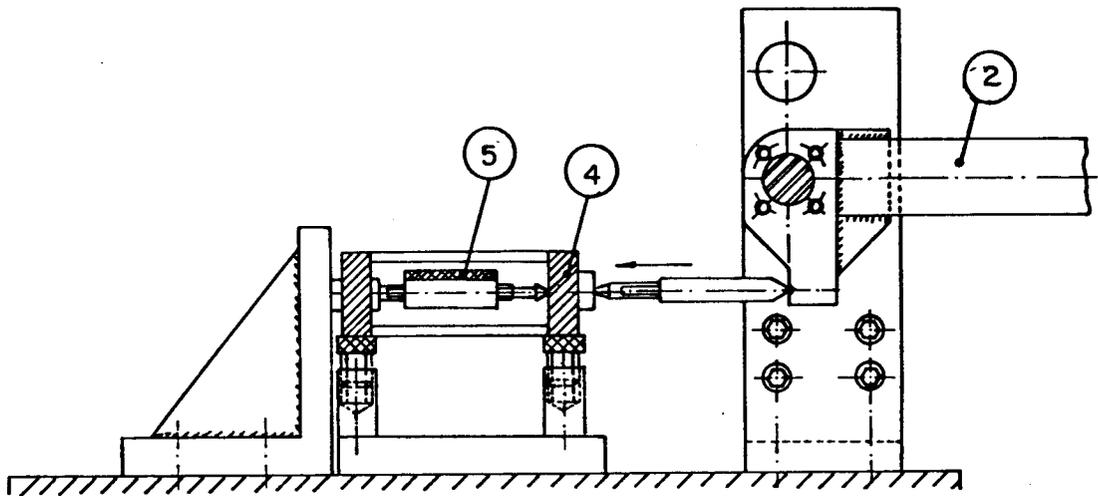


FIGURA 3.5- Montagem para a aferição da alavanca de aplicação da força de avanço (2).

(4)- Anel dinamométrico.

(5)- Relógio comparador.

Seguindo o mesmo critério acima exposto, as figuras 3.6 e 3.7 mostram as curvas de aferição da alavanca, para aplicação da força de avanço | 10 e 11 |.

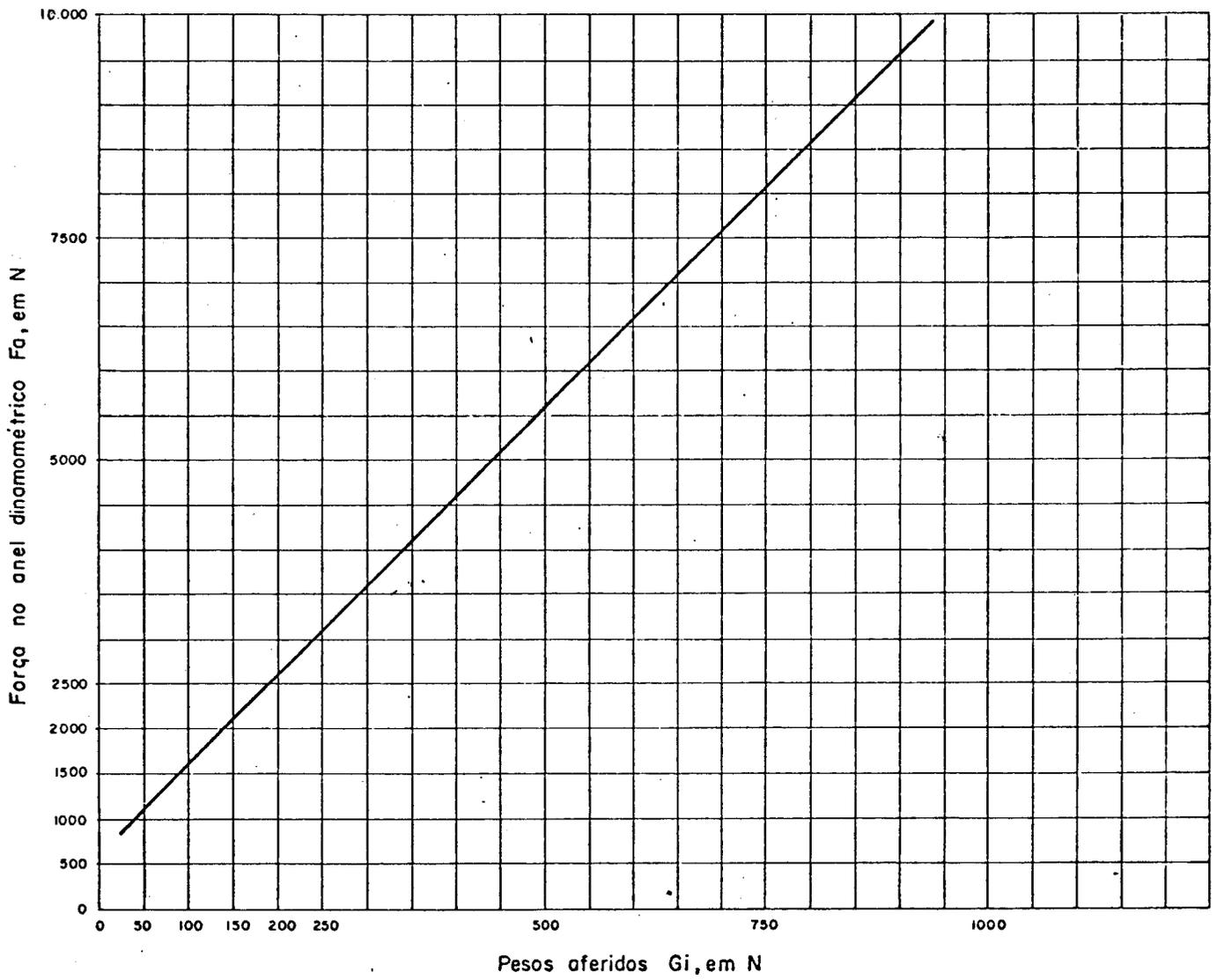


FIGURA 3.6- Curva de aferição da alavanca para aplicação da força de avanço.

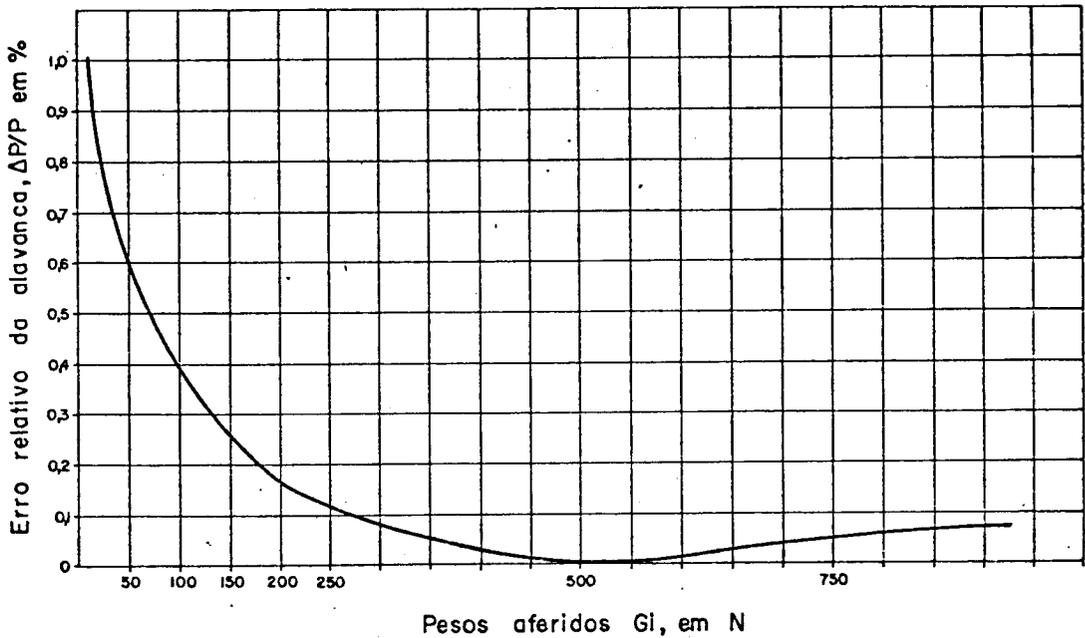


FIGURA 3.7- Curva do erro relativo da alavanca para a força de avanço, em função dos pesos aferidos, sem considerar o erro do anel dinamométrico.

Para 95% de confiança, chegou-se a equação:

$$P_a = 616,829 + 99,985 G_i \quad , \quad (3.2)$$

onde:

G_i = pesos aferidos, em N,

P_a = força de avanço, em N.

3.1.3- Aferição do dinamômetro para a força de avanço

Uma vez aferida a alavanca para a aplicação da força de avanço, foi montado o dinamômetro na balança de aferição (figura 3.1). A alavanca foi carregada e descarregada, duas vezes, com pesos aferidos de 50 N cada, até atingir uma carga de 950 N. As deformações correspondentês dos extensômetros elétricos do dinamômetro, foram lidas numa ponte amplificadora

Philips e registradas num registrador Honeywel-Visicorder de vários canais. As figuras 3.8 e 3.9 apresentam as curvas de aferição, obtidas através de procedimento estatístico, com a aplicação do teorema de Fieller.

Para 95% de confiança, chegou-se a equação:

$$P_a = -52,398 + 4515,783 L_i \quad , \quad (3.3)$$

onde:

L_i = leitura na ponte amplificadora, em mV,

P_a = força de avanço, em N.

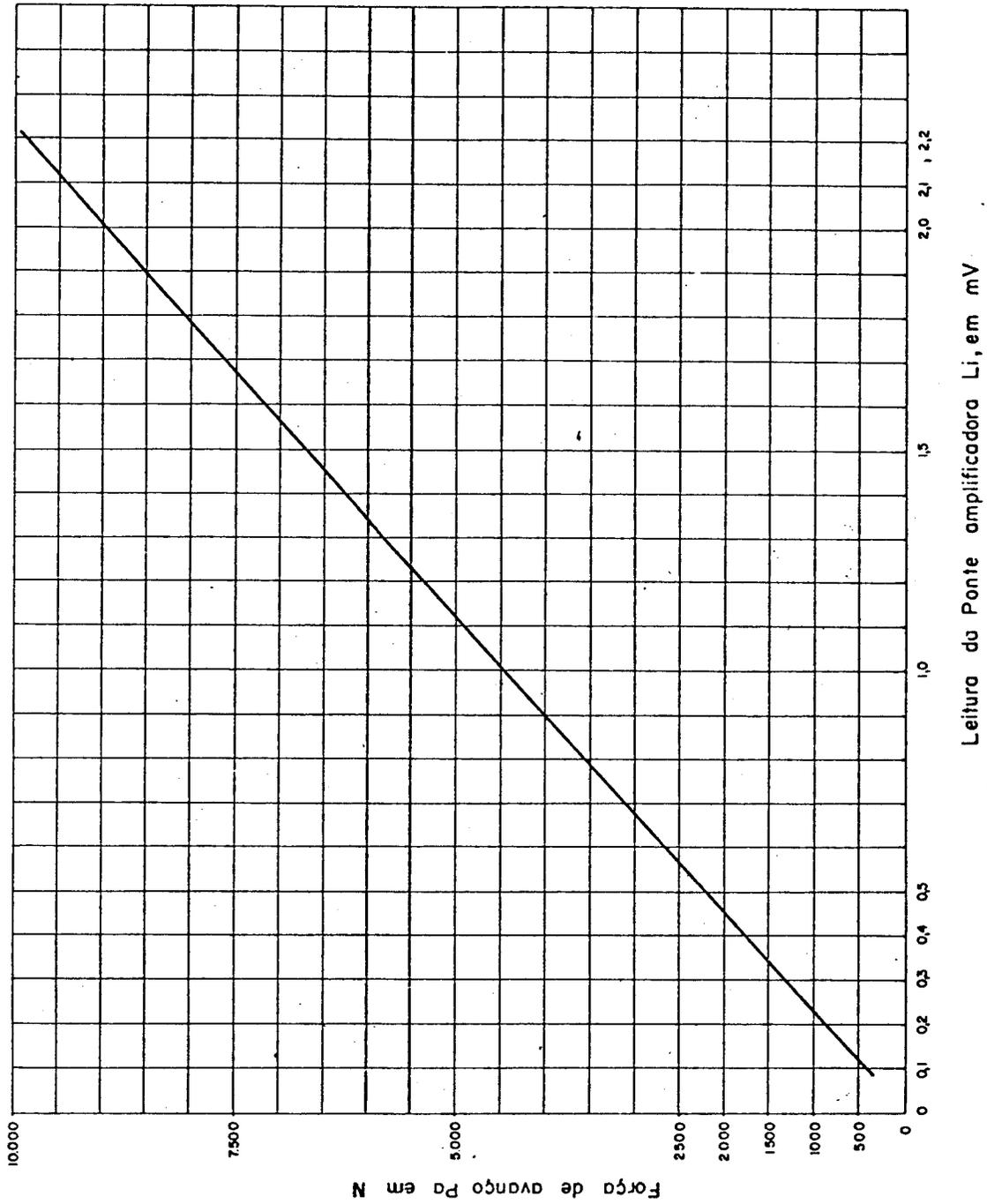


FIGURA 3.8- Curva de aferição do dinamômetro, para a força de avanço.

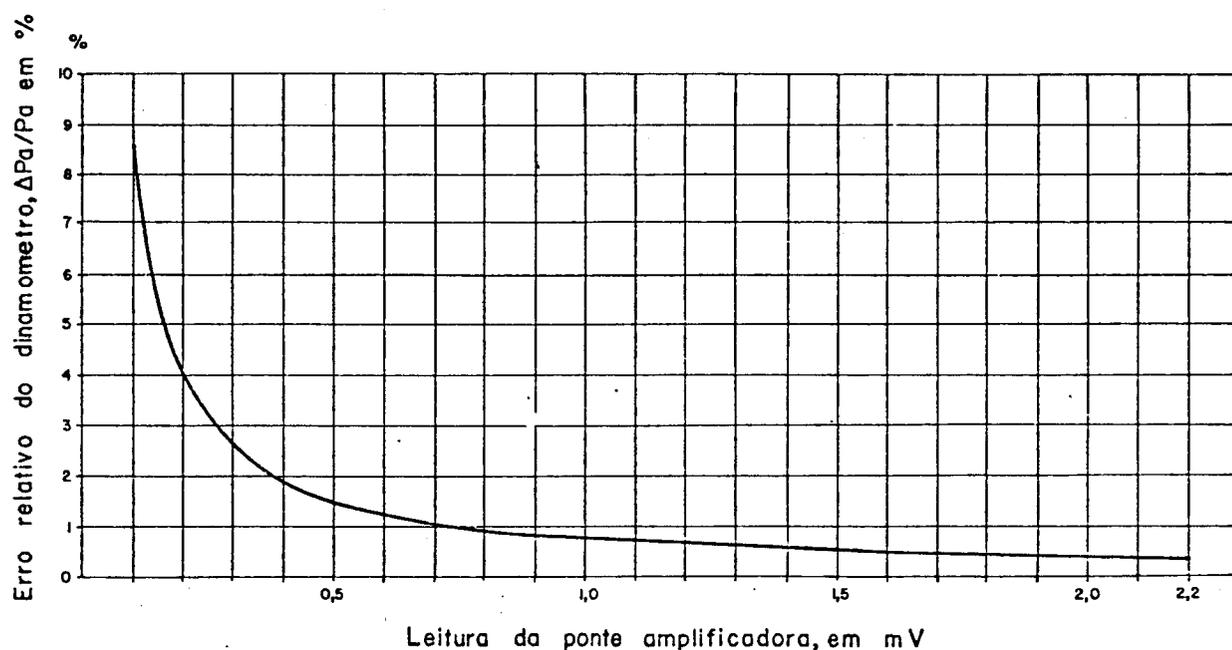


FIGURA 3.9- Curva do erro relativo do dinamômetro, em função da leitura da ponte amplificadora, sem considerar o erro do anel e da alavanca de aferição.

O erro relativo acumulado do dinamômetro, para aplicação da força de avanço, é obtido pela raiz quadrada da soma dos quadrados dos erros individuais do anel dinamométrico, alavanca e dinamômetro [11]:

$$\Delta = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad , \quad (3.4)$$

onde:

x = erro do anel dinamométrico, $\Delta F/F$

y = erro da alavanca, $\Delta P/p$

z = erro do dinamômetro, $\Delta P_a/p_a$.

A representação em coordenadas logarítmicas dos valores destes erros em função das leituras na ponte amplificadora, mostra que os mesmos se distribuem segundo retas, possibi

litando uma interpretação mais fácil. A figura 3.10 apresenta estes erros em %, para o caso de leitura em ponte amplificada, em mV. A influência destes erros acumulados, encontra-se na figura 3.11, que fornece a força de avanço para as leituras na ponte amplificadora, em mV.

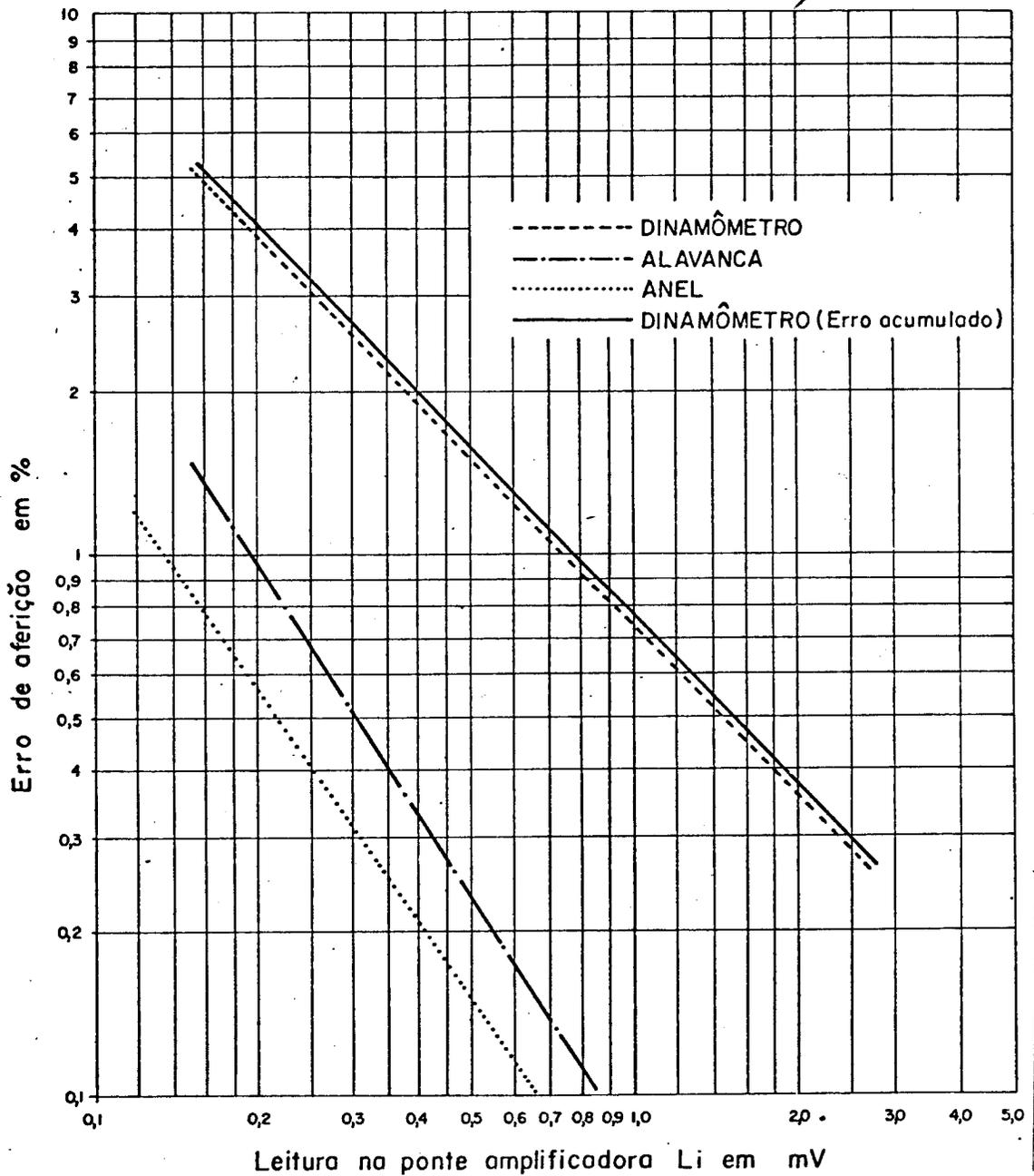


FIGURA 3.10- Erro acumulado em função das leituras na ponte amplificadora, para a força de avanço P_a .

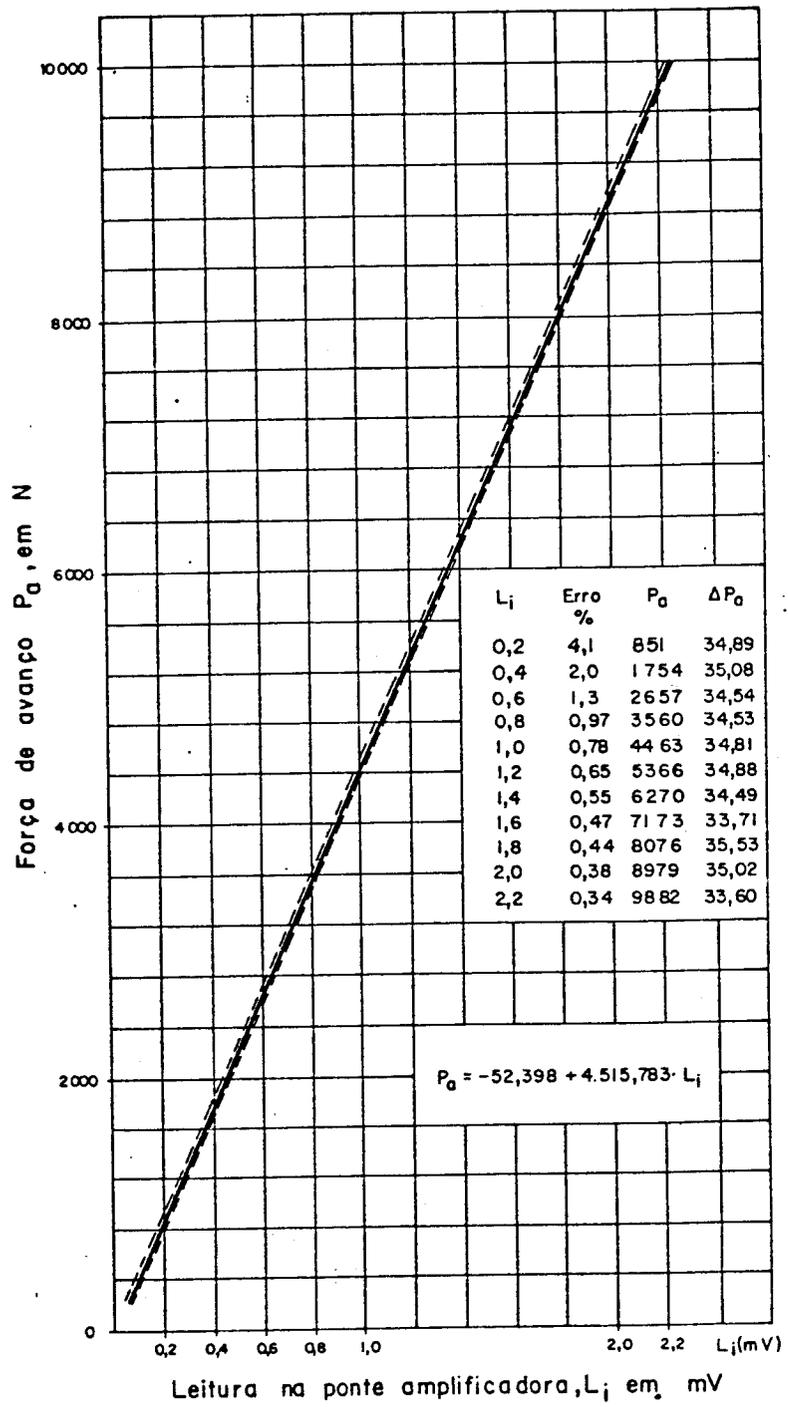


FIGURA 3.11- Curva de aferição do dinamômetro, com os respectivos erros acumulados, para a força de avanço.

Para verificar a influência do momento torçor nas leituras do dinamômetro, foram aplicadas através da alavanca 3 (figura 3.1), diferentes momentos de torção. Constatou-se que a influência é desprezível.

3.1.4- Alavanca para aplicação do momento de torção

A aplicação do momento torçor no dinamômetro foi através da alavanca 3, como mostra a figura 3.1. Inicialmente a alavanca foi balanceada através do contra peso 4 e ajustada a ponte amplificadora para a leitura zero. A figura 3.12 apresenta a curva de aferição, cuja equação obtida por procedimento estatístico análogo ao anterior (§ 3.1.3) é:

$$M_t = 3,058 + 10128,444 L_i , \quad (3.5)$$

onde:

M_t = momento de torção, em Ncm,

L_i = leitura da ponte amplificadora, em mV.

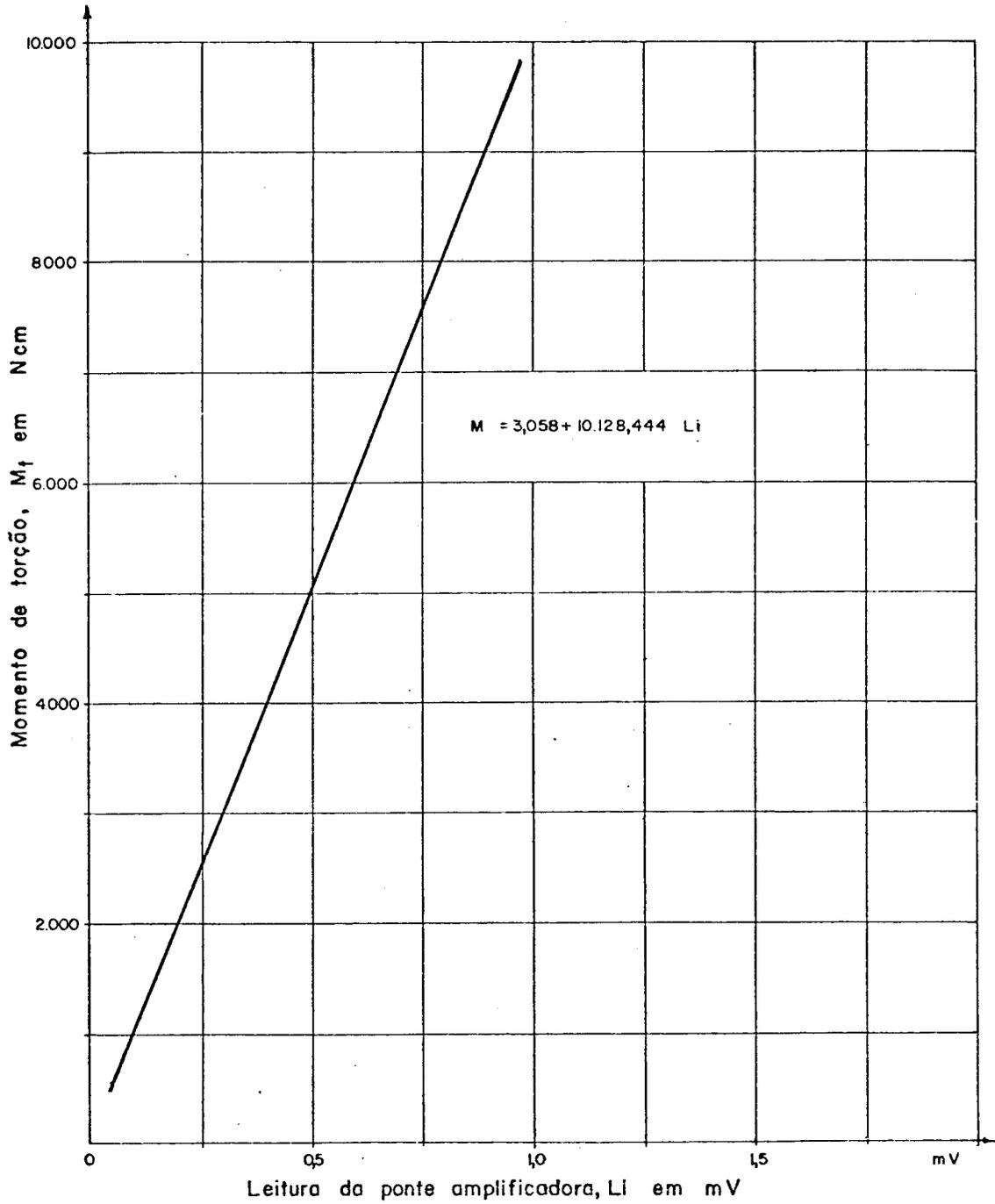


FIGURA 3.12- Curva de aferição do dinamômetro, para o momento de torção.

A figura 3.13 apresenta o erro relativo do dinamômetro , para o momento de torção, obtida por procedimento estatístico com auxílio do teorema de Fieller, para 95% de confiança.

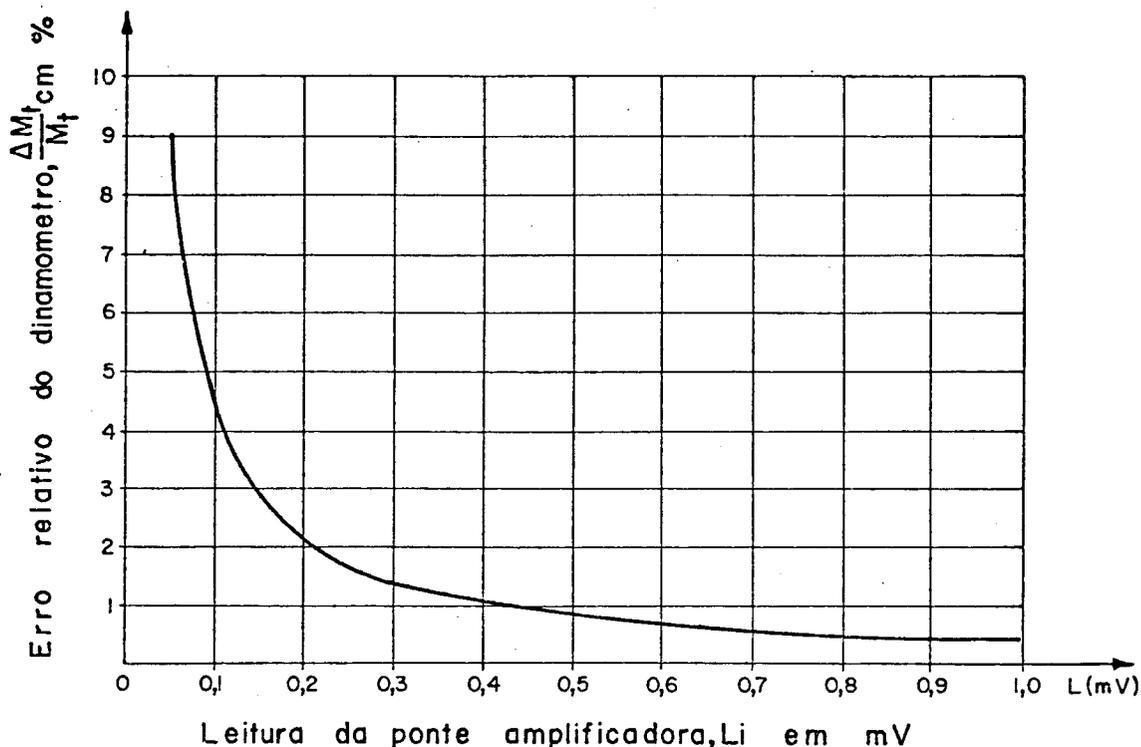


FIGURA 3.13- Curva do erro relativo do dinamômetro, em função da leitura da ponte amplificadora, para o momento de torção.

A figura 3.14 apresenta a curva final de aferição do dinamômetro, para o momento de torção, com a influência do seu erro relativo.

Para verificar a influência da força de avanço nas leituras do momento torçor, foram aplicadas através da alavanca 2 , diferentes cargas. Constatou-se, da mesma forma que no ensaio anterior (§ 3.1.3), que o erro devido esta influência era também desprezível.

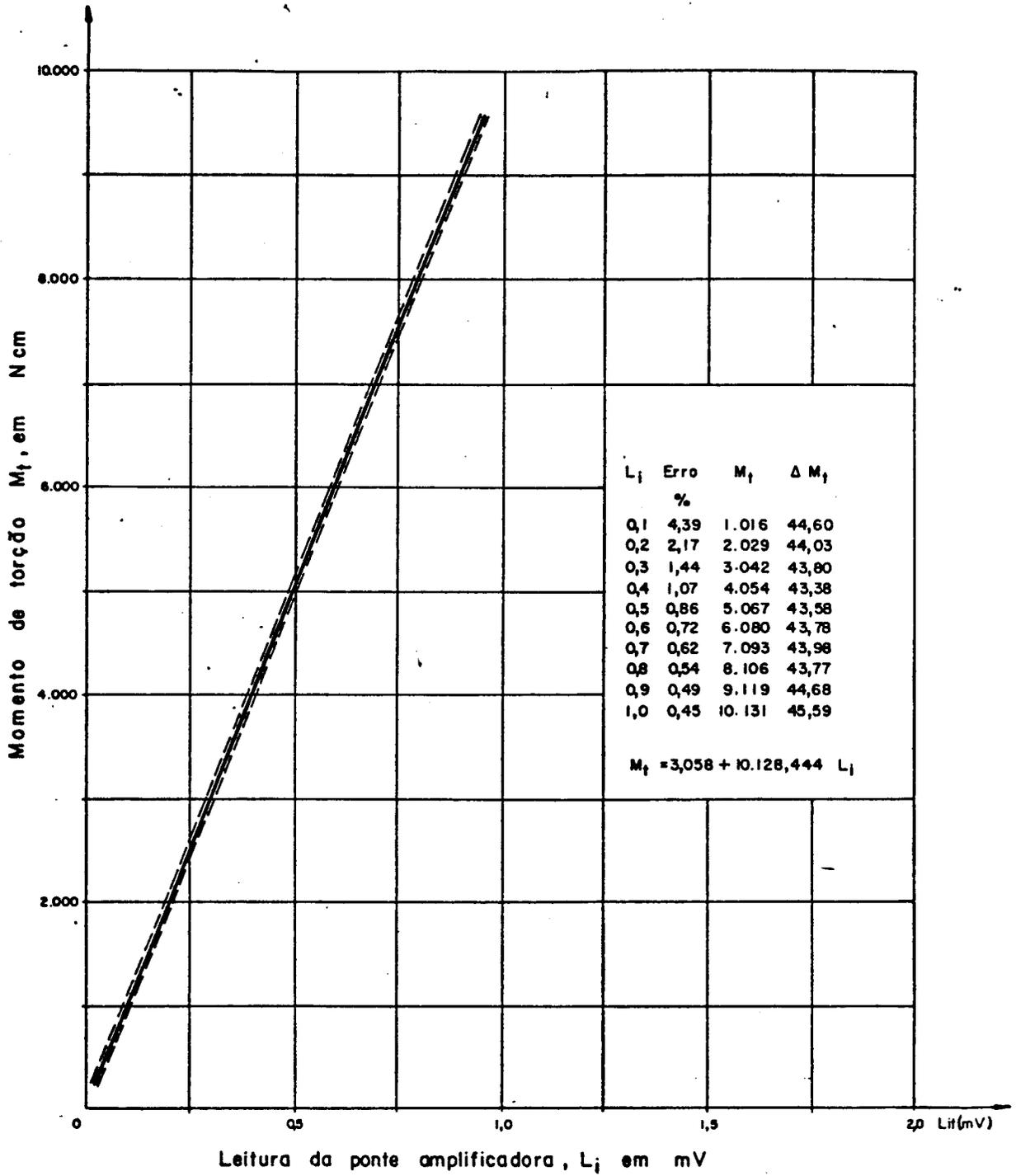


FIGURA 3.14- Curva de aferição do dinamômetro, para o momento de torção, com o respectivo erro de medição.

