

MON  
621.9  
F676c  
TES/MEB

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA

UMA CONTRIBUIÇÃO AO CONHECIMENTO DOS ESFORÇOS DE CORTE NO  
PROCESSO DE FURAÇÃO EM CHEIO COM BROCAS HELICOIDAIS.

Dissertação apresentada à Univer-  
sidade Federal de Uberlândia por  
Eli Marcio Fonseca para obtenção  
do título de Mestre em Engenharia  
Mecânica, aprovada em 29/9/92  
pela seguinte banca examinadora:

DIRBI/UFU

621.9 F676c /TES/FU  
01422/93



1000017145

- Alisson Rocha Machado

(Prof. U.F.U.)

- Nivaldo Lemos Cupini

(Prof. Unicamp)

- Valder Steffen Júnior

(Prof. U.F.U.)

-Orientador: Claudionor Cruz

(Prof. U.F.U.)

Aos meus pais e

à minha família:

Márcia, Nádia, André

e Aline

### Agradecimentos

- Ao professor orientador Claudionor Cruz  
pela dedicação e ensinamentos
- Aos professores e técnicos que contribuí-  
ram para a realização deste trabalho
- À Komatsu, na pessoa do engenheiro Valdi-  
nei G. Amorim

UMA CONTRIBUIÇÃO AO CONHECIMENTO DOS ESFORÇOS DE CORTE NO  
PROCESSO DE FURAÇÃO EM CHEIO COM BROCAS HELICOIDAIS

SUMÁRIO

Lista de figuras.....	III
Lista de tabelas.....	VI
Lista de símbolos .....	VIII
Abreviaturas.....	XI
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Considerações preliminares.....	4
2.2. Influência das variáveis de corte sobre o processo de furação.....	6
2.3. Expressões dos esforços de corte no processo de furação.....	15
3. APRESENTAÇÃO DE UM DINAMÔMETRO EXTENSOMÉTRICO PARA MEDIÇÃO DA FORÇA DE AVANÇO E DO TORQUE NO PROCESSO DE FURAÇÃO.....	21

3.1. Princípio e detalhes construtivos do dinamômetro.....	23
3.2. Características dinâmicas e metrológicas do dinamômetro.....	26
4 FORÇA DE AVANÇO E MOMENTO DE TORÇÃO PARA ALGUNS AÇOS NACIONAIS.....	35
4.1. Metodologia dos ensaios.....	35
4.1.1 Materiais ensaiados.....	36
4.1.2 Condições dos ensaios.....	39
4.1.3 Ensaios.....	41
4.1.4 Tratamento estatístico dos resultados numéricos e determinação dos coeficientes.....	42
4.2. Resultados experimentais.....	42
4.3. Discussão dos resultados.....	46
5. CONCLUSÕES.....	56
6. SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	60
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

Fonseca, E. M. - Uma contribuição ao conhecimento dos esforços de corte no processo de furação em cheio com brocas helicoidais, U.F.U., Uberlândia, M. G., 1992

### Resumo

O trabalho apresenta uma contribuição ao conhecimento dos esforços de corte no processo de furação em cheio com brocas helicoidais. Para tanto é feito um levantamento bibliográfico procurando conhecer os caminhos já percorridos pela pesquisa sobre o assunto. É projetado e construído um dinamômetro extensométrico para medir esforços de corte no processo de furação. São identificados e ensaiados alguns aços nacionais para conhecimento daqueles esforços e determinação dos coeficientes de expressões matemáticas usadas no cálculo da Força de Avanço e Momento de Torção.

### Palavras chaves

Furação, Força de Avanço, Momento de Torção, Brocas, Dinamômetros, Coeficientes

Fonseca, E. M. - A contribution to the knowledge of the machining forces in full drilling with twist drills; U.F.U., Uberlândia, M.G., 1992

#### Abstract

This work presents a contribution to the knowledge of the machining forces in full drilling with twist drills. A literature survey of the state of art was made. A strain gauge dynamometer was projected and construed to measure the machining forces in drilling. Some national steels were identified and tested to obtain the machining forces. From which were obtained the coefficients of the mathematical equations used in calculation of the thrust and torque in drilling.

## Lista de figuras

Figura	Significado	página
2.1	Esforços de corte no processo de furação com brocas helicoidais.....	4
2.2	Grandezas geométricas mais influentes sobre os esforços de furação.....	7
2.3	Força de Avanço x rotação da broca para latão de corte fácil.....	9
2.4	Torque x rotação da broca para latão de corte fácil.....	10
2.5	Força de Avanço ( $F_f$ ) e momento de torção ( $M_t$ ) em furação em cheio x mudanças da velocidade de corte ( $v$ ).....	11
2.6	Influência do sistema de afiação da ponta da broca sobre a Força de Avanço.....	12
2.7	Influência do estado de afiação sobre os esforços de corte.....	13
3.1	Partes estruturais e componentes do dinamômetro.....	24
3.2	Vista geral do dinamômetro.....	25

3.3	Esquema da utilização dos indicadores de carga.....	26
3.4	Fluxograma e equipamentos usados na determinação da frequência natural $\omega_n$ e o fator de amortecimento $\beta$ .....	27
3.5	Frequências naturais do dinamômetro na direção YY.....	28
3.6	Frequências naturais do dinamômetro na direção XX.....	29
3.7	Variação do erro relativo $E_r$ x variação da frequência excitadora $\omega/\omega_n$ na direção xx.....	31
3.8	Variação do erro relativo $E_r$ x variação da frequência excitadora $\omega/\omega_n$ na direção yy.....	31
3.9	Curvas de calibração da célula de carga de 100 kgf.....	33
3.10	Curva de calibração da célula de carga de 2000 kgf.....	33
4.1	Fluxograma de trabalho para determinação dos resultados experimentais.....	36
4.2	Fotografia - aço ABNT 1015 - aumento 150x.....	38
4.3	Fotografia - aço ABNT 1035 - aumento 150x.....	38
4.4	Fotografia - aço ABNT 1045 - aumento 150x.....	38

4.5	Fotografia - aço ABNT 1050 - aumento 150x.....	38
4.6	Fotografia - aço ABNT 8630 - aumento 150x.....	39
4.7	Força de avanço x velocidade de corte ( aço ABNT 1050, diâmetro da broca 19,05mm.).....	47
4.8	Momento de torção x velocidade de corte ( aço ABNT 1050, diâmetro da broca 19.05mm ).....	48
4.9	Representação gráfica das forças de avanço derivadas das tabelas 4.5 e 4.6 ( aço ABNT 1050, diâmetro da broca 19,05mm ).....	50
4.10	Representação gráfica dos momentos de torção derivados das tabelas 4.5 e 4.6 (aço ABNT 1050, diâmetro da broca 19.05mm ).....	51
4.11	Representação gráfica das forças de avanço, usando os coeficientes de Daar e do autor ( aço ABNT 1050, diâmetro da broca 19.05mm ).....	54
4.12	Representação gráfica dos momentos de torção, usando os coeficientes de Daar e do autor ( aço ABNT 1050, diâmetro da broca 19,05mm ).....	55

## Lista de tabelas

Tabela	Significado	página
2.1	Valores das principais grandezas geométricas do corpo da broca.....	8
2.2	Expressões para cálculo dos esforços de furação em cheio com brocas helicoidais.....	20
3.1	Frequências naturais e fator de amortecimento do dinamômetro.....	30
4.1	Composição química dos aços ensaiados.....	37
4.2	Propriedades mecânicas dos aços ensaiados.....	37
4.3	Força de Avanço $F_f$ e Momento de Torção $M_t$ ( broca de diâmetro 6,35mm ).....	43
4.4	Força de Avanço $F_f$ e Momento de Torção $M_t$ ( broca de diâmetro 12,7mm ).....	44
4.5	Força de Avanço $F_f$ e Momento de Torção $M_t$ ( broca de diâmetro 19,05mm ).....	45
4.6	Coeficientes das expressões de Spur, Kienzle, e Kronenberg, para as condições e aços ensaiados...	46
4.7	Coeficientes das expressões de Spur, Kienzle e Kronenberg, obtidos pelo autor e por outros pesquisadores.....	52

5.1	Valores dos esforços de furação calculados pelas expressões de Shaw-Oxford e Kronenberg gerais.....	58
5.2	Coefficientes das expressões de Kronenberg para cálculo dos esforços de furação para alguns aços nacionais.....	59

### Lista de símbolos

Símbolo	Significado	Unidade
A	Sistema de afiação da broca	_____
B <sub>1</sub>	Braço de alavanca	mm
D	Diâmetro	mm
E	Esforço de corte	_____
E <sub>r</sub>	Erro relativo	_____
F	Fluidos de corte	_____
F <sub>f</sub>	Força de avanço	N
F <sub>c</sub>	Força principal de corte	kgf
F <sub>t</sub>	Força tangencial	kgf
G	Geometria da parte cortante da broca	_____
M	Material a ser furado	_____
M <sub>t</sub>	Momento de torção	Nm
P <sub>a</sub>	Carga aplicada	kgf
P <sub>i</sub>	Carga indicada	kgf
ω	Frequência excitadora	Hz
ω <sub>n</sub>	Frequência natural	Hz
XX	Direção xx	_____
YY	Direção yy	_____
Z	Coefficiente numérico	_____
b	Largura de corte	mm

c	Comprimento da aresta transversal de corte	mm
f	Avanço	mm/rot
h	Espessura de corte	mm
k <sub>1</sub>	Coeficiente numérico	_____
k <sub>2</sub>	Coeficiente numérico	_____
k <sub>3</sub>	Coeficiente numérico	_____
k <sub>4</sub>	Coeficiente numérico	_____
k <sub>5</sub>	Coeficiente numérico	_____
k <sub>6</sub>	Coeficiente numérico	_____
k <sub>7</sub>	Coeficiente numérico	_____
k <sub>sl</sub>	Pressão de corte	kgf/mm <sup>2</sup>
n	Rotações	rpm
v	Velocidade de corte	m/mm
x <sub>1</sub>	Coeficiente numérico	_____
x <sub>2</sub>	Coeficiente numérico	_____
y <sub>1</sub>	Coeficiente numérico	_____
y <sub>2</sub>	Coeficiente numérico	_____
y <sub>3</sub>	Coeficiente numérico	_____
α <sub>n</sub>	Ângulo de folga	graus
β	Fator de amortecimento	_____
γ <sub>n</sub>	Ângulo de saída	graus
θ	Ângulo de helice da broca	graus

$\xi$	Ângulo da ponta da broca	graus
Ff	Desvio padrão	_____
Mt	Desvio padrão	_____
t	Tensão de ruptura	kfg/mm <sup>2</sup>
$\phi$	Fator de amplificação	_____
$\psi$	Ângulo transversal de corte	graus

Abreviaturas:

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

HB Dureza Brinell

## UMA CONTRIBUIÇÃO AO CONHECIMENTO DOS ESFORÇOS DE CORTE NO PROCESSO DE FURAÇÃO EM CHEIO COM BROCAS HELICOIDAIS

### 1. INTRODUÇÃO

O processo de furação com brocas helicoidais, assim como, por exemplo, os processos de torneamento e fresamento, embora seja um processo convencional de usinagem por arranque de cavaco bastante estudado desde o início do século, ainda carece de grande volume de pesquisa em todos seus aspectos graças à evolução que se observa nos materiais das ferramentas, nos materiais das peças a serem usinadas e nas exigências de produção cada vez mais rápida, de melhor qualidade e a baixo custo.

Apenas para ilustrar o que foi dito acima, hoje se usam, além de brocas helicoidais de aço rápido, ferramentas bem mais eficientes como brocas revestidas de diferentes materiais como nitreto de titânio, com geometrias e sistemas de afiação a serem otimizadas para usinagem de novas ligas que incluem elementos como titânio, níquel e níobio [1]. Ao lado da evolução dos materiais, a evolução da máquina-ferramenta permitiu a transformação das velhas furadeiras de coluna, de bancada ou radiais em modernas furadeiras de coordenadas, furadeiras múltiplas e centros de usinagem com comando numérico

computadorizado.

Não obstante tenha a máquina-ferramenta evoluído significativamente no seu todo, essa evolução está aquém da evolução experimentada pelas ferramentas e pelos materiais [2]. A evolução da máquina-ferramenta foi mais no tocante ao acionamento, principalmente por causa dos motores de corrente contínua e no tocante ao comando notadamente com o advento do comando numérico computadorizado [3]. A evolução estrutural das máquinas de usinagem é bastante modesta onde ferramentas matemáticas como o método dos elementos finitos e softwares para cálculos estruturais não tem sido utilizados com a intensidade que era de se esperar. O conhecimento da magnitude dos esforços de furação pode colaborar com o projeto estrutural da máquina de modo a torná-lo eficaz e econômico.

Os pesquisadores no campo da usinagem dos materiais e áreas afins tem se dividido em outros campos como automatização e processos não convencionais, esvaziando linhas de pesquisas tradicionais como a da determinação dos esforços de usinagem em todos processos. Este trabalho tem como objetivo contribuir na linha de determinação dos esforços de corte no processo de furação com brocas helicoidais não apenas para que seja possível melhorar a especificação de grandezas de corte em programas de fabricação mas também para contribuir com a área de projeto estrutural da máquina-ferramenta e principalmente propiciar o

monitoramento dos critérios de fim de vida das ferramentas.

Essencialmente, este trabalho apresenta três compartimentos específicos: no primeiro ( capítulo 2 ) é feito uma revisão bibliográfica sobre esforços de furação; no segundo ( capítulo 3 ) apresenta-se um dinamômetro para medição do torque e da força de avanço no processo de furação desenvolvido pelo autor, e no terceiro ( capítulo 4 ) são determinados os valores do torque e da força de avanço para alguns aços nacionais utilizando o dinamômetro apresentado no capítulo 3.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Considerações preliminares

O propósito deste capítulo é reunir e comentar as principais contribuições sobre o tema Esforços de Corte no Processo de Furação em Cheio com Brocas Helicoidais.

Os esforços a que se refere o parágrafo acima são os esforços de resistência à penetração da broca e resistência ao giro da mesma, respectivamente designado de força de avanço ( $F_f$ ) e o momento de torção ou torque ( $M_t$ ) ilustrados na Fig. 2.1 [5].

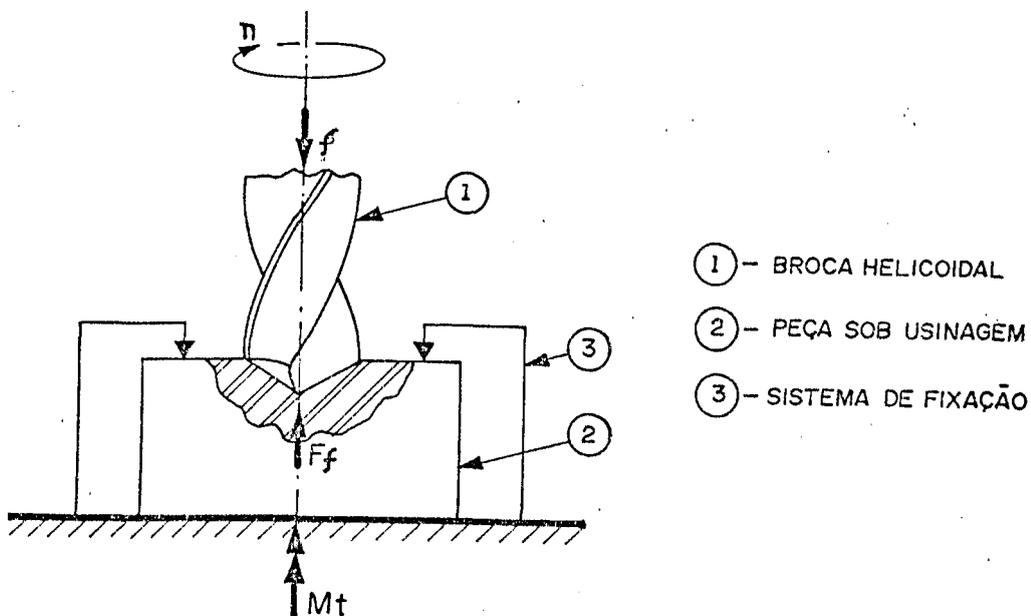


Fig. 2.1. - Esforços de corte no processo de furação com brocas helicoidais

Na figura 2.1 tem-se a seguinte representação simbólica:

$f$  = Avanço da Broca ( mm/rot )

$n$  = Rotação da Broca ( rpm )

$F_f$  = Força de Avanço ( N )

$M_t$  = Momento de Torção ou Torque ( N.m )

Entre os vários processos de furação com arranque de cavaco utilizando diferentes geometrias de brocas ( vide [6] pags. 627 a 634 ), destaca-se pela importância industrial na produção de furos em cheio, a broca helicoidal ("twist drill") de duas arestas de corte em aço rápido com afiação convencional [6 a 9]. É especificamente para este tipo de ferramenta que o presente estudo de determinação de esforços de furação se aplica não obstante a furação com pré-furação [10], a utilização de diferentes geometrias da cunha cortante [1] e o emprego de novos materiais para as brocas [10] sejam cada vez mais utilizados.

A compreensão fenomenológica do processo de furação com brocas helicoidais e seu desenvolvimento se deve em parte a dois trabalhos básicos sobre o processo: o desenvolvido por Oxford e Rochester [12] e o devido a Galloway [13], ambos levados a efeito na década de 1950. Esses trabalhos, entre outros [13 a 18], e também levando em conta a síntese feita por M. Shaw [19], permitem considerar que o esforço de corte  $E$  ( força de avanço ou momento de torção ) em furação em cheio depende de vários fatores ou parâmetros de corte conforme a relação abaixo:

$$E = f( M, G, D, f, v, A, F )$$

onde

M = Material a ser furado

G = Geometria da parte cortante da broca

D = Diâmetro do furo

f = Avanço de corte

v = Velocidade de corte

A = Sistema de afiação da ponta da broca

F = Fluido de corte usado no processo

A próxima seção (2.2) apresenta um resumo das principais conclusões acerca das influências desses fatores sobre o valor dos Esforços de Corte e na seção seguinte 2.3 são relacionados, em ordem cronológica, as expressões empíricas da força de avanço e do momento de torção.