3.2- Aferição Dinâmica

3.2.1- Determinação das frequências naturais do dinamômetro

3.2.1.1- Método da percussão

Para a determinação experimental da frequência natural mais baixa do dinamômetro, na direção da força de avanço e na direção da força de corte, foi aplicada uma percussão axial e tangencial, na parte superior do dinamômetro, respectivamente. As oscilações livres do corpo dinamométrico foram acompanhadas pelos extensômetros elétricos, amplificadas pelo circuito elétrico-eletrônico de amplificação e fotografadas por meio de câmera fotográfica.

Direção de avanço

A figura 3.15 apresenta esquematicamente o dinamômetro (1), uma ponte amplificadora de fabricação Philips (2), um osciloscópio com memória de fabricação Hewlett Packard (3) e uma câmera fotográfica da fabricação Zeiss (4).

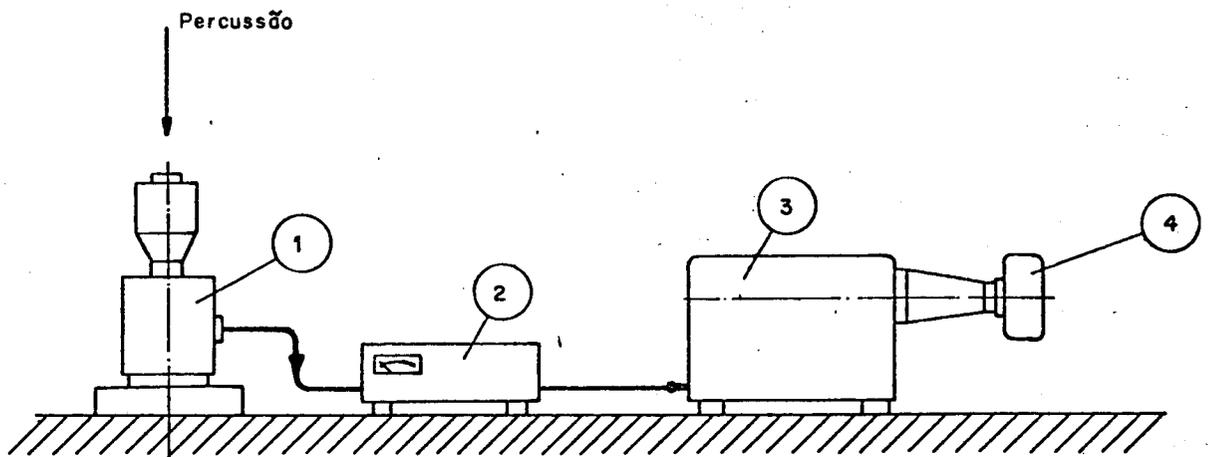


FIGURA 3.15- Equipamento empregado na aferição dinâmica pelo método de percussão.

A fotografia obtida encontra-se na figura 3.16.

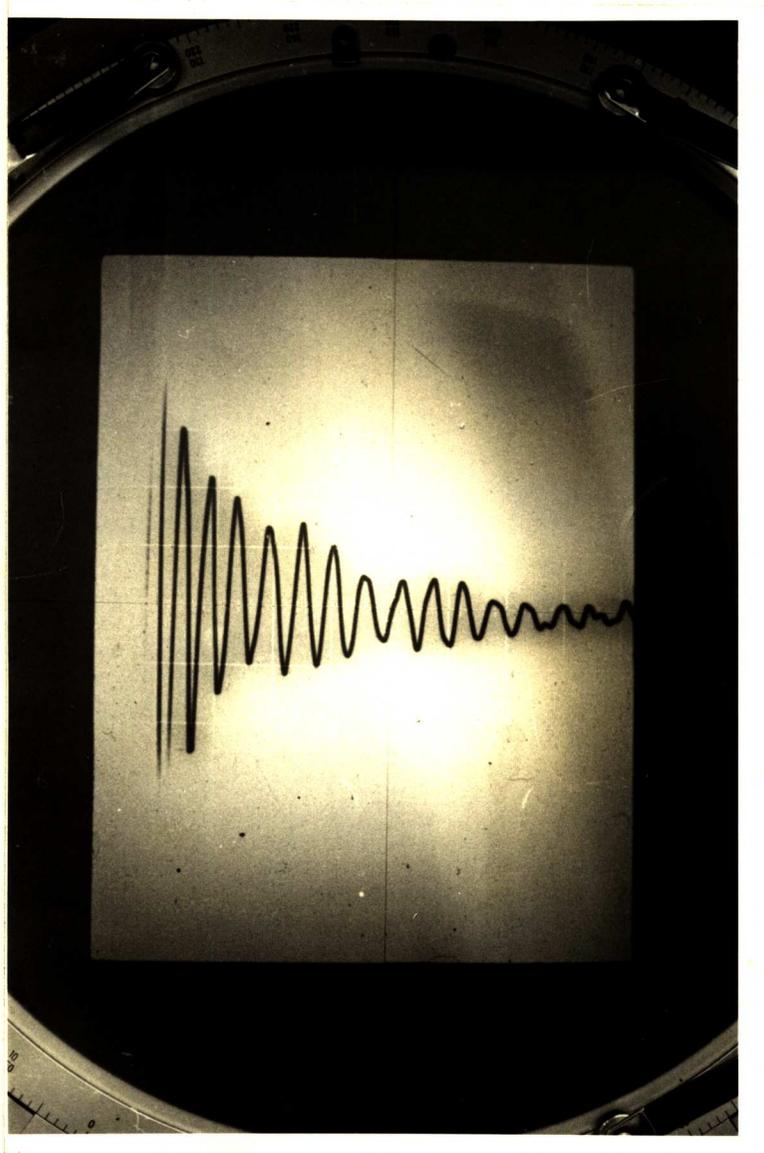


FIGURA 3.16- Curva de amortecimento das oscilações do dinamômetro, na direção da força de avanço.

Para a determinação do período T da oscilação amortecida, utilizou-se um projetor de perfil Nikon Modelo R-14.

Através da projeção da curva de amortecimento obteve-se:

1º) Para um tempo por divisão do osciloscópio, de 2ms, tem-se o percurso do sinal luminoso, no retículo do mostrador, de 1,90 mm.

29) Através da amplificação do projetor, determinou-se o valor do comprimento de uma oscilação correspondente a um período, o qual foi 1,00 mm.

30) Portanto o período T será:

$$T_a = \frac{2}{1,90} \times 1,00 \quad (3.6)$$

$$T_a = 1,05 \text{ ms.}$$

Portanto, a frequência natural mais baixa para o sistema, relativo a direção de avanço, será:

$$f_a = \frac{1}{T_a} \quad (3.7)$$

$$f_a = \frac{1}{1,05 \times 10^{-3}}$$

$$f_a = 952 \text{ Hz.}$$

Direção de corte

Através de procedimento análogo ao anterior, agora para uma percussão na direção tangencial, na parte superior do dispositivo de fixação do corpo de prova, obteve-se a curva de amortecimento das oscilações, representada na figura 3.17. O período foi $T_c = 0,00138 \text{ s}$, correspondendo a uma frequência:

$$f_c = \frac{1}{T_c} \quad (3.8)$$

$$f_c = \frac{1}{0,00138} = 723 \text{ Hz.}$$

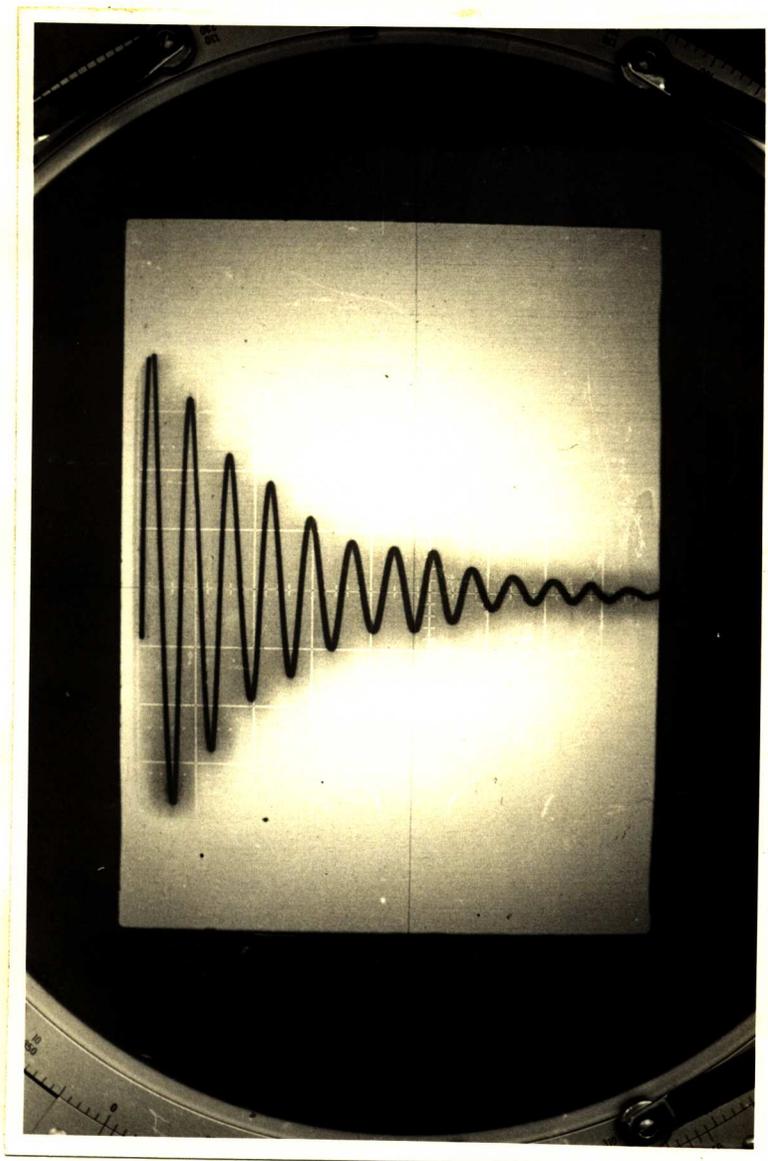


FIGURA 3.17- Curva de amortecimento das oscilações do conjunto-dinamômetro e dispositivo de fixação-, na direção da força de corte.

3.2.1.2- Método da oscilação forçada

As frequências naturais do conjunto-dinamômetro e dispositivo de fixação do corpo de prova- foram obtidas pelo espectro de frequências, determinado através do equipamento de fabricação Brüel Kjaer, constituído de sistema de geração de

força pulsante e sistema de registro do espectro. A figura 3.18 mostra esquematicamente a ligação da aparelhagem empregada. Para a geração da força pulsante, na direção da força de avanço, os aparelhos empregados encontram-se representados pelos números 1, 2, 3, 4 e 5. O sistema de registro do espectro apresenta-se constituído pelo dinamômetro 6 e aparelhos representados pelos números 7, 8, 9 e 10.

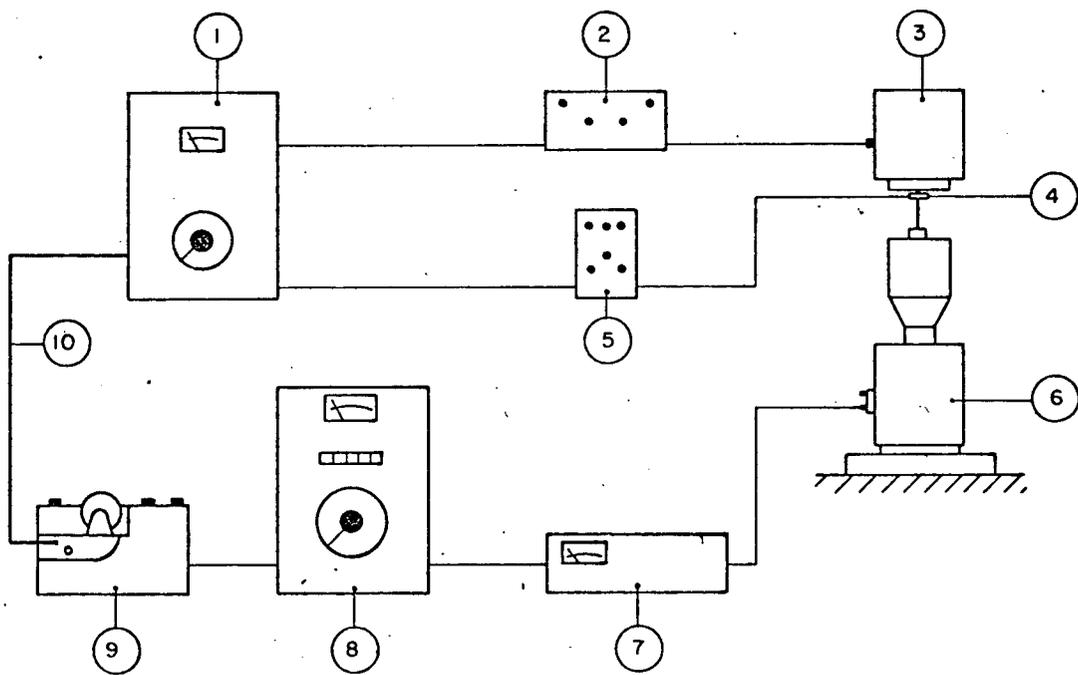


FIGURA 3.18- Equipamento empregado na aferição dinâmica do conjunto-dinamômetro e dispositivo de fixação, constituído:

- | | |
|--------------------------|--------------------------|
| 1- Gerador de frequência | - Brüel - Tipo 1022 |
| 2- Amplificador | - Brüel - Tipo 2706 |
| 3- Vibrador | - Brüel - Tipo 4809 |
| 4- Transdutor de força | - Brüel - Tipo 8200 |
| 5- Pré-amplificador | - Brüel - Tipo 2626 |
| 6- Dinamômetro | - Centro de Tecnologia |
| 7- Ponte Amplificadora | - Philips - Tipo PR-9308 |
| 8- Analisador | - Brüel - Tipo 2010 |
| 9- Registrador | - Brüel - Tipo 2305 |
| 10- Ligação Mecânica | |

A varredura de frequências foi efetuada automaticamente, através do gerador de frequências -1, na faixa de 20 a 20 000 Hz. Este gerador é acionado pelo registrador -9, através de uma ligação mecânica -10, a fim de manter o sincronismo entre o gerador de frequências e o registrador. As figuras 3.19 e 3.20 apresentam uma vista do equipamento empregado e do excitador aplicando uma força pulsante na direção de avanço do dinamômetro.

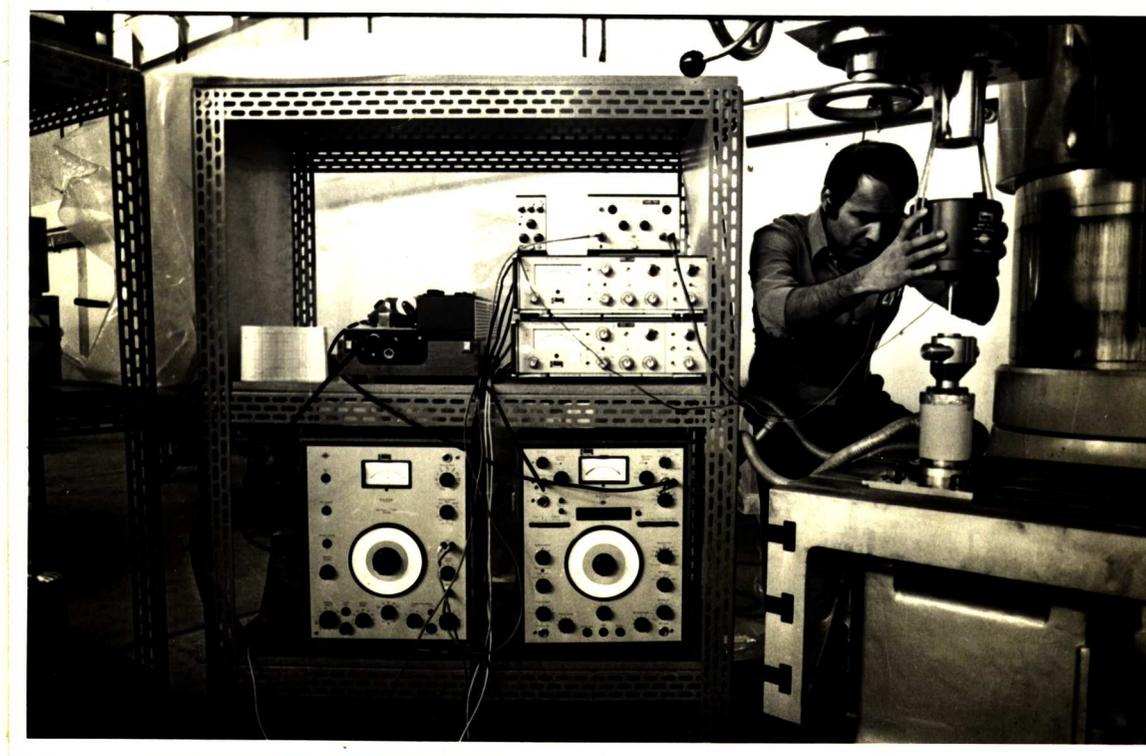


FIGURA 3.19- Vista do equipamento empregado para a obtenção do espectro de frequências do conjunto-dinamômetro e dispositivo de fixação- para a força de avanço.

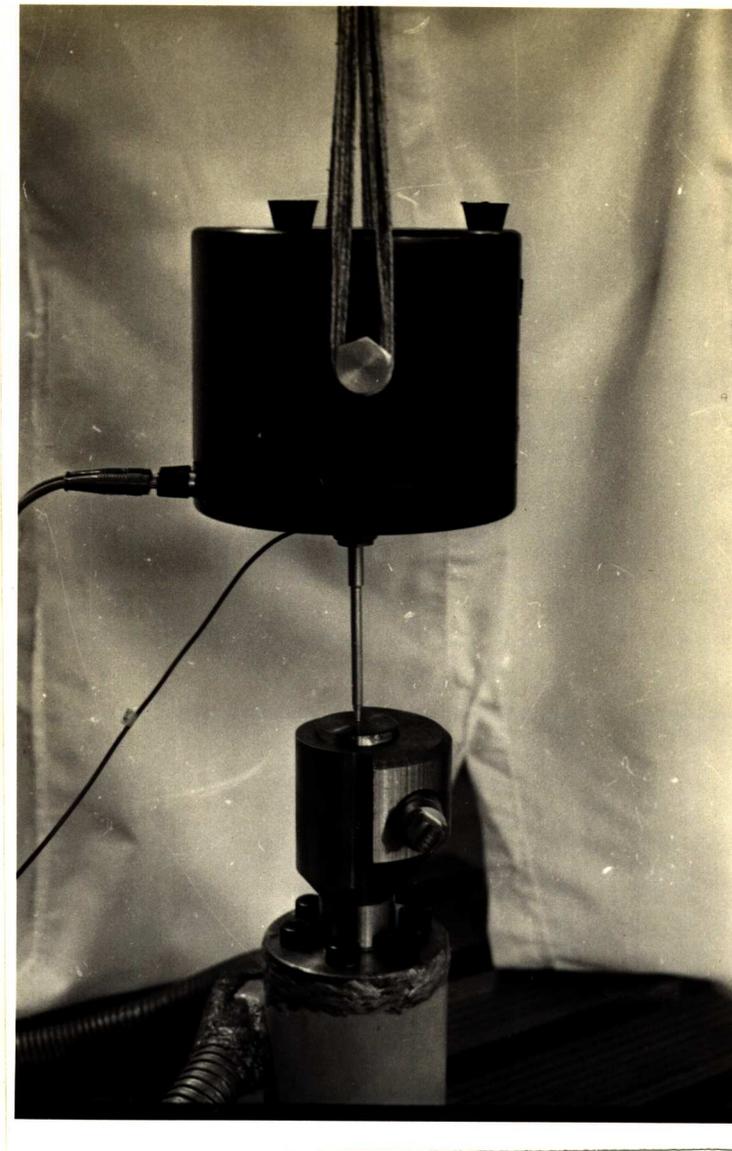


FIGURA 3.20- Vista em detalhe da aplicação da força pulsante segundo a direção do eixo geométrico do dinamômetro.

O espectro de frequência para a direção de avanço encontra-se na figura 3.21. No mesmo verifica-se que a frequência mais baixa foi de $1\ 100\ \text{H}_z$. Comparando-se este valor com o obtido pelo método da percussão, cujo valor foi de $952\ \text{H}_z$, constata-se uma divergência de 13%, a qual é atribuída aos seguintes fatores:

- sistemas diferentes de fixação do dinamômetro

- influência do peso do martelo no método da percussão
- acoplamento de aplicação da carga do excitador Brüel ao dinamômetro
- erros de medida da frequência, no emprego do sistema de fotografia e leitura do filme, utilizado no método da percussão
- erros de medida do sistema de registro, empregado com o equipamento Brüel.

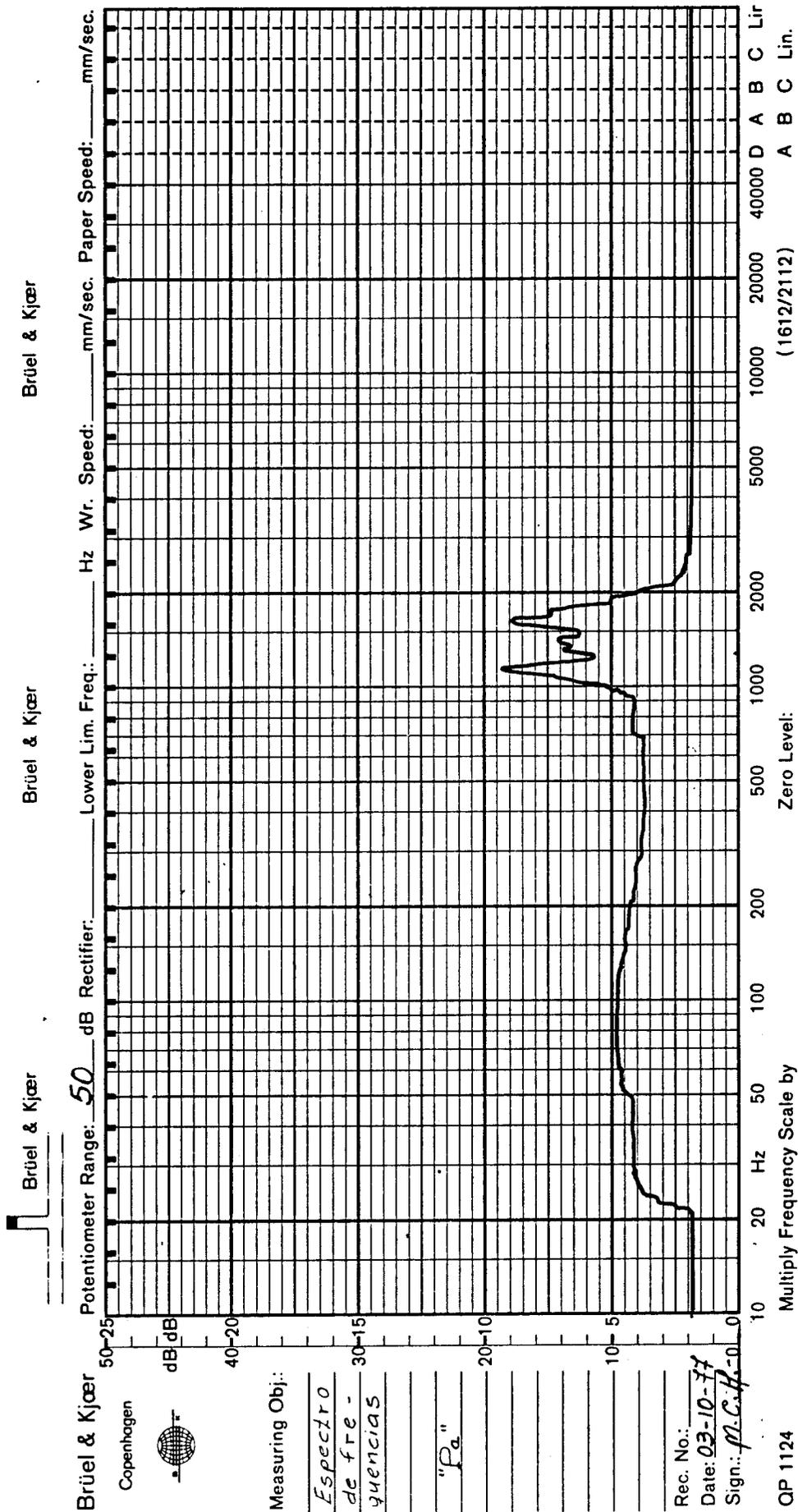


FIGURA 3.21- Espectro de frequências, obtido pelo método da oscilação forçada, para a direção de avanço.

Para a determinação do espectro de frequências segundo a direção da força de corte, foi empregado procedimento análogo ao anterior, colocando-se o excitador Brüel na direção tangencial em relação ao eixo geométrico do dinamômetro (Figuras 3.22 e 3.23).

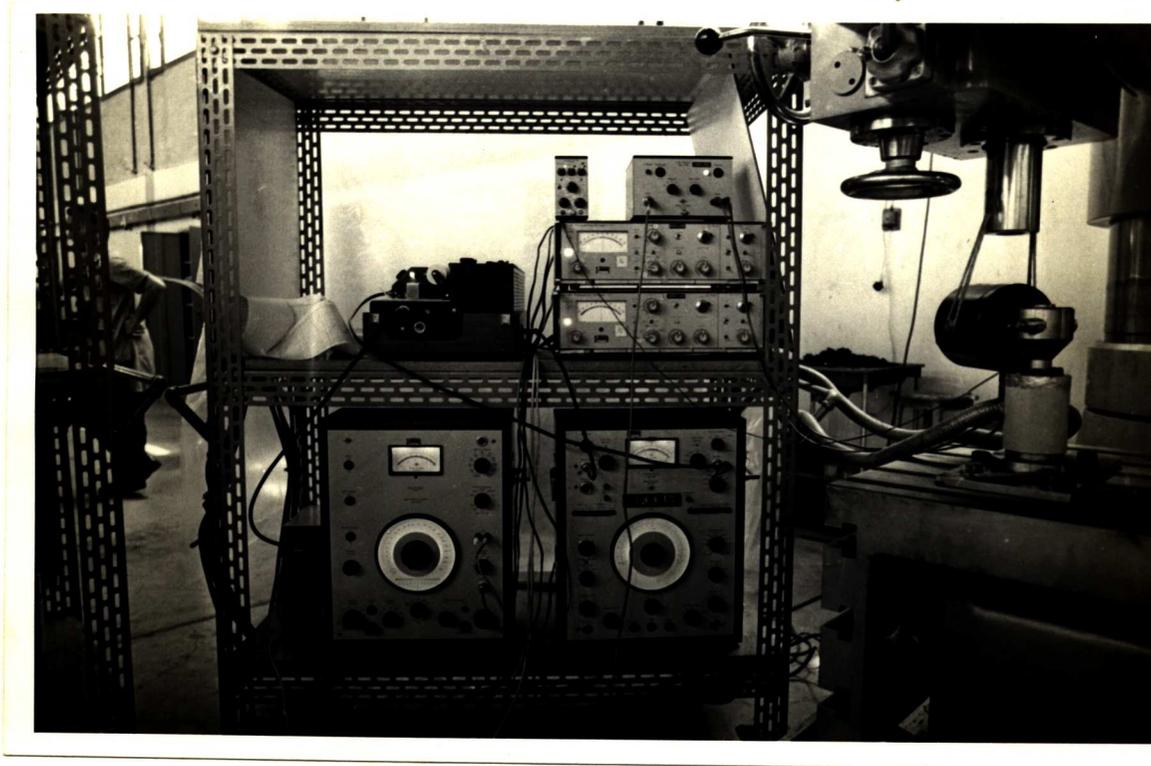
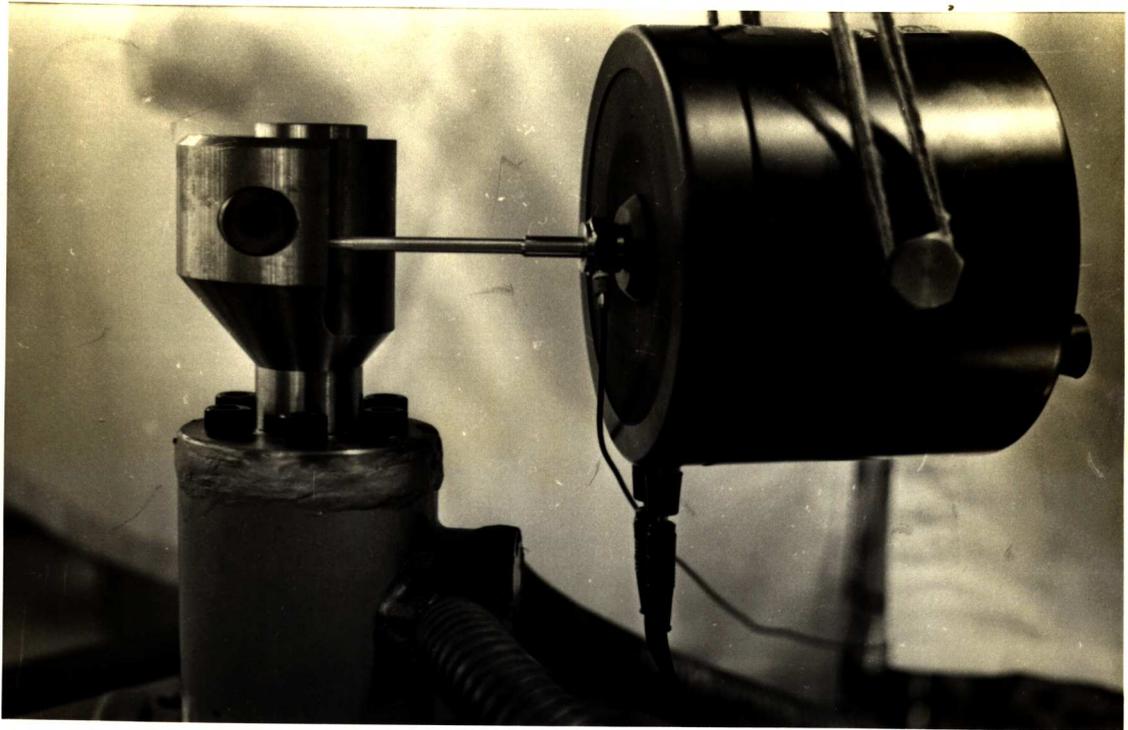


FIGURA 3.22- Vista do equipamento empregado para obtenção do espectro de frequências do conjunto -dinamômetro e dispositivo de fixação-, para direção da força de corte.



- FIGURA 3.23- Vista em detalhe da aplicação da força pulsante segundo a direção tangencial ao eixo geométrico do dinamômetro.

A figura 3.24 apresenta o espectro de frequências para a direção da força de corte, onde se constata que a frequência mais baixa foi de 700 H_z . Comparando-se este valor com o obtido pelo método da percussão, cuja frequência foi 723 H_z , nota-se uma divergência de 3,0%.

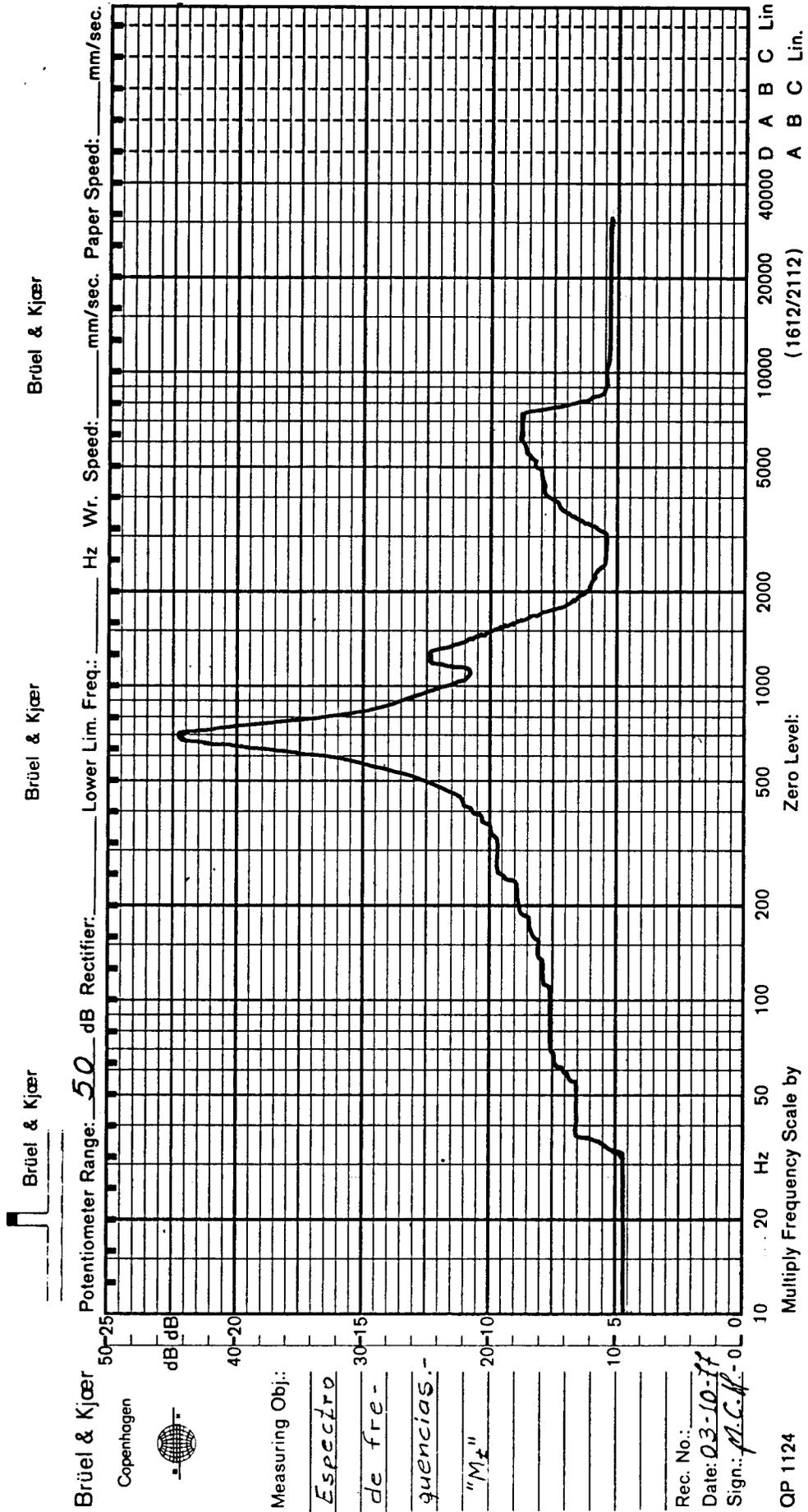


FIGURA 3.24- Espectro de frequências, obtido pelo método da oscilação forçada, para a direção da força de corte.

3.2.2- Determinação do grau de amortecimento

3.2.2.1- Método da percussão

3.2.2.1.1- Direção de corte

O grau de amortecimento é determinado através da medida das amplitudes da curva de amortecimento da figura 3.17.

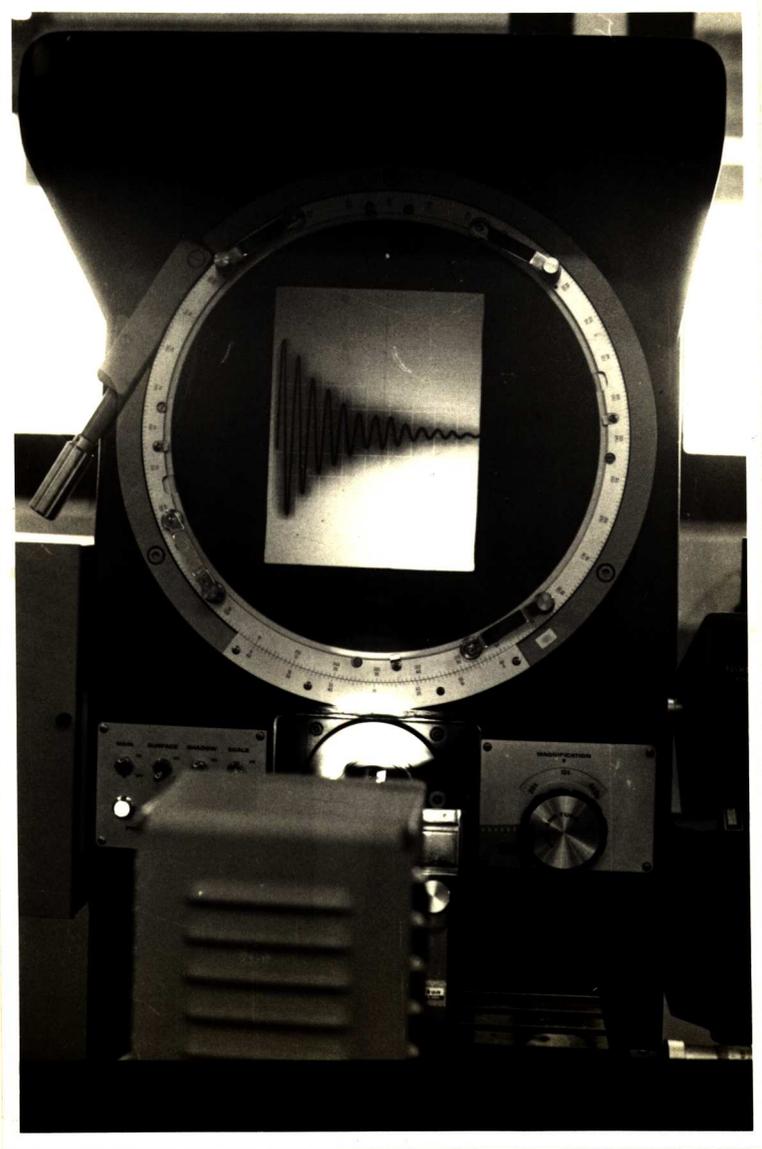


FIGURA 3.25- Medida das amplitudes da oscilação amortecida , através de um projetor de perfil Nikon.

Medindo-se as amplitudes no projetor Nikon (figura 3.25) verificou-se que a razão de duas amplitudes consecutivas não se mantém constante. Desta forma utilizou-se o método dos mínimos quadrados para obter a reta média, cujo coeficiente angular é o decremento logarítmico δ . Para o cálculo, admitiu-se o sistema linear e com um grau de liberdade. A tabela III.1 apresenta os valores da relação $l_n \frac{a_0}{a_n}$, obtidos por este método, onde a_0 representa o valor da amplitude e a_n os valores das amplitudes seguintes. A reta média é dada pela expressão | 12 | :

$$l_n \frac{a_0}{a_n} = 1,51 + 0,291 (n_i - 5,0) \quad (3.9)$$

Logo o decremento logarítmico δ_c , será:

$$\delta_c = 0,291$$

O grau de amortecimento é calculado pela fórmula |13 e 14|:

$$\beta_c = \frac{\delta_c}{\sqrt{4\pi^2 + \delta_c^2}} \quad (3.10)$$

Logo

$$\beta_c = \frac{0,291}{\sqrt{4\pi^2 + 0,291^2}}$$

$$\beta_c = 0,0463$$

TABELA III.1- Valores de $l_n \frac{a_o}{a_n}$ em função do número de ordem

para obtenção do grau de amortecimento na direção de corte.

n	a_n	a_o/a_n	$l_n a_o/a_n$
0	140	1,00	0,00
1	105	1,33	0,28
2	72,5	1,93	0,66
3	51,5	2,72	1,00
4	38,5	3,64	1,29
5	29,0	4,83	1,57
6	22,0	6,36	1,85
7	17,5	8,00	2,08
8	13,5	10,37	2,34
9	9,5	14,74	2,69
10	7,5	18,67	2,93

3.2.2.1.2- Direção de avanço

De acordo com o mesmo procedimento do item 3.2.2.1.1 e os valores obtidos na tabela III.2, calculou-se a reta média. Tem-se a expressão:

$$l_n \frac{a_0}{a_n} = 1,41 + 0,288 (n_i - 5,0) \quad (3.11)$$

Logo o decremento logarítmico será:

$$\delta_a = 0,288$$

O grau de amortecimento correspondente, terá o valor:

$$\beta_a = 0,0457$$

TABELA III.2- Valores de $l_n \frac{a_0}{a_n}$ em função do número de ordem ,

para a obtenção do grau de amortecimento na direção de avanço.

n	a_n	a_0/a_n	$l_n a_0/a_n$
0	115,5	1,00	0,00
1	83,5	1,38	0,32
2	66,5	1,73	0,54
3	51,5	2,24	0,80
4	39,5	2,92	1,07
5	30,0	3,85	1,34
6	21,5	5,37	1,68
7	15,0	7,70	2,04
8	10,5	11,00	2,39
9	8,5	13,58	2,60
10	7,0	16,50	2,80

3.2.2.2- Método da força pulsante

3.2.2.2,1- Direção de corte

Para obter o grau de amortecimento do sistema, empregou-se a aparelhagem de fabricação Brüel & Kjaer, de acordo com o esquema da Figura 3.26.

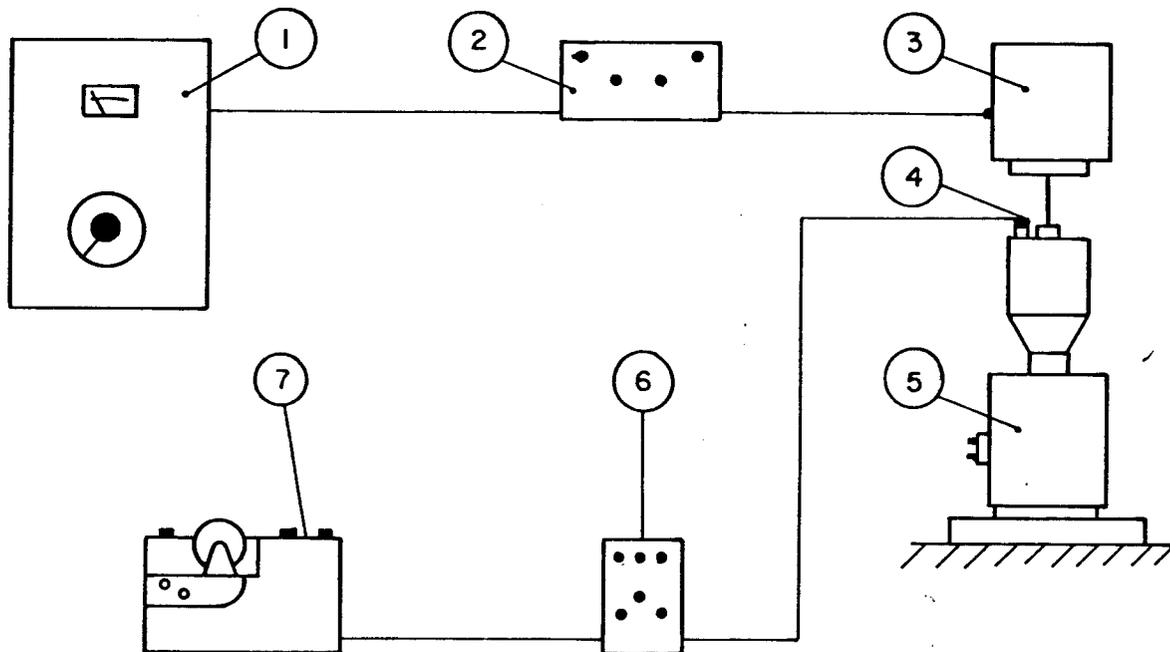
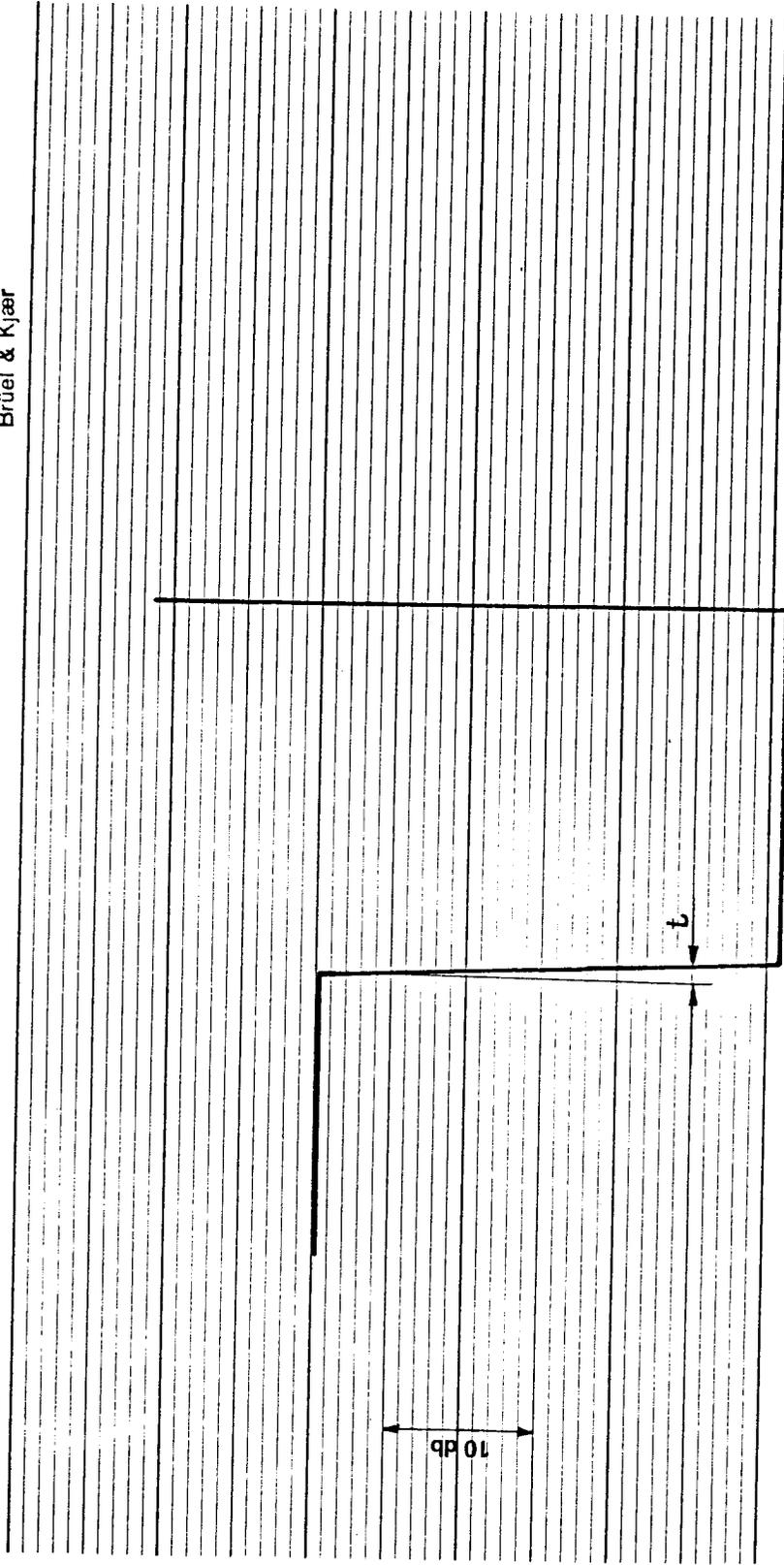


FIGURA 3.26- Esquema da aparelhagem empregada para obtenção do grau de amortecimento pelo método da força pulsante.

1- Gerador de frequências	- Brüel	- Tipo 1022
2- Amplificador	- Brüel	- Tipo 2706
3- Vibrador	- Brüel	- Tipo 4809
4- Acelerômetro	- Brüel	- Tipo 4343
5- Dinamômetro	- Centro de Tecnologia	
6- Prê-Amplificador	- Brüel	- Tipo 2626
7- Registrador	- Brüel	- Tipo 2305

A montagem do equipamento representado na figura 3.26, permite a determinação da curva envolvente da oscilação amortecida proveniente do dinamômetro, uma vez que a voltagem de saída do pré-amplificador - 6 é proporcional à amplitude da oscilação. Mediante o potenciômetro logarítmico do registrador - 7, a curva envolvente é transformada numa reta (figura 3.27), a qual permite determinar o amortecimento através de sua inclinação.

Brüel & Kjaer



OP 1102

FIGURA 3.27- Representação logarítmica do amortecimento, para a direção de corte do dinamômetro.

De acordo com as instruções do catálogo do fabricante [15] e admitindo que o amortecimento é do tipo viscoso, temos:

$$\frac{D}{f_n} = 27,3 \times \beta, \quad (3.12)$$

onde f_n é a primeira frequência de ressonância do sistema e D é dado pela relação

$$D = \frac{20}{t} \frac{\text{db}}{\text{s}}, \text{ onde} \quad (3.13)$$

t é o tempo que demora a amplitude da vibração para cair de 20 db.

Para o cálculo do grau de amortecimento do sistema, obteve-se do registro os seguintes valores:

Velocidade do papel = 100 mm/s

Velocidade do registro = 2.000 mm/s

Tempo $t = 0,021$ s

considerando que $f_n = 700 \text{ Hz}$

$$\text{e como } \beta_c = \frac{20}{27,3 \times f_n \times t}, \quad (3.14)$$

$$\text{resulta } \beta_c = \frac{20}{27,3 \times 700 \times 0,021}$$

$$\beta_c = 0,0476$$

Comparando-se com o valor do grau de amortecimento obtido pelo método da percussão, o qual foi 0,0463, constata-se um erro de 3%.

3.2.2.2.2- Direção de avanço

De acordo com o mesmo procedimento do item 3.2.2.2.1 e através dos valores obtidos do registro logarítmico do amortecimento (Figura 3.28), calculou-se o grau de amortecimento do sistema.

Tem-se os valores:

Velocidade do papel = 100 mm/s

Velocidade de registro = 2.000 mm/s

Tempo $t = 0,015$ s

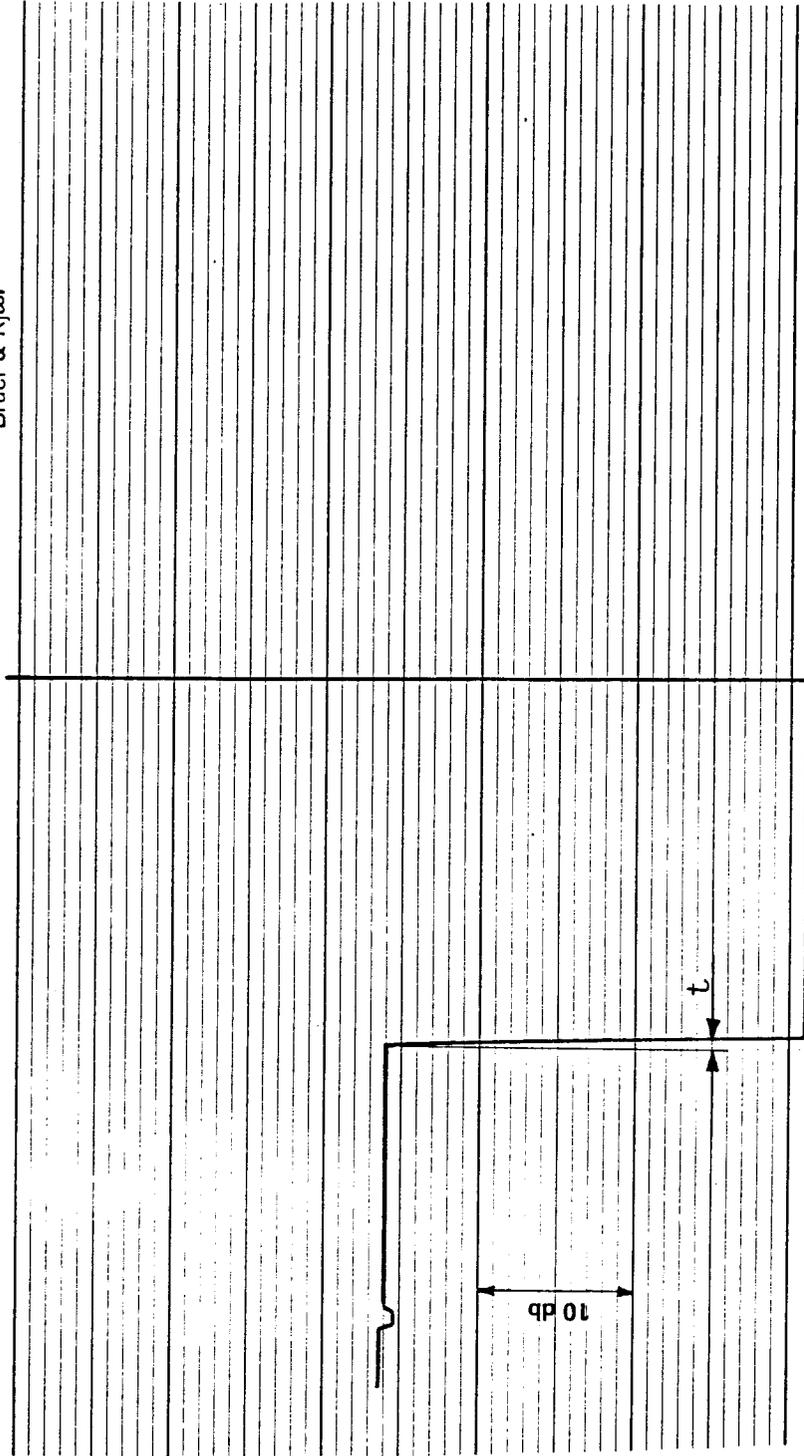
Considerando que $f_n = 1.100$ Hz ,

resulta:

$$\beta_a = 0,0444$$

Comparando-se com o grau de amortecimento para a direção de avanço, obtido pelo método da percussão, o qual foi 0,0457, constata-se um erro de 3%.

Brüel & Kjær



QP 1102

FIGURA 3.28- Representação logarítmica do amortecimento, para a direção de avanço.

3.2.3- Fator de amplificação " Φ " para a direção de corte

O fator de amplificação Φ representa o fator que deve ser multiplicado à deformação estática, para obter-se a amplitude da oscilação forçada em diferentes frequências. Representa portanto o erro dinâmico do dinamômetro em trabalho.

Considerando-se o sistema de um grau de liberdade, tem-se para a torção [13 e 14] :

$$\Phi = \frac{1}{\sqrt{(1-r_1^2)^2 + (2\beta r_1)^2}} \quad (3.15)$$

onde

$$r_1 = \frac{\omega_1}{\omega_n} = \frac{f_1}{f_n}$$

A Tabela III.3 apresenta os valores do fator de amplificação Φ_1 , para a direção de corte, em função da relação de frequências $r_1 = f_1 / f_n$. A figura 3.29 apresenta a sua representação gráfica.

TABELA III.3- Fator de amplificação Φ , para a direção de corte, em função da relação de frequências r_1 .

r_1	Φ_1
0,0	1
0,2	1,04
0,4	1,19
0,6	1,55
0,8	2,71
1,0	10,24
1,2	2,19
1,4	1,03
1,6	0,64
1,8	0,44
2,0	0,33

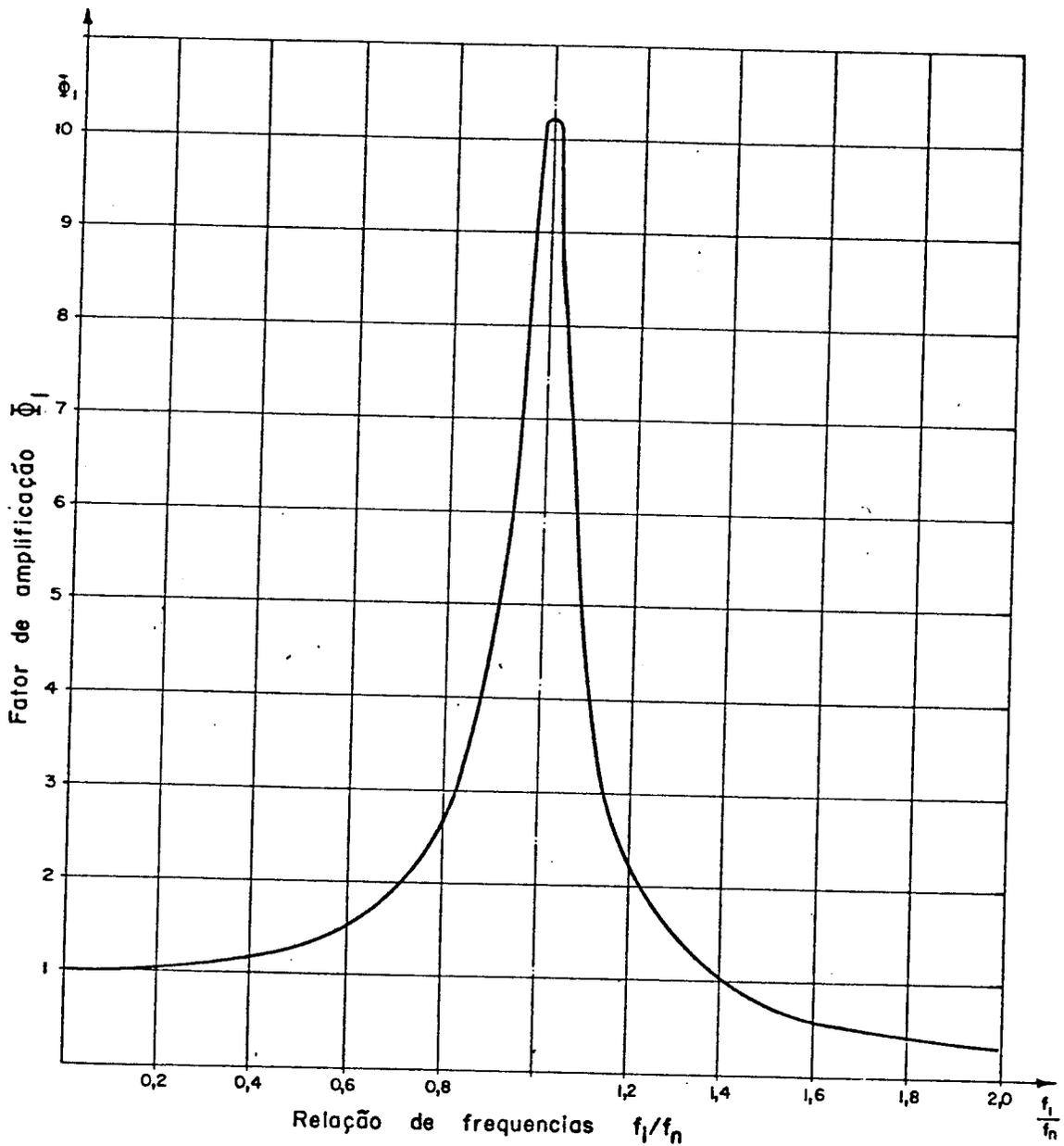


FIGURA 3.29- Fator de amplificação Φ_1 , para a força de corte, em função da relação de frequências $r_1 = f_1/f_n$.

O "erro relativo dinâmico", E , é definido por

$$E = (\phi_1 - 1) \times 100 (\%) . \quad (3.16)$$

Portanto, para diferentes relações de frequências, tem-se os valores:

r	ϕ	E (%)
0,1	1,01	1,0
0,2	1,04	4,0
0,3	1,09	9,0
0,4	1,19	19,0
0,5	1,32	32,0

A figura 3.30 representa a variação do erro relativo dinâmico em função do parâmetro " r ".

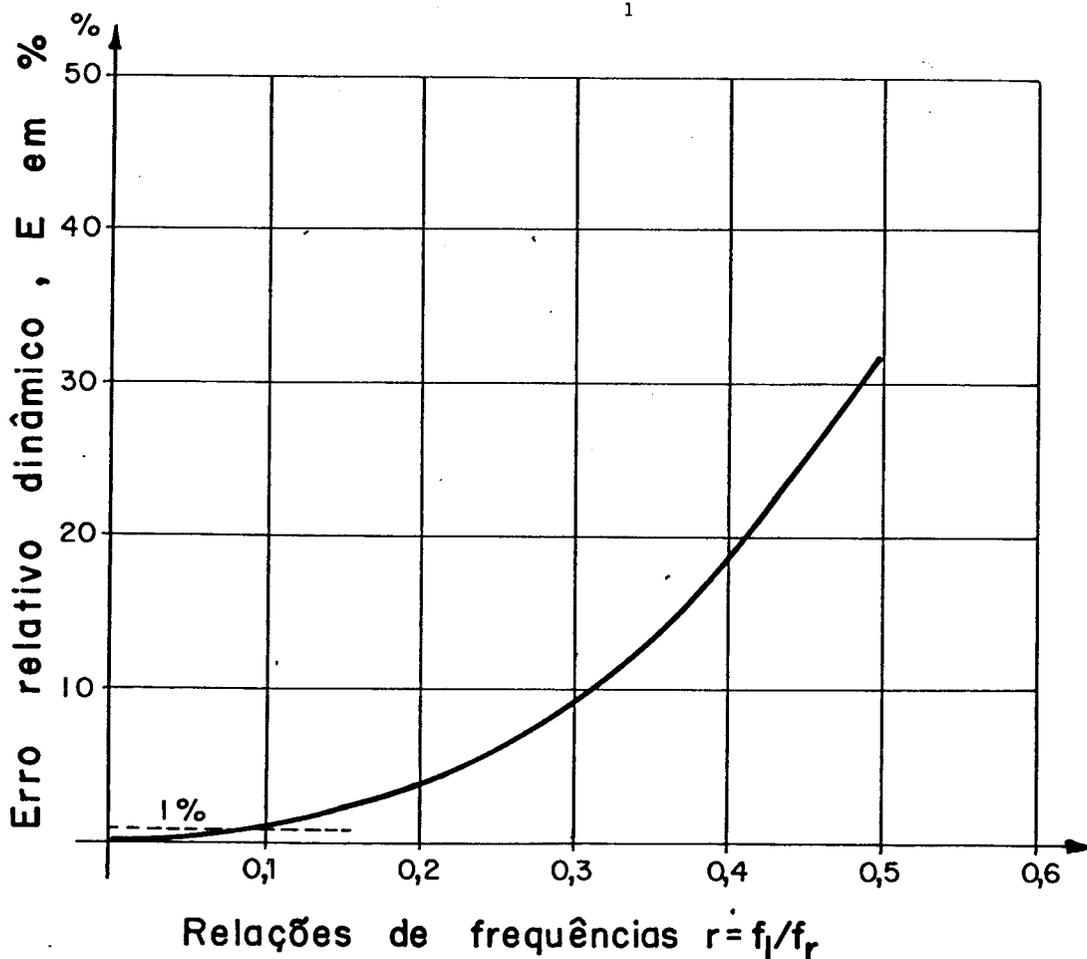


FIGURA 3.30- Erro relativo dinâmico das medidas do " M_t ".

Observa-se na figura 3.30, que para frequências abaixo de $0,1 \times 700 \cong 70 \text{ H}_z$, o erro relativo dinâmico é inferior a 1%. Considerando que 70 H_z corresponde em rotações da broca de $70 \times 60 = 4.200 \text{ rpm}$ e que a rotação utilizada durante os ensaios nunca era superior a 1.500 rpm , pode-se esperar que o erro relativo dinâmico do " M_t " será inferior a 0,75%.

3.2.4- Fator de amplificação ϕ para a direção de avanço

Sendo a frequência própria na direção de avanço de aproximadamente $f_a = 1.000 \text{ H}_z$ e o grau de amortecimento $\beta_a = 0,145$, pode-se concluir que o erro dinâmico na direção de avanço, para as rotações em que o dinamômetro vai operar, é ainda inferior ao anterior.

CAPÍTULO IV

DESGASTE E VIDA DAS BROCAS HELICOIDAIS

4.1- Considerações sobre a geometria das brocas helicoidais

Para o estudo dos desgastes, vida e forças de usinagem das brocas helicoidais, torna-se necessário a fixação de conceitos básicos sobre a geometria destas ferramentas. Estes conceitos são fornecidos pelas normas técnicas, elaboradas pelos diferentes países industrializados. No Brasil, a norma técnica que trata do assunto é a ABNT-NB-205, "Ferramentas de Usinagem" - Geometria da Cunha Cortante", correspondente a norma DIN 6581 [16 e 17].

No desenvolvimento do presente trabalho, são utilizados os seguintes conceitos e definições, fornecidos pelas normas técnicas acima (figura 4.1).

4.1.1- Superfícies de uma broca helicoidal

Superfície de folga- A superfície de folga da cunha de uma broca helicoidal é a superfície que se defronta com a superfície gerada na peça. Na ponta de uma broca helicoidal distinguem-se duas superfícies de folga. No caso de uma afiação normal da broca, cada superfície de folga é parte de uma superfície cônica de revolução.

Distinguem-se ainda as superfícies principal e lateral de folga, associadas respectivamente, a uma aresta principal e uma aresta lateral de corte.

Superfície de saída- A superfície de saída de uma broca helicoidal é a superfície da cunha cortante sobre a qual o cavaco desliza ao se formar. Na broca helicoidal existem duas superfícies de saída distintas, formadas pelos canais helicoidais.

4.1.2- Arestas cortantes de uma broca

Arestas principais de corte- São as arestas formadas pela intersecção das superfícies de folga e de saída. Na broca helicoidal existem duas arestas principais de corte, geralmen

te retilíneas.

Arestas laterais de corte- Nas brocas helicoidais existem duas arestas laterais de corte, que são as duas linhas helicoidais formadas pela intersecção das guias com os canais helicoidais | 18 | .

Aresta transversal- É uma aresta particular das brocas helicoidais e é formada pela intersecção das duas superfícies principais de folga, estando o seu comprimento limitado pelas duas arestas principais de corte.

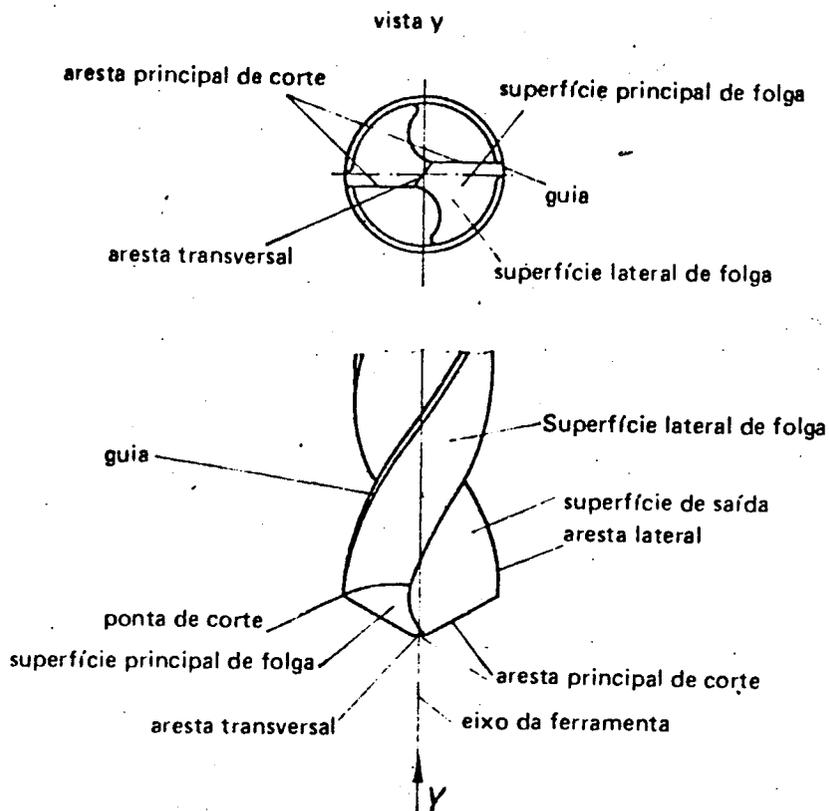


FIGURA 4.1- Superfícies e arestas de uma broca helicoidal.

4.1.3- Ângulos de uma broca helicoidal

De acordo com a norma ABNT - NB 205, distinguem-se duas classes de ângulos da cunha cortante:

os ângulos efetivos, de interesse no estudo do mecanismo da formação do cavaco | 9 |,

os ângulos da ferramenta, de interesse na construção e afiação da ferramenta.

Cada classe de ângulos é definida com auxílio de um sistema de referência, formado por 3 planos ortogonais entre si e passando por um ponto de referência da aresta cortante. Os três planos são denominados plano de referência, plano de corte e plano de medida.

Planos do sistema de referência de uma broca helicoidal

Plano de referência da broca- É o plano que contém o eixo da broca e passa pelo ponto de referência da aresta principal de corte.

Plano de corte da broca- É o plano que contém a aresta principal de corte e é perpendicular ao plano de referência.

Plano de medida da broca- É o plano perpendicular aos planos de referência e de corte, passando pelo ponto de referência da aresta principal de corte.

Além destes planos ortogonais, é de interesse o plano de trabalho, definido como o plano que passa pelo ponto de referência da aresta principal de corte, paralelo ao eixo da broca e perpendicular ao plano de referência da broca.

Ângulos medidos no plano de medida

Ângulo de folga α - É o ângulo formado pela superfície de folga e o plano de corte, medido no plano de medida da cunha cortante. É positivo, quando a reta de intersecção dos planos de corte e de medida for externa à cunha da ferramenta (figura 4.2).

Ângulo de cunha β - É o ângulo formado pelas superfícies de folga e de saída, medido no plano de medida da cunha cortante.

Ângulo de saída γ - É o ângulo formado pela superfície de saída e o plano de referência, medido no plano de medida da cunha cortante. É positivo quando a reta de intersecção dos planos de referência e de medida for externa a cunha da ferramenta.