## 2.2 Influência das variáveis de corte sobre os Esforços de Furação.

Desde a década de 1920 os pesquisadores verificaram que os parâmetros mais influentes sobre os esforços de corte são o material a ser furado ( M ), o diâmetro do furo ( D ) e o avanço ( f ) [20]. Esta constatação levou às expressões empíricas da força de avanço e momento de torção apresentadas na seção 2.3 adiante.

Os demais parâmetros, G, v, A, e F, também exercem

influências sobre os esforços de corte. Essas influências, embora de menor monta que os de  $M$ ,  $D$ , e  $f$ , são apresentadas resumidamente a seguir nesta seção.

#### INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA BROCA - G

As grandezas mais influentes da geometria da broca são [19]:

O ângulo de hélice da broca ( $\theta$ ), o comprimento da aresta transversal de corte ( $c$ ), o ângulo transversal de corte ( $\psi$ ), o ângulo da ponta ( $\xi$ ), o número de cunhas cortantes e os ângulos de folga ( $\alpha_n$ ) e saída ( $\gamma_n$ ) da cunha cortante, que se acham ilustrados na fig. 2.2.

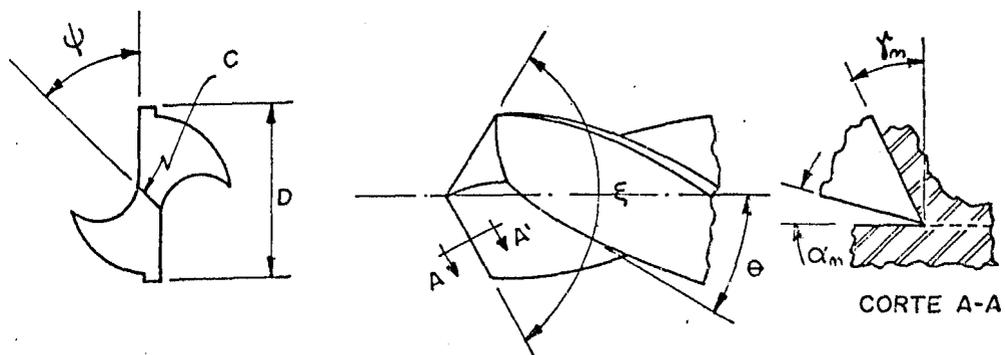


Fig. 2.2 - Grandezas geométricas mais influentes sobre os esforços de furação.

Para não detalhar muito neste trabalho as influências desses parâmetros, podem ser consultados os trabalhos de GALLOWAY [13], de SHAW e OXFORD [14], SPUR [21] e os manuais da ASTM -American Society of Metals [22] e MRA -Metcut Research Associates [23].

Em função dos resultados das pesquisas envolvendo grandezas geométricas da broca sobre os valores dos esforços de corte e

consequentemente sobre a vida da ferramenta, é que, na prática costuma-se usar brocas com algumas dessas grandezas em faixas bem definidas de acordo com o material a ser furado, tal como as que se apresentam na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Valores das principais grandezas geométricas do corpo da broca.

Brocas p/ aços-carbono	Brocas p/ aços-ligas duros	Brocas p/ metais não ferrosos
$\theta = 28 \text{ à } 32^\circ$	$\theta = 28 \text{ à } 32^\circ$	$\theta = 15 \text{ à } 20^\circ$
$\xi = 118^\circ$	$\xi = 135^\circ$	$\xi = 100^\circ$
$\alpha_n = 8 \text{ à } 12^\circ$	$\alpha_n = 6 \text{ à } 9^\circ$	$\alpha_n = 10 \text{ à } 12^\circ$
$\psi = 45 \text{ à } 60^\circ$ $c = ( 0.13 \text{ à } 0.23 )D$		

#### INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE - v

Desde os primeiros trabalhos sobre determinação de esforços de corte na furação [20], verificou-se que era pequena a influência da velocidade de corte sobre o valor dos mesmos. Como será visto no item 2.3, nenhuma das expressões empíricas do torque e da força de avanço incluem esta grandeza, desprezando, desta forma, sua influência. Apenas para ilustrar tal fato apresentam-se a seguir alguns resultados gráficos do momento de torção e força de avanço versus velocidade de corte, levantados em pesquisas mais recentes.

Monein [17] pesquisando os esforços de corte em materiais não

ferrosos como Latão, Alumínio e Bronze em furos de diâmetros 5, 10, 15, e 20mm para a faixa de 2 à 42m/min, encontrou para os três referidos materiais resultados experimentais similares ao apresentado nas figuras 2.3 e 2.4.

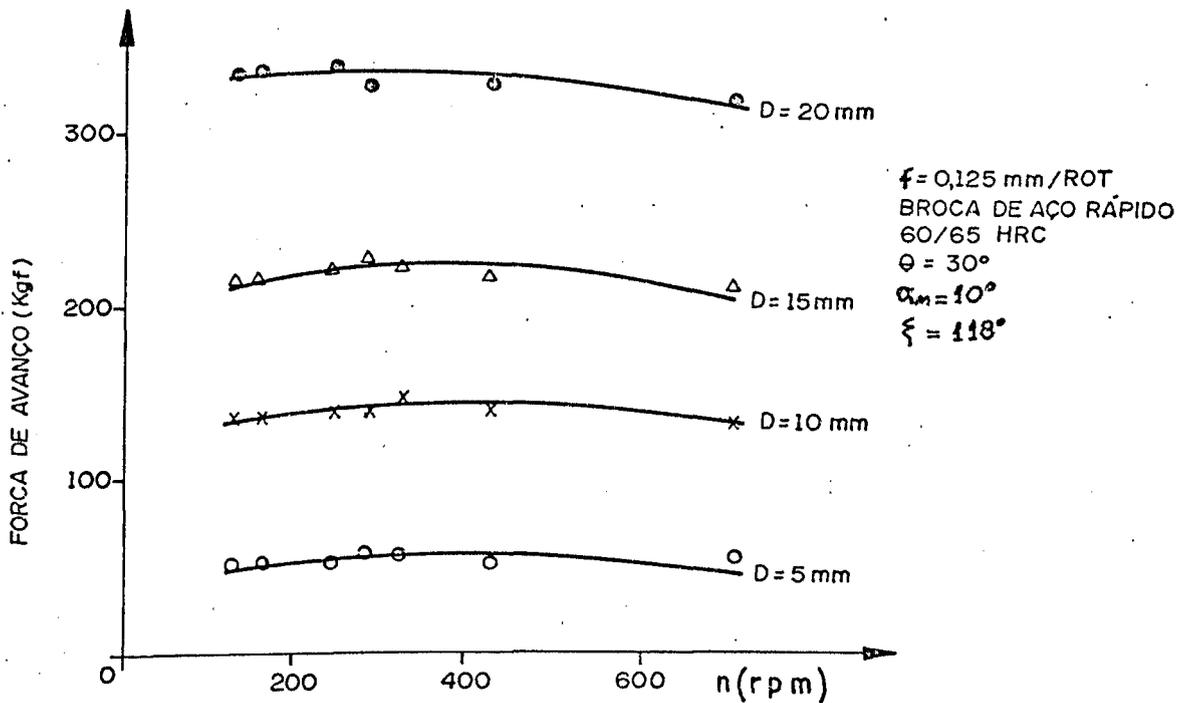


Fig. 2.3 - Força de avanço x rotação da broca para latão de corte fácil [17].

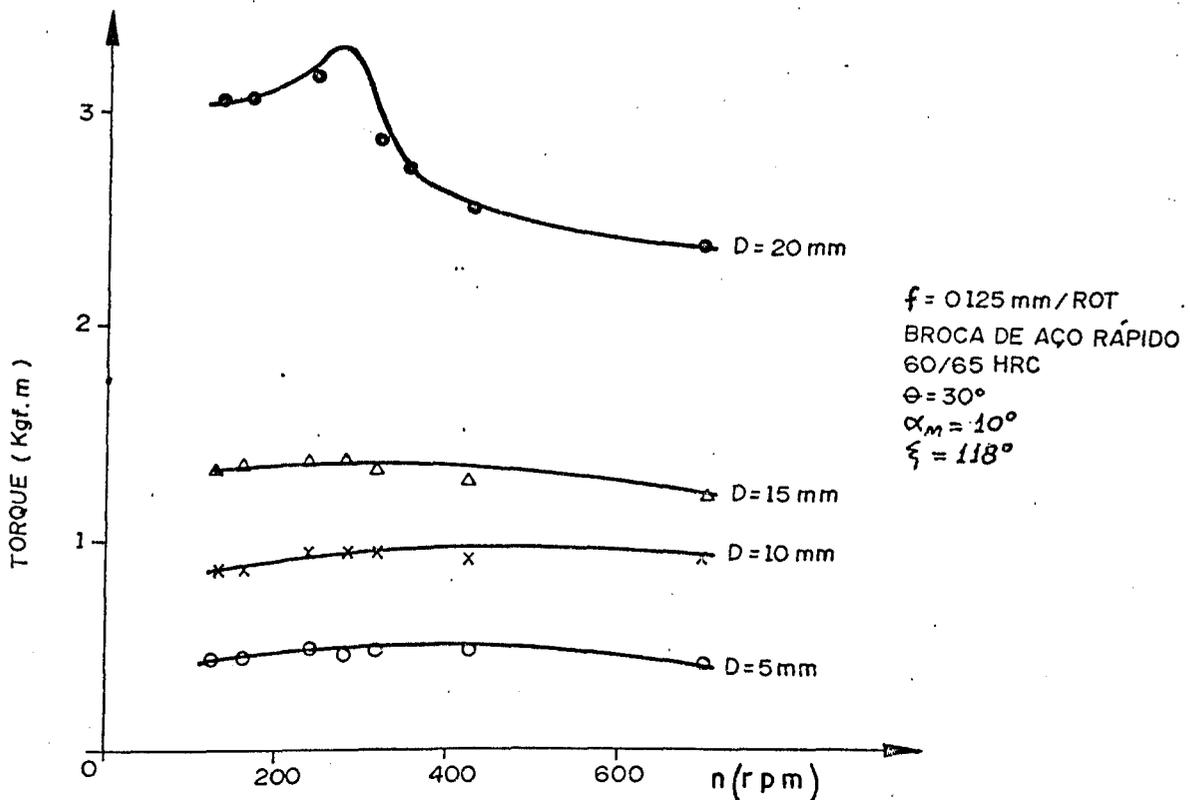


Fig. 2.4 - Torque x rotação da broca para latão de corte fácil [17].

Na referida pesquisa ficam evidenciados três aspectos importantes à cerca da influência da velocidade nos valores dos esforços:

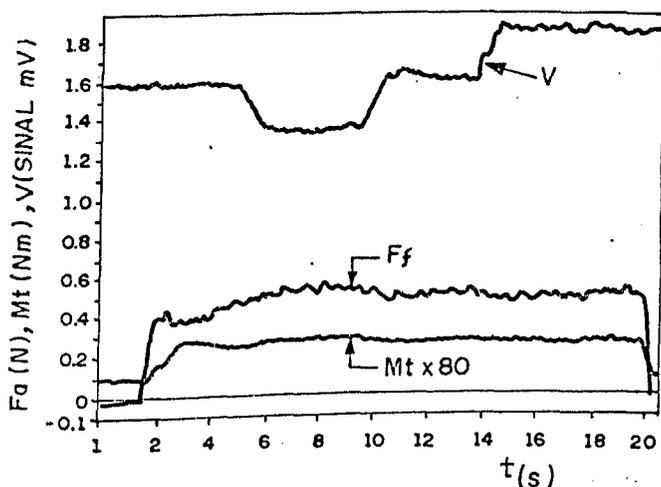
I - A magnitude da influência é pequena; no máximo em torno de 10% para uma faixa relativamente larga da velocidade;

II - Não há uma tendência de acréscimo do esforço com o acréscimo da velocidade. Ao contrário, a pesquisa mostra que para a maior velocidade ( 704 rpm ), tanto o torque quanto a força de avanço foram menores que para velocidades

intermediárias;

III - Dois fatores governam a força de avanço e o momento de torção, o efeito do aumento do encruamento devido a baixas e moderadas velocidades e o efeito do amolecimento térmico devido ao aumento da velocidade.

Em outra pesquisa importante, Donai e Ulsoy [18] estudando o modelamento dinâmico para forças de corte no torneamento, fresamento e furação, através de experimentação, com vistas a aplicação em controle adaptativo de máquinas-ferramenta, também apresentam o resultado da influência da velocidade nos valores dos esforços conforme está na figura 2.5.



Material aço AISI 1020  
 Broca HSS D=12,7mm  
 $V=27\text{m/min}$   
 $f=0,05\text{mm/rot.}$

Fig. 2.5 - Força de avanço ( $F_f$ ) e momento de torção ( $M_t$ ) em furação em cheio x mudanças na velocidade de corte ( $v$ ) [18].

Na figura 2.5, a velocidade de rotação da árvore, em sinais de voltagem (mV), foi variada para mais e para menos numa faixa de

cerca de 15% sem que se notasse qualquer mudança significativa nos valores dos esforços. O mérito maior do trabalho foi o de esclarecer aspectos dinâmicos dos esforços bem como de estudar a magnitude dos esforços ao longo do furo, durante os aproximados 20 segundos de duração do mesmo desde a entrada em funcionamento da ponta da broca até a sua saída do furo.

#### INFLUENCIA DO SISTEMA DE AFIAÇÃO DA BROCA - A

Conforme está estabelecido [1,6], há vários sistemas de afiação de brocas helicoidais para as diferentes situações práticas.

A figura 2.6, reproduzida de DeCarmo [6], mostra alguns valores da força de avanço em função de diferentes sistemas de afiação da ponta da broca.

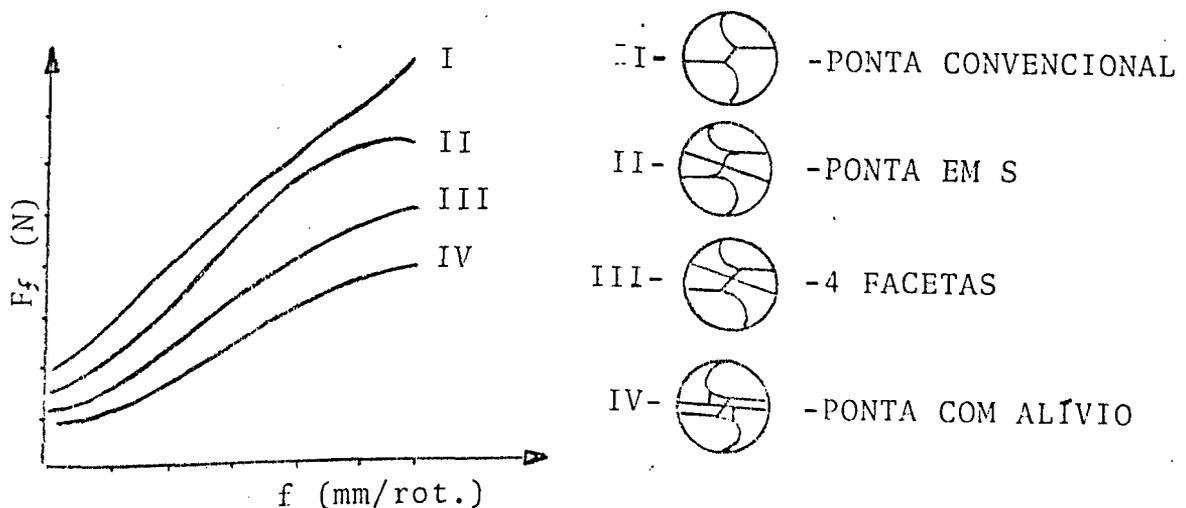


Fig. 2.6 - Influência do sistema de afiação da ponta da broca sobre a Força de Avanço [6].

O gráfico da figura 2.6, sintetizado de vários trabalhos furando aço AISI 1030 [13,14,21], evidencia a diminuição da Força de Avanço com a diminuição do comprimento da aresta transversal de corte conseguida em diferentes graus conforme o sistema de afiação. Já a influência do sistema de afiação sobre o momento de torção é desprezível segundo as mesmas fontes acima mencionadas.

Uma observação importante deve ser feita com relação às brocas desafiadas ou que perderam o corte. Quando isto acontece, o momento de torção aumenta muito de valor (conforme ilustra a figura 2.7, extraída de Galloway [13]), indicando que a broca necessita ser reafiada.

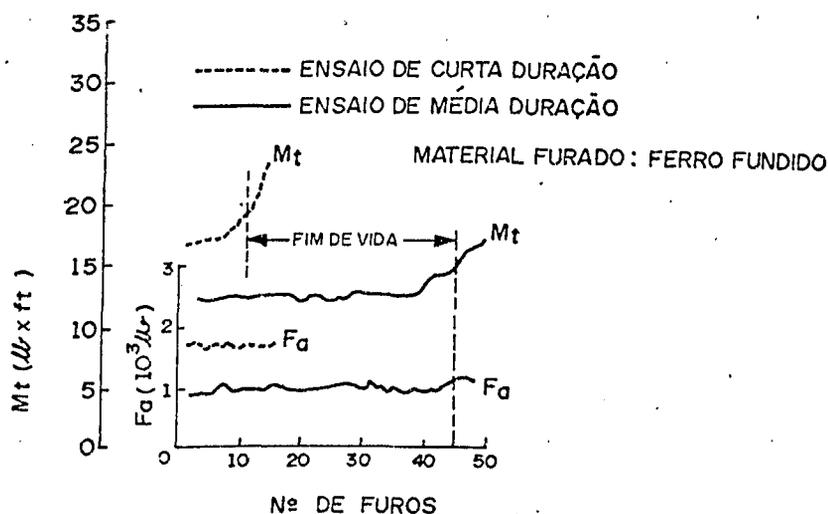


Fig. 2.7 - Influência do estado da afiação sobre os esforços de corte [13]

Conforme se observa, o efeito da perda do corte sobre a força de avanço é bem menos significativo que no caso do momento de

torção. Galloway [13] afirma que tal fato se aplica a todos os materiais furados com broca helicoidal. O monitoramento do momento de torção em processo serve como critério de fim de vida de brocas helicoidais tanto em pesquisa como na produção em alta escala.

#### *INFLUENCIA DO FLUIDO DE CORTE SOBRE OS ESFORÇOS DE CORTE. - F*

É sobejamente conhecido que a utilização de fluidos de corte no processo de furação com brocas helicoidais traz mais benefícios que para os processos de fresamento e torneamento [24].

Tais benefícios se referem especialmente à vida da ferramenta, visto que a utilização desses fluidos levam a produção de muitos mais furos que a furação a seco, em iguais condições de corte. Os desempenhos de diferentes fluidos de corte, no entanto, não diferem significativamente entre si, para os casos de furação normal com brocas helicoidais comuns. Assim sendo, prefere-se empregar nesses casos, o óleo mineral solúvel por ser de menor custo. Óleos de corte especiais como os que contem óleos minerais com aditivos EP ou óleos compostos só são utilizados com vantagens significativas em relação aos óleos solúveis em situações especiais ( furação profunda, produção em altas séries, materiais muito duros, outras ) [22,23].

Como na prática só se usa furação de metais com fluidos de corte, é de praxe também pesquisar esforços utilizando óleos solúveis nas concentrações diversas de óleo mineral.

### 2.3 Expressões dos esforços de corte no processo de furação.

As expressões que serão apresentadas a seguir nesta seção são as expressões de  $F_t$  e  $M_t$  mais utilizadas pelos pesquisadores ao longo do desenvolvimento histórico do processo ocorrido especialmente neste século XX.

As primeiras expressões importantes aparecem em 1936 no trabalho de Boston e Gilbert [25] para a furação de aços em geral, dadas por ( 2.2 ) e ( 2.3 ), abaixo:

$$M_t = k_1 \cdot D^{1,8} \cdot f^{0,78} \quad ( 2.2 )$$

$$F_t = k_2 \cdot D \cdot f^{0,78} \quad ( 2.3 )$$

onde  $M_t$  é dado em  $\text{lb} \cdot \text{pol.}$ ,  $F_t$  em  $\text{lb.}$ ,  $D$  em  $\text{pol.}$ ,  $f$  em  $\text{pol./rot.}$  e  $k_1$ ,  $k_2$  são constantes.

Na década de 1950, continuadores e discípulos de Kienzle [26] tais como H. Victor [27], G. Spur [28], derivaram novas expressões de  $M_t$  a partir da expressão geral da força principal de corte  $F_c$  de Kienzle, válida para qualquer processo de usinagem, [26] dada por:

$$F_c = b \cdot k_{sl} \cdot h^{1-z} \quad ( \text{kgf} ) \quad ( 2.4 )$$

onde:  $h = a/2 \cdot \text{sen}(\xi/2)$  - espessura de corte  
 $b$  = comprimento de corte ( mm )  
 $k_{sl}$  = pressão de corte (  $\text{kgf}/\text{mm}^2$  )  
 $z$  = coeficiente numérico experimental

Tal expressão de Kienzle foi a representada por ( 2.5 )

$$M_t = k_{sl} D^2 / 4 \cdot \text{sen}(\xi/2) \cdot [ f/2 \cdot \text{sen}(\xi/2) ]^{1-z} \quad ( 2.5 )$$

Spur [28] derivou a correspondente expressão da força de avanço ( 2.6 ) de forma similar à de Kienzle, com a diferença que seus coeficientes são específicos para furação e não mais independentes do processo tais como  $k$  e  $1-z$  da expressão de  $M_t$ .

$$F_f = k_3 \cdot D \cdot h^{1-y_1} \quad ( 2.6 )$$

onde:  $k_3$  = pressão unitária de corte (  $\text{kgf}/\text{m}^2$  )  
 $y_1$  = coeficiente numérico experimental

Em 1957, Oxford e Shaw [14] estabeleceram as expressões ( 2.7 ) e ( 2.8 ) abaixo após estudos teóricos envolvendo análise dimensional. Tais expressões, segundo seus autores, são válidas apenas para aços com dureza Brinell inferior a 250  $\text{kgf}/\text{mm}^2$

$$M_t = 0,087.HB.D^{1,8}.f^{0,8} \quad (lb.pol) \quad (2.7)$$

$$F_f = 0,195.HB.D^{0,8}.f^{0,8} + 0,002.HB.D^2 \quad (lb) \quad (2.8)$$

sendo HB a dureza Brinell do aço em psi.

Depois de muitos anos de pesquisas, Kronenberg [29] sugeriu em 1963, um par de expressões gerais ( 2.9 ) e ( 2.10 ) e um par de expressões simplificadas ( 2.11 ) e ( 2.12 ) para cálculo dos esforços.

Expressões gerais de Kronenberg:

$$M_t = k_4.D^{x_1}.f^{y_2} \quad (kgf.mm) \quad (2.9)$$

$$F_f = k_5.D^{x_2}.f^{y_3} \quad (kgf) \quad (2.10)$$

onde  $x_1, x_2, y_2, y_3$  são expoentes numéricos experimentais.

Expressões simplificadas de Kronenberg:

$$M_t = k_6.D^{1,8}.f^{0,8} \quad (kgf.mm) \quad (2.11)$$

$$F_f = k_7.(D + 19)^{2,12}.f^{0,87} \quad (kgf) \quad (2.12)$$

H.Daar [7], em sua tese de doutoramento, em 1966, põe à prova todas as expressões de  $M_t$  e  $F_f$  anteriormente citadas e afirma categoricamente a superioridade das expressões ( 2.9 ) e ( 2.10 ) de Kronenberg sobre as demais. Tal superioridade, segundo o referido pesquisador, foi avaliada por dois critérios:

o da precisão, isto é, pela diferença entre os valores medidos e os calculados para as expressões e o da simplicidade de cálculo pela qual sua aplicação prática seria mais fácil. Este último critério, o da simplicidade, pode ser desconsiderado nos dias de hoje, pela rapidez e precisão com que resultados podem ser obtidos mesmo a partir de expressões complexas. Mesmo com esses dois critérios de avaliação Daar sugeria que em trabalhos futuros fosse dada a preferência para a utilização das expressões gerais de Kronenberg em detrimento das outras ainda que mais simples mas muito menos precisas.

Mesmo as famosas expressões de Kienzle que originalmente tinham a pretensão de serem válidas para todos os processos convencionais de usinagem com exceção dos processos abrasivos, já não mais são indicadas para o cálculo de  $M_t$ , ou seja, não é correto determinar-se  $M_t$ , por exemplo, a partir de ( 2.4 ) conhecendo-se os valores de  $k_{sl}$  e  $z$  obtidos por torneamento. Se isso for feito, os resultados calculados serão bastantes discrepantes dos medidos, pelo menos para a furação em cheio. Weingaertner e Rocha [30], em trabalho recente, afirma textualmente "Quanto às forças de usinagem da furação em cheio, ficou claro que, de maneira alguma, são iguais às do processo de torneamento, como muitas vezes é enfatizado pela literatura".

As mais contundentes constatações de H. Daar, no entanto, se deram na crítica às expressões de Oxford e Shaw. Para ele, a

variação linear do momento de torção e da força de avanço em função da dureza Brinell do aço não se verifica. Como justificativa, o referido autor diz que a dureza Brinell não caracteriza com suficiente precisão as propriedades físicas do material usinado visto que, segundo Pankine [31], o trabalho de usinagem dos aços resulta de três fatores principais: o trabalho de deformação plástica do material ( participação em cerca de 60% a 85% ), o trabalho de cisalhamento do material ( 10 a 25% ) e trabalho de atrito ( 10 a 15% ). Sabe-se também, que com o aumento da dureza do material usinado, e portanto maior a fragilidade, o cavaco pode, em casos extremos, passar do tipo contínuo para o tipo ruptura. Neste caso a área de contacto cavaco-ferramenta será menor podendo reduzir os esforços de corte. Desta forma, descarta para trabalhos futuros as expressões de Oxford e Shaw.

A tabela 2.2 resume as principais expressões para o cálculo dos Esforços de Furação, em furação em cheio com brocas helicoidais para comodidade do leitor, já que são o principal enfoque deste trabalho.

Tabela 2.2 - Expressões para cálculo dos Esforços de Furação em furação em cheio com brocas helicoidais

Pesquisador	Expressão	Década
Boston e Gilbert	$M_t = k_1 . D^{1,8} . f^{0,78}$ $F_f = k_2 . D . f^{0,78}$	30
Kienzle e Victor	$M_t = k_{sl} . D^2 / 4 \text{sen}(\xi/2) [f/2 . \text{sen}(\xi/2)]^{1-z}$	50/60
Spur	$F_f = k_3 . D . h^{1-y_1}$	50/60
Oxford e Shaw	$M_t = 0,087 . HB . D^{1,8} . f^{0,8}$ $F_f = 0,195 . HB . D^{0,8} . f^{0,8} + 0,002 . HB . D^2$	50/60
Kronenberg	$M_t = k_4 . D^{x_1} . f^{y_2}$ $F_f = k_5 . D^{x_2} . f^{y_3}$ > (gerais) $M_t = k_6 . D^{1,8} . f^{0,8}$ > (simp) $F_f = k_7 . (D + 19)^{2,12} . f^{0,87}$	60

### 3 - APRESENTAÇÃO DE UM DINAMÔMETRO EXTENSOMÉTRICO PARA MEDIÇÃO DA FORÇA DE AVANÇO E DO TORQUE NO PROCESSO DE FURAÇÃO.

A construção de um dinamômetro para medição de esforços de usinagem se baseia num princípio de medida direta ou indireta destes esforços. No quadro 3.1 apresentam-se vários métodos e princípios usados na construção destes dinamômetros [32].

Quadro 3.1 - Métodos e princípios de construção de dinamômetros de usinagem

Medição dos esforços de usinagem		
Método	Princípio	
Direto	Piezoelétrico Magnetoestrutivo	
Indireto	Mecânico Pneumático Hidráulico Ótico	
	Elétrico	Indutivo Capacitivo Resistivo

Utilizando um destes princípios, vários pesquisadores desenvolveram os mais diferentes tipos de dinamômetros para a medição dos esforços de usinagem nos diferentes processos. Alguns desses princípios já se acham superados, entre os quais o mecânico, o pneumático e o hidráulico, usados até a década de 40 [33]. Outros, como o piezoelétrico, o magnetoestrutivo, o ótico

e o elétrico apresentam bons resultados e são usados alternativamente em cada caso de acordo com o custo e a precisão requerida. Em geral, os dinamômetros elétricos são mais simples e mais baratos que os outros três com confiança e precisão aceitáveis mesmo para pesquisas.

Especificamente sobre furação, apresenta-se a seguir uma relação dos mais importantes dinamômetros construídos até hoje do ponto de vista histórico.

O primeiro dinamômetro de furação que se tem referência foi o de BIRD e FAIRFIELD [34] que utilizava o princípio mecânico, desenvolvido em 1905. Os dinamômetros elétricos tiveram grande desenvolvimento a partir da década de 50 sendo que entre os indutivos destaca-se o desenvolvido por OPITZ [7]. GALLOWAY [13], em suas investigações utilizou dinamômetros elétricos capacitivos para brocas de pequenos diâmetros e dinamômetros elétricos indutivos para brocas de quaisquer diâmetros. Os primeiros dinamômetros elétricos resistivos para furação foram desenvolvidos por LOEWEN, SHAW e COOKS [35]. Este mesmo princípio foi também posteriormente empregado por outros pesquisadores importantes do processo de furação tais como SPUR [36], PANKINE [31] e DAAR [7]. O dinamômetro desenvolvido e utilizado neste trabalho também obedece ao mesmo princípio dos extensômetros elétricos. A diferença fundamental em relação aos anteriores, é que nele se empregam células de

carga extensométricas desenvolvidas por indústria especializada, enquanto que nos anteriores os extensômetros foram montados e posicionados pelos próprios pesquisadores. Na prática, isso facilita para o usuário, uma vez que as células de carga em questão são fabricadas em série como qualquer produto industrial de linha normal.

Entre os dinamômetros modernos de furação para medição de  $F_f$  e  $M_t$ , destacam-se os desenvolvidos por HATAMURA, NAGAO e WATANABE [37] e os desenvolvidos e produzidos industrialmente pela KISTLER [38]. No primeiro caso dois dinamômetros foram desenvolvidos: um ótico e outro extensométrico cujo sinal é enviado aos indicadores por telemetria. No segundo caso, emprega-se o princípio da piezoeletricidade. Nos dois casos os dinamômetros são bastantes precisos e de grande confiabilidade, mas apresentam o inconveniente do elevado custo.

Nas seções seguintes deste capítulo apresentam-se detalhes e características do dinamômetro extensométrico desenvolvido e utilizado neste trabalho.

### 3.1 -PRINCÍPIOS E DETALHES CONSTRUTIVOS DO DINAMÔMETRO.

Fundamentado na figura 2.1, foi projetado e construído para este trabalho, o dinamômetro anteriormente mencionado. A parte estrutural do projeto e demais componentes são mostrados nas figuras 3.1 e 3.2.

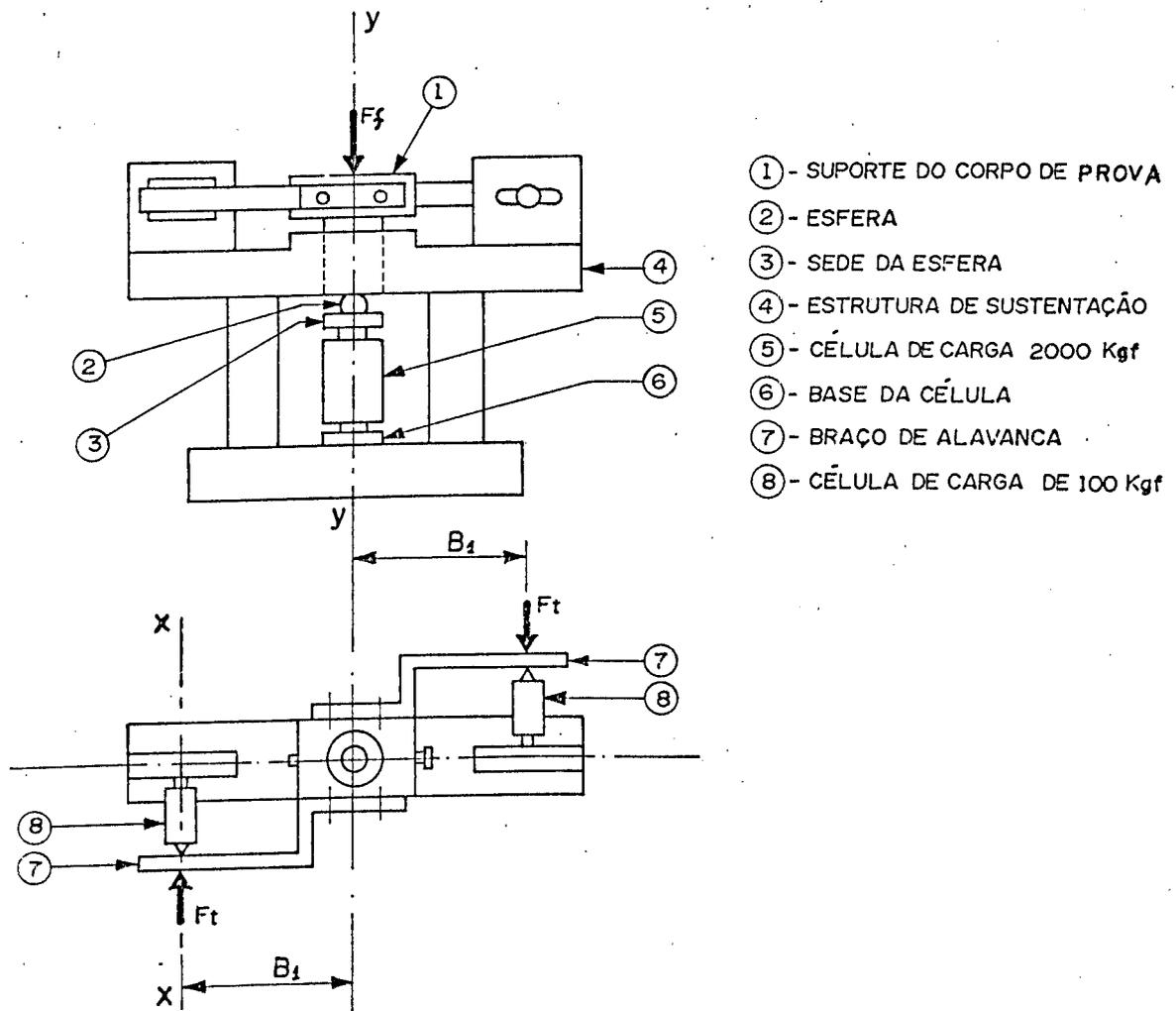


Fig. 3.1 - Partes estruturais e componentes do dinamômetro

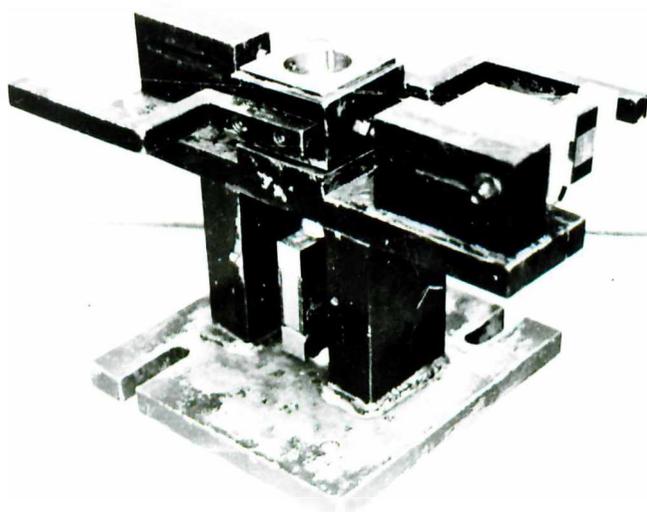


Fig. 3.2 - Vista geral do dinamômetro

Quando a broca atua no corpo de prova fixado no seu suporte, transmite a este uma força axial e um torque que sensibilizam as células de carga 5 e 8 respectivamente ( vide figura 3.1 ). A célula de carga 5 indica diretamente a Força de Avanço, e a célula de carga 8 mede uma força tangencial  $F_t$ , que multiplicada pelo braço de alavanca  $B_1$  dá o Momento de Torção  $M_t$ . O esquema de utilização dos indicadores de carga é mostrado na figura 3.3.