Os ângulos de folga, da cunha e de saída são relacionados sempre pela igualdade

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^{\circ} \quad (4.1)$$

Ângulos medidos no plano de trabalho

Em analogia aos ângulos medidos no plano de medida da cunha cortante, definem-se no plano de trabalho os ângulos (figura 4.2):

ângulo lateral de folga α_x

ângulo lateral de cunha β_x

ângulo lateral de saída γ_x

valendo a propriedade

$$\alpha_x + \beta_x + \gamma_x = 90^{\circ} \quad (4.2)$$

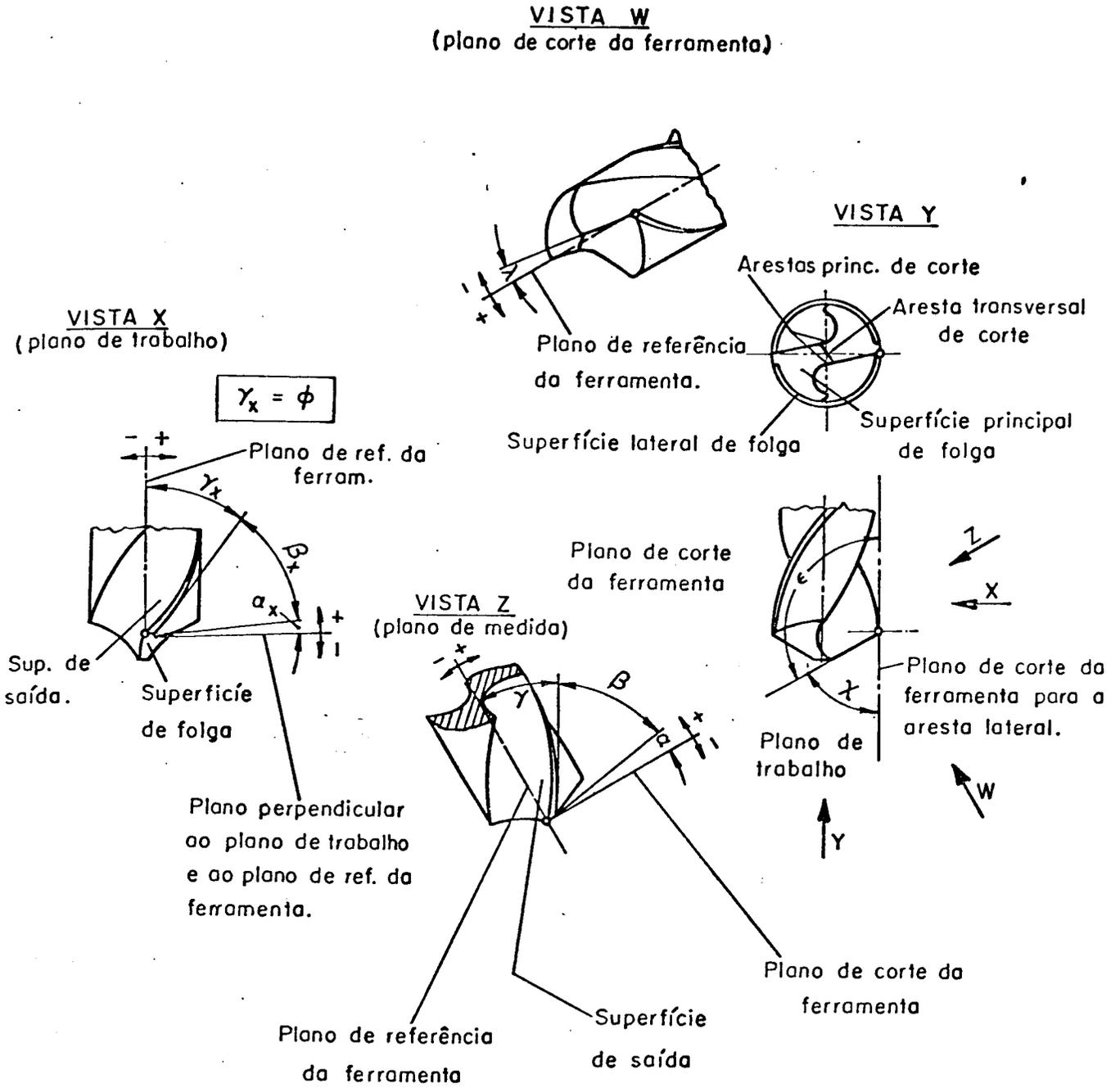
Nas brocas helicoidais, apresentam um interesse especial, os ângulos laterais medidos no plano de trabalho que contém a ponta de corte, uma vez que estes ângulos podem ser medidos diretamente, com auxílio de microscópio de oficina.

Ângulos medidos no plano de referência da broca

Ângulo de posição x - É o ângulo entre o plano de corte e o plano de trabalho, medido no plano de referência (figura 4.2)

Ângulo de ponta σ - É o ângulo de abertura da superfície cônica gerada pela broca na peça usinada. No caso de uma afiação simétrica da ponta da broca, tem-se (figura 4.2)

$$x = \frac{\sigma}{2} \quad (4.3)$$

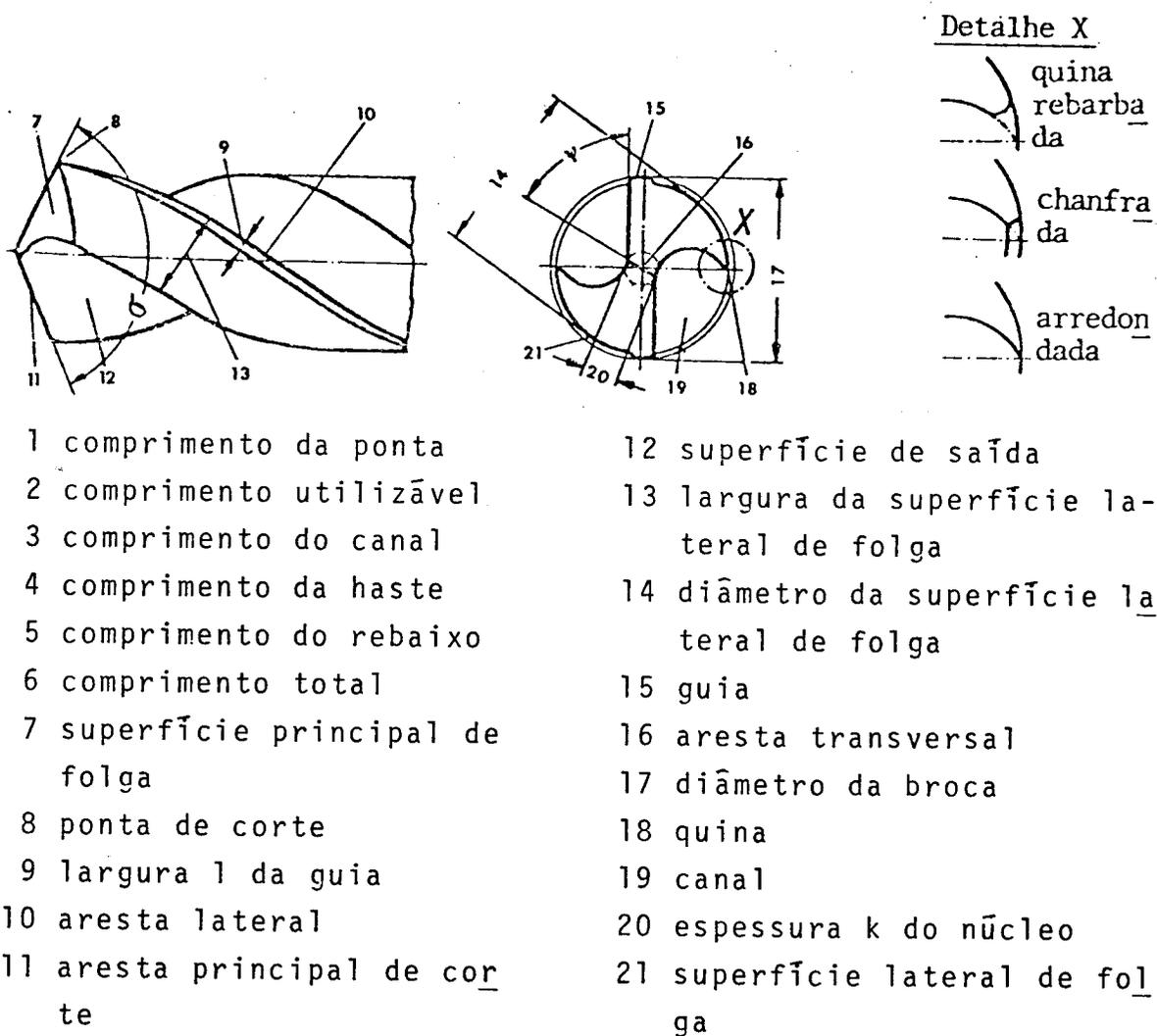


Plano da vista principal = Plano de referência da ferram.

FIGURA 4.2- Ângulos da ferramenta numa broca helicoidal | 1 |.

Ângulo de hēlice ϕ - É o ângulo entre a guia helicoidal e a direçāo do eixo da broca. Coincide com o ângulo lateral de saída γ_x , quando o ponto de referēncia for a ponta da aresta cortante (figura 4.2)

Ângulo da aresta transversal de corte ψ - É o ângulo agudo entre a aresta transversal de corte e a projeçāo da aresta principal de corte, sobre um plano perpendicular ao eixo, da broca, contendo a aresta transversal de corte (figura 4.3).



- | | |
|---------------------------------|--------------------------------------------|
| 1 comprimento da ponta | 12 superfície de saída |
| 2 comprimento utilizável | 13 largura da superfície lateral de folga |
| 3 comprimento do canal | 14 diâmetro da superfície lateral de folga |
| 4 comprimento da haste | 15 guia |
| 5 comprimento do rebaixo | 16 aresta transversal |
| 6 comprimento total | 17 diâmetro da broca |
| 7 superfície principal de folga | 18 quina |
| 8 ponta de corte | 19 canal |
| 9 largura l da guia | 20 espessura k do núcleo |
| 10 aresta lateral | 21 superfície lateral de folga |
| 11 aresta principal de corte | |

σ = ângulo da ponta ψ = ângulo da aresta transversal

FIGURA 4.3- Grandezas específicas de uma broca helicoidal

4.1.4- Variação dos ângulos medidos no plano de medida da cunha cortante, ao longo da aresta principal de corte

Devido ao fato que as superfícies principais de folga e

de saída de uma broca helicoidal são superfícies planas, os ângulos medidos no plano de medida variam ao longo da aresta principal de corte.

As figuras 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam os valores destes ângulos, em função da relação d/D , onde d é um diâmetro genérico de referência e D é o diâmetro externo da broca | 5 | .

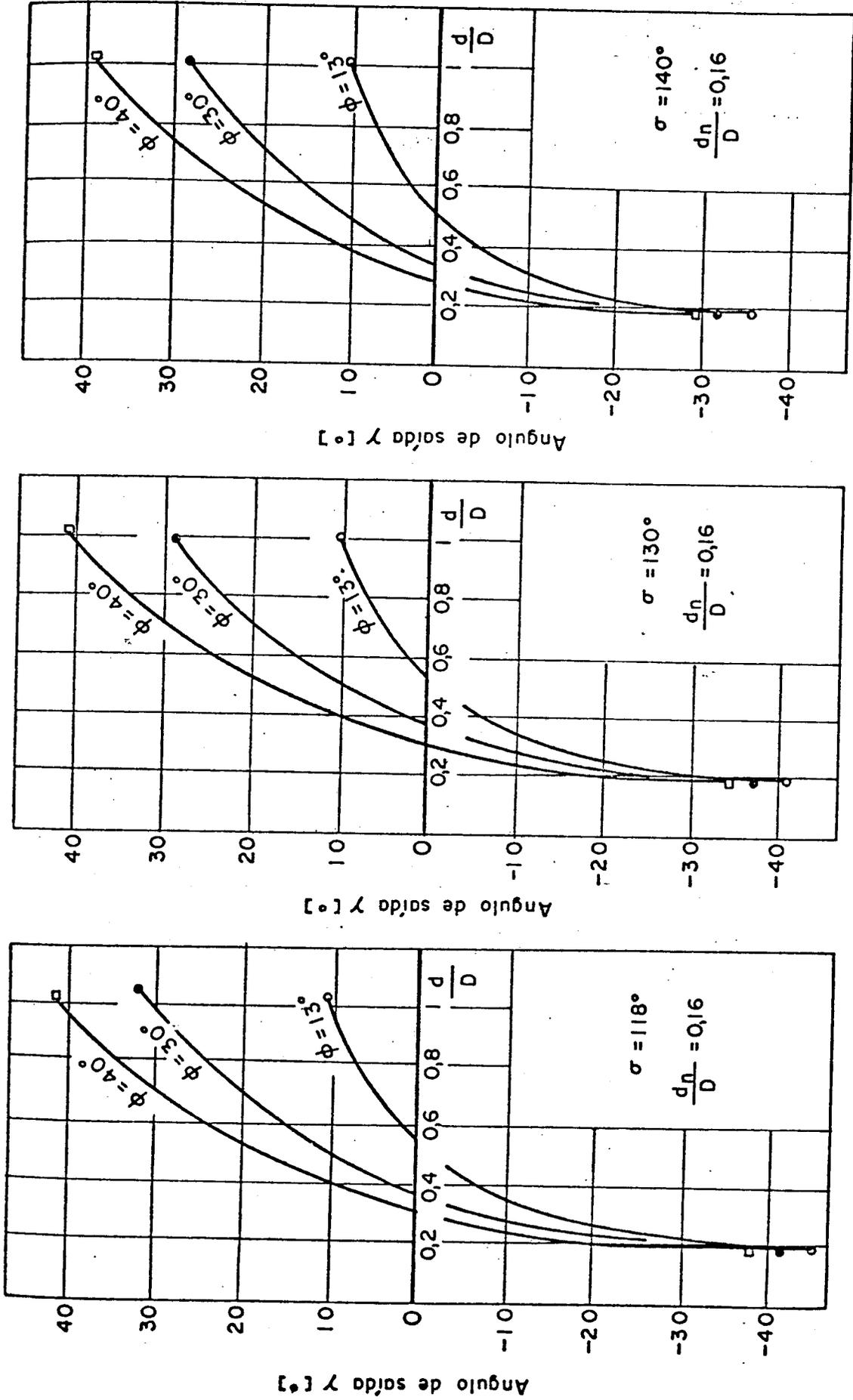


FIGURA 4.4- Variação do ângulo de saída γ , ao longo da aresta principal de corte, para diferentes valores do ângulo de ponta σ e ângulo de hélice ϕ | 5 | .

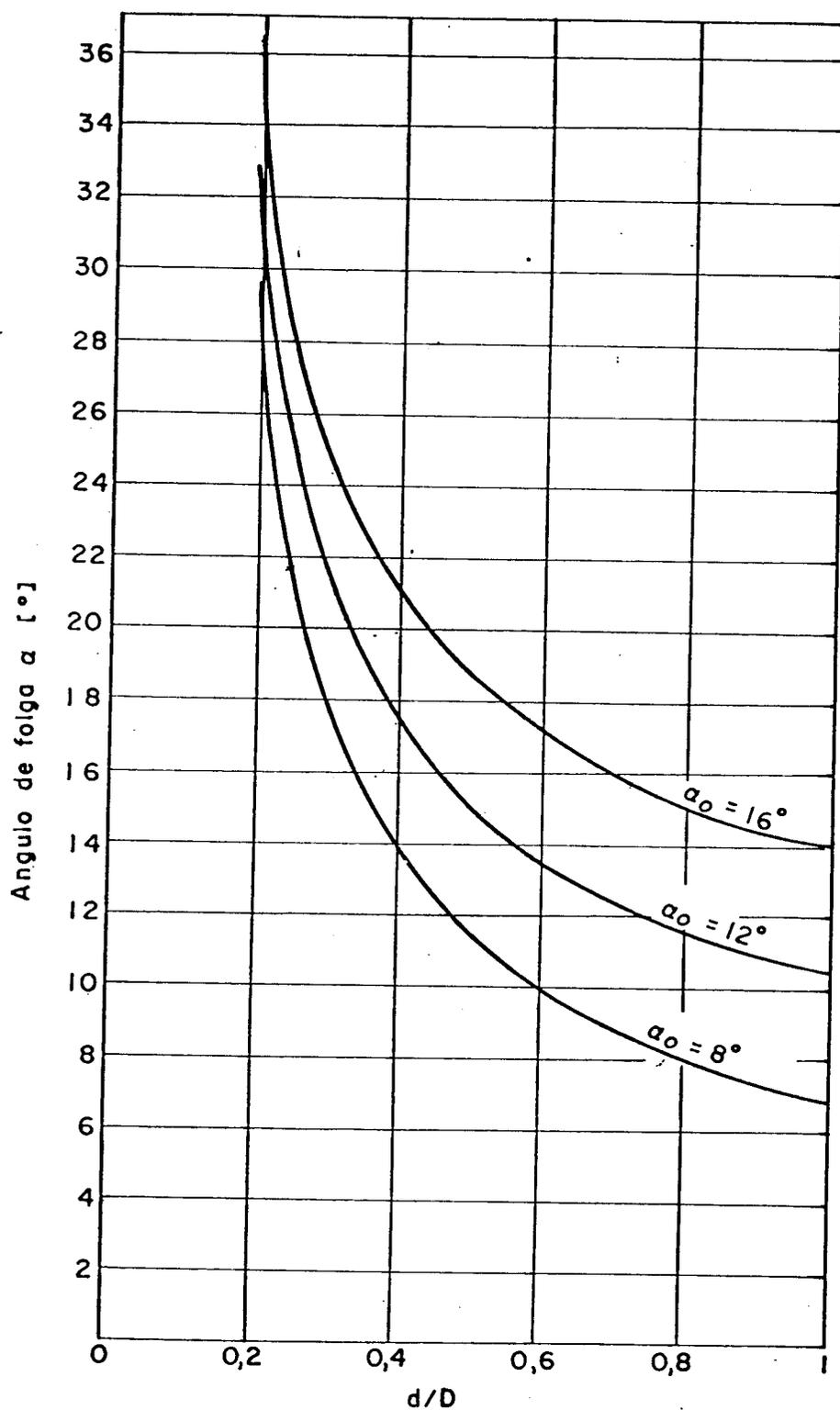


FIGURA 4.5- Variação do ângulo de folga α , ao longo da aresta principal de corte, para um ângulo de ponta $\sigma = 118^\circ$ e os ângulos laterais de folga $\alpha_x = 8^\circ, 12^\circ$ e 18° | 5 |.

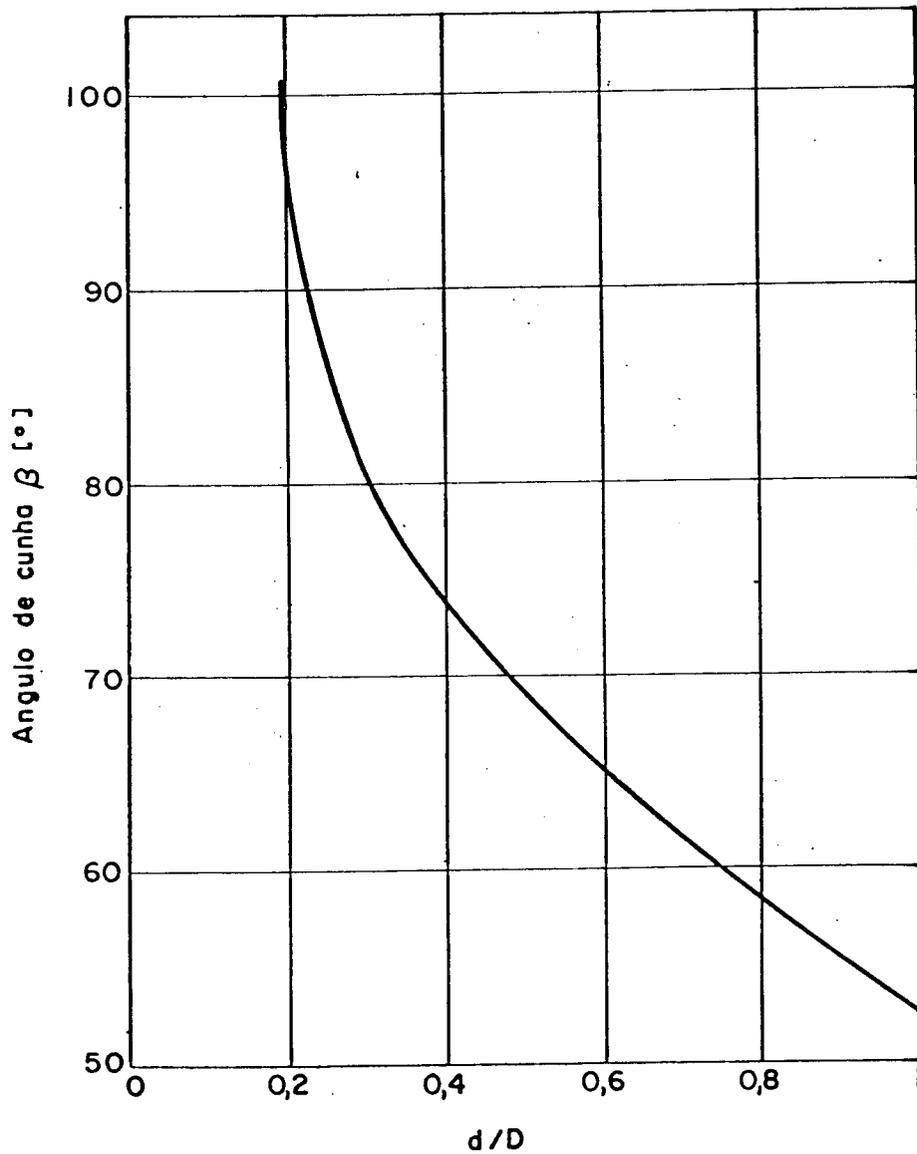


FIGURA 4.6-Variação do ângulo de cunha β , ao longo da aresta principal de corte, para os valores: $\sigma = 118^{\circ}$, $\phi = 30^{\circ}$, $\alpha_x = 8^{\circ}$ | 5 | .

A figura 4.7 apresenta esquematicamente a variação do ângulo de cunha β , para diferentes diâmetros de uma broca helicoidal, de diâmetro externo 25 mm | 5 | .

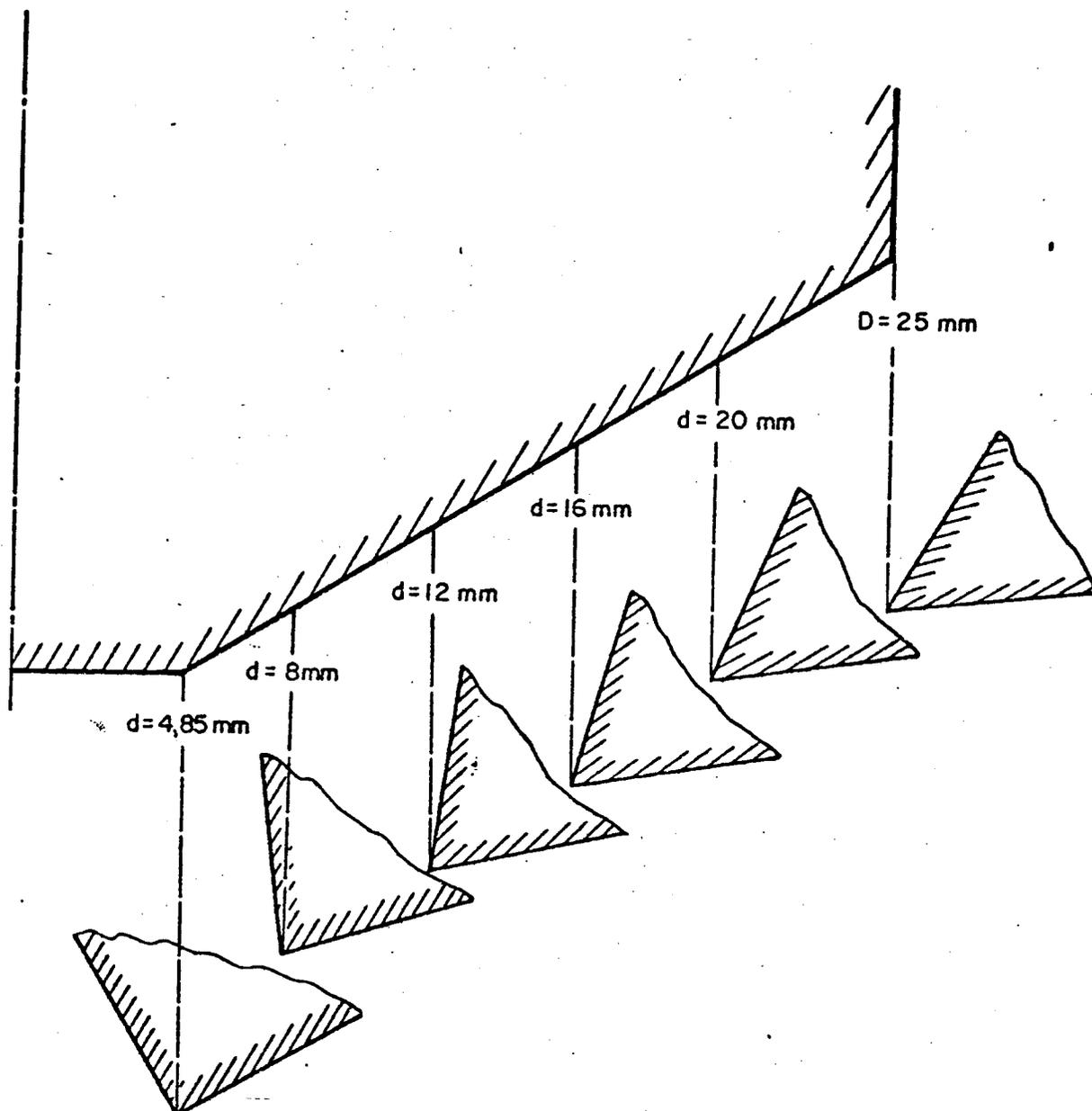


FIGURA 4.7- Variação da cunha cortante ao longo da aresta principal de corte, para $\sigma = 118^\circ$, $\phi = 30^\circ$, $\alpha_x = 8^\circ$, $D = 25 \text{ mm}$ | 5 | .

Além dos ângulos acima definidos, são de interesse para o estudo de afiação das brocas helicoidais, os ângulos laterais efetivos, medidos no plano de trabalho.

De acordo com a figura 4.8, tem-se os ângulos:

α_{xe} = ângulo lateral efetivo de folga

γ_{xe} = ângulo lateral efetivo de saída

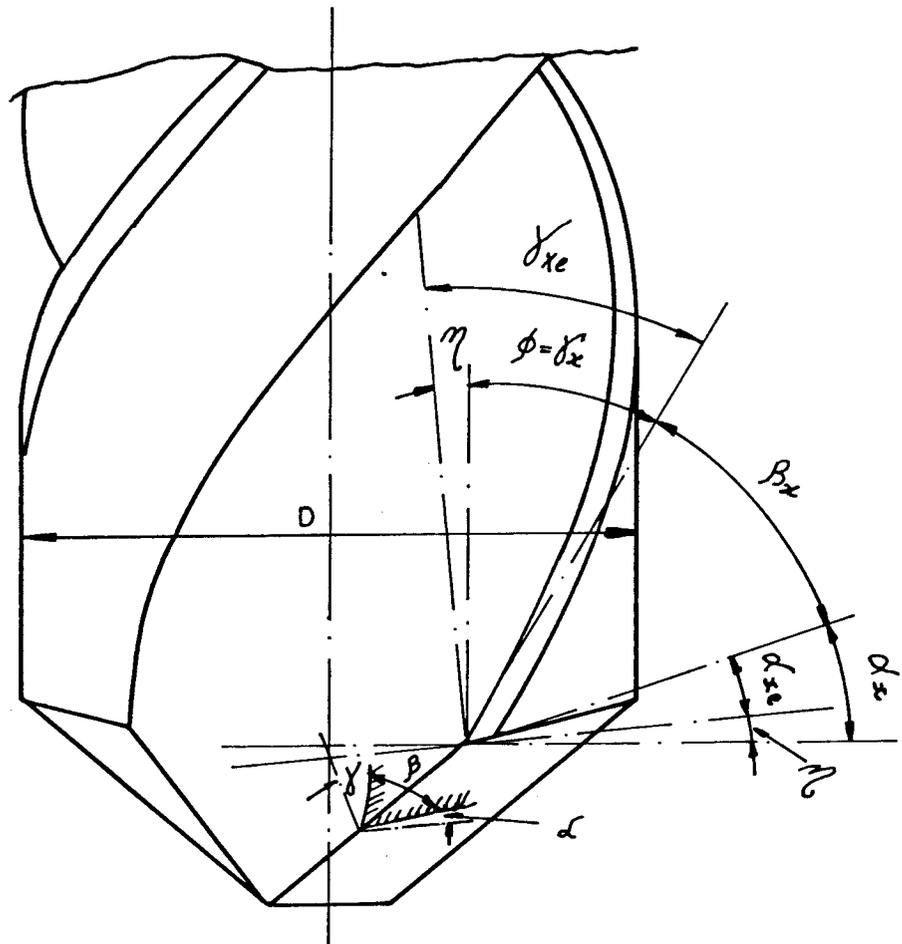


FIGURA 4.8- Representação dos ângulos laterais de uma broca helicoidal | 19 | .

A figura 4.9 apresenta o desenvolvimento da superfície cilíndrica periférica de uma broca helicoidal.

Tem-se as relações | 19 | :

$$\alpha_x = \alpha_{xe} + \eta_D \quad ,$$

$$\gamma_x = \gamma_{xe} - \eta_D \quad , \quad (4.4)$$

onde η_D é o ângulo da direção efetiva de corte, medido no plano de trabalho. De acordo com a definição, tem-se a propriedade:

$$\operatorname{tg} \eta_D = \frac{a}{\pi \cdot D} \quad , \quad (4.5)$$

onde

a = avanço da broca por volta

D = diâmetro externo da broca

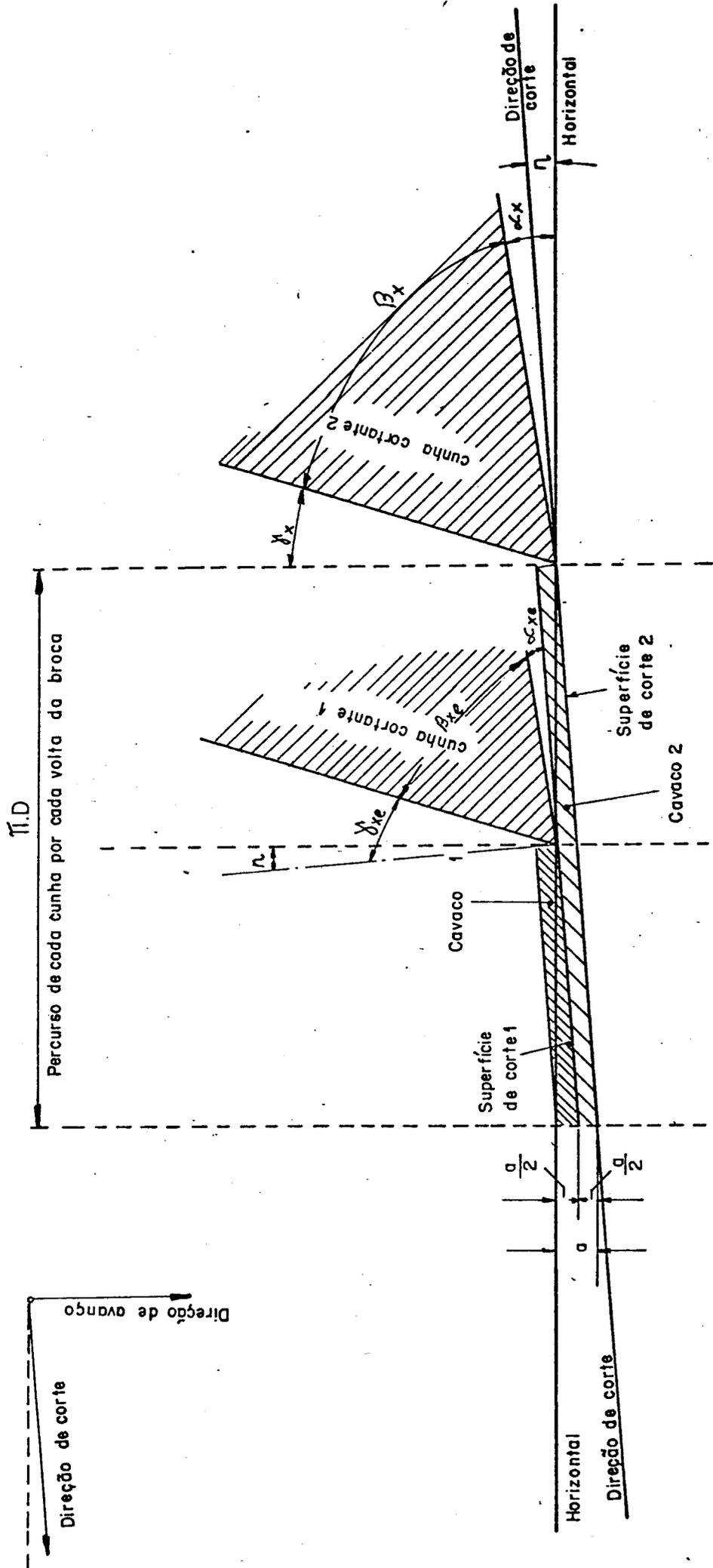


FIGURA 4.9- Desenvolvimento de uma broca helicoidal. Ângulos medidos no plano de trabalho | 19 |.

4.2- Considerações sobre afiação das brocas helicoidais

De acordo com a figura 4.9, verifica-se que o ângulo α_{xe} deve ser tanto quanto possível positivo, a fim de que a superfície principal de folga não interfira com a superfície cônica de furação da peça. De acordo com a fórmula (4.4), conclui-se que o ângulo lateral de folga α_x deverá ser sempre maior, que o ângulo da direção efetiva de corte η_D :

$$\alpha_x = \alpha_{xe} + \eta_D \quad . \quad (4.6)$$

Porém, verifica-se que o ângulo η da direção efetiva de corte varia com o diâmetro da broca (4.5). A figura 4.10 mostra que, durante o processo de furação, os pontos A, B, C e D da aresta principal de corte, percorrem distâncias iguais ao avanço a , numa volta. Logo o ângulo η da direção efetiva de corte, correspondente aos pontos acima definidos, apresenta os valores diferentes

$$\operatorname{tg} \eta_D = \frac{a}{\pi \cdot D} \quad ,$$

$$\operatorname{tg} \eta_b = \frac{a}{\pi \cdot d_b}$$

$$\operatorname{tg} \eta_c = \frac{a}{\pi \cdot d_c}$$

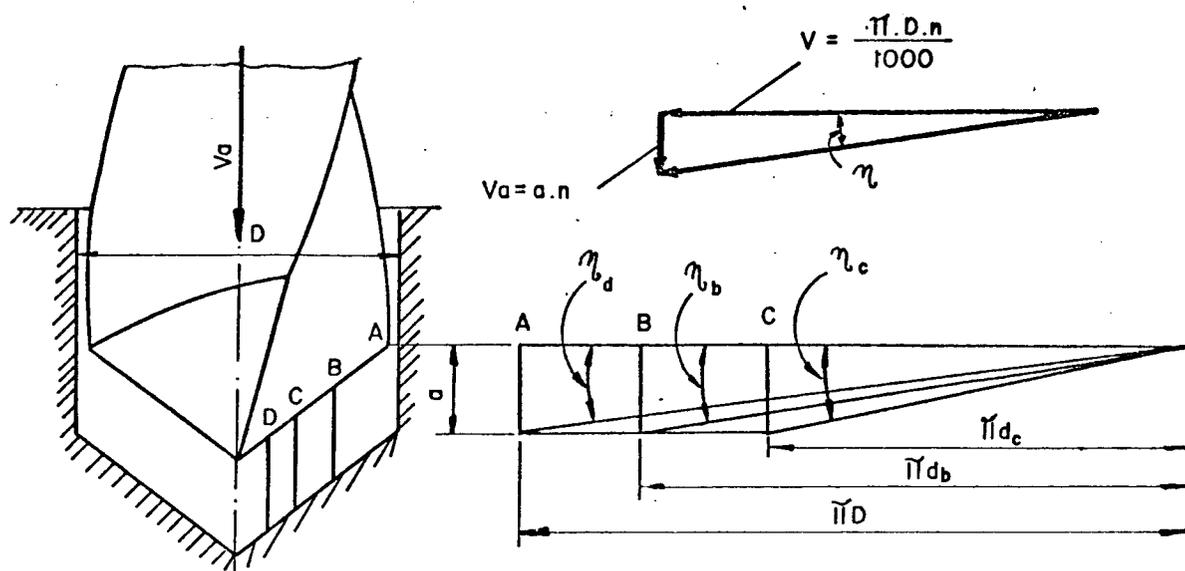


FIGURA 4.10- Esquema ilustrativo mostrando a variação do ângulo η da direção efetiva de corte com o diâmetro da broca, durante a furação.