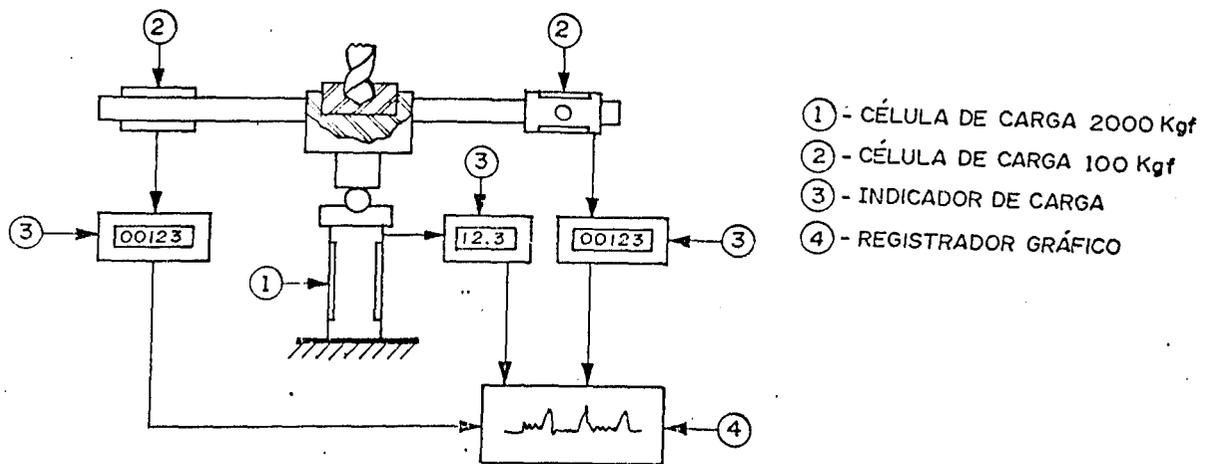


Fig. 3.3 - Esquema da utilização dos indicadores de carga

Por esse esquema, conta-se com a possibilidade de medir e registrar as indicações das três células de carga possibilitando uma série de vantagens na obtenção de dados no estudo do processo de furagem.

### 3.2 - CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS E METROLÓGICAS DO DINAMÔMETRO

No processo de furagem com brocas helicoidais as frequências de excitação do sistema broca-peça-sujeitador são pequenas [18], principalmente quando a rotação da broca esta abaixo de 1000rpm. No tocante aos esforços de furagem estes valores se situam entre 500 e 10000 N para a força de avanço e entre 1 e 50 Nm para o momento de torção, quando se usa brocas de diâmetros variando de 5 a 25 mm, usinando aços carbonos com médio teor de carbono.

Para determinar as características básicas de um bom dinamômetro [32] é necessário medir as frequências naturais mais

baixas e os fatores de amortecimento nas direções "principais", que no caso do dinamômetro em questão são as direções XX e YY (vide figura 3.1 ).

A figura 3.4 abaixo mostra os equipamentos usados e o fluxograma para a determinação das curvas das figuras 3.5 e 3.6, que representam as amplitudes pelas frequências de excitação do dinamômetro, geradas pela função de transferência.

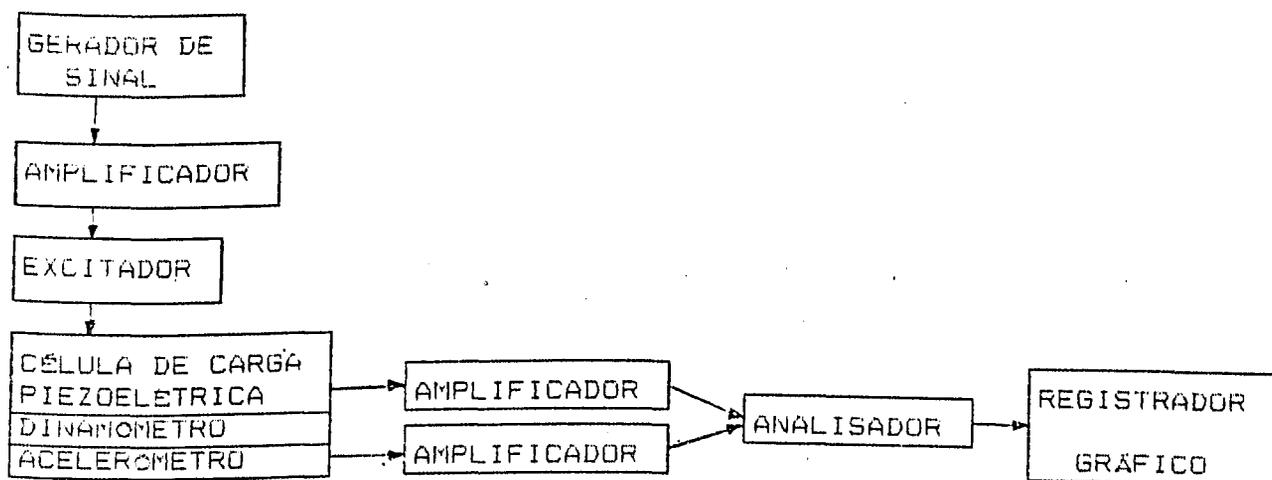


Fig. 3.4 - Fluxograma e equipamentos usados na determinação da frequência natural  $\omega_n$  e o fator de amortecimento  $\beta$

As condições dos ensaios foram:

- Força de entrada = ruído com banda 20 Hz a 2 KHz
- Sensibilidade da célula de carga piezoelétrica = 100 mv/N
- Frequência de corte do filtro = 1000 Hz
- Função de transferência = velocidade/força

SETUP 00:56:50    GRP TF    DUAL    VW 40DB CH AB    FR 1KHZ  
                   COH B/A    AVG    DG X1            WTG H A .5V B .5V

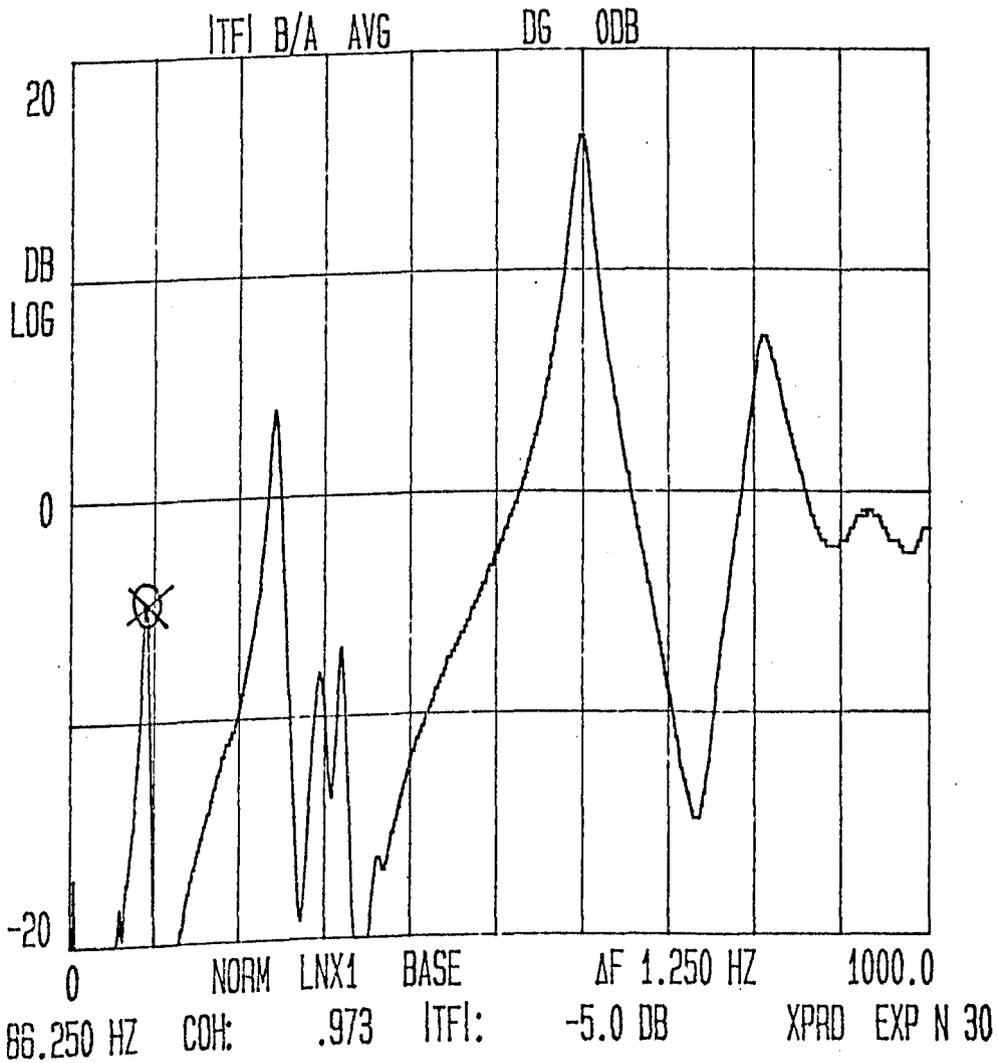
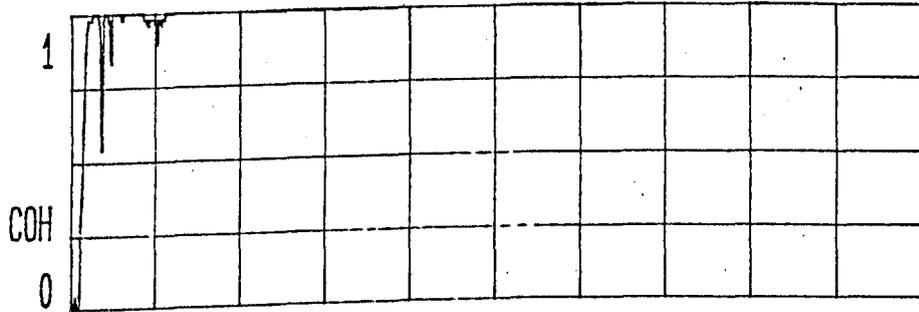
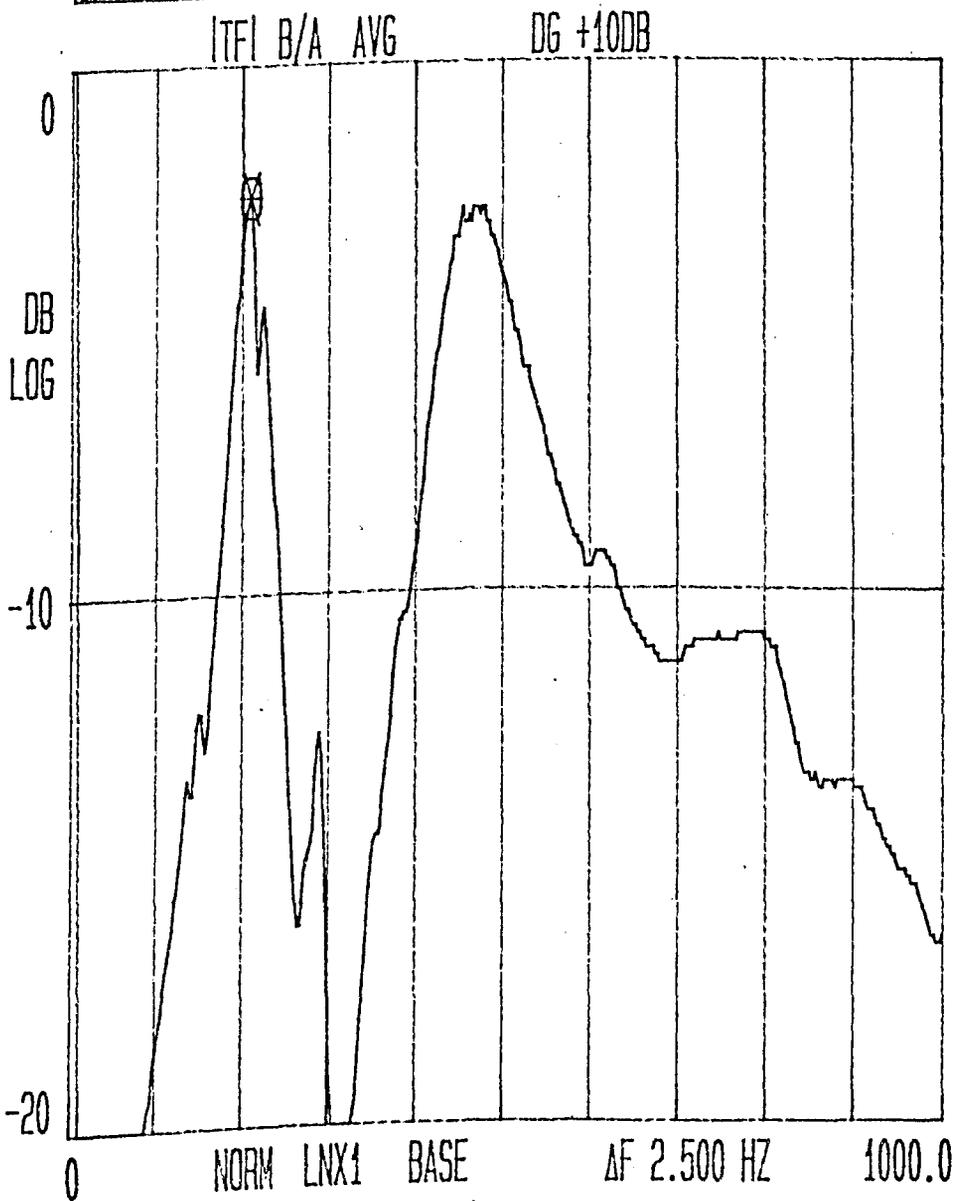
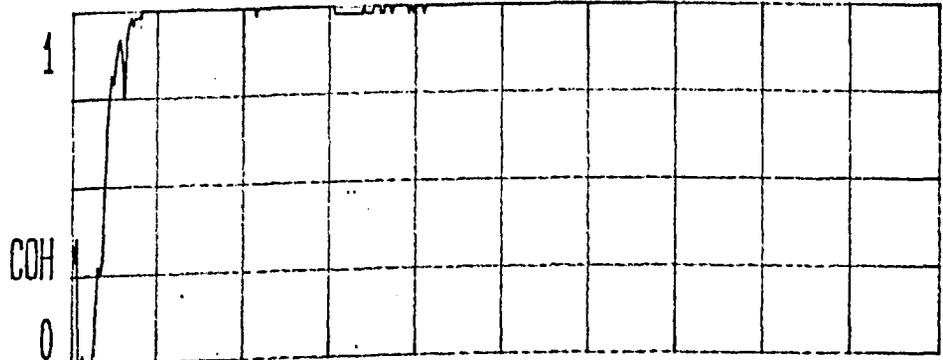


Fig. 3.5 - Frequências naturais do dinamômetro na direção XX

SETUP GRP TF DUAL VW 20DB CH AB FR 1KHZ  
 01:00:33 COH B/A AVG DG X40 WTG H A .5V B .1V



207.50 HZ COH: .986 ITFI: -2.4 DB XPRD EXP N 50

Fig. 3.6 - Frequências naturais do dinamômetro na direção YY

Conhecendo as frequências naturais e a largura das bandas foram determinados os fatores de amortecimento  $\beta$  [39] nas duas direções. Os resultados dos ensaios nos levaram aos valores apresentados na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Frequências naturais e fator de amortecimento do dinamômetro

Direção >	XX	YY
Frequência natural $\omega_n$ ( Hz )	85,6	207,5
Fator de amortecimento $\beta$	0,03	0,05

Considerando o erro relativo de amplitude  $E_r$ , sendo

$$E_r = ( \phi - 1 ) \cdot 100\% \quad ( 3-1 )$$

e o fator de amplificação  $\phi$  sendo

$$\phi = \frac{1}{( 1 - \omega^2/\omega_n^2 )^2 + ( 2 \cdot \beta \cdot \omega / \omega_n )^2} \quad ( 3-2 )$$

onde  $\omega$  é a frequência de excitação, foram feitos os gráficos das figuras 3.7 e 3.8 que representam a variação do erro relativo  $E_r$  em função da relação  $\omega/\omega_n$  nas direções XX e YY do dinamômetro.