Logo o ângulo η aumenta com a diminuição do diâmetro da broca. Desta forma, o ângulo lateral de folga α_x deverá apresentar uma variação ao longo da aresta principal de corte, a fim de que o ângulo lateral efetivo de folga seja sempre positivo (4.6).

De acordo com a figura 4.5, existe uma relação bem definida entre o ângulo lateral de folga α_x e o ângulo de folga α , medido no plano de medida. Conclue-se desta forma que o processo de afiação das brocas helicoidais, deve possibilitar na superfície principal de folga uma geometria que permita uma variação do ângulo de folga α e consequentemente o ângulo lateral de folga α_x com o diâmetro da broca.

Diferentes princípios de afiação foram estudados a fim de possibilitar a propriedade acima. O mais utilizado ainda

hoje é o princípio de afiação por cone de revolução.

Para possibilitar o desenvolvimento deste trabalho, foi adquirido pelo Centro de Tecnologia da UNICAMP uma afiadora de brocas de procedência da firma Gühring-Alemanha, tendo como princípio de afiação o de "cone de revolução". As figuras 4.11 e 4.12 apresentam uma vista de conjunto e uma vista em detalhe, mostrando a afiação da superfície principal de folga de uma broca helicoidal.

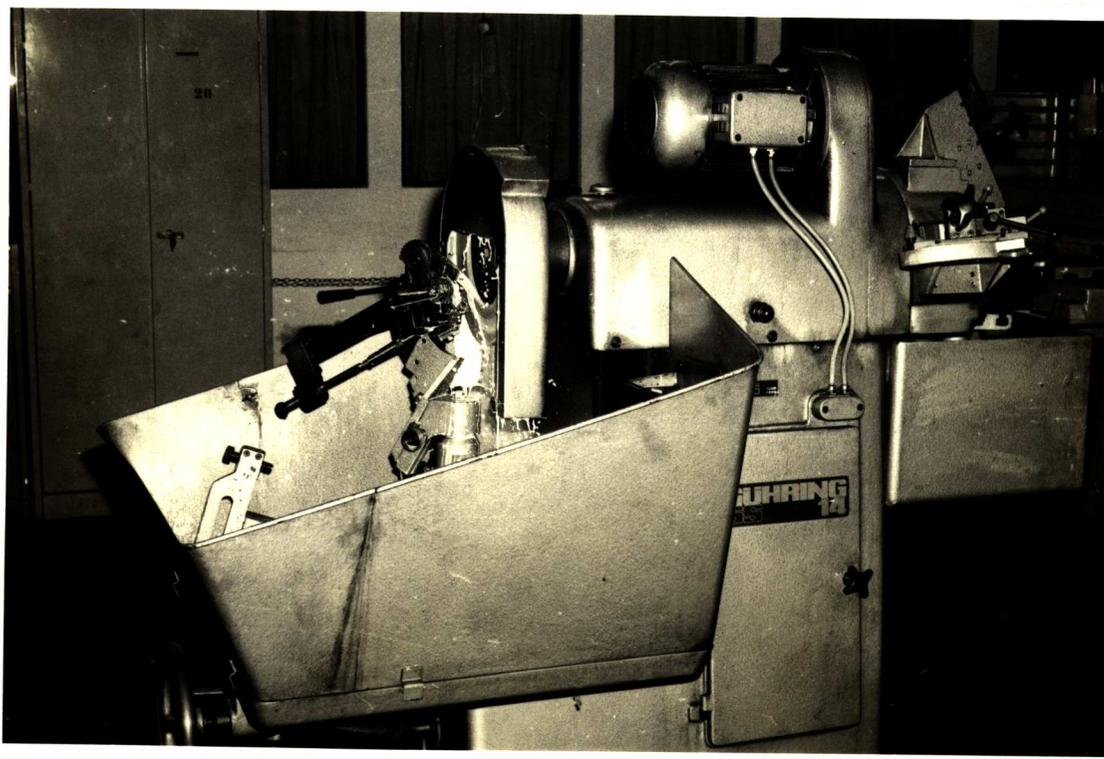


FIGURA 4.11- Vista do conjunto da afiadora.

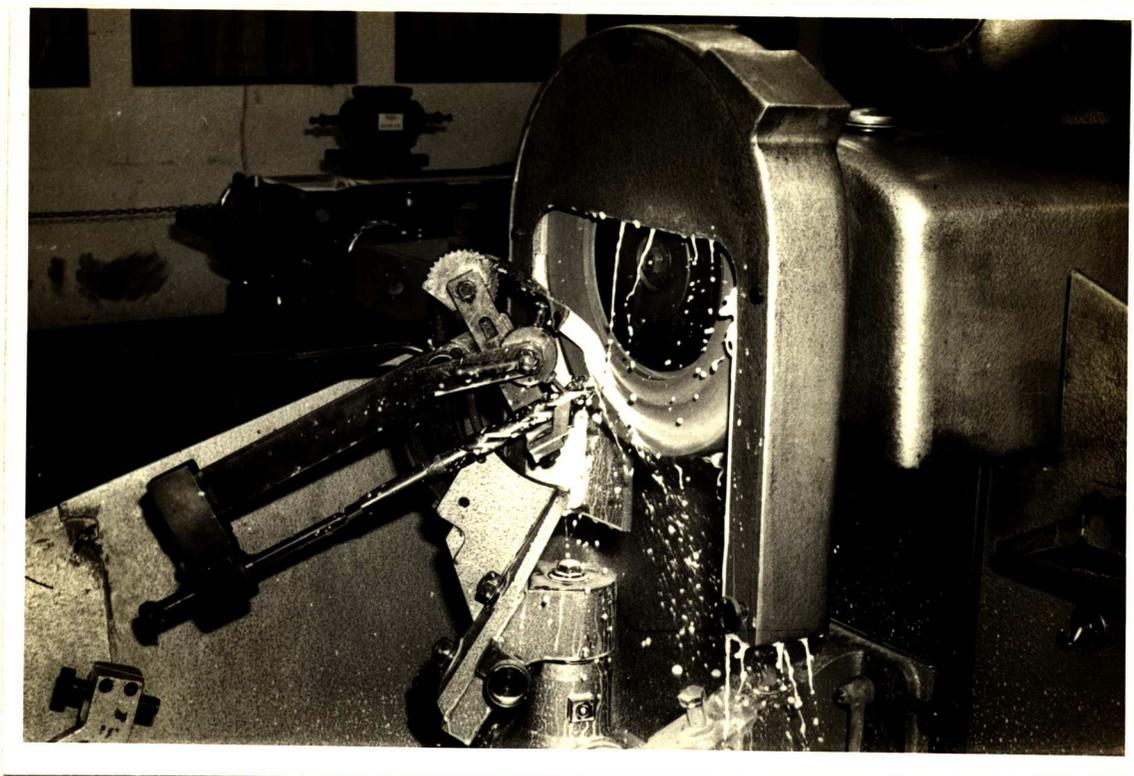


FIGURA 4.12- Vista em detalhe da afiação de uma broca.

A figura 4.13 mostra esquematicamente o princípio de afiação de brocas helicoidais por cone de revolução. A broca é colocada num dispositivo e é aproximada a superfície frontal do rebolo, para permitir a sua afiação. O dispositivo permite variar o ângulo entre o eixo geométrico da broca e o plano de corte do rebolo, a fim de que este ângulo seja igual a metade do ângulo da ponta σ da broca. Este dispositivo, por sua vez, apresenta um eixo de giração, o qual não é coplanar com o eixo da broca. Girando-se o dispositivo ao redor deste eixo, e através do contato da superfície principal de folga da broca com o rebolo, é gerado na mesa uma superfície cônica de revolução.

Na figura 4.13 encontram-se dois cortes da superfície cônica de revolução, segundo os planos de medida I e II. Nestes planos de medida estão representados os ângulos da cunha cortante α , β e γ . Para que o ângulo α , ao longo da aresta principal de corte, seja positivo, é necessário que o eixo de giração do dispositivo não seja coplanar com o eixo da broca.

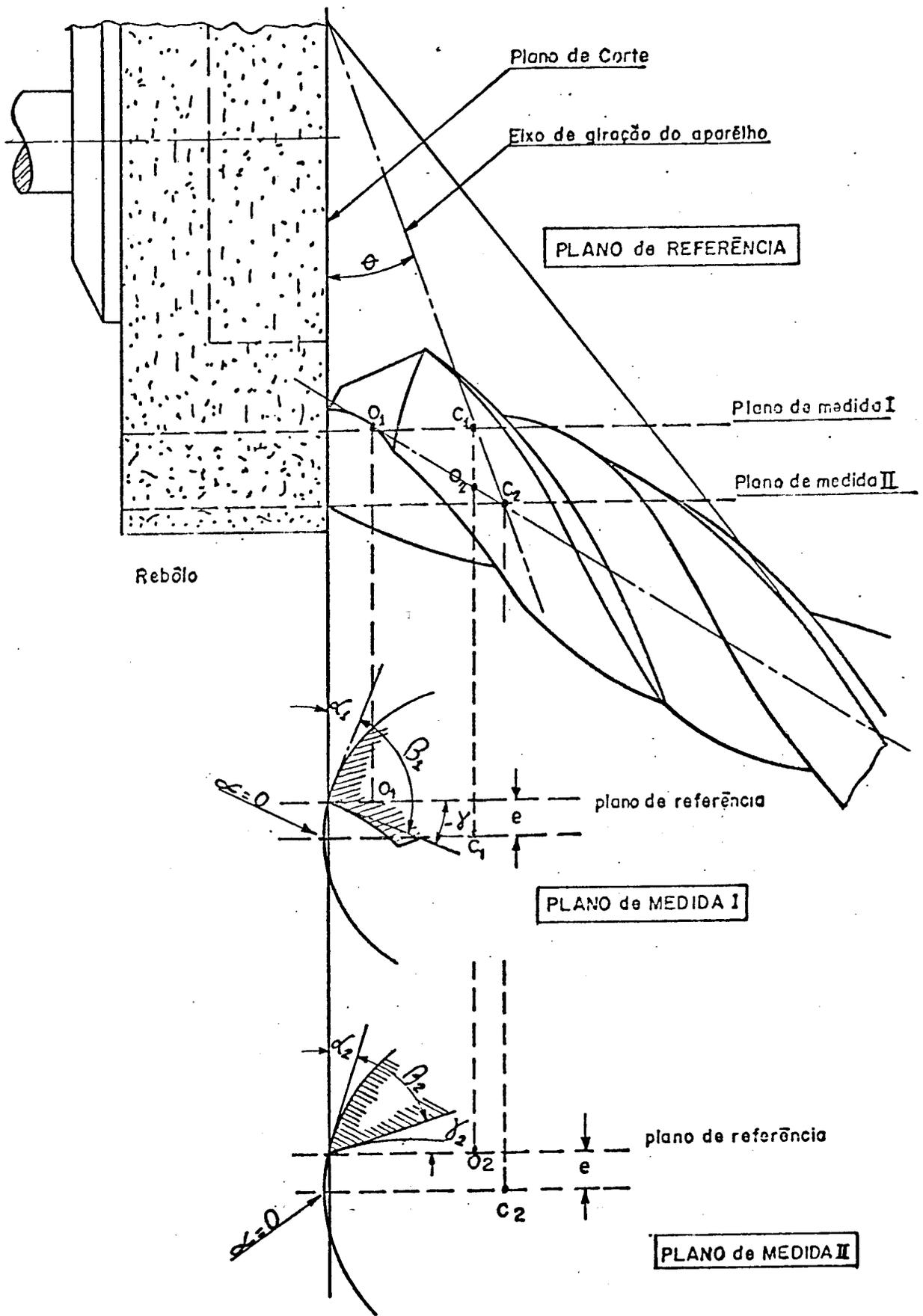


FIGURA 4.13- Princípio de afiação de uma broca helicoidal por cone de revolução.

Deve existir uma excentricidade e (distância entre o plano que contém o eixo de rotação do dispositivo e o plano que contém o eixo da broca). No caso de e ser igual a zero, teremos $\alpha = 0$, havendo interferência da superfície principal de folga da broca com a superfície cônica do furo da peça. Quanto maior o valor de e , maior será o ângulo α , principalmente nos pontos da aresta cortante correspondentes aos diâmetros menores da broca. Nestes pontos, onde η é grande (figura 4.10), o ângulo α deve ser maior, para satisfazer a equação (4.6). As afiadoras de brocas apresentam a possibilidade de variar e .

4.3- Desgastes e vida das brocas helicoidais

4.3.1- Considerações sobre o desgaste e vida de uma ferramenta de barra

Os principais desgastes convencionais da cunha cortante são medidos no plano de medida (4.1.3) e recebem as denominações (figura 4.14)

C_p = profundidade de cratera

I_l = largura do desgaste

D_γ = deslocamento da aresta de corte

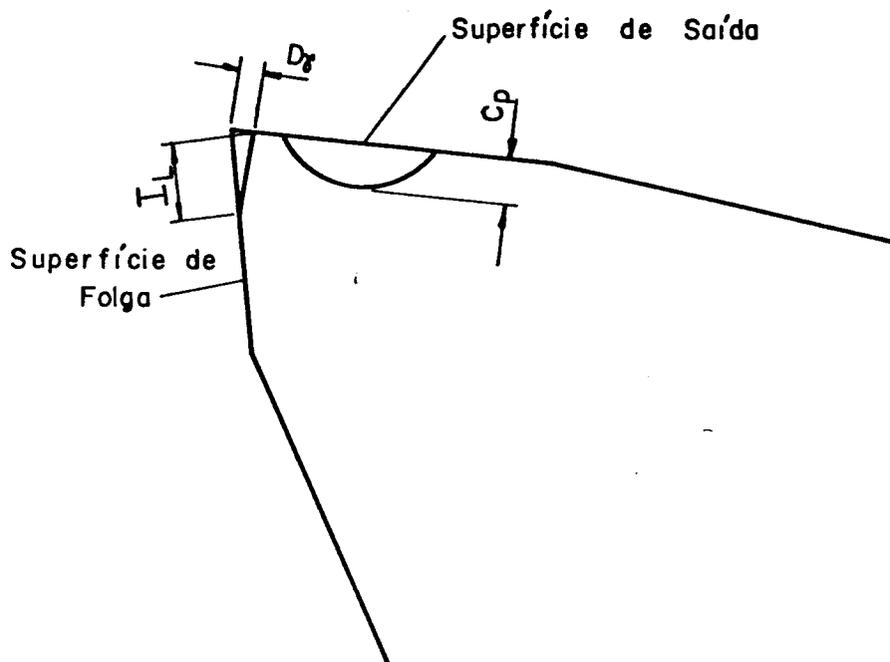


FIGURA 4.14- Desgastes convencionais de uma ferramenta de corte, medidos no plano de medida.

A figura 4.15-a apresenta o comportamento de desgaste I_1 em função do tempo de usinagem, para diferentes velocidades de corte, para uma operação de torneamento | 9|.

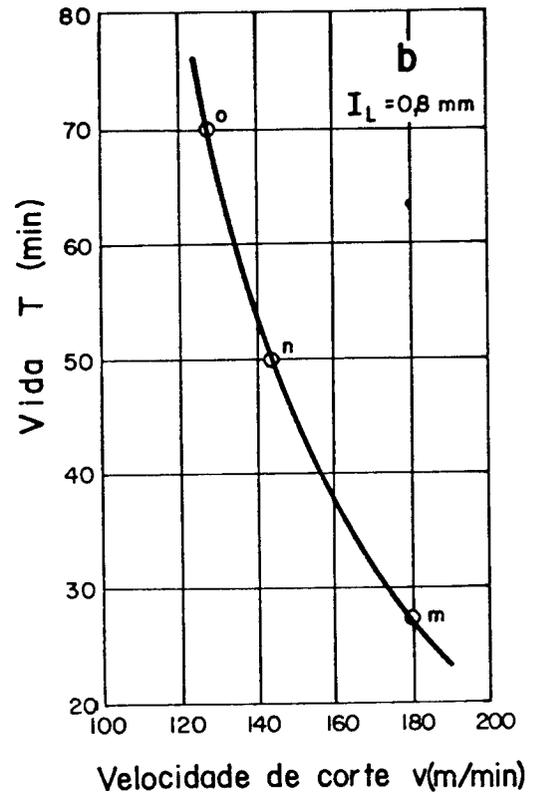
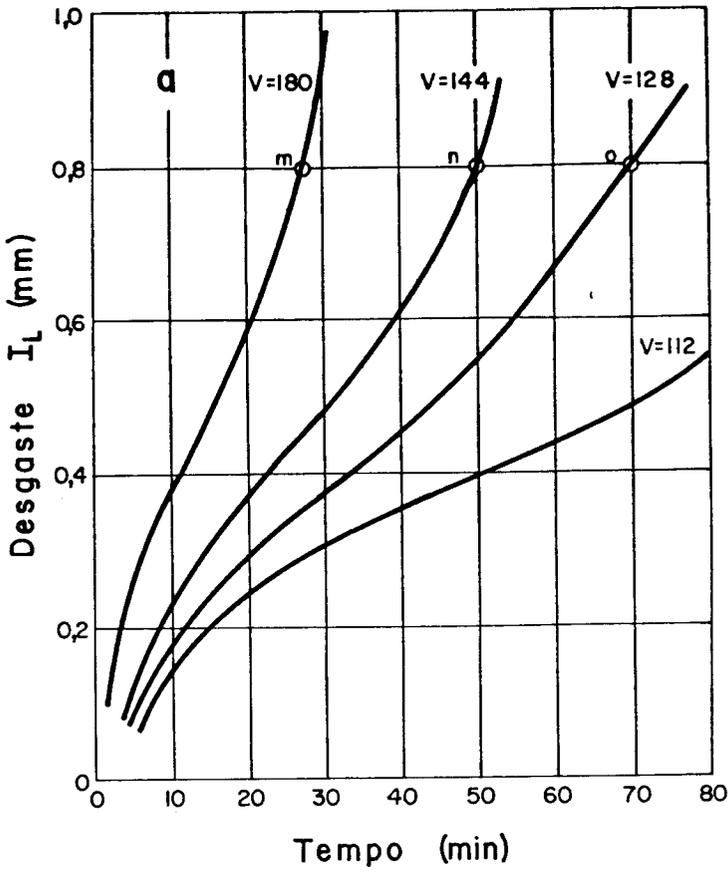


FIGURA 4.15- a) Variação do desgaste I_L em função do tempo de usinagem para diferentes velocidades de corte.
b) Curva da vida da ferramenta para o desgaste $I_L = 0,8$ mm, obtida através da curva de desgaste a).

A perda da capacidade de corte da ferramenta depende principalmente de um determinado valor do desgaste, o qual sendo atingido, provoca as seguintes consequências:

- Aumento da força de corte, proveniente da perda do "fio de corte" e do aumento de atrito entre a superfície de folga da cunha cortante e a peça e atrito entre a superfície de saída da cunha cortante e o cavaco.
- Vibração da ferramenta, podendo causar a sua quebra, como no caso das brocas helicoidais.

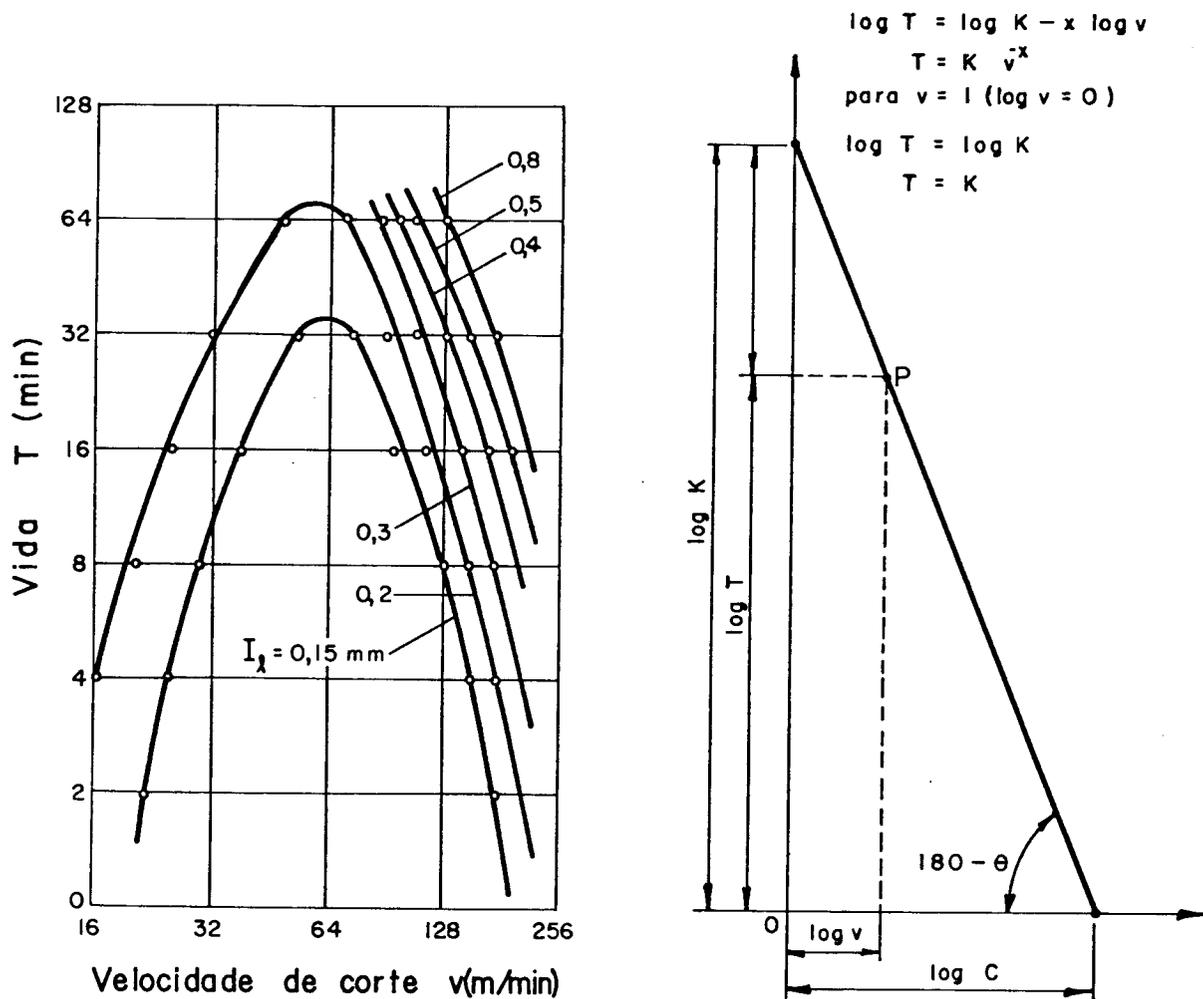
- c) Fusão do gume cortante, proveniente do aumento da temperatura de corte, como no caso das ferramentas de aço-carbono e aço-rápido.
- d) Perda das dimensões e forma geométrica da superfície usinada.

Define-se Vida de uma ferramenta o tempo que a mesma trabalha efetivamente, até perder a sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. Atingido esse tempo, a ferramenta deve ser afiada ou substituída.

Conhecendo-se a curva de desgaste da ferramenta em função do tempo de usinagem, para uma dada velocidade de corte, pode-se, fixando o valor do desgaste (por exemplo $I_1 = 0,8\text{mm}$), determinar graficamente o tempo gasto até atingir este desgaste. Se o desgaste considerado definir a capacidade de corte da ferramenta, o tempo correspondente é a vida da ferramenta, de acordo com a definição anterior.

Determinando-se estes tempos de trabalho para outras velocidades, através de curvas de desgaste para diferentes velocidades de corte (ver figura 4.15-a), obtêm-se diferentes tempos de usinagem, ou seja, diferentes vidas da ferramenta. A curva que representa o valor da vida da ferramenta em função da velocidade de corte, é denominada curva de vida da ferramenta (figura 4.15-b).

Representando-se a função $T = f(v)$ em coordenadas logarítmicas, verifica-se que, no campo de velocidades de corte geralmente utilizado no processo de usinagem, os pontos da curva de vida se distribuem aproximadamente segundo uma reta (figura 4.16). Desta forma, para cada valor do desgaste I_1 fixado, teremos uma reta representativa da curva de vida do par ferramenta-peça, uma vez fixado os parâmetros de usinagem: avanço e profundidade de corte, geometria da ferramenta e fluido de corte. Este raciocínio é válido para outro tipo de desgaste, como por exemplo C_p (figura 4.14).



- FIGURA 4.16- Representação em escala logarõtmica da curva de vida da ferramenta

De acordo com a figura 4.16, tem-se a equação:

$$\log T = \log K - x \log V$$

ou ainda

$$T = K.V^{-x} \tag{4.7}$$

deduzida pela primeira vez por Taylor.

Desta forma, o coeficiente K é a vida da ferramenta para uma velocidade v igual a 1 m/min. O expoente x representa a

inclinação da reta no diagrama dilogarítmico. As grandezas K e x variam com o material da peça, ferramenta utilizada e condições de usinagem empregadas (a , p , α , β , γ , x , r , lubrificação).

4.3.2- Desgaste nas brocas helicoidais

Enquanto nas ferramentas de barra, utilizadas na operação de torneamento, há de um modo geral duas cunhas cortantes, representadas pela aresta principal e lateral de corte, nas brocas helicoidais temos ainda a cunha definida pela aresta transversal de corte. Desta forma pode-se relacionar os desgastes nas brocas helicoidais a três cunhas, definidas pela aresta principal de corte, aresta lateral de corte e aresta transversal.

4.3.2.1- Desgaste relativo à aresta principal de corte

A figura 4.17 apresenta os desgastes provenientes do trabalho da cunha principal de corte. Particular importância merece o desgaste I_1 da superfície principal de folga.

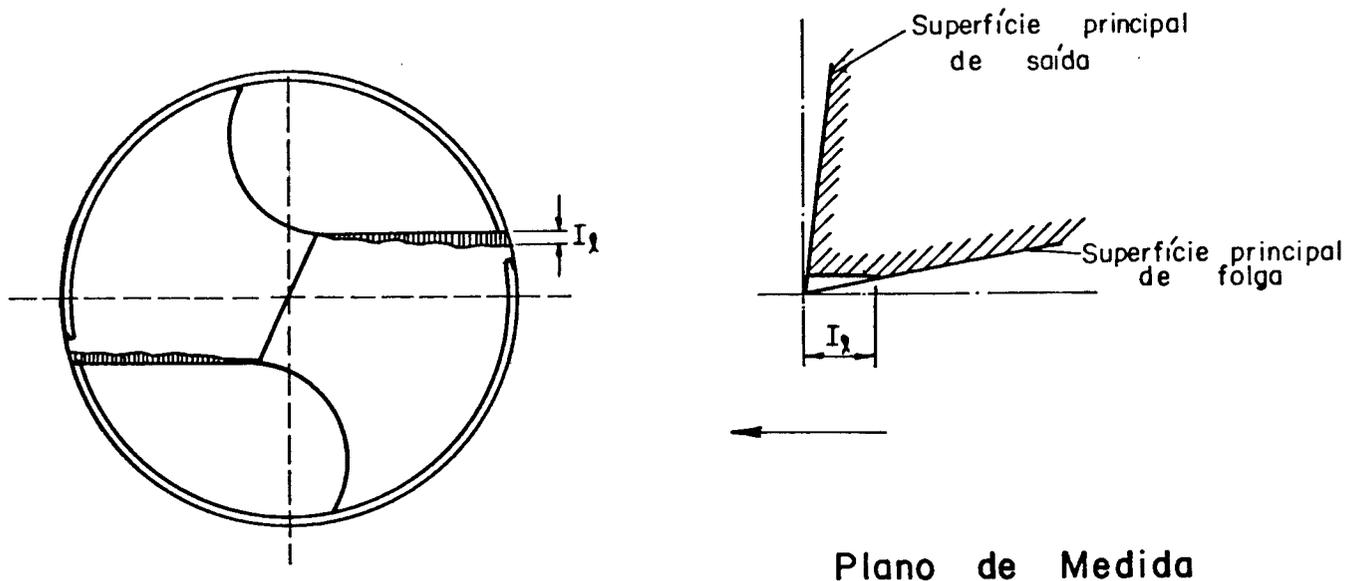


FIGURA 4.17- Representação do desgaste I_1 da aresta principal de corte.

A grandeza I_T é medida no plano de corte da broca, num ponto próximo à periferia (4.1.3).

4.3.2.2- Desgaste relativo à aresta transversal de corte

Para a medida do desgaste da aresta transversal de corte I_T , convencionou-se o plano perpendicular ao eixo da broca e que contém a aresta transversal de corte. A medida é efetuada num ponto próximo à periferia do núcleo da broca (figura 4.18).

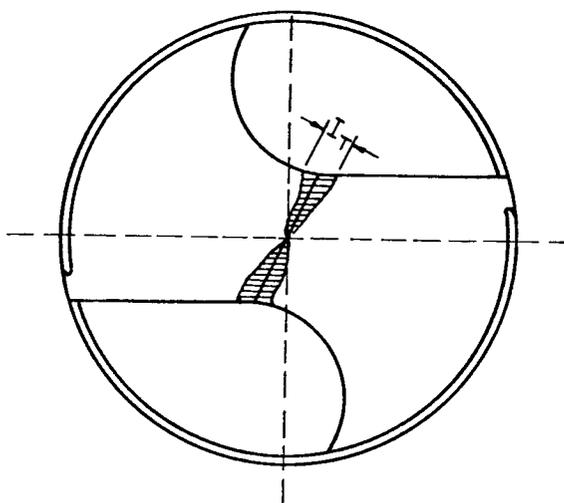


FIGURA 4.18- Representação do desgaste I_T da aresta transversal de corte.

4.3.2.3- Desgaste relativo à aresta lateral de corte

De grande importância na vida das brocas helicoidais é o desgaste ao longo da aresta lateral, a partir da ponta de corte. Para tanto convencionou-se a grandeza I_G medida no plano de trabalho do sistema de referência da broca, conforme indica a figura 4.19 (4.1.3).

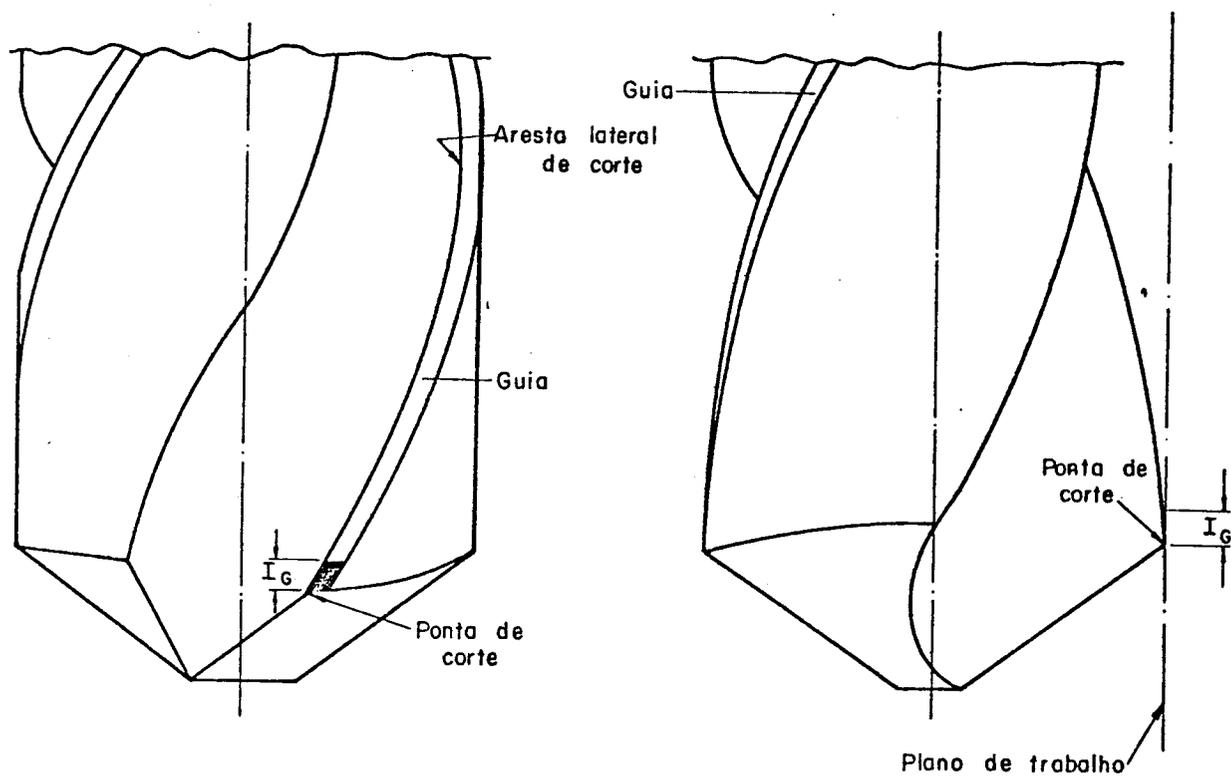


FIGURA 4.19- Representação do desgaste I_G da aresta lateral de corte.

4.3.3- Vida das brocas helicoidais

Analogamente ao que foi visto em ferramenta de barra (§ 4.3.1), os desgastes nas brocas helicoidais, se desenvolvem progressivamente com o tempo de trabalho. A figura 4.20 mostra o comportamento da curva de desgaste I_1 da superfície principal de folga de uma broca, em função do tempo de furação, para um avanço e condições de usinagem pré estabelecidas.

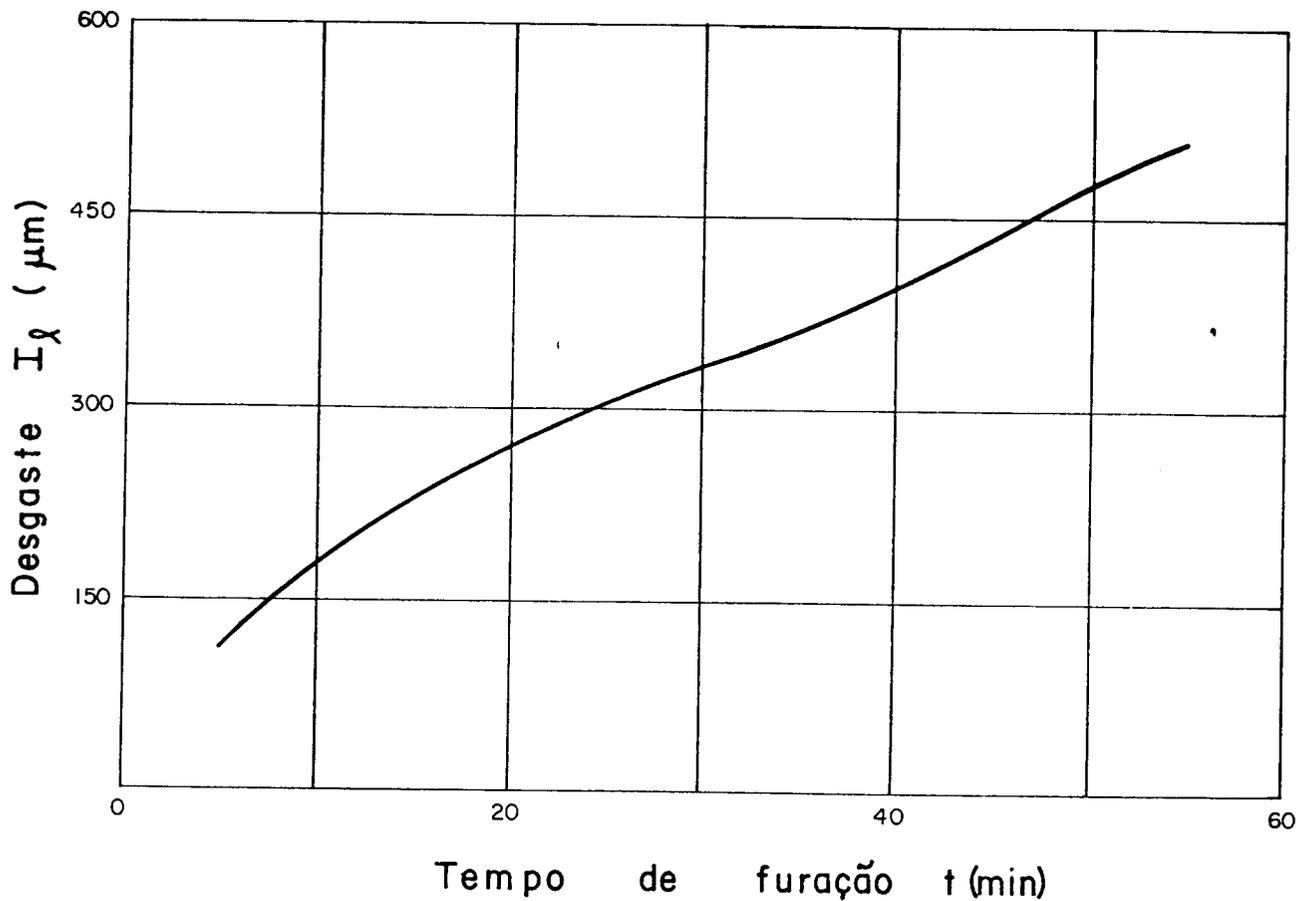


FIGURA 4.20- Desgaste I_g da superfície de folga de uma broca helicoidal.

O comprimento de furação de uma broca helicoidal é dado pela expressão:

$$l = a \cdot n \cdot t \quad , \quad (4.8)$$

onde

a = avanço (mm/volta)

t = tempo de furação (min)

n = rotação da broca (r.p.m) = $v \cdot 1000 / \pi D$.

Desta forma, para um determinado avanço e uma determinada rotação, a curva de desgaste pode ser expressa em função do comprimento de furação (figura 4.21). Para cada rotação da broca, ou seja, cada velocidade periférica, teremos uma

curva de desgaste, o qual uma vez fixado, fornecerá a vida da broca, como no caso da ferramenta de barra.

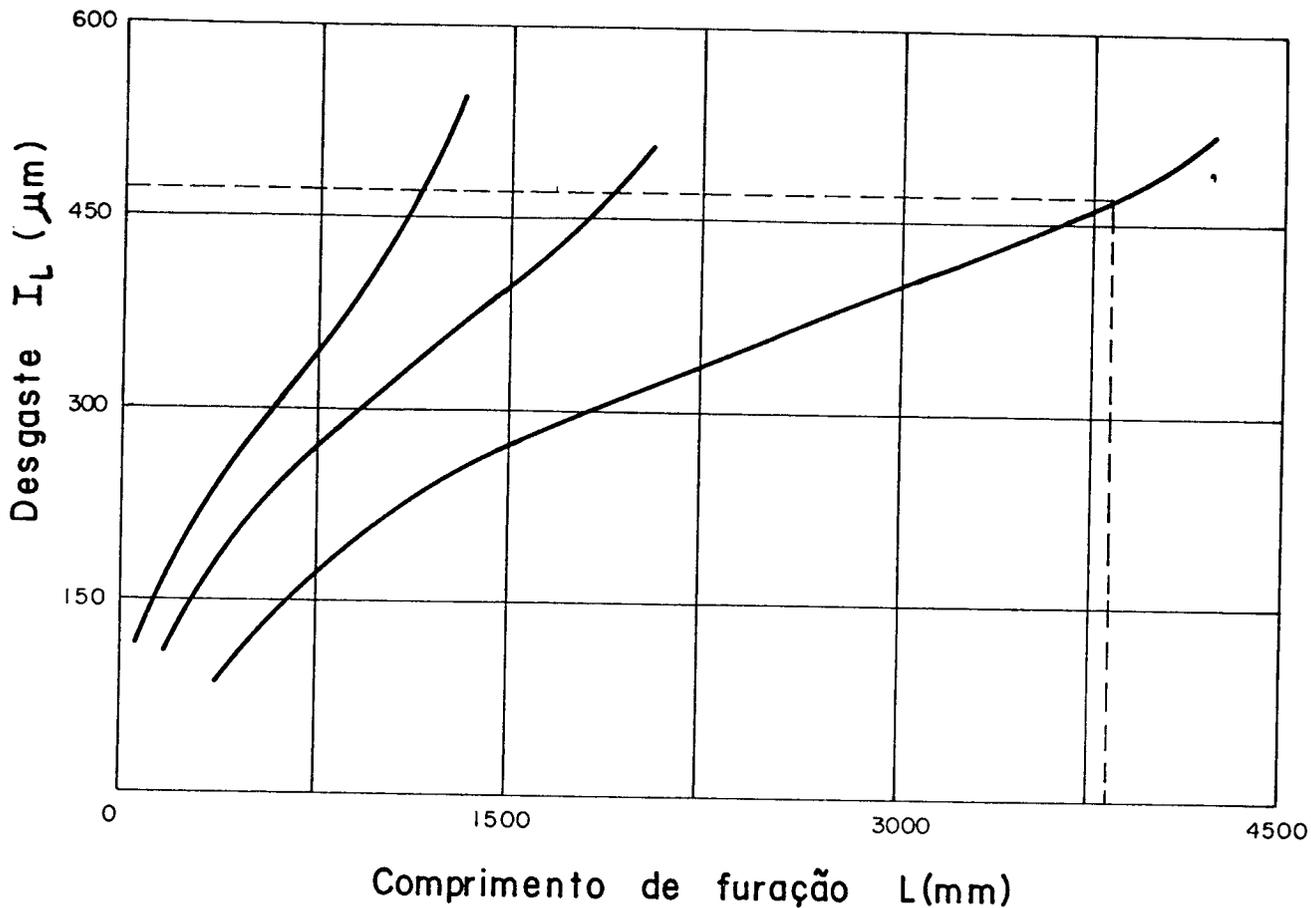


FIGURA 4.21- Desgaste I_L da superfície principal de folga, em função do comprimento de furação, para diferentes valores da velocidade periférica.

A figura 4.22 apresenta a curva de vida de uma broca helicoidal, para um desgaste I_L da superfície principal de folga, previamente fixado.

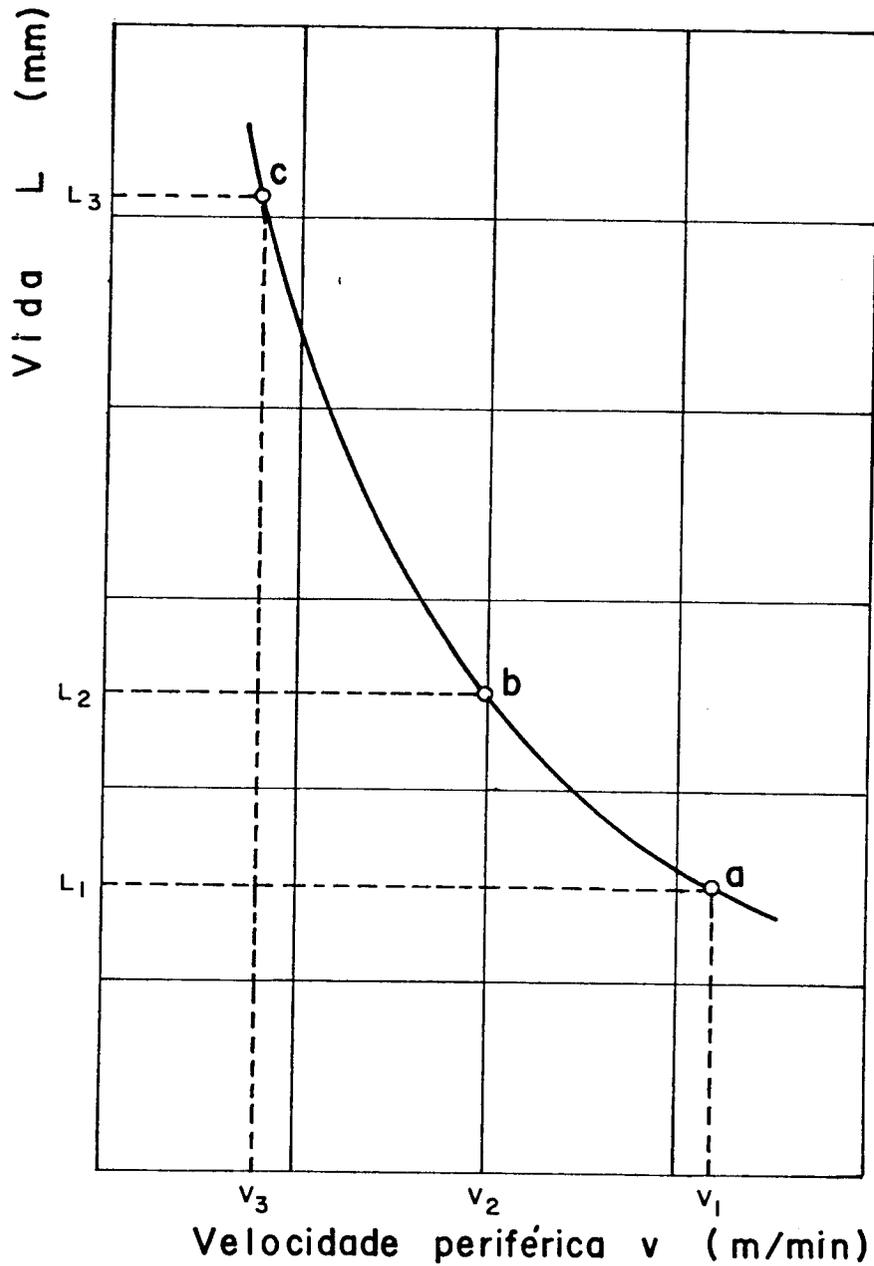


FIGURA 4.22- Representação da curva de vida de uma broca helicoidal, para o caso do desgaste I_1 .

Verifica-se que, para um determinado campo de variação de velocidade periférica, a representação dilogarítmica desta curva se aproxima de uma linha reta, permitindo representá-la por uma equação análoga à de Taylor (figura 4.2 3).

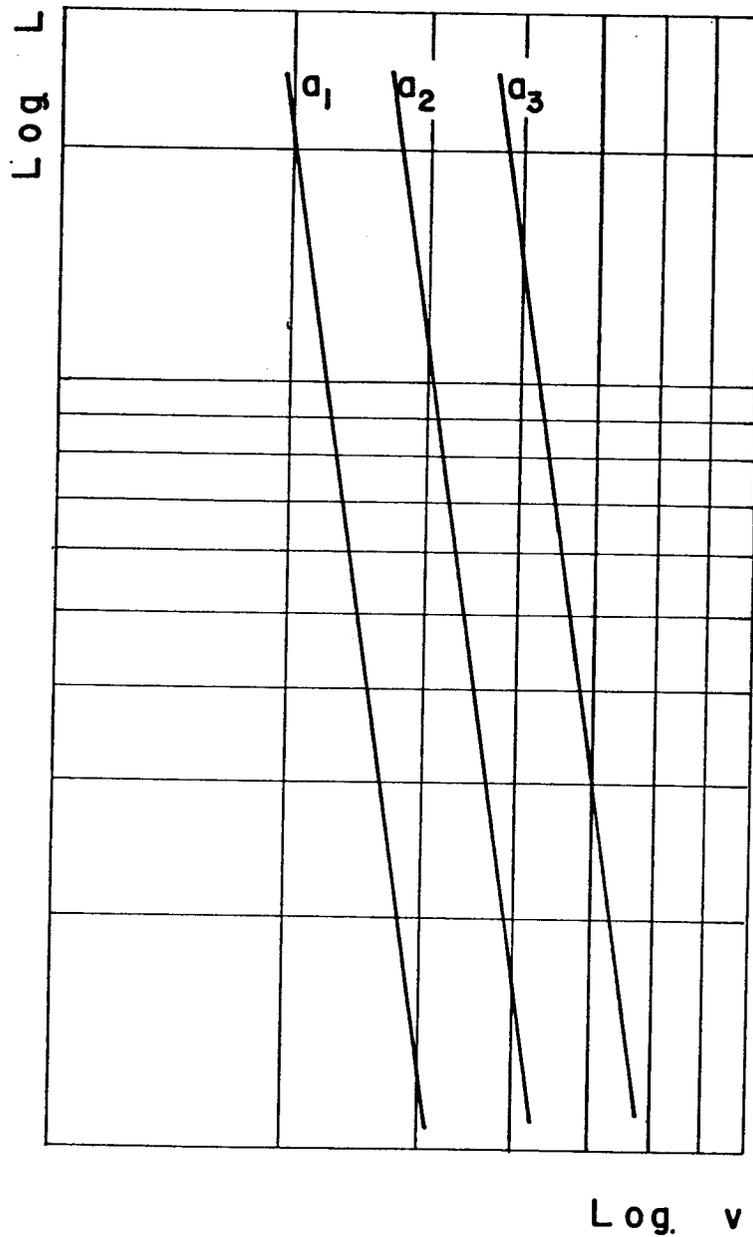


FIGURA 4.23- Representação da curva de vida de uma broca helicoidal, em coordenadas dilogarítmicas.

De fato, de acordo com a equação (4.8), tem-se para uma vida T da broca,

$$L = a \cdot n \cdot T \tag{4.9}$$

ou ainda

$$L = a \frac{v \cdot 1000}{\pi \cdot D} \cdot T \quad (4.10)$$

substituindo-se (4.10) em (4.7), resulta

$$L = K \frac{a \cdot 1000}{\pi \cdot D} \cdot v^{1-x} \quad (4.11)$$

ou simplesmente

$$L = C \cdot v^y \quad (4.12)$$

Para cada valor do avanço a , teremos a curva de vida da broca, uma vez fixados: material do par ferramenta-peça, geometria e diâmetro da broca. Outros fatores influem também na curva de vida, tais como: fluído de corte, rigidez da máquina ferramenta, profundidade de furação.

Para uma determinada ferramenta de corte, o material da peça terá características melhores de usinabilidade, quanto maior for a velocidade de corte permissível para um tempo de usinagem especificado, até perder as características de corte. Em ferramentas de barra, para operação de torneamento, costuma-se padronizar um tempo de usinagem de 60 minutos. A velocidade de corte v_{60} (figura 4.24-a), para este tempo de usinagem, representa o índice de usinabilidade do material, baseado no desgaste da ferramenta. Analogamente para o caso de brocas helicoidais, é padronizado um comprimento total de furação $L = 2000$ mm. A velocidade de corte que permite atingir este comprimento de furação, representada pelo símbolo $v_{L 2000}$, definirá a usinabilidade do material na operação de furação, para um determinado par ferramenta-peça (figura 4.24-b). Os manuais técnicos de usinagem costumam apresentar

tabelas e abacos, que fornecem a velocidade de corte v_L 2000 para diferentes materiais, uma vez fixados as grandezas: avanços, diâmetro, material da broca, relações entre o comprimento de furação l e o diâmetro da broca D | 1, 20, 21 |.

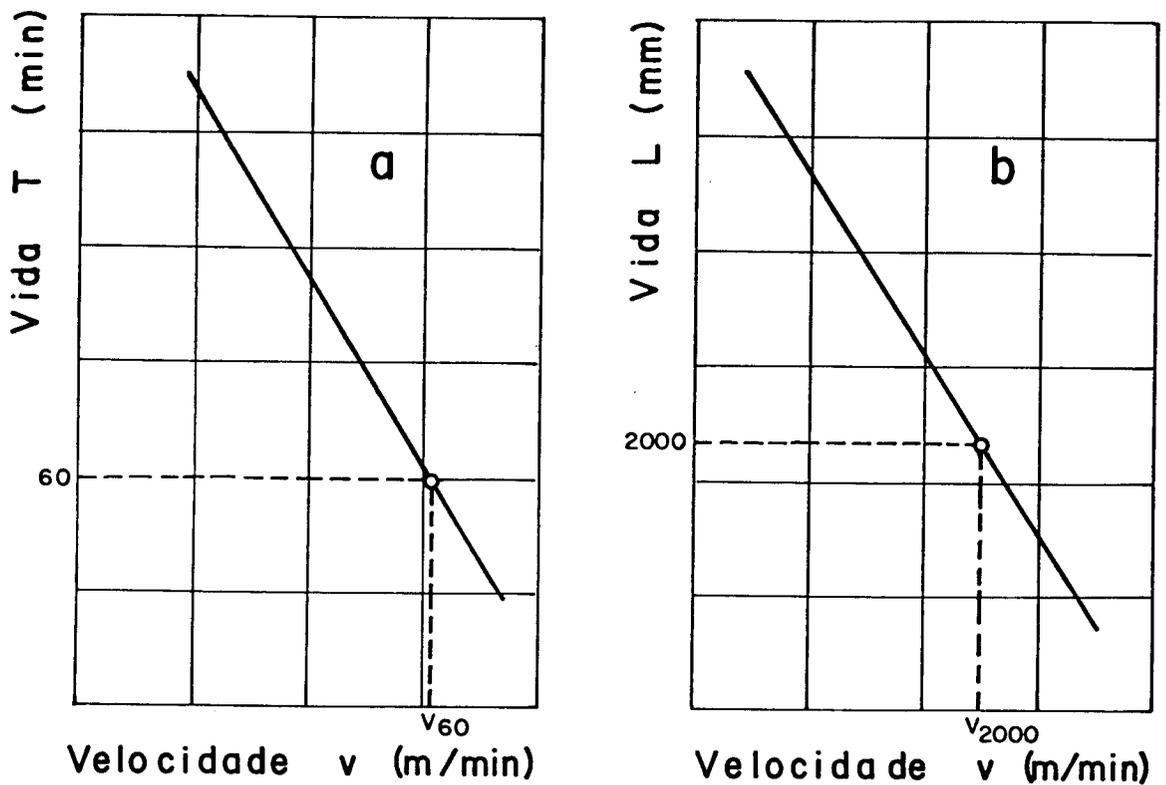


FIGURA 4.24- Índices de usinabilidade de um material, baseados no desgaste da ferramenta. a) Torneamento b) Furação.

Havendo três tipos de desgastes característicos nas brocas helicoidais, teremos três curvas de vida correspondentes aos desgastes I_1 , I_G e I_T . Dependendo das condições de utilização, poderá prevalecer mais um tipo de desgaste do que o outro.

A vida útil da broca será definida para o desgaste que for mais significativo na perda da capacidade de corte.

4.4- Medida do desgaste das brocas helicoidais

Inicialmente procurou-se estabelecer o método de medição que maior precisão e melhor confiabilidade oferecesse, com certa rapidez, tendo em vista o número de medições a serem efetuadas. Para tanto, utilizou-se da ampla gama de recursos que oferece o Laboratório de Metrologia do Centro de Tecnologia da UNICAMP. Foram estudadas as possibilidades de medição com os equipamentos: projetor de perfil, perfilômetro com registrador XY, rugosímetro com registrador, microscópios de oficina. Verificou-se que o melhor sistema de medição, que atendia as características acima mencionadas, era o ótico.

4.4.1- Medida do desgaste I_1 da superfície principal de folga

A figura 4.25 apresenta o equipamento de medida, estudado para possibilitar a medição dos desgastes I_1 e I_T das brocas helicoidais. O mesmo é constituído por uma mesa de coordenadas, com avanço micrométrico, colocada sobre a base de um suporte de microscópio. Foi utilizado o sistema ótico de um microscópio de máquina-ferramenta, constituído de objetiva, plano reticular e ocular.

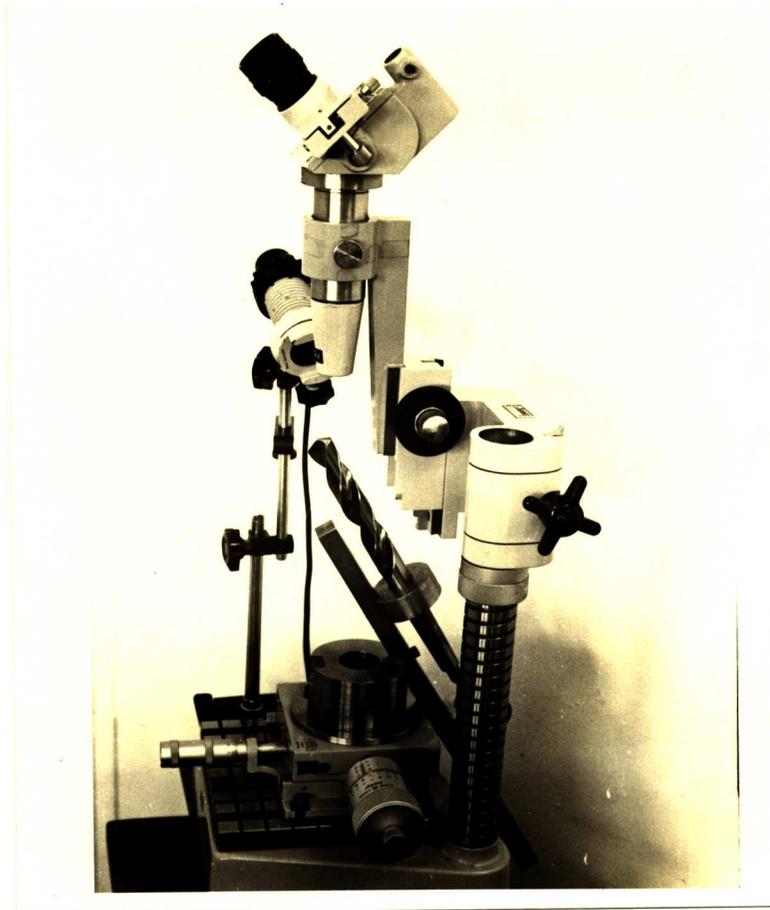


FIGURA 4.25- Vista do equipamento para medida do desgaste I_1 da broca helicoidal.

Para a medida do desgaste I_1 , foi construído um dispositivo, o qual é fixado na mesa micrométrica, de maneira a permitir que o plano de corte da broca (§ 4.1.3) fique perpendicular ao eixo da luneta do microscópio. Desta forma a região gastada da superfície principal de folga, fica projetada na sua forma real, sobre o plano reticular do microscópio. O dispositivo suporte da broca é montado de maneira que, a aresta principal de corte da broca fique perpendicular ao deslocamento da mesa.

Na operação de medida, inicialmente faz-se coincidir a aresta principal de corte com um dos eixos do retículo, através do movimento micrométrico da mesa. O valor do desgaste I_1 obtém-se tangenciando o eixo do retículo à periferia da superfície gasta, junto a extremidade da broca. Desta forma, o valor de I_1 será dado pela diferença das duas leituras, feitas no parafuso micrométrico da mesa (eixo x, perpendicular

a aresta principal de corte). A figura 4.26 apresenta esquematicamente a medida de I_1 .

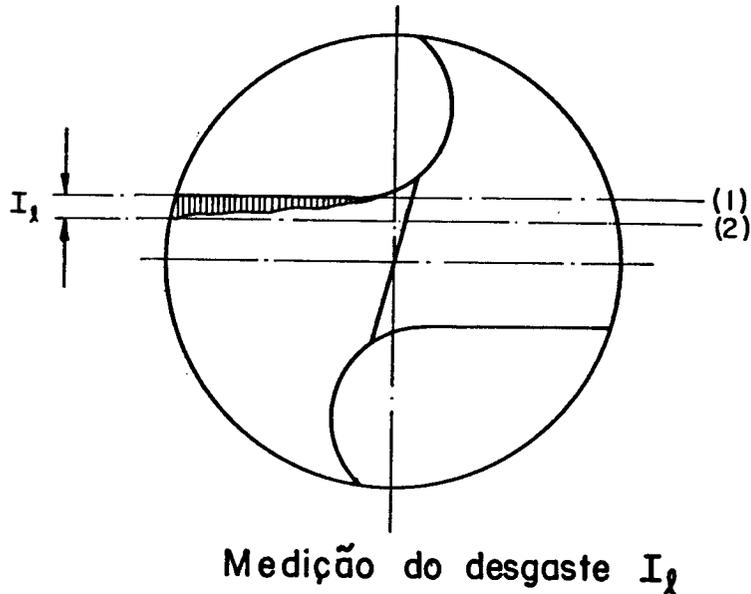


FIGURA 4.26- Medida do desgaste I_1 .

4.4.2- Medida do desgaste I_T da aresta transversal

Para a medida do desgaste I_T , foi utilizado o mesmo equipamento descrito anteriormente, porém o dispositivo suporte da broca foi construído de forma a permitir o eixo da broca em posição coaxial com o eixo do microscópio (figura 4.27).

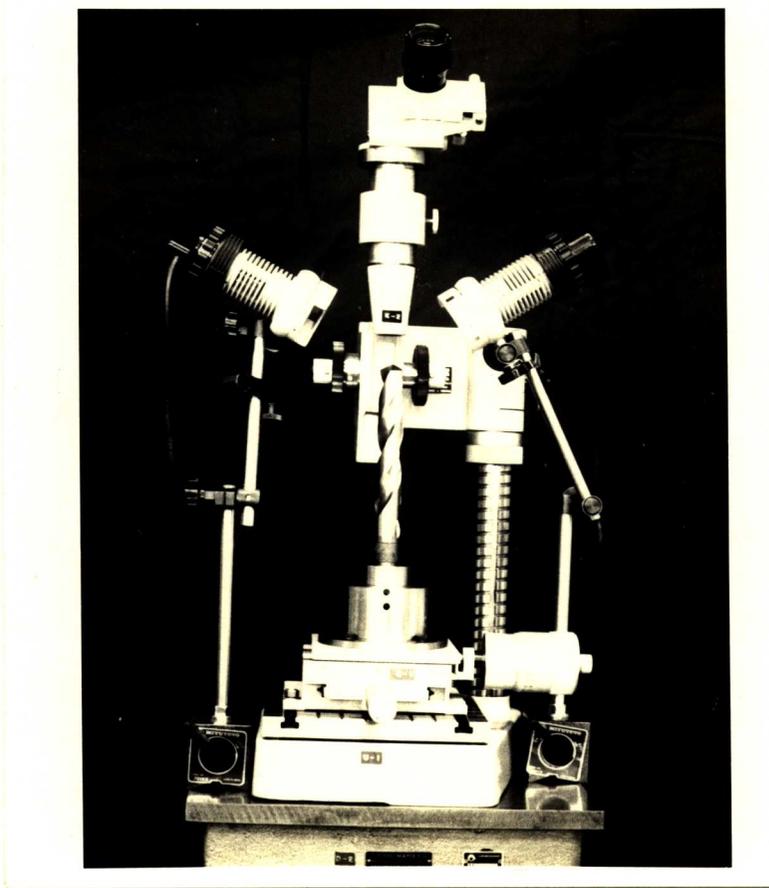


FIGURA 4.27- Vista do equipamento para a medida do desgaste I_T da broca helicoidal.

A primeira operação de medida consiste girar a broca sobre o seu eixo, de maneira que a aresta transversal fique perpendicular a direção de deslocamento da mesa (eixo x). Um dos eixos do reticulado do microscópio, deverá coincidir com a aresta transversal. A segunda operação consiste no deslocamento da mesa de maneira que o eixo do retículo venha tangenciar a periferia da região gasta, de maneira a se obter a largura máxima do desgaste. A figura 4.28 apresenta esquematicamente, a medida do desgaste I_T .

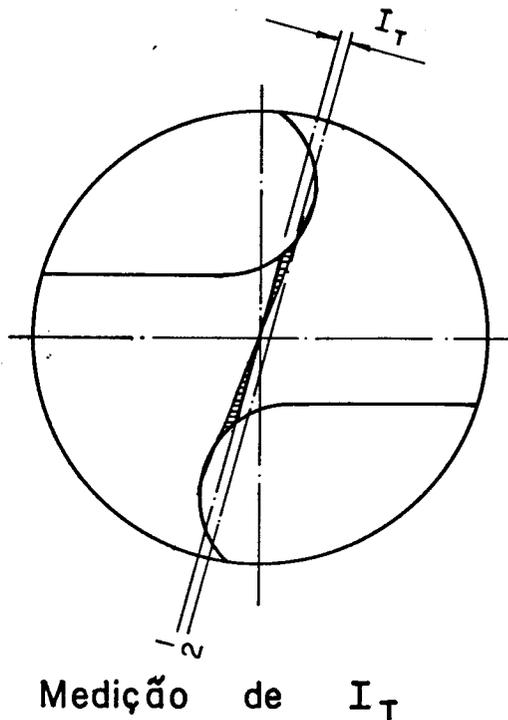


FIGURA 4.28- Medida do desgaste I_T .

4.4.3- Medida do desgaste I_G da superfície lateral de folga

Para a medida do desgaste I_G foi utilizado um microscópio de oficina modelo VWMII Leitz-Wild. Foi construído um dispositivo suporte da parte do cone da broca, de maneira a possibilitar o giro ao redor de seu eixo, em posição horizontal, paralelo ao movimento de deslocamento da mesa do microscópio. O valor de I_G obtém-se pela diferença das leituras do deslocamento da mesa, leituras estas, referentes a coincidência do eixo do retículo com a ponta de corte da broca e coincidência do eixo do retículo com o término do desgaste da

guia. A figura 4.29 apresenta esquematicamente a medida deste desgaste.

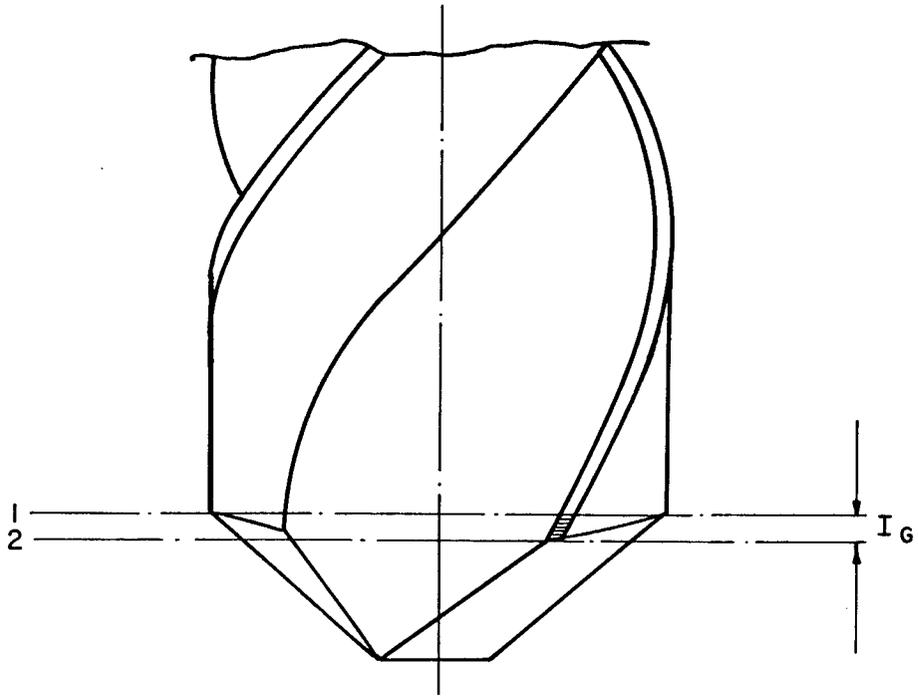


FIGURA 4.29- Medida do desgaste I_G de uma broca helicoidal.

CAPÍTULO V

ENSAIOS

5.1- Considerações Gerais

Os ensaios experimentais consistiram na determinação dos desgastes, momento de torção e força de avanço, durante o processo de furação com broca helicoidal. Periódicamente, após determinados comprimentos de furação, a broca era retirada da furadeira e eram medidos os desgastes I_L , I_T e I_G . O momento de torção e a força de avanço foram fornecidos pelo dinamômetro, desenvolvido para esta finalidade, através de leituras analógicas, obtidas nas pontes amplificadoras, e registros gráficos, obtidos em registrador de vários canais.

5.2- Material dos corpos de prova

Foram confeccionados aproximadamente 1.000 corpos de prova, de medidas padronizadas de acordo com o dispositivo de fixação do dinamômetro (figura 2.1). Como material empregou-se o aço ABNT 8640, beneficiado, de procedência da firma Aços Villares S/A. Suas características foram:

Análise Química (segundo a norma ABNT NB-82)

C %	Si %	Mn %	Cr %	Ni %	Mo %	P %	S %
0,40	0,30	0,83	0,48	0,50	0,18	0,009	0,019

Ensaio de Tração (segundo a norma ABNT MB-4)

POSIÇÃO DO CORPO DE PROVA	LIMITE DE ES COAMENTO 0,2%	LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO	ALONGAMENTO EM 50 mm	ESTRICÇÃO
	N/ mm ²	N/ mm ²	(%)	(%)
A	525,2	727,8	23,2	66,2
B	514,1	715,5	22,4	66,3

Ensaio de Dureza (segundo a norma ABNT MB-60)

DUREZA BRINELL					
POSIÇÃO	POSIÇÃO	POSIÇÃO	POSIÇÃO	POSIÇÃO	POSIÇÃO
1	2	3	4	A	B
217 H	211 H	217 H	217 H	222 H	222 H

Inclusões (segundo ASTM E 45-74 - Método B)

6^d - 2⁸ - C

5.3- Broca Helicoidal

Fornecedor

Fábrica Paulista de Brocas

(fornecidas gentilmente para fins de pesquisa)

Características

Material: Tipo N, segundo a norma ABNT-EB-621

Geometria: $\sigma = 130^{\circ} 30'$, $\alpha_x = 9^{\circ} 30'$, $\psi = 57^{\circ}$, $\gamma_x = 30^{\circ}$,
 $\epsilon = 114^{\circ} 45'$.

Diâmetro: 15 mm

Formato: cilíndrica, haste cônica (segundo a norma ABNT-TB 111)

Afiação: normal com cone de revolução

5.4- Equipamento de Medida

Dinamômetro

- Especialmente projetado e construído para a realização dos ensaios (Vide capítulos 2 e 3)

Equipamento eletrônico de medida

- Duas pontes amplificadoras, de fabricação Philips Holanda, modelo PR 9308

- Registrador de vários canais, de fabricação Honeywell-Visicorder, Alemanha, modelo 2208 A
- Estroboscópio Philips Holanda, com leitura analógica, modelo PR 9107

Equipamento de medida de desgaste

- Especialmente desenvolvido de acordo com o capítulo IV

5.5- Máquinas de Ensaio

Furadeira radial, modelo RFH 75, marca CSEPEL, Hungria.