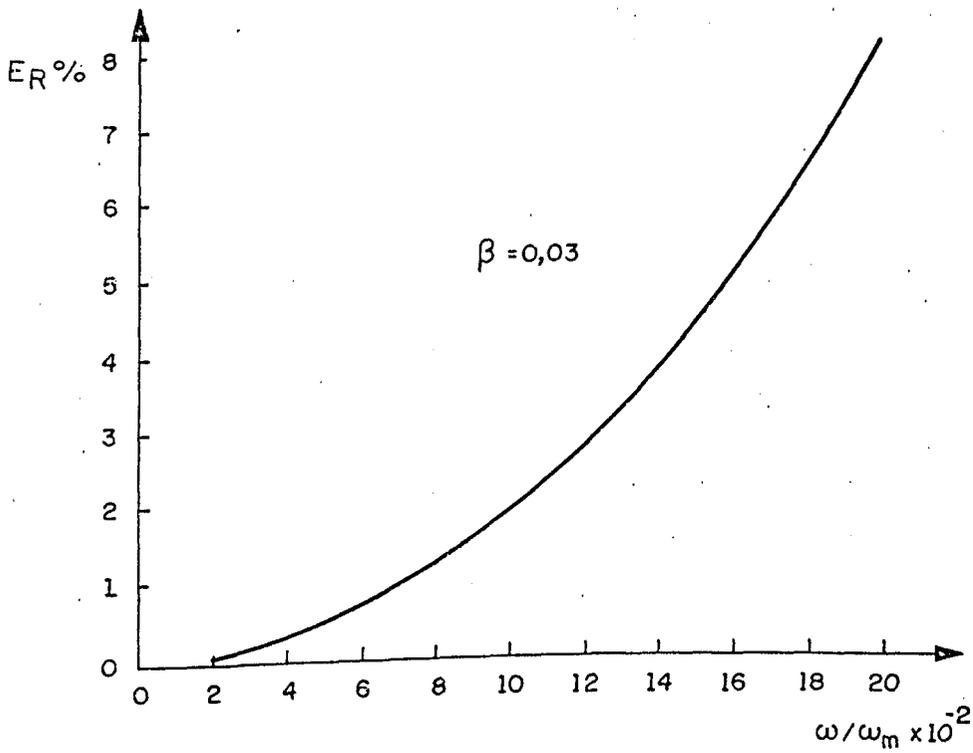


Fig. 3.7 - Variação do erro relativo  $E_r$  x variação da frequência excitadora na direção XX

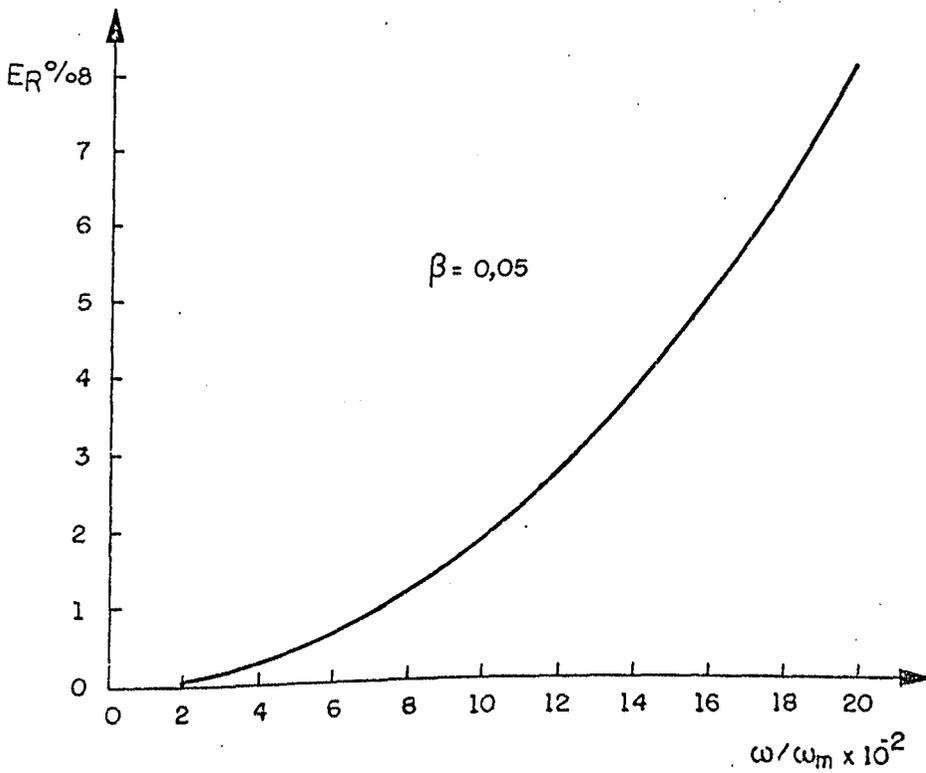


Fig. 3.8 - Variação do erro relativo  $E_r$  x variação da frequência excitadora na direção YY

Considerando, que neste trabalho, a rotação máxima utilizada na furação é de 920 rpm, pode-se dizer que a frequência de excitação máxima imposta sobre o dinamômetro está em torno de 15 Hz, o que nos faz esperar que os erros cometidos nas direções XX e YY estejam abaixo de 6% e 2% respectivamente.

As demais características físicas e metrológicas do dinamômetro são:

- Dimensões 420 x 280 x 265mm
- Peso = 300 N

Dimensões do corpo de prova = cilíndrico  $\phi$  50 x 30mm

Capacidade na medição da força de avanço = 20.000 N

Capacidade na medição do momento de torção = 180 Nm

Rotação máxima da broca para erros abaixo de 8% = 1000 rpm

### 3.3 - CALIBRAÇÃO DO DINAMÔMETRO

Como os indicadores de carga usados no dinamômetro só deixam passar frequências baixas, devido a atuação dos filtros e estas frequências são no máximo 7 Hz, podemos considerar os valores lidos nos indicadores de carga como sendo valores provocados por cargas quase estáticas. Baseado nisto, a calibração do dinamômetro foi realizada usando cargas estáticas conhecidas atuando nas células de carga e fazendo as leituras dos valores mostrados nos indicadores de carga. Com a relação conhecida da carga aplicada  $P_a$  e a carga indicada  $P_i$  foram levantadas as

curvas de calibração como mostra as figuras 3.9 e 3.10.

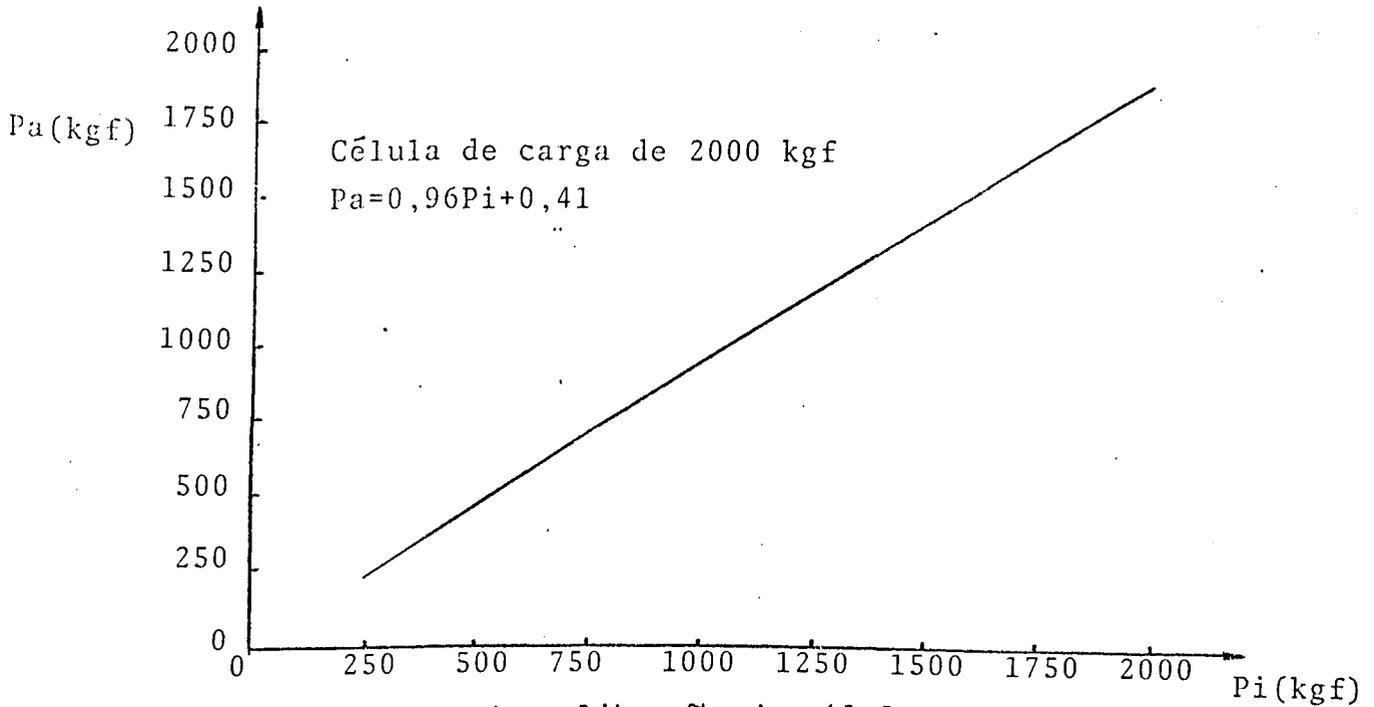


Fig. 3.9 - Curva de calibração da célula de carga de 100 kgf

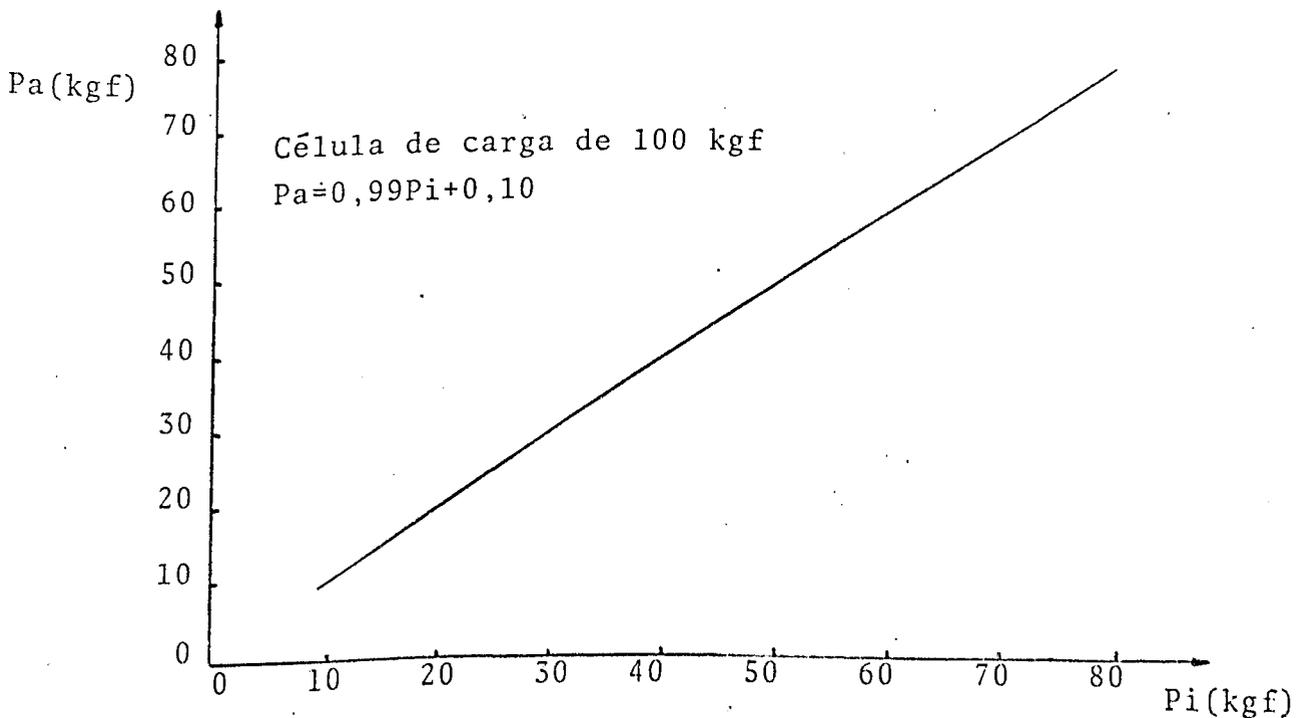


Fig. 3.10 - Curva de calibração da célula de carga de 2000 kgf

Foram feitos pré testes com o dinamômetro e os resultados

divulgados em trabalhos científicos do autor [5,16], sendo contudo a sua utilização mais importante a determinação dos Esforços de Furação apresentados neste trabalho.

#### 4 - FORÇA DE AVANÇO E MOMENTO DE TORÇÃO PARA ALGUNS AÇOS NACIONAIS.

Conforme comentários feitos no capítulo 2, apenas as expressões empíricas gerais de Kronenberg ( 2.9 e 2.10 ) são recomendáveis para determinação dos esforços de furação  $F_f$  e  $M_t$ . Além de considerar essas referidas expressões, neste trabalho também serão utilizadas as expressões simplificadas do referido pesquisador, ou seja, as expressões 2.11 e 2.12. Serão consideradas, também, as expressões 2.5 de Kienzle e 2.6 de Spur embora, pelas considerações de outros pesquisadores [7], não devam mais serem empregadas para determinação dos referidos esforços de furação, pela pouca confiabilidade que apresentam. Assim sendo foram abandonadas, neste trabalho, expressões antigas tais como as de Oxford e Shaw ( 2.7 e 2.8 ) e Boston e Gilbert ( 2.2 e 2.3 ).

Nas seções seguintes são apresentados a metodologia dos ensaios, os resultados experimentais e uma discussão desses resultados.

##### 4.1 - METODOLOGIA DOS ENSAIOS

De acordo com a figura 4.1, tem-se o seguinte fluxograma dos trabalhos relacionados com os ensaios experimentais para determinação dos Esforços de Furação.

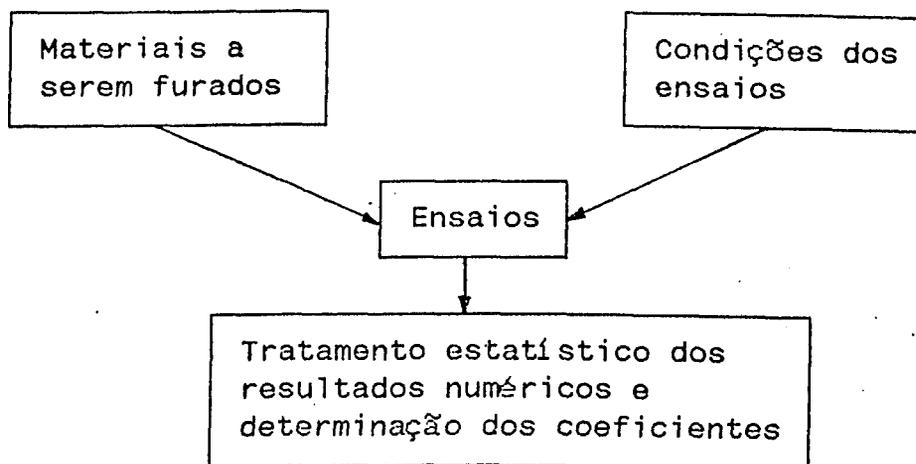


Fig. 4.1 - Fluxograma de trabalho para determinação dos resultados experimentais

#### 4.1.1 - MATERIAIS ENSAIADOS

Foram escolhidos para os ensaios cinco aços nacionais, sendo quatro aços carbonos ( ABNT 1015, ABNT 1035, ABNT 1045, ABNT 1050 ) e um aço liga ( ABNT 8630 ). Com a necessidade de se ter o conhecimento da composição química, microestrutura, tratamento térmico e propriedades mecânicas desses aços, foram realizadas várias análises para identificações. Para isto foram feitos corpos de prova tirados da parte central das barras dos referidos aços, esperando que esta parte poderia representar a estrutura ao longo da barra.

A análise química foi executada pela empresa Komatsu, a qual empregou, para análise, o método da espectrofotometria; as análises de microestrutura, dureza e tratamento térmico foram realizadas no laboratório do departamento de física da U.F.U.;

as análises das propriedades mecânicas como limite de escoamento, limite de resistência, alongamento e estrição foram realizadas com a utilização da máquina de teste M.P.A. do laboratório de comportamento mecânico do departamento de engenharia mecânica da U.F.U.

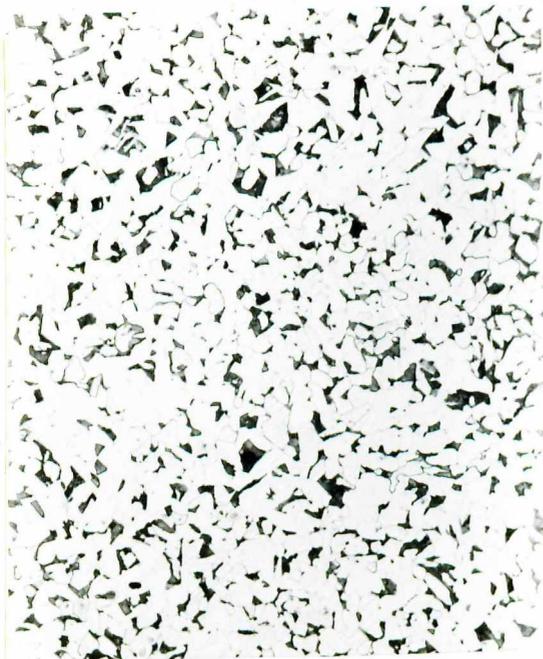
Os resultados laboratoriais são apresentados nas tabelas 4.1 e 4.2 e nas fotografias 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6.