Potência do motor: 12 KW

Número de rotações: 21 (19 a 1900 r.p.m.)

Número de avanços : 12 (0,047 a 2,00 mm/volta)

Afiadora de brocas, modelo SS 14, marca GÜHRING

5.6- Condições de Ensaio

Foram realizados 5 grupos de ensaios, utilizando-se 5 brocas helicoidais (acima especificadas). O quadro abaixo apresenta os valores de avanço e velocidade de corte, obtidos através de valores recomendáveis pelos fabricantes e através das características da furadeira.

BROCA Nº	AVANÇO (mm/volta)	VELOCIDADE DE CORTE (m/min)	COMPRIMENTO DE FURAÇÃO DE CADA CORPO DE PROVA (mm)
1	0,187	17,7	40
2	0,187	22,4	40
3	0,187	28,3	40
4	0,125	22,4	40
5	0,125	28,3	40

5.7- Resultados dos Ensaios

As tabelas V.1 a V.5 apresentam os resultados obtidos dos ensaios. Na coluna (1) encontram-se os números dos corpos de prova ensaiados e na coluna (2) os comprimentos totais de furação, obtidos pelo produto do número de corpos de prova ensaiados com o comprimento parcial de furação (40 mm em cada corpo de prova). As colunas (3), (4) e (5) apresentam as medidas dos desgastes I_T , I_l e I_G , correspondentes aos comprimentos de furação especificados na coluna (2). Nas colunas (6) e (8) encontram-se as leituras em mV das pontes amplificadas, para a força de avanço e momento de torção respectivamente. Através das equações de aferição do dinamômetro (Vide § 3.1.3 e 3.1.4)

$$P_a = - 52,40 + 4 515,78 L_i \quad (\text{N})$$

$$M_t = 3,06 + 10 128,44 L_i \quad (\text{N.cm})$$

tem-se os valores da força de avanço e momento de torção, mencionados nas colunas (7) e (9).

Nas figuras 5.1 a 5.5 encontram-se representadas as curvas de desgaste, momento de torção e força de avanço, obtidas dos valores fornecidos pelas tabelas. As figuras 5.6 a 5.10 apresentam reproduções dos gráficos dos momentos de torção e força de avanço de alguns ensaios.

Os ensaios foram conduzidos até a broca perder sua capacidade de corte, a qual foi determinada pelo aparecimento de trepidações e ruído no processo de furação e pela análise dos gráficos de registro do momento de torção e força de avanço. As figuras 5.6, 5.8, 5.9 e 5.10 mostram esta ocorrência.

Examinando-se as tabelas V.1 a V.5 constata-se que a broca perdeu sua capacidade de corte, nas cinco condições de ensaio, para um desgaste I_l da superfície de folga da aresta principal de corte, de aproximadamente 0,62 mm. Com relação aos desgastes I_T e I_G , na aresta transversal e na guia da broca, respectivamente, verifica-se divergência dos seus valores. Para velocidades de corte maiores, os comprimentos de fu

TABELA V.1- VALORES DOS ENSAIOS PARA A VELOCIDADE DE CORTE $v = 17,7$ m/min E AVANÇO $a = 0,187$ mm/volta
 BROCA DE AÇO RÁPIDO, TIPO N, DIÂMETRO ϕ 15 mm
 MATERIAL DA PEÇA AÇO ABNT 8640, BENEFICIADO.

Nº DE CORPOS DE PROVA	COMPRIMENTO DE FURAÇÃO L (mm)	MEDIDA DOS DESGASTES				FORÇA DE AVANÇO		MOMENTO TORÇOR	
		I _T (µm)	I ₁ (µm)	I _G (µm)	LEITURA PONTE (mV)	P _a (N)	LEITURA PONTE (mV)	M _t (Ncm)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	40	-	-	-	1,18	5.280	0,24	2.430	
6	240	97	68	-	1,21	5.520	0,24	2.430	
12	480	124	139	-	1,21	5.520	0,25	2.530	
18	720	144	184	150	1,21	5.520	0,25	2.530	
24	960	161	225	180	1,31	5.860	0,27	2.740	
30	1.200	180	250	245	1,32	5.910	0,28	2.840	
36	1.440	187	268	287	1,37	6.130	0,28	2.840	
42	1.680	194	282	308	1,35	6.040	0,28	2.840	
48	1.920	197	315	356	1,35	6.040	0,28	2.840	
54	2.160	202	350	425	1,35	6.040	0,28	2.840	
60	2.400	208	403	558	1,37	6.130	0,29	2.940	
66	2.640	212	427	630	1,38	6.180	0,29	2.940	
72	2.880	220	437	640	1,37	6.130	0,29	2.940	
78	3.120	244	448	655	1,32	5.910	0,28	2.840	
84	3.360	260	490	677	1,38	6.180	0,28	2.840	
90	3.600	273	508	697	1,42	6.360	0,28	2.840	
96	3.840	280	543	739	1,43	6.405	0,28	2.840	
102	4.080	287	591	763	1,43	6.405	0,29	2.940	
108	4.320	292	635	815	1,45	6.495	0,31	3.140	

TABELA V.2- VALORES DOS ENSAIOS PARA A VELOCIDADE DE CORTE $v = 22,4$ m/min E AVANÇO $a = 0,187$ mm/volta

BROCA DE AÇO RÁPIDO, TIPO N, DIÂMETRO ϕ 15 mm

MATERIAL DA PEÇA AÇO ABNT 8640, BENEFICIADO.

Nº DE CORPOS DE PROVA	COMPRIMENTO DE FURAÇÃO L (mm)	MEDIDA DOS DESGASTES				FORÇA DE AVANÇO		MOMENTO TORÇOR	
		I_T (μ m)	I_1 (μ m)	I_G (μ m)	LEITURA NA PONTE (mV)	P^a (N)	LEITURA NA PONTE (mV)	M_t (Ncm)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	40	-	-	-	1,18	5.276	0,23	2.332	
8	320	107	246	-	1,26	5.638	0,25	2.535	
16	640	158	336	-	1,32	5.909	0,27	2.738	
24	960	202	523	183	1,37	6.134	0,28	2.839	
32	1.280	258	609	310	1,44	6.450	0,30	3.040	

TABELA V.3- VALORES DOS ENSAIOS PARA A VELOCIDADE DE CORTE $v = 28,3 \text{ m/min}$ E AVANÇO $a = 0,187 \text{ mm/volta}$

BROCA DE AÇO RÁPIDO, TIPO N, DIÂMETRO $\phi 15 \text{ mm}$

MATERIAL DA PEÇA AÇO ABNT 8640, BENEFICIADO.

Nº DE CORPOS DE PROVA	COMPRIMENTO DE FURAÇÃO L (mm)	MEDIDA DOS DESGASTES			FORÇA DE AVANÇO		MOMENTO TORÇOR	
		I_T (μm)	I_1 (μm)	I_G (μm)	LEITURA NA PONTE (mV)	P_a (N)	LEITURA NA PONTE (mV)	M_t (Ncm)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	20	34	118	-	1,17	5.231	0,22	2.231
1	40	58	183	-	1,31	5.863	0,25	2.535
2	80	88	346	-	1,32	5.908	0,26	2.636
4	160	105	588	microsold.	1,39	6.230	0,29	2.940

TABELA V.4- VALORES DOS ENSAIOS PARA A VELOCIDADE DE CORTE $v = 22,4$ m/min E AVANÇO $a = 0,125$ mm/volta

BROCA DE AÇO RÁPIDO, TIPO N, DIÂMETRO ϕ 15 mm

MATERIAL DA PEÇA AÇO ABNT 8640, BENEFICIADO.

Nº DE CORPOS DE PROVA	COMPRIMENTO DE FURAÇÃO L (mm)	MEDIDA DOS DESGASTES				FORÇA DE AVANÇO		MOMENTO TORÇOR	
		I_T (μ m)	I_L (μ m)	I_G (μ m)	LEITURA PONTE (mV)	P^a (N)	LEITURA PONTE (mV)	M_t (Ncm)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
6	240	-	38	70	0,89	3.966	0,17	1.722	
24	960	73	123	200	0,93	4.147	0,17	1.722	
42	1.680	140	247	298	0,95	4.237	0,18	1.823	
60	2.400	182	328	405	0,97	4.328	0,18	1.823	
78	3.120	245	380	483	0,99	4.418	0,19	1.924	
96	3.840	267	456	575	1,01	4.508	0,19	1.924	
114	4.560	320	539	635	1,03	4.599	0,20	2.026	
132	5.280	335	594	725	1,07	4.779	0,21	2.127	
150	6.000	350	650	800	1,09	4.871	0,22	2.228	

TABELA V.5- VALORES DOS ENSAIOS PARA A VELOCIDADE DE CORTE $v = 28,3$ m/min E AVANÇO $a = 0,125$ mm/volta
 BROCA DE AÇO RÁPIDO, TIPO N, DIÂMETRO ϕ 15 mm
 MATERIAL DA PEÇA AÇO ABNT 8640, BENEFICIADO.

Nº DE CORPOS DE PROVA	COMPRIMENTO DE FURAÇÃO L (mm)	MEDIDA DOS DESGASTES				FORÇA DE AVANÇO			MOMENTO TORÇOR	
		I_T (μm)	I_l (μm)	I_G (μm)	LEITURA NA PONTE (mV)	P^a (N)	LEITURA NA PONTE (mV)	M_t (Ncm)		
1	2	3	4	5	6	7	8	9		
3	120	40	130	-	0,88	3.921	0,16	1.620		
6	240	65	236	190	0,92	4.102	0,16	1.620		
9	360	90	360	240	0,97	4.328	0,17	1.710		
12	480	105	423	305	1,00	4.463	0,18	1.823		
15	600	110	552	335	1,04	4.644	0,20	2.026		
18	720	118	637	405	1,07	4.779	0,21	2.127		

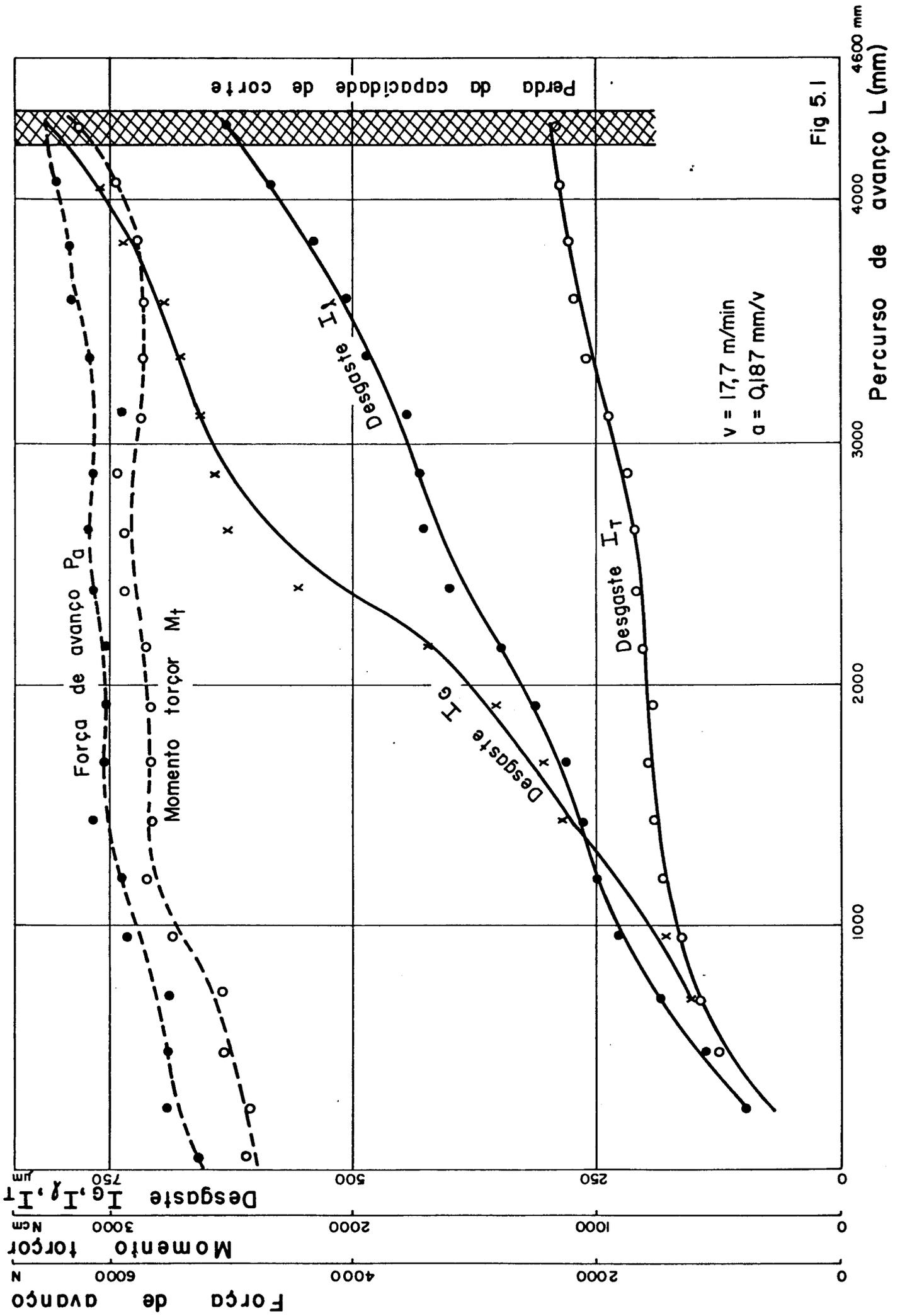


Fig 5.1

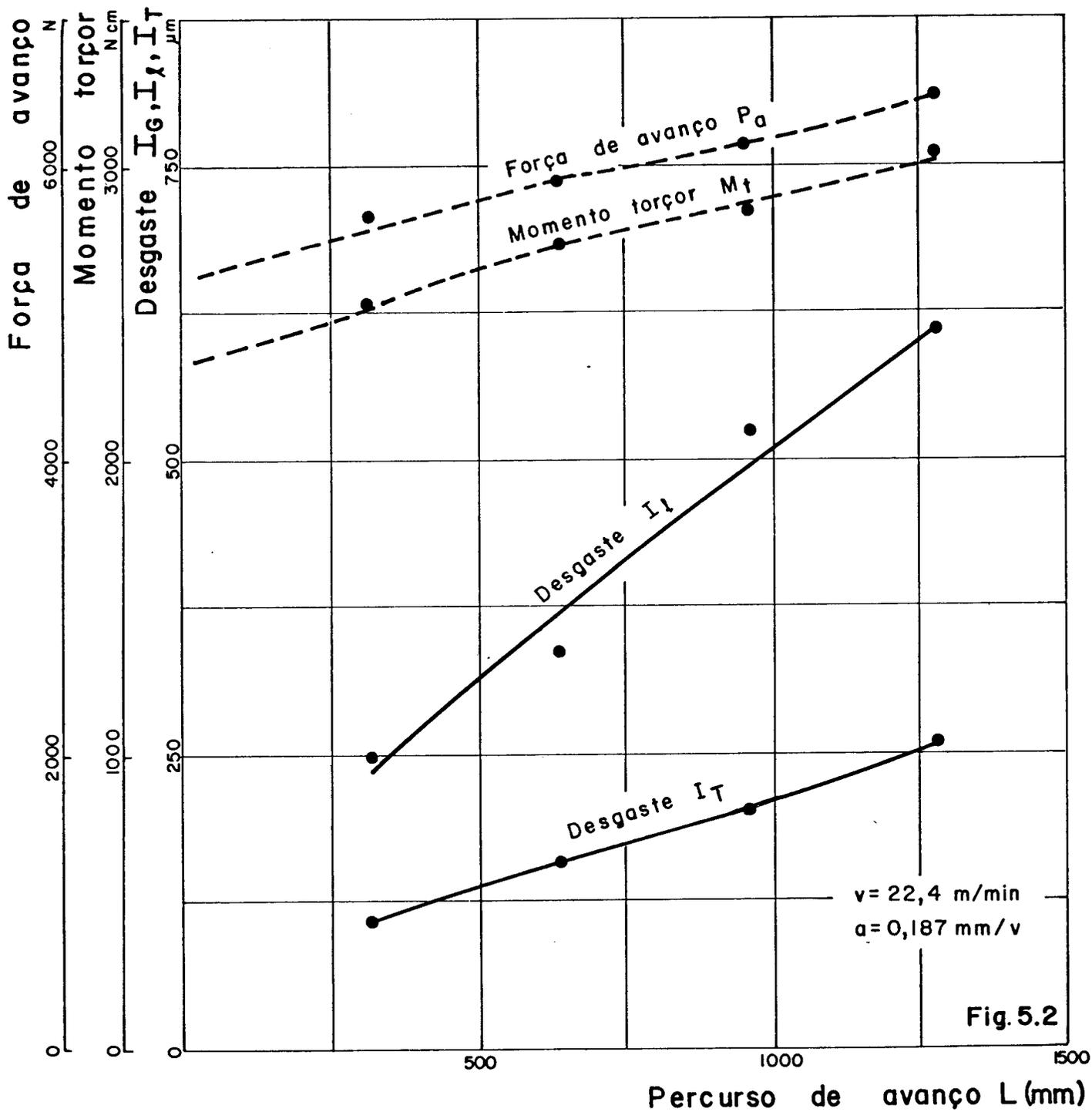


Fig. 5.2

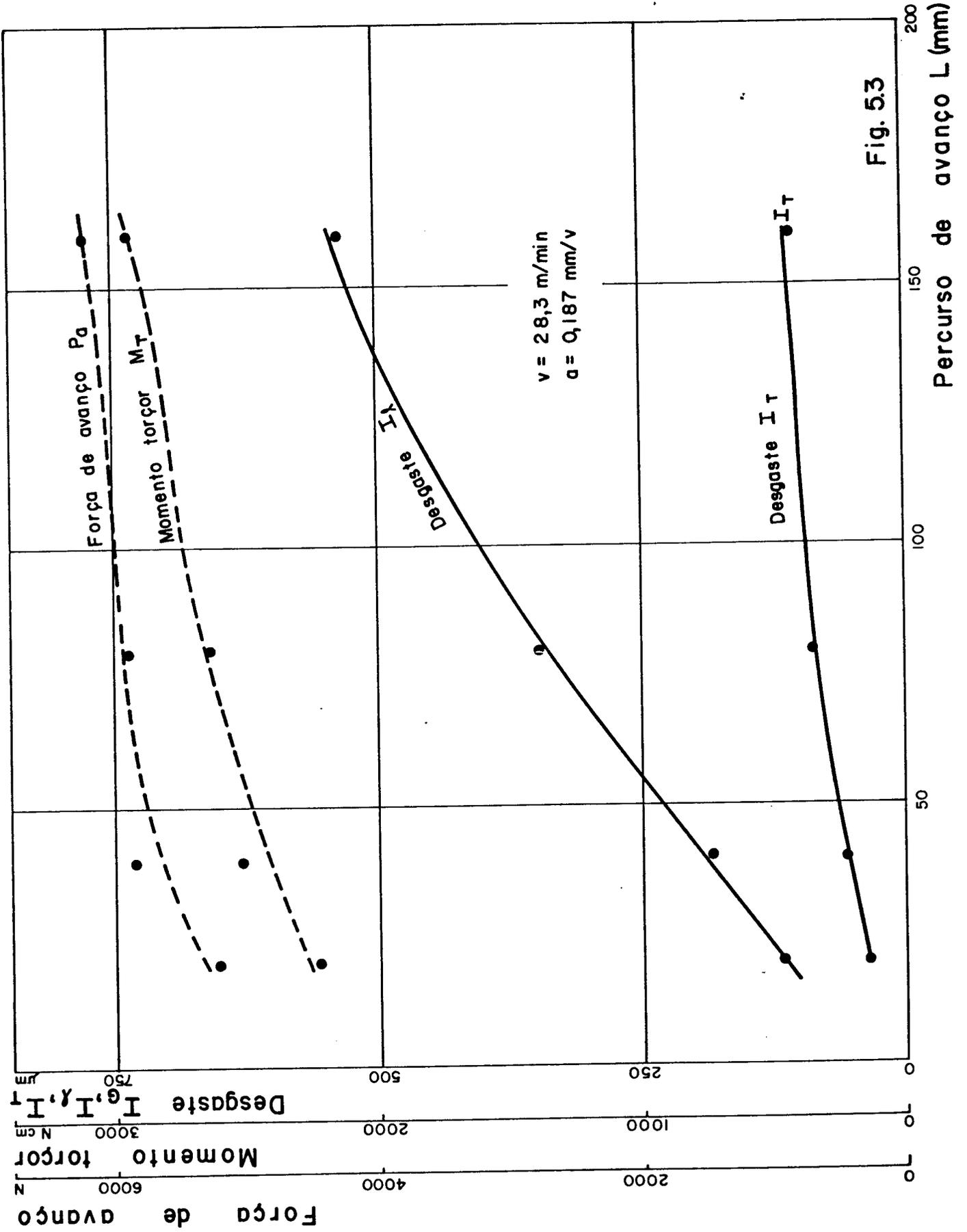


Fig. 5.3

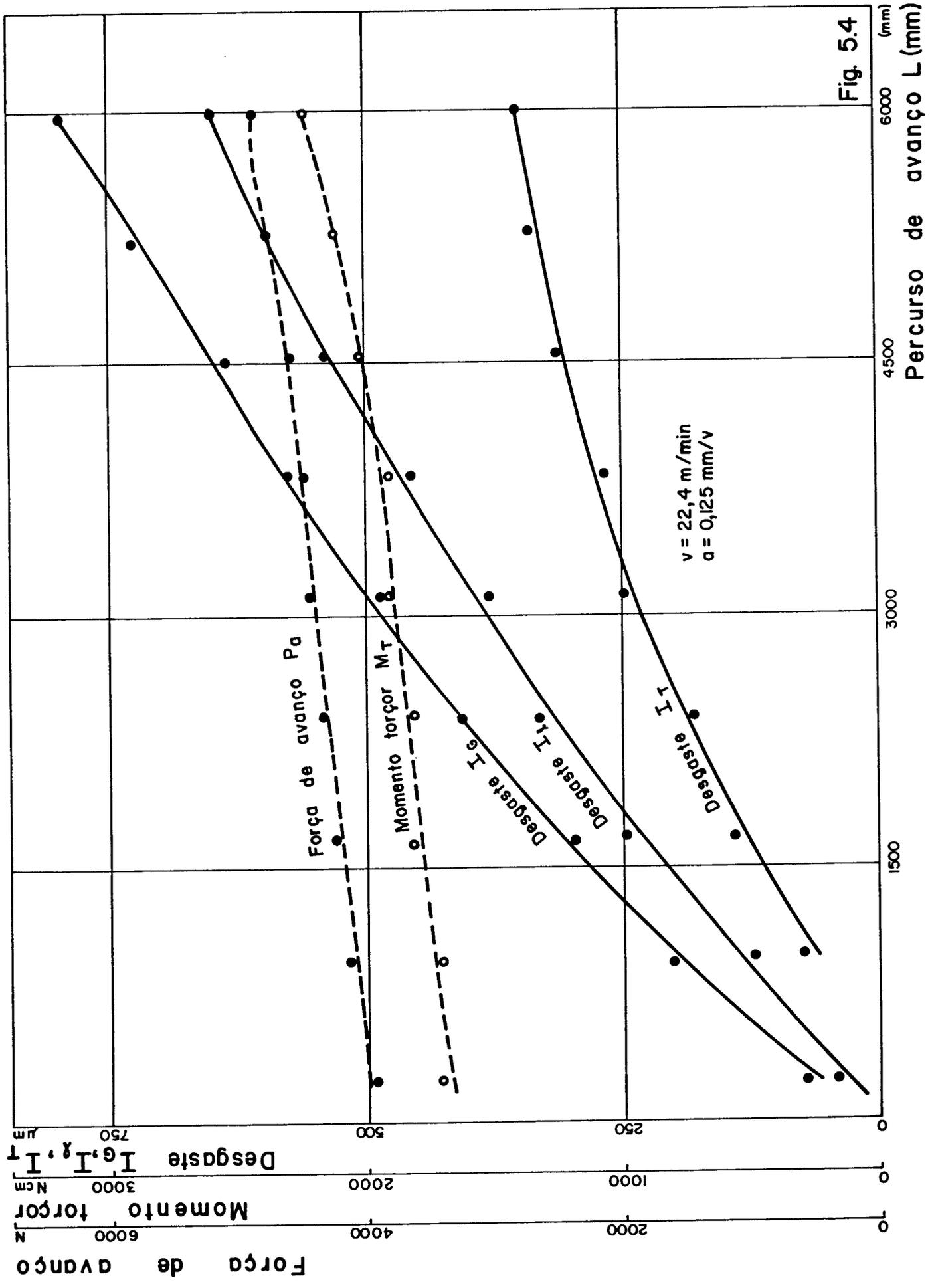


Fig. 5.4

Percurso de avanço L (mm)

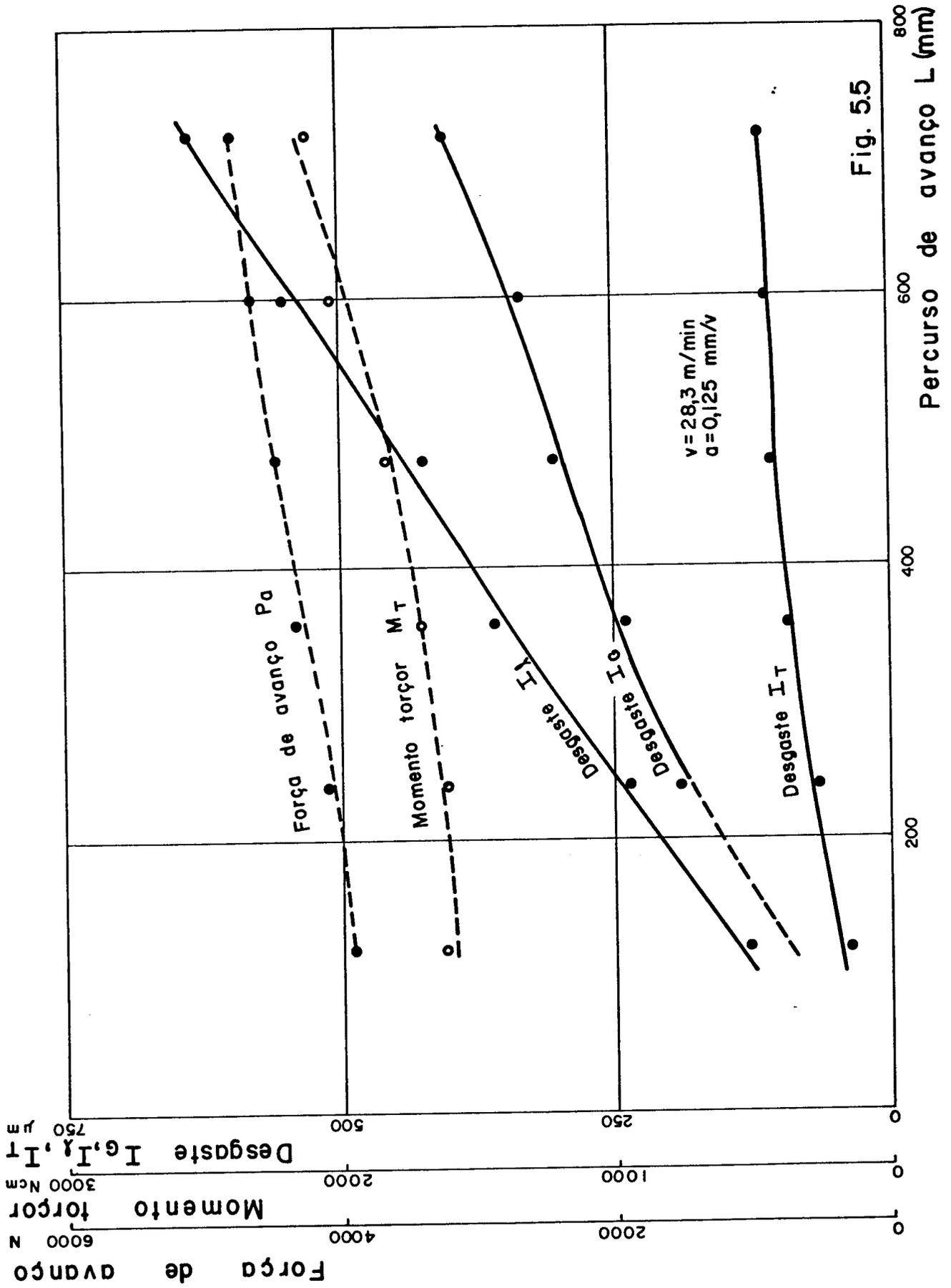


Fig. 5.5

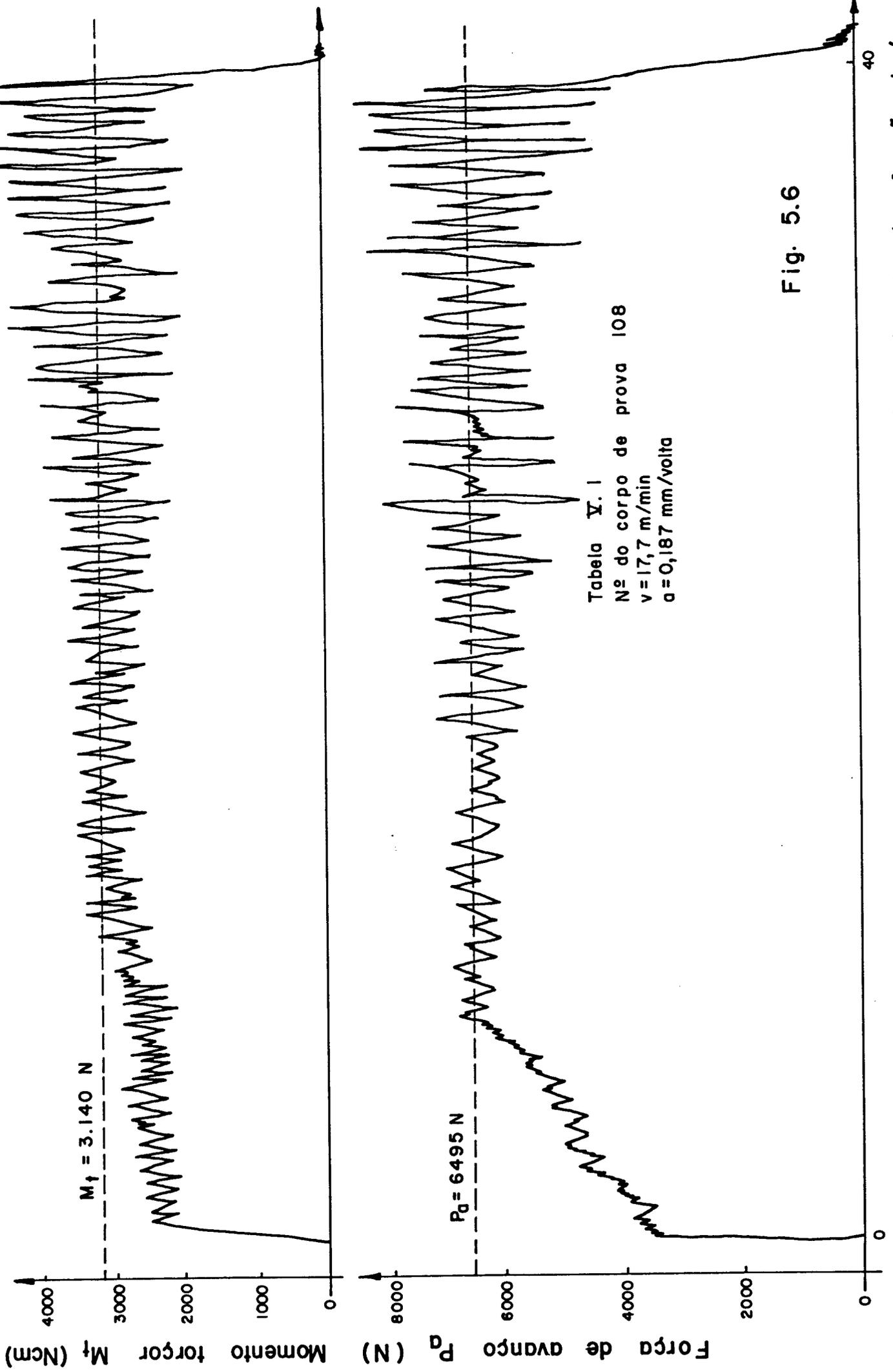


Tabela X. 1
Nº do corpo de prova 108
v = 17,7 m/min
a = 0,187 mm/volta

Fig. 5.6

Comprimento de furação L (mm)

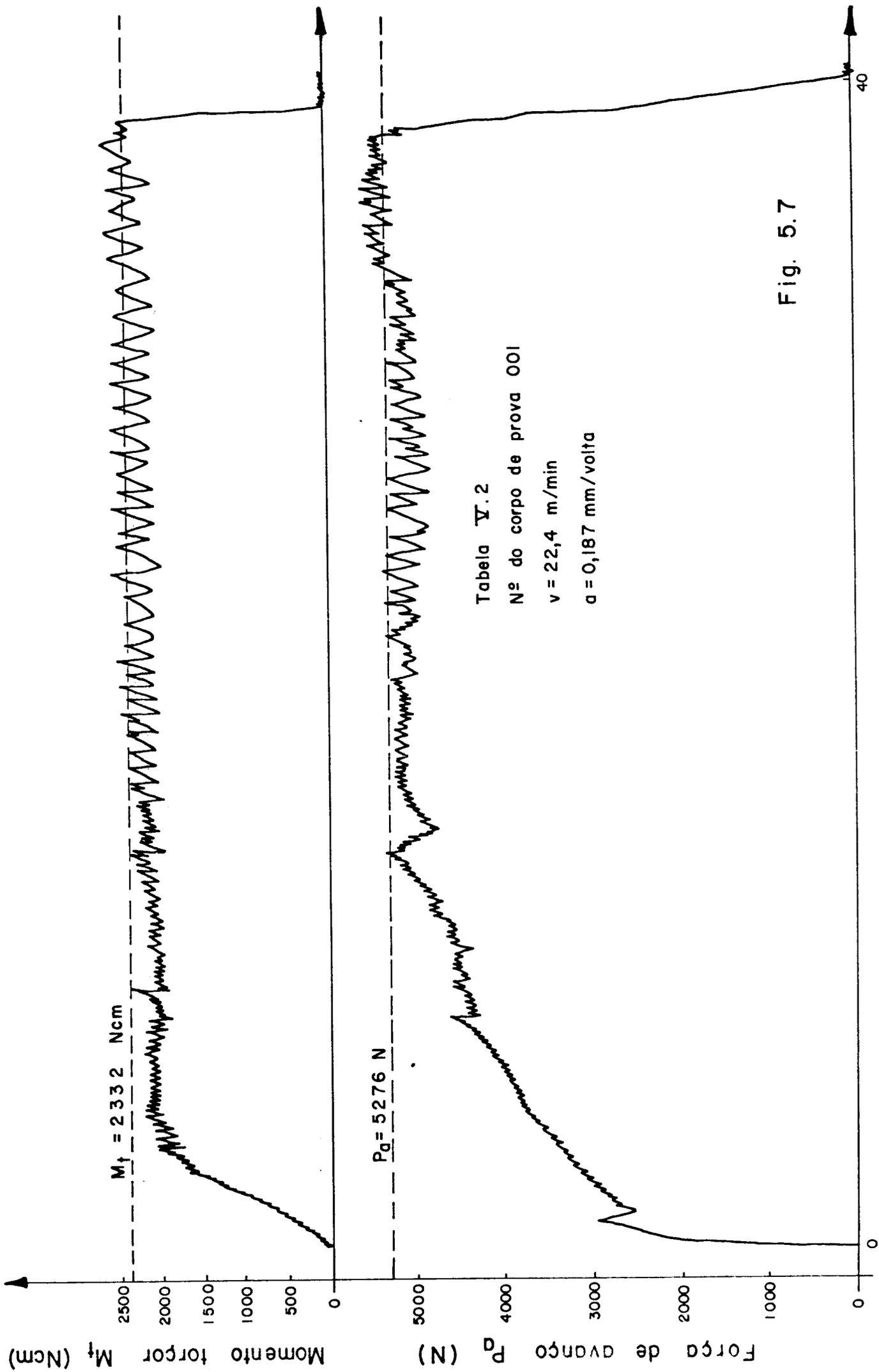


Fig. 5.7

Comprimento de furação L (mm)