Tabela 4.1 - Composição química dos aços ensaiados

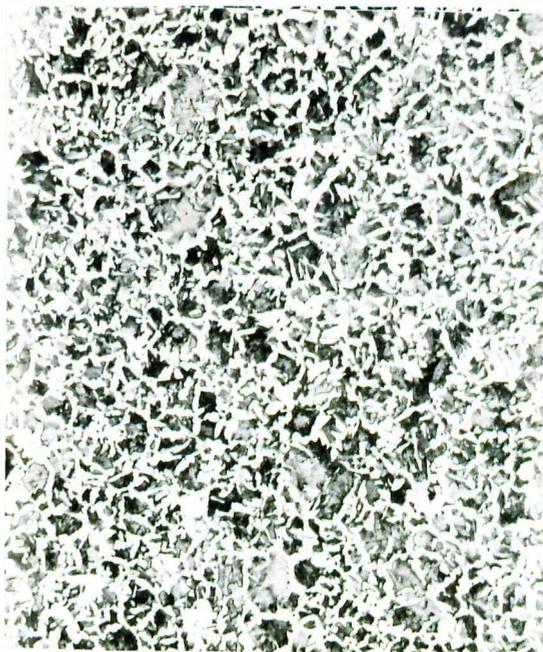
Material	Composição Química												Tratam. térmico
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Sn	Al	
A.B.N.T.													Normal.
1015	.15	.14	.37	.019	.012	.035	.030	-	-	.041	.03	-	Normal.
1035	.35	.23	.72	.018	.022	.009	.028	-	.016	.039	.03	-	Normal.
1045	.45	.27	.64	.030	.013	.036	.033	-	.020	.039	.03	.02	Normal.
1050	.51	.22	.75	.027	.015	.028	.035	-	.016	.039	.03	.05	Normal.
8630	.34	.21	.75	.020	.009	.428	.398	.14	.022	.035	.03	.05	Normal.

Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas dos aços ensaiados

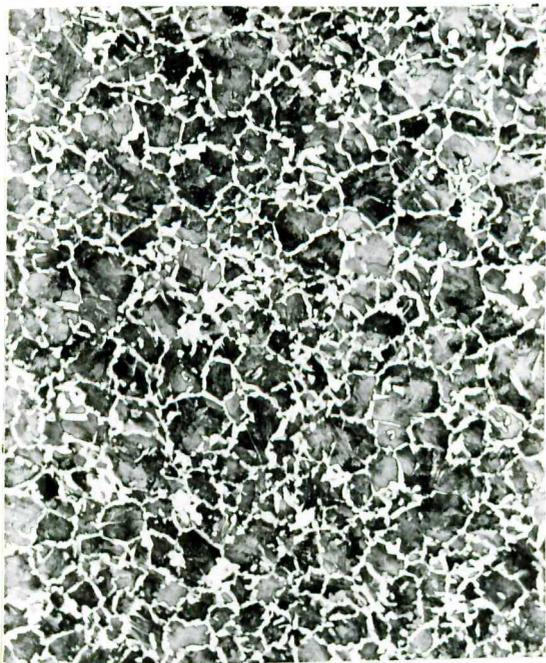
Material	Propriedades mecânicas					
	Especific. A.B.N.T.	Resistência N/mm <sup>2</sup>	Escoamento N/mm <sup>2</sup>	Alongamento N/mm <sup>2</sup>	Estricção %	Dureza HB
1015		409,14	229,94	22,40	62,03	122
1035		592,17	327,95	16,19	47,44	182
1045		697,75	364,73	20,10	34,70	211
1050		758,01	756,43	7,20	21,88	229
8630		680,76	404,10	15,40	52,99	219



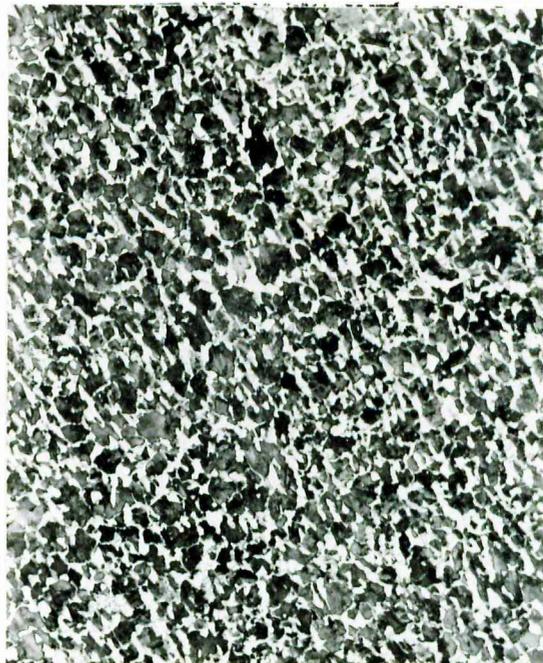
Fotografia 4.2 - Aço ABNT 1015  
aumento 150x



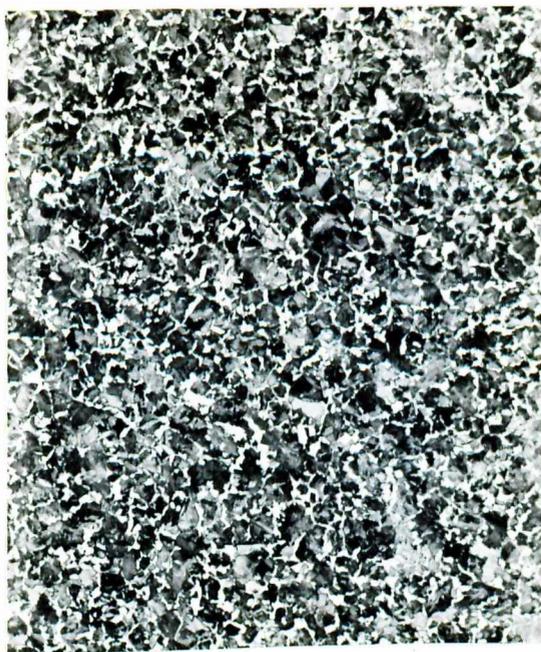
Fotografia 4.3 - Aço ABNT 1035  
aumento 150x



Fotografia 4.4 - Aço ABNT 1045  
aumento 150x



Fotografia 4.5 - Aço ABNT 1050  
aumento 150x



Fotografia 4.6 - Aço ABNT 8630  
aumento 150x

Foram confeccionados 320 corpos de prova cilíndricos de diâmetro 50mm e altura 30mm, sendo 60 corpos de prova para cada tipo de aço.

#### 4.1.2 - CONDIÇÕES DOS ENSAIOS

Nos ensaios realizados foi utilizado uma furadeira de coluna marca Kone, modelo K 40 em estado semi novo de uso e trinta brocas helicoidais em aço rápido, sendo dez de diâmetro 6,35mm, dez de diâmetro 12,7mm e dez de diâmetro 19,05mm. As condições de afiação das brocas foram as mesmas usadas na sua afiação original ou seja, ângulo de hélice  $\theta = 30^\circ$ , ângulo da ponta  $\xi = 118^\circ$ , ângulo de incidência  $\alpha_n = 8^\circ$  e ângulo da aresta transversal de corte  $\psi = 45^\circ$ .

As variáveis de corte usadas nos ensaios são mostrados no

quadro 4.1 abaixo.

Quadro 4.1 - Variáveis de corte usadas nos ensaios

Diâmetro da broca (mm)	Rotação da broca (rpm).	Avanço da broca (mm/volta)
6.35	580 920	0.062
		0.116
		0.243
		0.365
12.7	430 580 920	0.062
		0.116
		0.243
		0.365
19.05	280 430 580	0.062
		0.116
		0.243
		0.365

As rotações e os avanços mostrados no quadro acima são as rotações e os avanços reais da furadeira, medidos com a utilização de um tacômetro ótico e um cronômetro.

Todos os furos foram usinados utilizando como refrigerante/lubrificante óleo solúvel e água, na proporção de uma parte de óleo solúvel para dez partes de água, sendo a mistura aplicada com grande vazão e baixa velocidade.

#### 4.1.3 - ENSAIOS

Na realização dos ensaios, foram usinados trezentos e vinte furos, sendo que para cada situação ( material ensaiado, diâmetro, rotação e avanço da broca ) foram feitos dois furos, e isto nos levou a usinar oito furos por broca de diâmetro 6,35mm, doze furos por broca de diâmetro 12,7mm e doze furos por broca de diâmetro 19,05mm. As brocas utilizadas estavam com a afiação original de fábrica. Durante a usinagem foi tomado o cuidado de primeiro injetar o lubrificante/refrigerante antes da broca tocar o corpo de prova.

Nos pré-testes com o dinamômetro foram usados os indicadores de cargas digitais e o registrador gráfico como mostra a figura 3.3 do capítulo anterior, sendo observado, como era de esperar, uma grande coerência nos valores mostrados pelos diferentes equipamentos. Neste trabalho, para efeito de simplificação, não foi usada uma das células de carga de 100 kg e o indicador gráfico. As leituras foram tomadas visualmente dos indicadores da célula de carga que mede a força tangencial  $F_t$  e do indicador da célula de carga que mede a força de avanço  $F_f$ . Durante a penetração da broca no corpo de prova foram tomados em média cinco valores indicados para cada célula de carga para cada situação de ensaio, tendo o cuidado de ler valores somente quando toda aresta principal de corte da broca estivesse atuando.

#### 4.1.4 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS E DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES

Como, em média, foram tomados cinco leituras dos esforços para cada furo executado e sendo dois furos para cada situação de ensaio, são em média dez valores de esforços lidos para cada situação de ensaio. Com esses valores foi calculada a média aritmética  $F_f$  e o desvio padrão  $\sigma_{Ff}$  para a força de avanço e a média aritmética  $M_t$  e o desvio padrão  $\sigma_{Mt}$  para o momento de torção.

De posse dos valores das forças de avanço e momentos de torção, no total trinta e dois valores para cada material ensaiado, se fez a determinação dos coeficientes das expressões 2.5 e 2.6 de Kienzle, Victor, Spur e das expressões 2.9, 2.10, 2.11 e 2.12 de Kronenberg. Aplicando logarítmico nas expressões citadas e recorrendo à regressão polinomial, baseada no método dos mínimos quadrados foram determinados os coeficientes daquelas expressões.

#### 4.2 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Apresentam-se nas tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 os resultados experimentais obtidos nos ensaios de furação e na tabela 4.6 os coeficientes das expressões de Spur, Kienzle e Kronenberg obtidos para os aços estudados.

Tabela 4.3 - Força de Avanço Ff e Momento de Torção Mt  
( broca de diâmetro 6,35mm )

R.P.M. da broca	580	580	580	580	920	920	920	920	
Avanço (mm/v)	.062	.116	.243	.365	.062	.116	.243	.365	
ABNT 1015	Ff (N)	510	878	1607	2270	526	943	1933	2807
	$\sqrt{Ff}$	65	21	31	45	30	70	70	55
	Mt (Nm)	1.1	1.8	3.8	6.1	1.1	2.0	4.3	7.0
	$\sqrt{Mt}$	.09	.11	.16	.34	.05	.09	.12	.23
ABNT 1035	Ff (N)	617	993	1791	2645	679	1026	1998	2941
	$\sqrt{Ff}$	12	14	19	71	14	14	25	126
	Mt (Nm)	1.1	1.8	3.7	6.5	1.2	2.0	3.9	5.4
	$\sqrt{Mt}$	.12	.07	.07	.32	.12	.09	0	.73
ABNT 1045	Ff (N)	777	1352	2480	3525	699	1056	2104	2861
	$\sqrt{Ff}$	69	37	31	115	11	24	195	59
	Mt (Nm)	1,22	2.0	3.7	5.8	1.13	2.0	4.0	6.2
	$\sqrt{Mt}$	.21	.11	.05	.18	.09	.09	.09	.29
ABNT 1050	Ff (N)	641	1023	1726	3222	749	1079	2141	2821
	$\sqrt{Ff}$	20	16	82	14	58	40	79	41
	Mt (Nm)	1.1	1.9	3.4	6.0	1.2	2.0	3.9	5.6
	$\sqrt{Mt}$	0	.09	.48	.09	.09	.12	.14	0
ABNT 8630	Ff (N)	746	1038	1866	2934	804	1090	2057	2744
	$\sqrt{Ff}$	16	24	14	73	23	87	106	38
	Mt (Nm)	1.3	2.1	3.9	5.3	1.3	2.0	3.9	6.4
	$\sqrt{Mt}$	.09	.09	.16	.95	.09	.13	.11	.27

Tabela 4.4 - Força de Avanço Ff e Momento de Torção Mt  
( broca de diâmetro 12,7mm )

R.P.M. da Broca	430	430	430	430	580	580	580	580	920	920	920	920	
Avanço (mm/v)	.062	.116	.243	.365	.062	.116	.243	.365	.062	.116	.243	.365	
ABNT 1015	Ff (N)	1152	1777	2769	3944	1143	1824	2668	3773	1155	1968	3119	4524
	$\sqrt{Ff}$	89	43	248	332	55	102	169	103	86	87	127	201
	Mt (Nm)	5.3	8.3	15.0	23.1	5.5	8.7	15.3	22.3	5.2	8.8	16.4	24.9
	$\sqrt{Mt}$	.48	.61	.75	.07	.62	.29	.63	.27	.63	.23	.36	1.26
ABNT 1035	Ff (N)	1209	1779	2945	4270	1268	1733	3003	4329	1254	1704	3398	4634
	$\sqrt{Ff}$	79	40	48	48	38	45	101	94	50	45	116	79
	Mt (Nm)	4.1	7.09	12.9	18.6	4.2	6.9	13.2	19.0	4.2	7.3	13.8	18.3
	$\sqrt{Mt}$	.16	.57	.36	.30	.18	.16	.27	.81	.41	.09	.36	1.40
ABNT 1045	Ff (N)	1173	1721	2996	4344	1204	1687	3006	4192	1111	1592	3203	4363
	$\sqrt{Ff}$	26	67	108	68	30	69	57	169	46	33	65	0
	Mt (Nm)	4.0	6.8	12.6	19.0	4.2	6.4	12.9	18.8	3.8	6.8	13.4	17.7
	$\sqrt{Mt}$	.32	.21	.41	.03	.30	.57	.30	1.04	.39	.38	.63	.68
ABNT 1050	Ff (N)	1156	1851	2964	4340	1264	1857	2769	4000	1094	1591	3393	4411
	$\sqrt{Ff}$	54	41	113	85	30	55	141	226	16	50	44	79
	Mt (Nm)	4.2	6.5	12.5	18.9	4.6	7.2	12.7	19.5	4.2	6.5	13.3	18.2
	$\sqrt{Mt}$	.11	.11	.29	.70	.18	.27	.27	1.58	.48	.68	.22	.34
ABNT 8650	Ff (N)	1171	1720	2813	4026	1138	1685	2755	3644	984	1599	2853	3836
	$\sqrt{Ff}$	20	43	58	133	30	53	52	136	65	32	73	0
	Mt (Nm)	4.3	6.8	12.8	18.4	4.4	7.0	13.6	18.2	4.1	7.4	13.2	18.3
	$\sqrt{Mt}$	.18	.25	.22	.59	.18	.18	.38	.09	.36	.39	.57	.40

Tabela 4.5 - Força de Avanço Ff e momento de Torção Mt  
( broca de diâmetro 19,05mm )

R.P.M. da Broca	280	280	280	280	430	430	430	430	580	580	580	580	
Avanço (mm/v)	.062	.116	.243	.365	.062	.116	.243	.365	.062	.116	.243	.365	
ABNT 1015	Ff (N)	1831	2819	4372	5903	1946	2639	4567	6526	1592	2563	4162	6819
	$\bar{F}f$	59	88	99	131	44	201	89	79	71	96	234	80
	Mt (Nm)	11.5	17.8	29.3	40.6	11.0	17.5	28.8	43.2	10.7	17.8	30.1	43.7
	$\bar{M}t$	.79	.99	.90	.70	.65	.41	.70	1.58	.52	1.09	.72	.66
ABNT 1055	Ff (N)	1552	2289	3802	5645	1490	2209	3901	5841	1527	2343	4329	6505
	$\bar{F}f$	60	124	119	170	43	137	295	159	52	150	85	74
	Mt (Nm)	9.2	15.0	27.2	38.4	9.5	15.3	25.0	36.0	8.1	14.1	27.0	37.8
	$\bar{M}t$	.63	.90	1.40	1.24	.29	.91	1.38	1.22	.39	.66	.79	.48
ABNT 1045	Ff (N)	2160	3014	4544	6372	1992	2622	4639	6872	2191	3228	5399	7886
	$\bar{F}f$	63	95	322	266	158	268	210	132	232	288	286	173
	Mt (Nm)	11.4	16.0	27.3	39.7	10.4	16.0	29.1	38.3	9.8	16.8	27.6	38.9
	$\bar{M}t$	.72	.57	1.08	.90	.68	1.36	.54	1.20	1.95	1.43	2.06	.52
ABNT 1050	Ff (N)	2625	3752	5930	8228	2668	3875	5296	8321	2685	3925	7325	9613
	$\bar{F}f$	132	100	188	147	224	471	356	280	236	291	206	49
	Mt (Nm)	9.8	15.4	27.8	39.5	9.4	16.2	27.5	41.1	10.9	19.0	29.5	40.2
	$\bar{M}t$	1.02	1.17	.70	.41	.91	1.45	2.44	1.52	1.31	2.78	1.08	.68
ABNT 8650	Ff (N)	1768	2594	4173	5845	1695	2412	4424	6747	2378	3211	5791	8005
	$\bar{F}f$	82	97	300	107	87	202	297	28	266	184	107	183
	Mt (Nm)	8.9	14.5	25.9	37.2	9.04	14.4	28.6	40.1	12.1	18.0	27.5	41.4
	$\bar{M}t$	.56	.70	.63	.54	.65	.82	2.80	.66	1.18	.81	2.87	.36

Tabela 4.6 - Coeficiente das expressões de Spur, Kienzle e Kronenberg para as condições e aços ensaiados

Material A.B.N.T.	Expressão de Spur		Expressão de Kienzle		Expressões Simplificadas de Kronenberg		Expressões gerais de Kronenberg					
	Ff (2.6)		Mt (2.5)		Ff (2.12)	Mt (2.11)	Ff (2.10)			Mt (2.9)		
	k <sub>3</sub>	1-y <sub>1</sub>	K <sub>s1</sub>	1-z	k <sub>7</sub>	k <sub>6</sub>	k <sub>5</sub>	x <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	k <sub>4</sub>	x <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>
1015	137	.75	222	.84	.66	48.0	84	.94	.75	39	1.92	.84
1035	143	.76	198	.85	.63	42.3	150	.73	.76	47	1.80	.85
1045	150	.74	192	.83	.72	44.3	137	.79	.74	41	1.85	.83
1050	154	.72	191	.83	.89	45.7	66	1.1	.72	36	1.89	.83
8630	134	.72	182	.81	.70	44.3	117	.81	.72	45	1.79	.81

#### 4.3 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A influência da velocidade de corte, como era de se esperar, é pequena na determinação dos esforços de furação. Como exemplo as figuras 4.7 e 4.8, confeccionadas de dados da tabela 4.5, nos mostra a variação dos esforços de furação com a velocidade de corte, para o aço ABNT 1050. Neste caso há uma variação nos esforços em média de 10 a 13%.