Tabela V.2
Nº do corpo de prova 001
 $v = 22,4$ m/min
 $a = 0,187$ mm/volta

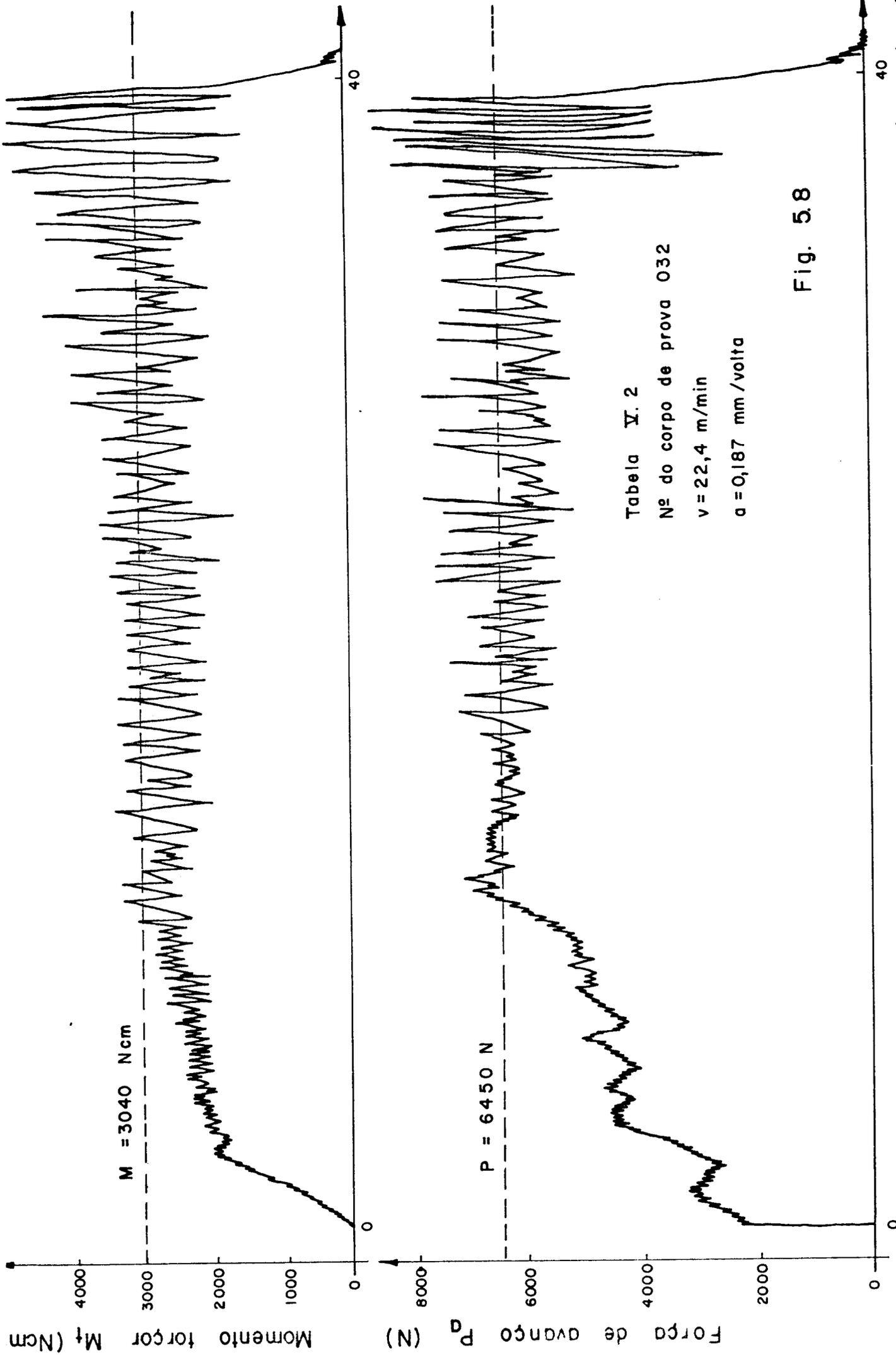


Tabela V. 2
Nº do corpo de prova 032
 $v = 22,4 \text{ m/min}$
 $a = 0,187 \text{ mm/volta}$

Fig. 5.8

Comprimento de furação L (mm)

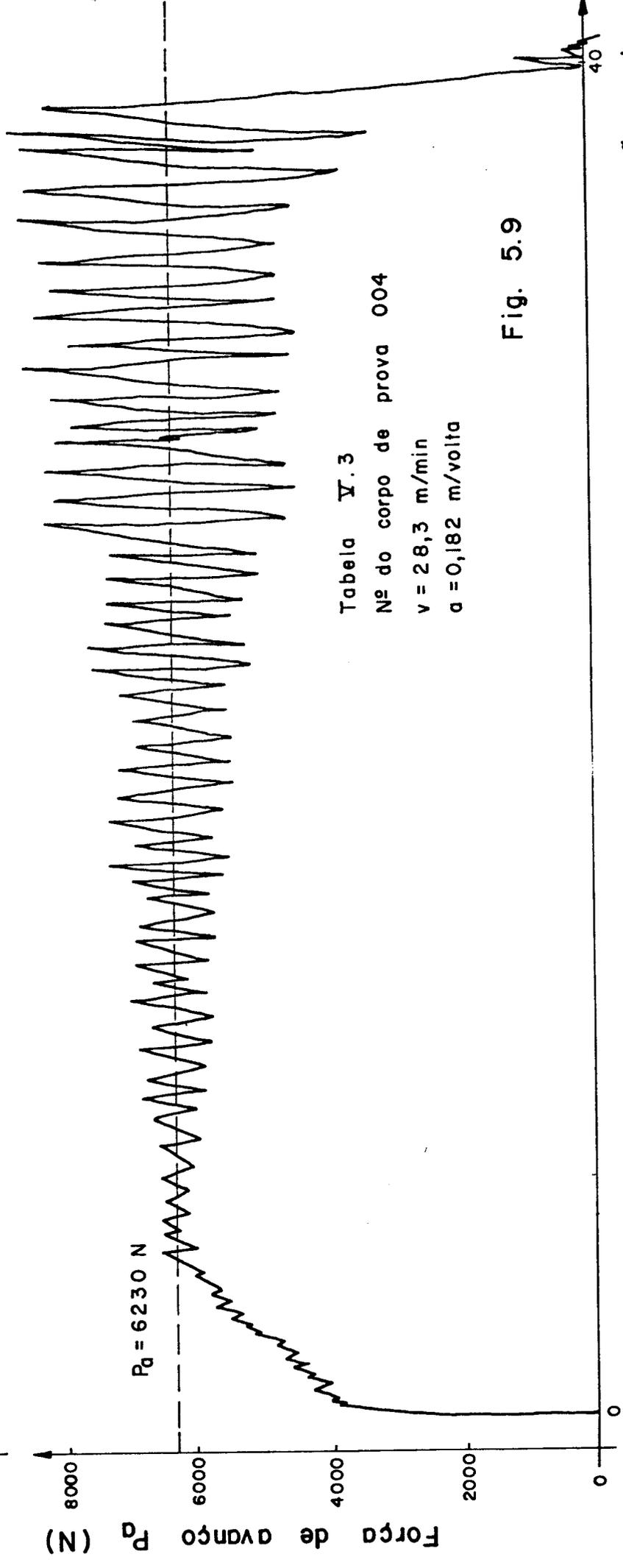
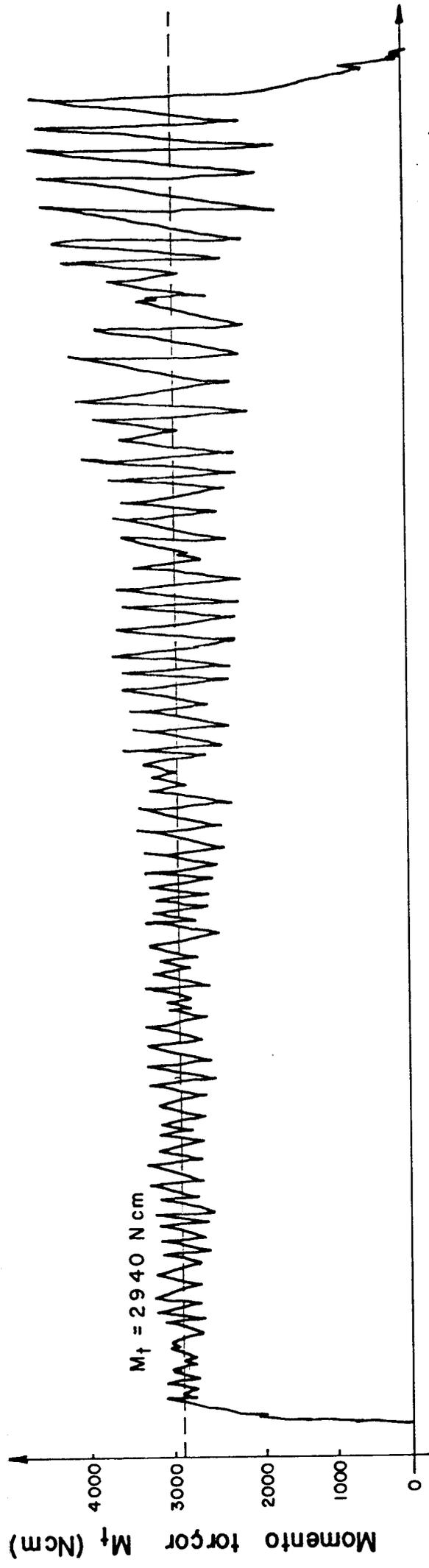


Tabela V.3

Nº do corpo de prova 004

$v = 28,3$ m/min

$a = 0,182$ m/volta

Fig. 5.9

Comprimento de furação L (mm)

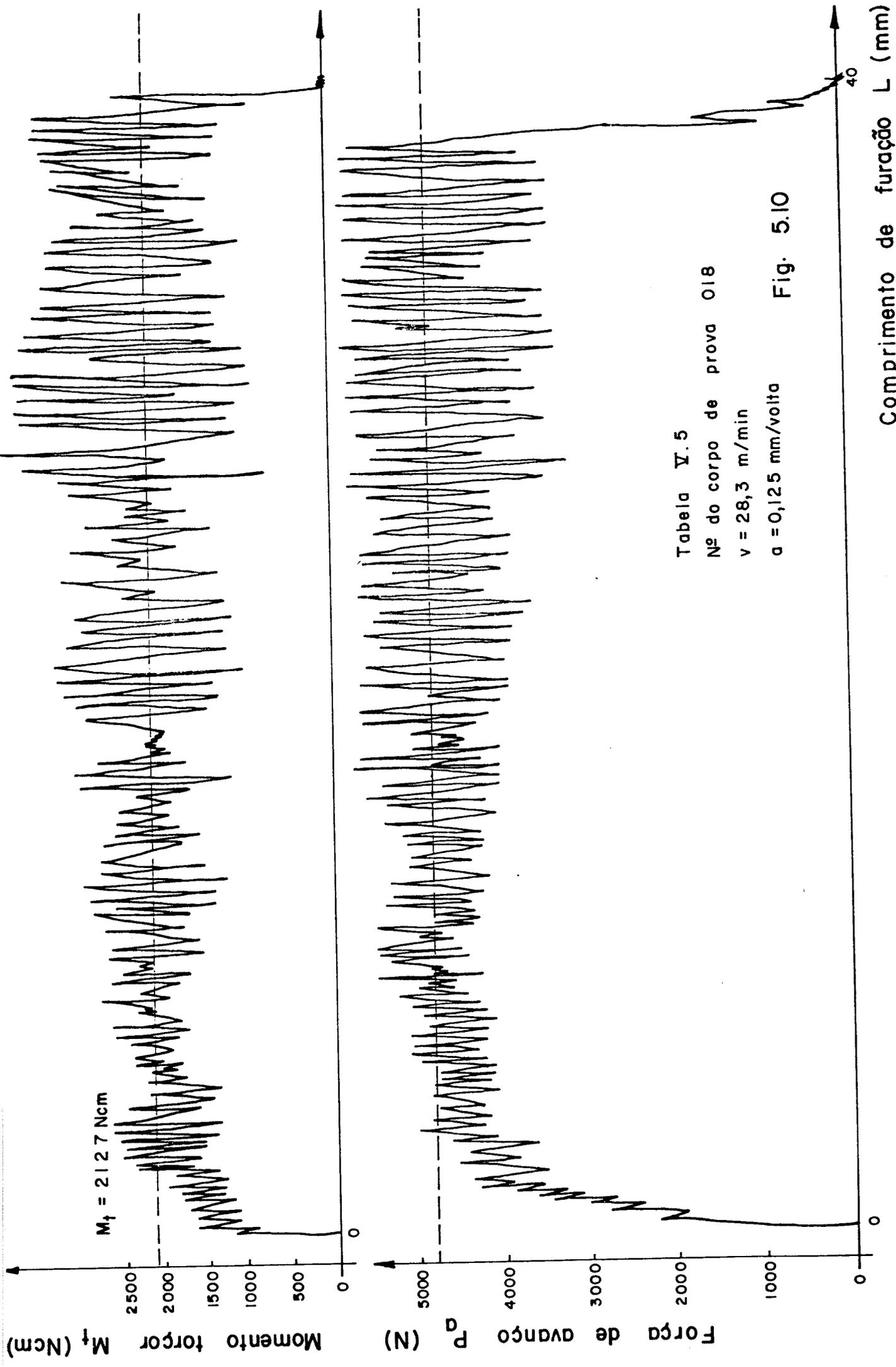


Tabela V.5
 Nº do corpo de prova 018
 $v = 28,3 \text{ m/min}$
 $a = 0,125 \text{ mm/volta}$

Fig. 5.10

Comprimento de furação L (mm)

ração foram menores e os valores de I_T e I_G foram menores.

Desta forma pode-se estabelecer como critério de avaliação da perda da capacidade de corte, o valor do desgaste $I_1 = 0,6$ mm, no campo de trabalho normal da broca empregada. Pois os valores utilizados para a velocidade de corte e avanço da broca ensaiada (com diâmetro de 15 mm) encontram-se nas recomendações de catálogos de fabricantes e manuais técnicos.

A tabela V.6 apresenta os valores comparativos do momento de torção e força de avanço da broca nova e gasta (quando $I_1 = 0,6$ mm). Pode-se estabelecer como valor médio, para os ensaios realizados, um aumento de 30% para o momento de torção e um aumento de 22% para a força de avanço.

TABELA V.6- Comparação dos valores do momento de torção e força de avanço para a broca nova e gasta ($I_1 \cong 0,6$ mm).

VELOCIDADE DE CORTE v m/min	AVANÇO a mm/volta	BROCA NOVA		BROCA GASTA		AUMENTO	
		M_t (Ncm)	P_a N	M_t (Ncm)	P_a N	M_t %	P_a %
17,7	0,187	2430	5280	3140	6495	30%	23%
22,4	0,187	2332	5276	3040	6450	30%	22%
28,3	0,187	2231	5231	2940	6230	32%	20%
22,4	0,125	1722	3966	2228	4871	29%	23%
28,3	0,125	1620	3921	2127	4779	31%	22%

5.8- Determinação das curvas de vida da broca, para o par ferramenta-peça

A figura 5.11 apresenta as curvas do desgaste I_1 em função do comprimento de furação L, para as velocidades de corte $v = 17,7, 22,4$ e $28,3$ m/min, e um avanço $a = 0,187$ mm/volta. Estas curvas de desgaste foram obtidas através das tabelas V.1, V.2 e V.3 (ou através dos gráficos 5.1, 5.2 e 5.3). A

figura 5.12 apresenta as curvas de desgaste I_1 para as velocidades de corte $v = 22,4$ e $28,3$ m/min e um avanço $a = 0,125$ mm/volta.

Admitindo-se, de acordo com as considerações anteriores, a perda da capacidade de corte da broca definida pelo desgaste $I_1 = 0,6$ mm, teremos para o caso do avanço $a = 0,187$ mm/volta (figura 5.11) e para as velocidades de corte acima definidas, as vidas da broca representadas pelos comprimentos de furação $L = 4110, 1240$ e 190 mm respectivamente (Vide § 4.3.1 e 4.3.3).

Representando-se na figura 5.13 os valores dos comprimentos de furação acima obtidos em função das correspondentes velocidades de corte, para o avanço $a = 0,187$ mm/volta, obtém-se uma curva, a qual se aproxima de uma reta, na representação em coordenadas dilogarítmicas. Expressando-se esta equação pela fórmula de Taylor (4.12)

$$L = C \cdot v^y,$$

tem-se através da representação gráfica, os valores

$$C = 4,29 \cdot 10^{12}$$

$$y = - 7,14$$

$$a = 0,187 \text{ mm/volta}$$

Para o avanço $a = 0,125$ mm/volta, desenvolve-se igual procedimento. Através da figura 5.12, determina-se os comprimentos de furação para as velocidades de corte $v = 22,4$ e $28,3$ m/min, uma vez fixado o desgaste $I_1 = 0,6$ mm. A figura 5.13 apresenta também a curva de vida da broca para $a = 0,125$ mm/volta. Por procedimento igual ao anterior, obtém-se

$$C = 1,91 \cdot 10^{13}$$

$$y = - 7,23$$

$$a = 0,125 \text{ mm/volta}$$

Estes valores são válidos somente para o par peça-ferramenta, nas condições de usinagem previamente fixadas, tais sejam:

Material da Peça: aço ABNT 8640 beneficiado, HB 220

Ferramenta: broca de aço rápido de diâmetro 15 mm, tipo N, geometria de acordo com o material

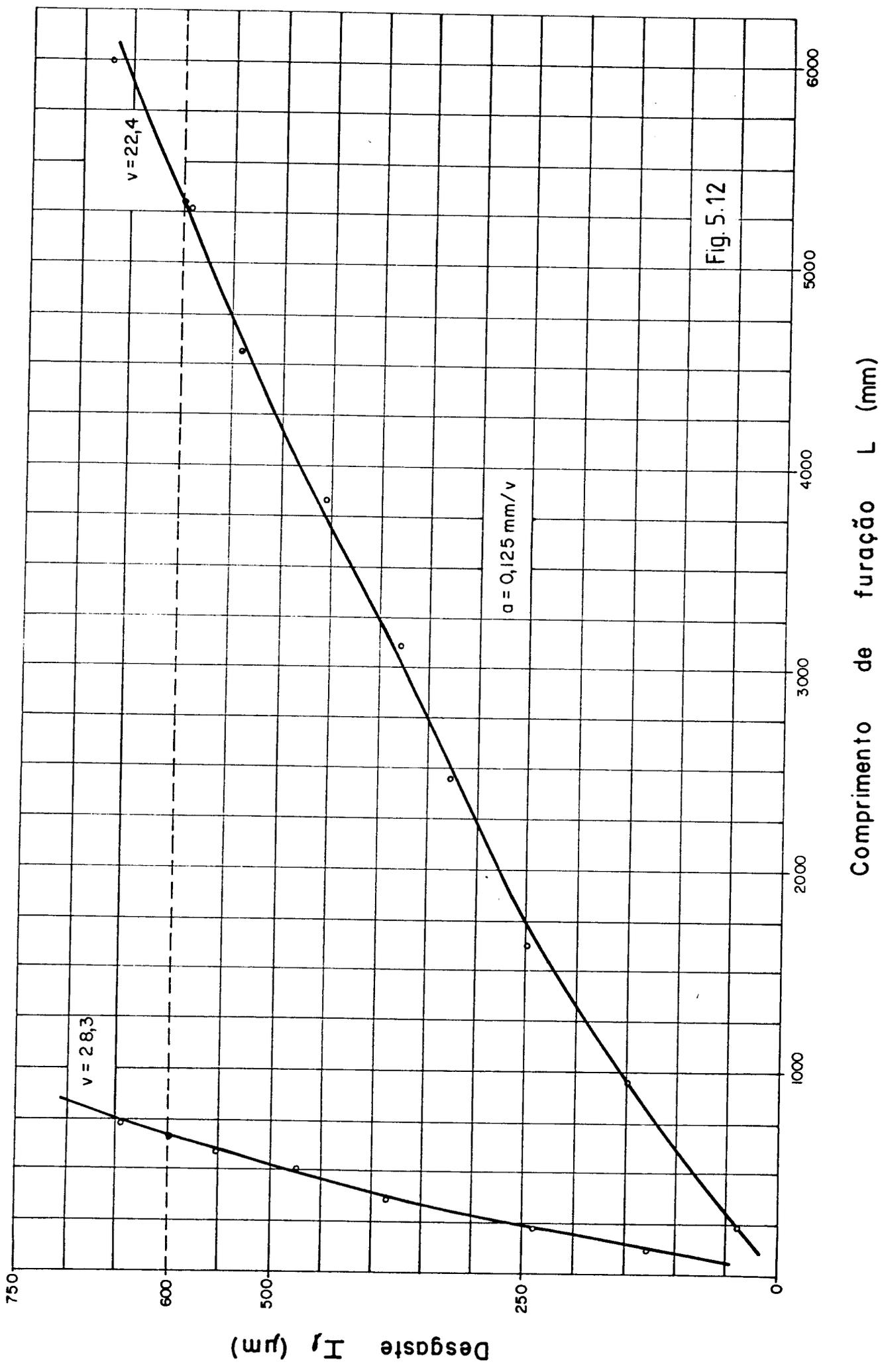
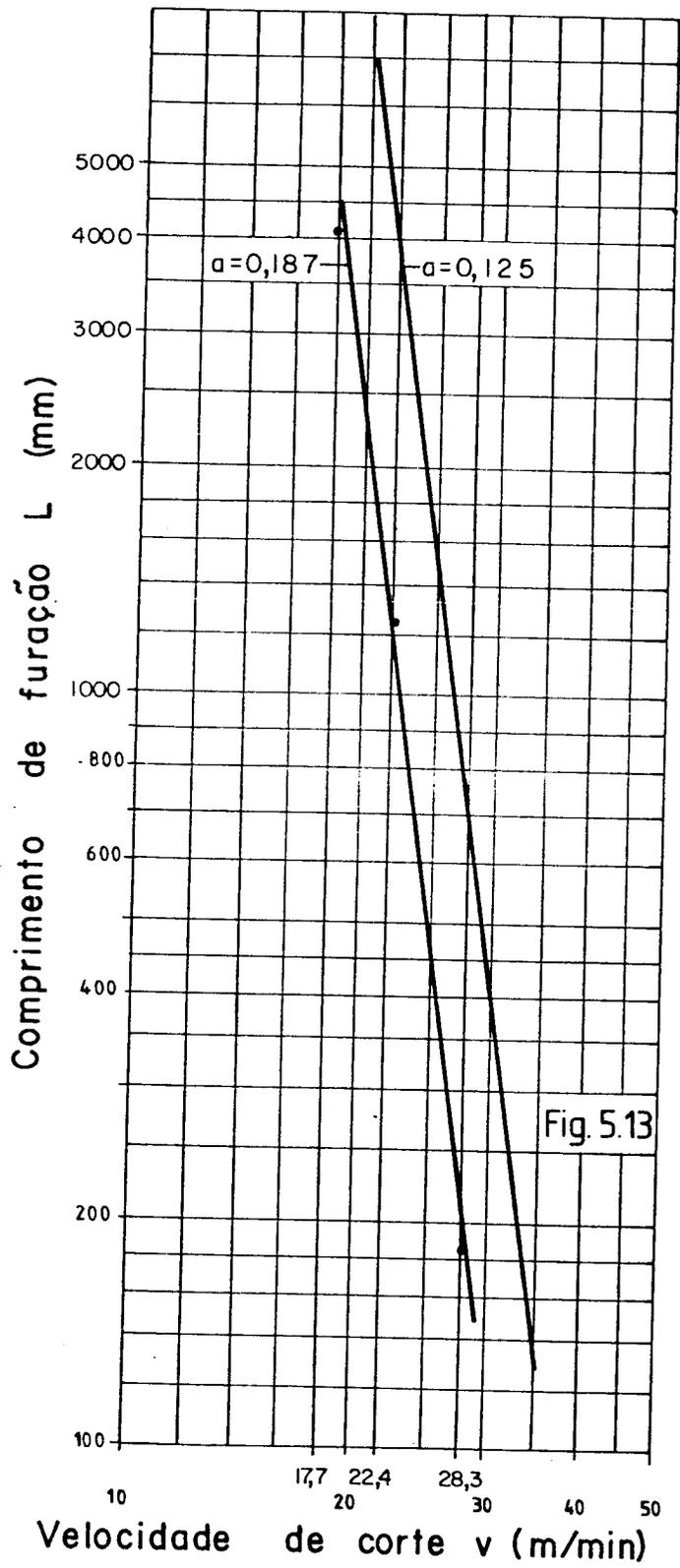


Fig. 5.12

Comprimento de furação L (mm)



Avanço: $a = 0,125$ e $0,187$ mm/volta

Fluído de Corte: solução normal de água com óleo solúvel

Variação de v : velocidade de corte aproximadamente com preendida entre 17 e 30 m/min

Desgaste I_1 : 0,6 mm

A tabela V.7 apresenta os valores das características de vida, obtidas nos ensaios anteriores

TABELA V.7- Características de corte obtidas nos ensaios

a (mm/volta)	y	C	$V_L = 2000$
0,125	- 7,23	$1,91 \cdot 10^{13}$	24,00 m/min
0,187	- 7,14	$4,29 \cdot 10^{12}$	20,27 m/min

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

6.1- Para a realização do trabalho em questão, foi projetado e construído um dinamômetro, específico para a medida do momento de torção e força de avanço, na operação de furação. Foram tomados cuidados especiais para o preenchimento das exigências, quanto as condições de sensibilidade e rigidez dinâmica.

Foi estudado um sistema de fixação dos corpos de prova, incorporado ao dinamômetro, permitindo colocação e retirada do corpo de prova com rapidez, além de oferecer uma fixação bastante rígida.

6.2- Para possibilitar a aferição do dinamômetro, foi construído uma balança especial, a qual permitiu aplicar separadamente e simultaneamente, momentos de torção e forças axiais diferentes.

Através da aferição estática obtiveram-se curvas características $M_t = f(\text{leitura})$ e $P_a = f(\text{leitura})$ lineares, facilitando a utilização do dinamômetro. Constatou-se uma sensibilidade satisfatória, além de uma interdependência dos valores do momento torçor e força de avanço. Isto é, aplicando-se diferentes momentos torçores no dinamômetro a leitura da força de avanço não era alterada (§ 3.1); aplicando-se diferentes forças axiais no dinamômetro, a leitura do momento torçor não era alterada.

A construção em forma tubular e o sistema de fixação de corpos de prova em dimensões reduzidas, permitiu obter-se pequena inércia do conjunto, possibilitando uma frequência própria relativamente alta, com erro dinâmico pequeno, conforme mostrou a aferição dinâmica (§ 3.2).

6.3- Devendo serem conduzidas pesquisas sobre os desgastes das brocas helicoidais, tornou-se necessário o estudo da sua geometria básica, apresentado no parágrafo 4.1. Foram tecidas também considerações sobre a afiação das brocas helicoidais, em particular a "afiação por cone de revolução", que é a mais generalizada no nosso parque

industrial (§ 4.2).

- 6.4- Para a realização dos ensaios foi rigorosamente controlado o material da peça, através de análise química, ensaios de tração, dureza e de inclusão. Nas brocas helicoidais, foi controlada a sua dureza e geometria. O processo de afiação foi sempre o mesmo, utilizando-se uma afiadora da fabricação GÜrling (Alemanha).
- O controle do material da peça a ser usinada e das brocas (inclusive afiação), permitiu a obtenção de resultados de ensaios bastantes uniformes, evitando-se assim a influência dos parâmetros inerentes ao material da peça e da broca.
- 6.5- Para a medida dos desgastes da broca, tornou-se necessário o desenvolvimento de dispositivos especiais, além da utilização de aparelhos e instrumentos metrológicos.
- Constatou-se a possibilidade de convencionar três desgastes: desgaste da aresta principal de corte I_T ; desgaste da guia da broca I_G ; desgaste da aresta transversal de corte I_T (§ 4.3).
- 6.6- Foram apresentados os estudos de vida das brocas helicoidais, em comparação com as ferramentas de barra, empregadas na operação de torneamento. Para tanto foi apresentado um critério de determinação das curvas de vida, partindo-se das curvas de desgaste, como é normalmente seguido nas operações de torneamento.
- 6.7- Na parte experimental do trabalho, foi realizada uma grande série de ensaios de desgaste e medidas do momento torçor, força de avanço, na operação de furação em aço ABNT-8640, empregando-se broca de aço rápido de 15 mm de diâmetro. Os ensaios foram conduzidos para dois avanços e três velocidades de corte.
- Não foi possível no presente trabalho, a realização de ensaios para outros materiais, e outros diâmetros de bro

cas, dado ao excessivo tempo necessário a obtenção das curvas de desgaste. Assim mesmo, para as condições de ensaios acima especificados, tornou-se necessária a confecção de aproximadamente 1000 corpos de prova.

- 6.8- Com o fim de se estabelecer um critério para a determinação da perda da capacidade de corte das brocas helicoidais, fator básico para o estabelecimento de sua vida, os ensaios foram conduzidos de maneira a se obter periodicamente os índices de desgaste I_1 , I_G e I_T , além do momento de torção e força de avanço, para um comprimento de furação determinado. Estas duas últimas grandezas foram registradas, a fim de se avaliar melhor a vibração da broca.
- 6.9- Através dos ensaios, constatou-se que o desgaste mais significativo na determinação da curva de vida, era o desgaste I_1 , o qual atingia sempre o mesmo valor, de aproximadamente 0,6 mm, quando o processo de furação começava a apresentar vibrações, impossibilitando o prosseguimento da operação. Esta ocorrência foi notada para diferentes velocidades de corte e avanços. Este fato permitiu estabelecer o valor acima ($I_1 = 0,6$ mm) para o caso de brocas helicoidais de 15 mm de diâmetro, nas condições de usinagem especificadas.
- 6.10- O desgaste $I_1 = 0,6$ mm, estabelecido para a determinação da perda da capacidade de corte, deve ser tomado para brocas de aço rápido, de 15 mm de diâmetro, para as condições de usinagem e material da peça aqui empregados. Para o caso de brocas de diferentes diâmetros e materiais, assim como condições de usinagem diferentes das empregadas neste trabalho, deverão ser conduzidos os ensaios de desgaste, para determinação do valor de I_1 , seguindo o critério aqui apresentado.
- 6.11- Foram construídas as curvas de vida da broca, para dois avanços, em aço ABNT-8640. Na representação logarítmica constatou-se que as curvas se aproximavam a retas, per-

mitindo desta forma uma representação analítica simples, ou seja, permitindo a determinação dos parâmetros da equação de Taylor $L = C.v^y$, como no processo de torneamento (§ 5.8).

- 6.12- O prosseguimento deste trabalho permitirá a determinação dos parâmetros C e y , na operação de furação, para diferentes materiais da peça e da broca, assim como diferentes avanços. Estes parâmetros possibilitarão, analogamente ao processo de torneamento, determinar as velocidades de máxima produção, mínimo custo e máximo lucro, de grande interesse nos estudos econômicos e de programação de usinagem.

BIBLIOGRAFIA

- [1] SCHALLBROCH, H. - Bohrarbeit und Bohrmosschine. München, Carl Hanser Verlag, 1951.
- [2] KRONENBERG, M. - Grundzüge der Zerspanungslehre. Vol 1, Berlin, Springer Verlag, 1954.
- [3] SPUR, G. - Beitrag zur Schnittkraftmessung beim Bohren mit Spiralbohrer unter Berücksichtigung der Radialkräfte. (Tese de doutoramento, T. H. Braunschweig, 1961).
- [4] SPUR, G. - Ergebnisse von Schnittkraftmessungen beim Bohren mit Spiralbohrer. Mosschinenmarkt 36, 1963, p. WP 75.
- [5] DAAR, H. L. A. - Uma contribuição ao conhecimento do processo de furação dos aços com brocas helicoidais. São Carlos, Departamento de Publicação da Escola de Engenharia de São Carlos, 1967.
- [6] TIMOSHENKO, S. - Strength of Materials. D. Van Nordstrand Co. Inc., New York, 1941.
- [7] HÜTTE, I. - Das Ingenieur Taschenbuch. Ernst & Sohn, Berlin, 1955.
- [8] PHILIPS, - Guide to Strain Gauges. The Nether Lands, N. V. Philips Gloeilampenfabriken, 1960.
- [9] FERRARESI, D. - Fundamentos da Usinagem dos Metais. Editora Edgard Blücher Ltda, 1970, V.1.
- [10] MARQUES, R. M. & Berquō, E. - Análise de Variância. Departamento de Estatística Aplicada da Faculdade de Higiene e Saúde Pública da U.S.P., 1963.

- [11] ARAUJO, S. - Dinamômetro para medidas de forças no torneamento. Tese de Mestrado apresentada na Faculdade de Engenharia de Campinas da UNICAMP. Publicação CT-nº 5, Centro de Tecnologia da UNICAMP, 1975.
- [12] FERRARESI, D. - Dynamische Schnittkraftmessungen beim Drehen. Tese de doutoramento na Escola Técnica Superior de Munique. Biblioteca da Faculdade de Engenharia de Campinas da UNICAMP, 1959.
- [13] HARTOG, V. P. den - Mechanical Vibrations. New York. Mc Graw-Hill Book Co., 1956.
- [14] THOMSON, W. T. - Theory of Vibration. New Versy , Prentice Hall, Inc., 1972.
- [15] BRUEL, & Kjaer. - Complex Modulus Apparatus, Type 3930, 1968.
- [16] ABNT, NB 205. - Ferramentas de Usinagem, Geometria da Cunha Cortante. São Paulo. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1978.
- [17] DIN, 6581. - Geometrie am Schneidkeil des Werkzeuges . Berlin, Beuth Vertrieb GmbH, 1960.
- [18] ABNT, TB 111. - Brocas helicoidais-Terminologia. São Paulo, Associação Brasileira de Normas Técnicas , 1977.
- [19] FERRARESI, D. - Usinagem dos Metais-Operação de furação, alargamento, fresamento, brochamento e processos não convencionais de usinagem. São Paulo. Ed. Associação Brasileira de Metais, 1978.
- [20] REFA. - Landesverband-Berlin. - Bohrer. Berlin , Beuth Vertrieb GmbH, 1971.
- [21] KRONENBERG, M. - Grundzüge der Zerspanungslehre. Berlin, Springer Verlag, 1963, V.2.