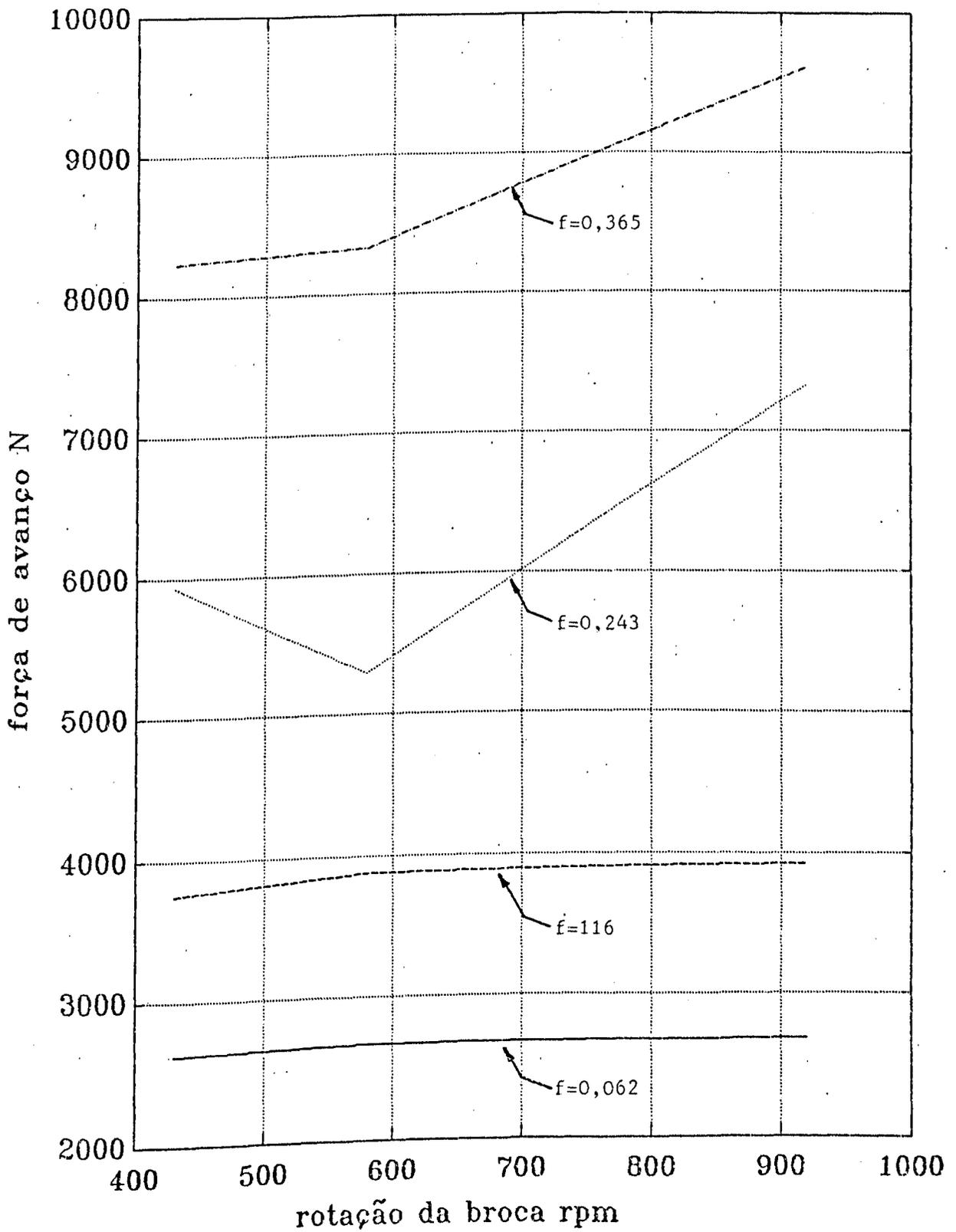


Fig.4.7 - Força de avanço x velocidade de corte  
( aço ABNT 1050, diâmetro da broca 19.05 mm )

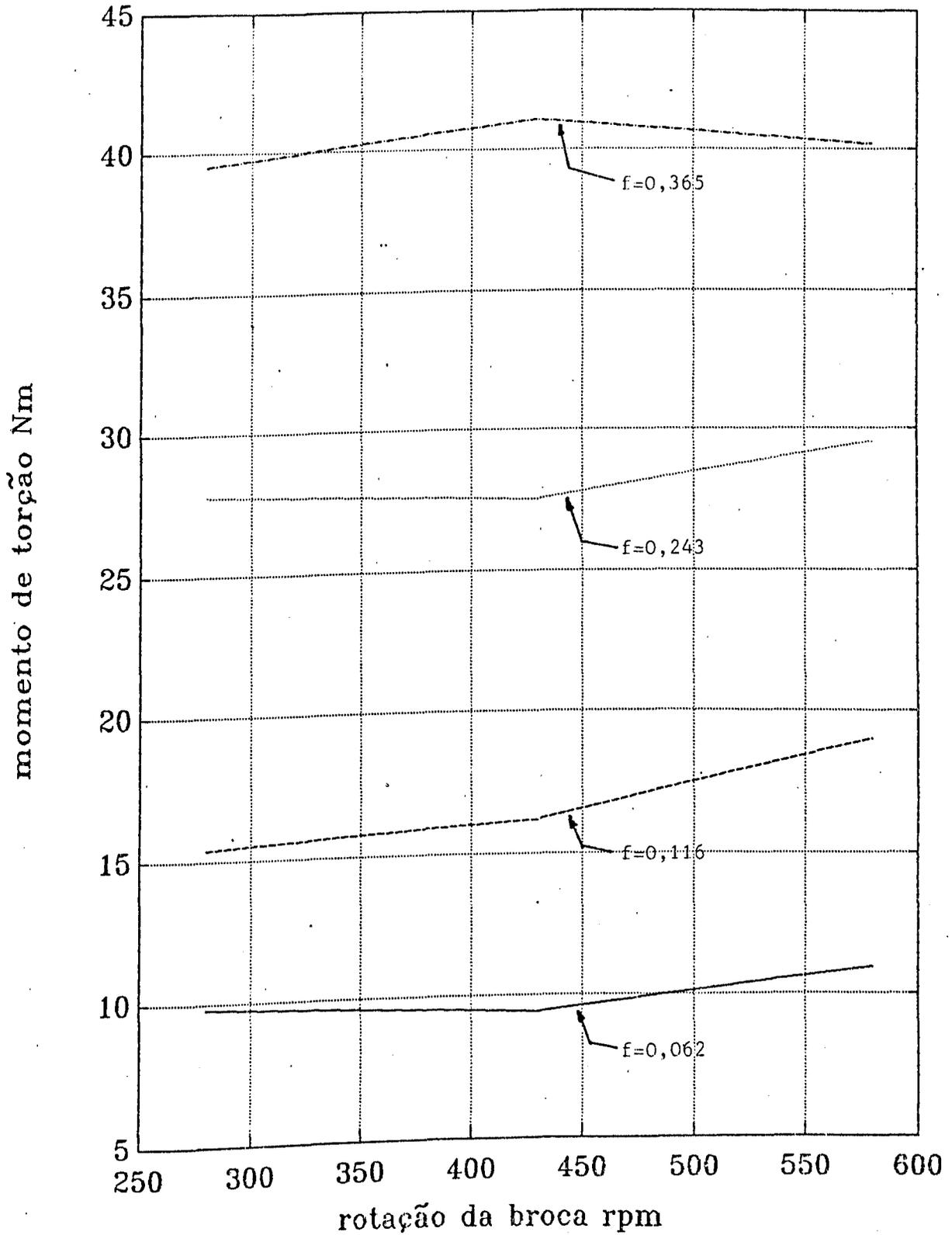


Fig. 4.8 - Momento de torção x velocidade de corte  
( aço ABNT 1050, diâmetro da broca 19.05 mm )

As figuras 4.9 e 4.10 apresentam graficamente os esforços de corte calculados através das expressões de Spur, Kienzle e Kronenberg com os coeficientes da tabela 4.6, para o aço ABNT 1050, tomado como referência. Pode-se notar que para a força de avanço a expressão geral de Kronenberg é a que mais se aproxima dos valores medidos ( vide figura 4.9 ). Para o momento de torção as expressões simplificadas e geral de Kronenberg são as que mais se aproximam dos valores medidos ( vide figura 4.10 ).

Houve uma necessidade de trabalhar no sistema de unidades M.K.S., a partir da figura 4.9, devido a citação de pesquisadores estar neste sistema.

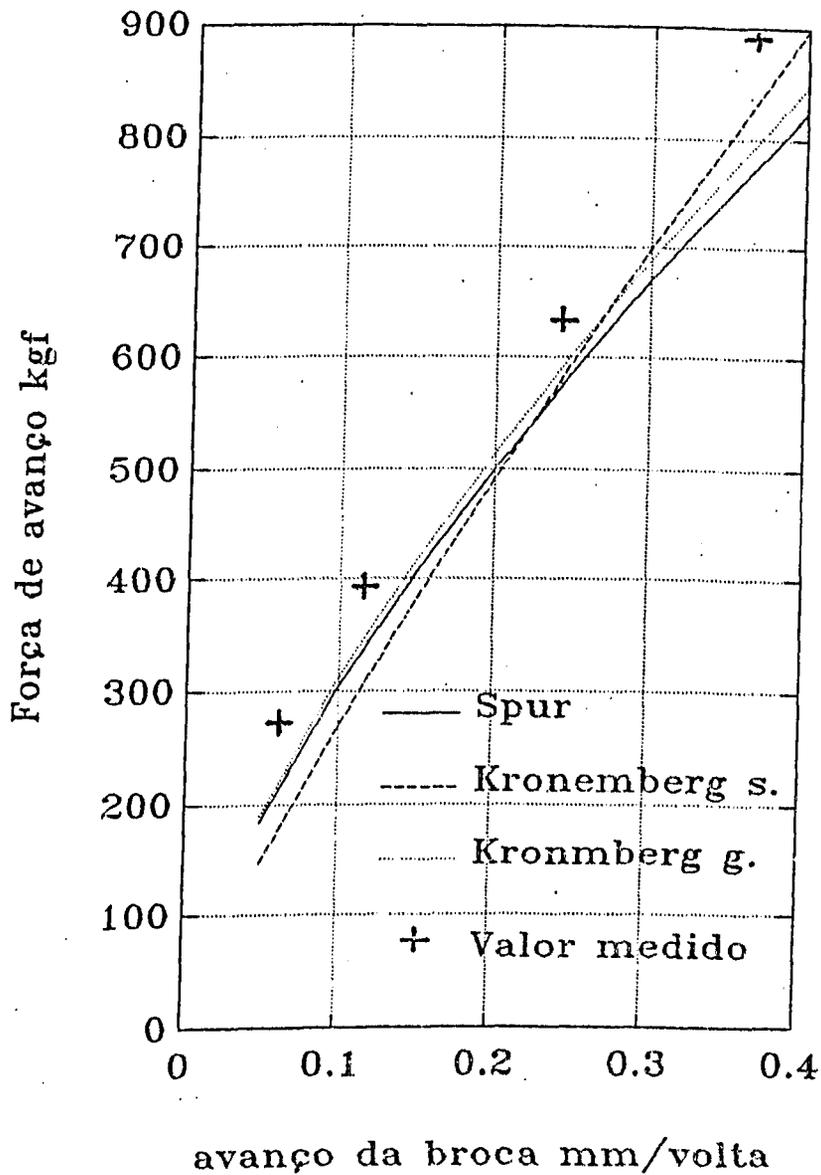


Fig. 4.9 - Representação gráfica das forças de avanço derivadas das tabelas 4.5 e 4.6 ( aço ABNT 1050, diâmetro da broca 19.05 mm )

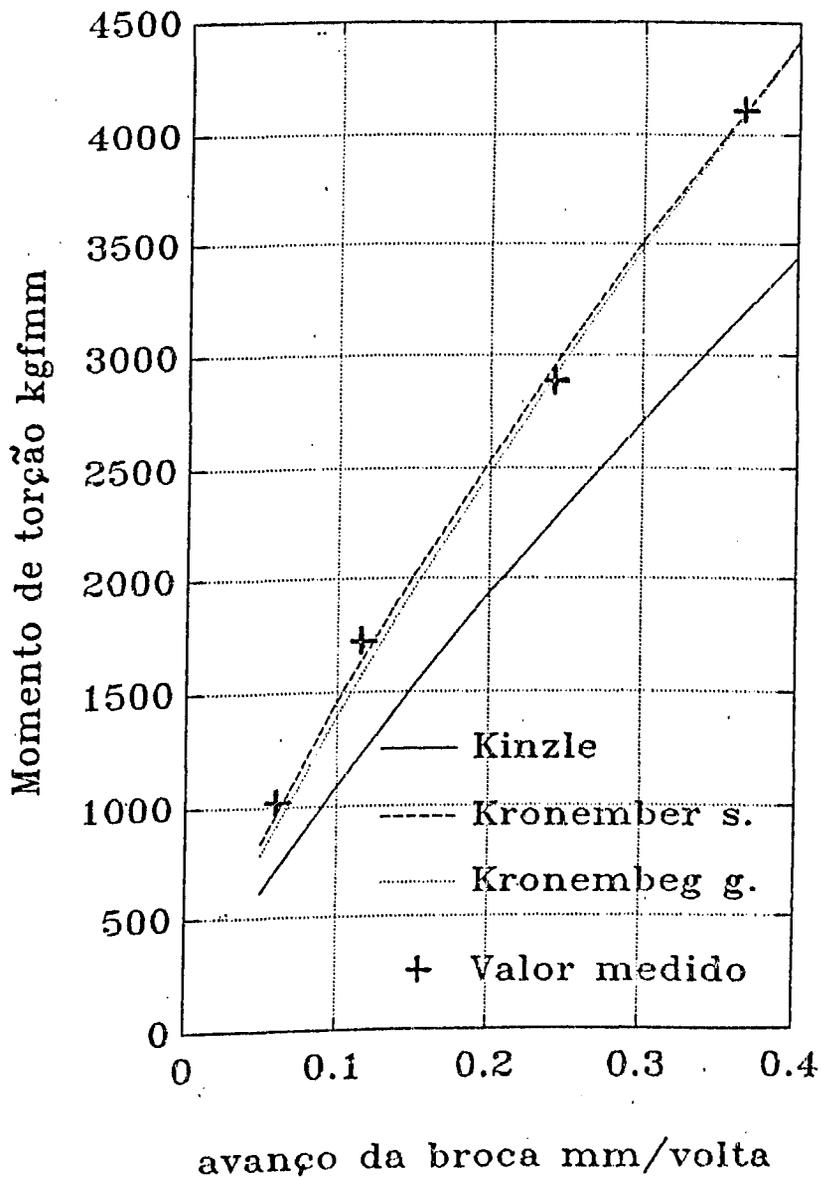


Fig. 4.10 - Representação gráfica dos momentos de torção derivados das tabelas 4.5 e 4.6 ( aço ABNT 1050, diâmetro da broca 19.05 mm )

A tabela 4.7 apresenta os coeficientes das expressões em

referência obtidos pelo autor e por outros pesquisadores, sendo que os coeficientes da fórmula de Kienzle apresentados por Ferraresi foram obtidos em ensaios de torneamento.

Tabela 4.7 - Coeficientes das expressões de Spur, Kienzle e Kronenberg obtidos pelo autor e por outros pesquisadores.

FONTE	MATERIAL			Expres. de Spur		Expres. de Kienzle		Expres. simpl. de Kronemb.		Expressões gerais de Kronenberg.					
				Ff		Mt		Ff	Mt	Ff			Mt		
	ABNT	$\sigma_t$ N/mm <sup>2</sup>	DUREZA HB	$k_s$	1-y	$k_{sl}$	1-z	$k_7$	$k_6$	$k_5$	$x_2$	$y_3$	$k_4$	$x_1$	$y_2$
FONSECA	1015	409	122	137	.75	222	.84	.66	48.0	84	.94	.75	39	1.92	.84
	1035	592	182	143	.76	198	.85	.63	42.3	150	.73	.76	47	1.80	.85
	1045	698	211	150	.74	192	.83	.72	44.3	137	.79	.74	41	1.85	.83
	1050	758	229	154	.74	191	.83	.89	45.7	66	1.09	.72	36	1.89	.83
	8630	681	219	134	.72	182	.81	.70	44.3	117	.81	.72	45	1.79	.81
DAAR	1020	377	115	151	.66	191	.77	1.11	64.3	33	1.32	.65	15	2.22	.76
	1025	441	148	117	.64	158	.75	.85	48.4	33	1.21	.60	38	1.87	.77
	1055	766	244	105	.61	148	.77	.85	43.2	22	1.32	.54	22	2.01	.77
	1065	815	266	101	.55	200	.84	.91	49.0	50	1.07	.54	24	2.05	.83
	1080	867	337	331	.71	245	.86	1.65	57.8	161	1.02	.79	30	2.05	.86
OXFO. SHAW	1020	490	151	-	-	-	-	-	-	-	-	-	88	1.50	1.0
	1045	870	230	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99	1.50	1.0
FERRAR.	1020	463	129	-	-	143	.81	-	-	-	-	-	-	-	-
	1045	768	216	-	-	149	.83	-	-	-	-	-	-	-	-
	4340	714	205	-	-	150	.73	-	-	-	-	-	-	-	-

É bom ressaltar que os materiais da tabela 4.7, que mesmo apresentado especificação ABNT iguais, não possuem o mesmo tipo de estrutura, não nos deixando com isto dizer, categoricamente,

se os coeficientes apresentados na tabela são discrepantes ou próximos. Procurando fazer uma verificação dos resultados apresentados pelo autor é mostrado graficamente nas figuras 4.11 e 4.12 os esforços de furação calculados pelas expressões de Spur, Kienzle, Kronenberg, usando os coeficientes do aço ABNT 1055 ensaiado por Daar e do aço ABNT 1050 ensaiado pelo autor. A escolha dos referidos aços se deve a aproximação de suas propriedades mecânicas.

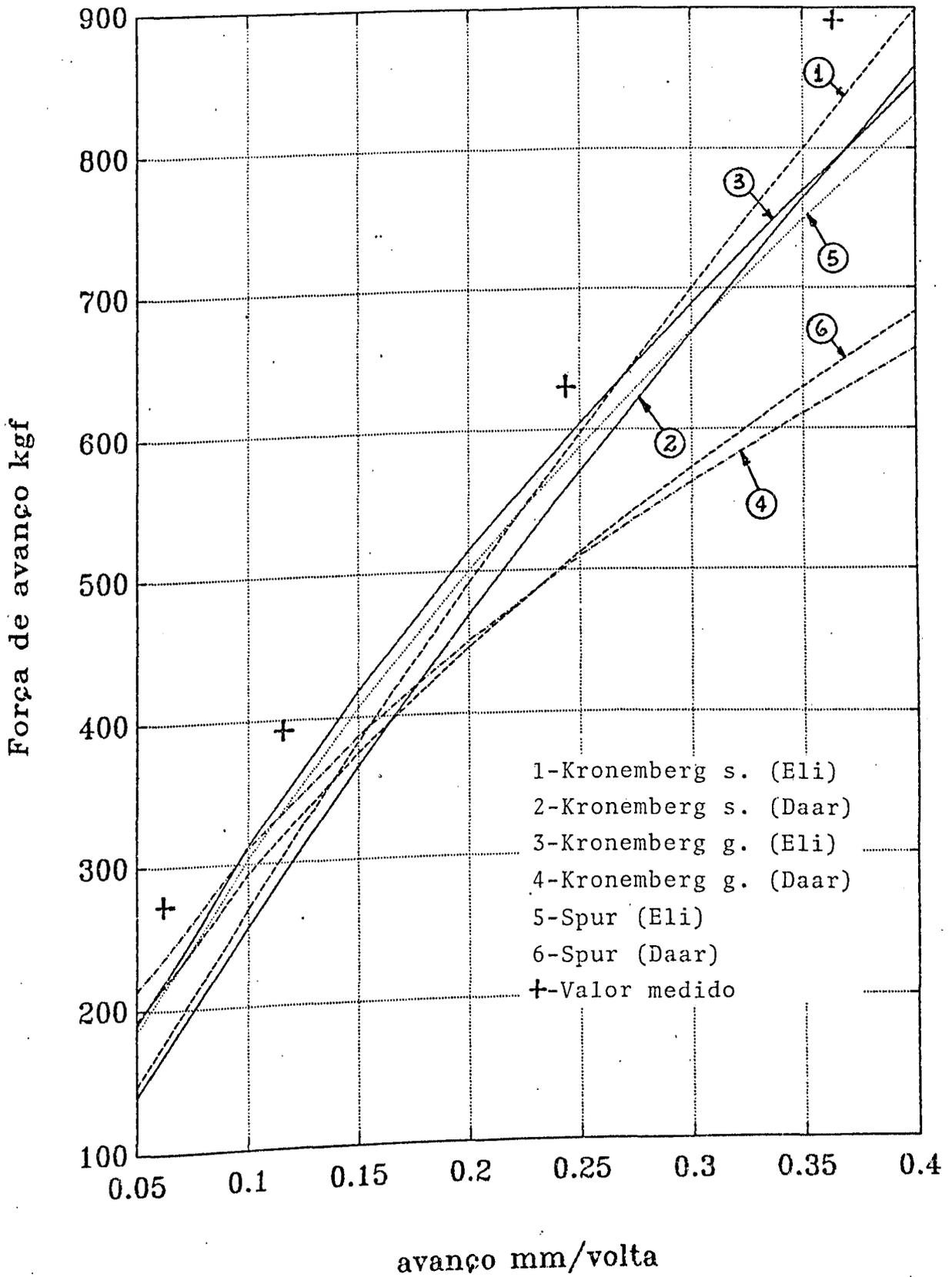


Fig. 4.11 - Representação das forças de avanço usando os coeficientes de Daar e do autor  
( aço ABNT 1050, diâmetro da broca 19.05 mm )

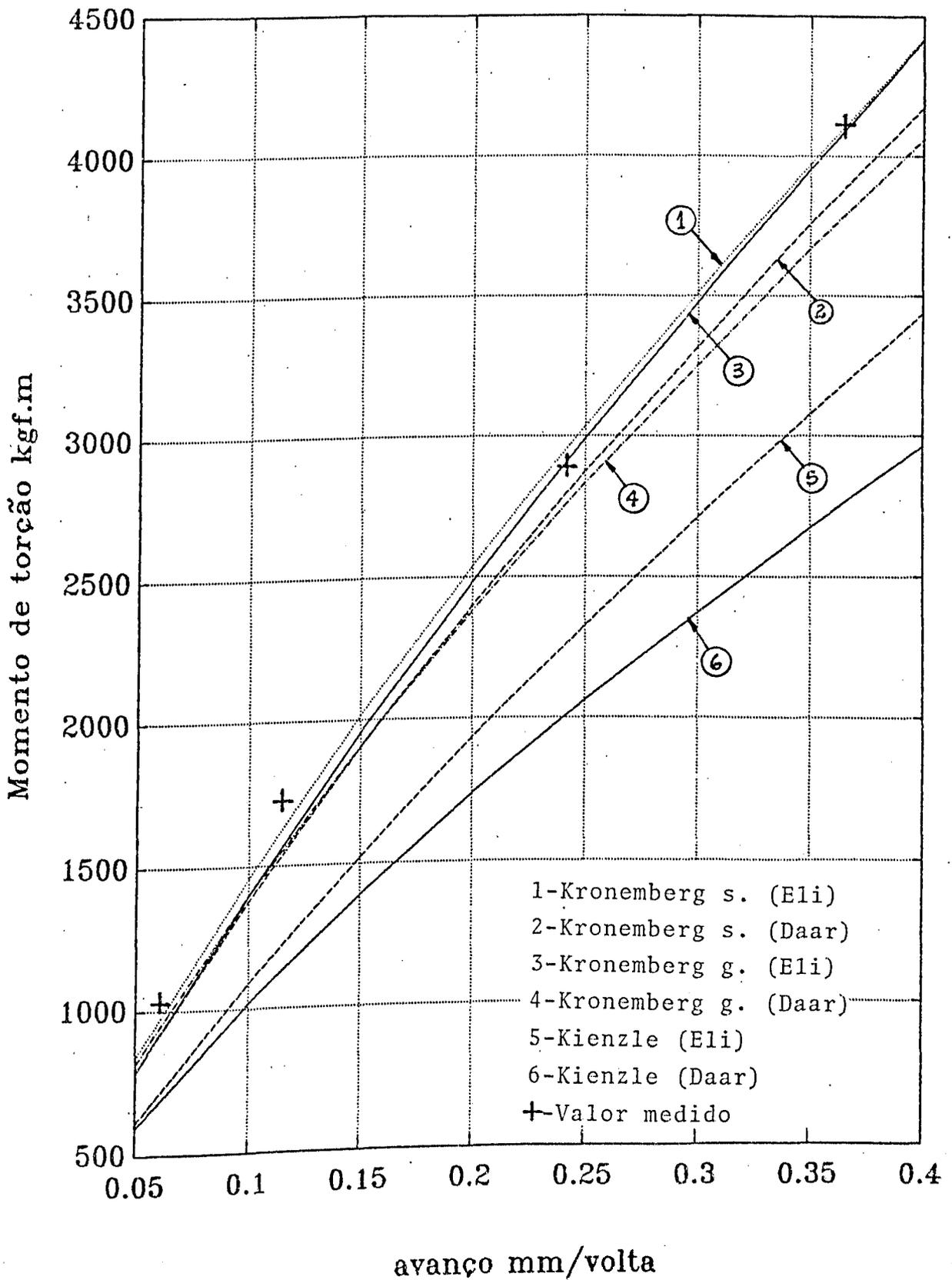


Fig. 4.12 - Representação dos momentos de torção usando os coeficientes de Daar e do autor ( aço ABNT 1050, diâmetro da broca 19.05 mm )

## 5 - CONCLUSÕES.

O processo de usinagem com brocas helicoidais é realmente complexo quando se trata da furação em cheio, devido a fenomenologia do processo ligada a geometria da ferramenta, onde na ponta da broca a velocidade de corte é zero e há a deformação plástica do material usinado ( extrusão ) sendo que esta velocidade aumenta continuamente até chegar a um valor máximo correspondente ao diâmetro externo da ferramenta. Devido a esta complexidade do processo, à evolução dos materiais das ferramentas e seus revestimentos, à evolução dos materiais das peças, às necessidades de produtividade, qualidade e custo baixo de produção é que a pesquisa vem desde o início do século estudando o assunto. Para tanto, o conhecimento dos esforços de usinagem envolvidos no processo e a existência de expressões matemáticas para cálculo destes esforços são necessárias para o desenvolvimento da pesquisa; com isto, pesquisadores desenvolveram dinamômetros com diferentes princípios de medição e criaram expressões objetivando resultados satisfatórios. Quanto aos dinamômetros, hoje prevalecem os que usam os princípios piezoelétricos e elétricos por apresentarem maior desempenho e confiabilidade; quanto as expressões matemáticas são as criadas por Kronenberg as mais aceitas por apresentarem maior precisão no cálculo dos esforços.

O dinamômetro desenvolvido neste trabalho obedece o princípio elétrico com a utilização de células de cargas extensométricas; é de construção mais simples e custo inferior ao demais existentes, podendo, para efeito comparativo dizer que é de custo dez vezes menor que os dinamômetros atuais com princípio piezoelétrico. Tem desempenho satisfatório para as funções que foi construído e sua confiabilidade está ligada firmemente às características das células de cargas usadas, células estas construídas por firmas especializadas no assunto.

Nos ensaios realizados com o dinamômetro, os dados levantados ( tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 e mais os gráficos 4.7 e 4.8 ) nos levam a afirmar, mais uma vez, que a influência da velocidade de corte é pequena, em torno dos 10%, nos esforços de furação. Quanto as expressões desenvolvidas por pesquisadores para o cálculo dos esforços de furação várias delas devem ser abandonadas pelo fato de não darem boa precisão nos cálculos, como é o caso das expressões de Shaw-Oxford que usam a dureza Brinell dos materiais como base de cálculo. Em observação a tabela 5.1 pode-se constatar que os valores dos esforços calculados pelas expressões de Shaw-Oxford e as gerais de Kronenberg são bastantes discrepantes

Tabela 5.1- Valores dos esforços de furação calculados pelas expressões de Shaw-Oxford e gerais de Kronenberg ( diâmetro da broca 19.05mm, avanço 0.062mm/volta )

Material	Mt ( kgf.mm )			Ff ( kgf )		
	Shaw-Oxford	Kronember	$\Delta Mt \%$	Shaw-Oxford	Kronenberg	$\Delta Ff \%$
1015	774.67	1081.6	28.4	196.50	166.60	15.2
1035	1155.60	890.1	23.0	293.17	155.80	46.86
1045	1339.78	951.2	29.0	339.89	179.50	47.2
1050	1454.09	939.7	35.4	368.88	221.38	39.98
8630	1390.58	924.8	33.5	352.78	171.95	51.26

Quanto a determinação dos coeficientes das expressões de cálculo dos esforços de furação, pesquisadores, como Daar ensaiou vários materiais identificados pelas propriedades mecânicas e pela análise química, enquanto outros, como o autor identificou os materiais acrescentando tipo de tratamento térmico e micrografia estrutural, ou seja, uma identificação mais completa. Daar utilizou a máquina ferramenta torno e uma velocidade constante em todos os ensaios, enquanto o autor usou uma furadeira de coluna e variou as velocidades de corte. Fatos como estes citados não deixam que se estabeleçam fatores de comparação precisos destes coeficientes entre os vários pesquisadores, mas nos permite dizer que valores com variação de 10% são bastantes coerentes.

Como é comercialmente impossível obter aços com propriedades mecânicas e composições químicas idênticas, o autor propõe, para cálculo dos esforços de furação, momento de torção e força de

avanço, os coeficientes das expressões gerais de Kronenberg, mostrados na tabela 5.2, valendo para aços com a mesma especificação ABNT e mesmo tratamento térmico.

Tabela 5.2 - Coeficientes das expressões de Kronenberg para cálculo dos esforços de furação para alguns aços nacionais.

Aços A.B.N.T.	Tratamento térmico	Momento de Torsão M <sub>t</sub> ( kgf.mm )			Força de Avanço F <sub>f</sub> ( kgf )			Fonte
		k <sub>4</sub>	x <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	k <sub>5</sub>	x <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	
1015	Normaliz.	39	1.92	.84	84	.94	.75	Fonseca
1020	Normaliz.	15	2.22	.76	33	1.32	.65	Daar
1025	Normaliz.	38	1.87	.77	33	1.21	.60	"
1035	Normaliz.	47	1.80	.85	150	.73	.76	Fonseca
1045	Normaliz.	41	1.85	.83	137	.79	.74	"
1050	Normaliz.	36	1.89	.83	66	1.09	.72	"
1055	Normaliz.	22	2.01	.77	22	1.32	.54	Daar
1065	Normaliz.	24	2.05	.83	50	1.07	.54	"
1080	Normaliz.	30	2.05	.86	161	1.02	.79	"
8630	Normaliz.	45	1.79	.81	117	.81	.72	Fonseca

## 6 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros o autor sugere, utilizando a metodologia apresentada na determinação dos esforços, o seguinte:

- Determinação dos coeficientes das expressões gerais de Kronenberg, utilizando o dinamômetro deste trabalho e um dinamômetro piezoelétrico.

- Ensaio de furação em máquinas ferramentas com variação contínua da velocidade de corte, para verificar a magnitude da influência desta velocidade no valor dos esforços de furação.

- Conhecer a distribuição dos esforços de corte na aresta principal de corte da broca ( uso da fotoelasticidade ).

- Conhecer a influência do sistema de afiação da broca nos esforços de corte.

- Conhecer a influência dos fluídos de corte nos esforços de furação com brocas.

- Aliar o monitoramento do processo pela medida simultânea de  $M_t$  e  $F_f$ , medindo a potência consumida nos motores das máquinas-ferramenta.

- Estudar novos tipos de brocas, como a broca canhão, a broca espada, outras.

- Estudar novos materiais, como o ferro fundido, o latão, o bronze, o alumínio, outros.

## 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] - Lindberg, R. A., Process and materials of manufacture, 4<sup>ª</sup> ed, Needham Henghts Massachusetts, Allyn and Bacon, 1990, 864 páginas.
- [2] - Koenigsberger, F., Design principles of metal cutting machine tools, McMillan, New York, 1964.
- [3] - Trent, E.M., O papel da pesquisa científica no desenvolvimento da tecnologia de corte, Boletim da Sobracon, n<sup>º</sup> 43, 1989, páginas 33 a 39.
- [4] - Cruz, C., Uma contribuição ao projeto do conjunto coluna-braço da furadeira radial, Escola de Engenharia de São Carlos, U.S.P. ( tese de doutoramento ), São Carlos, 1978, 170 páginas.
- [5] - Cruz, C., Fonseca, E. M. - Intrumentação de uma furadeira radial para medição de esforços de furação, COBEM 87.
- [6] - De Carmo, E. P., Black, J. T., Kohser, R., Materials and Processes in Manufacturing, Mac Millan, New York, 7<sup>ª</sup>ed, 1988 páginas.
- [7] - Daar, H.L.A. - Uma contribuição ao conhecimento do processo de furação dos aços com brocas helicoidais. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos E.E.S. São Carlos - 1967, 232 páginas.
- [8] - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Brocas Helicoidais - Terminologia, Norma T.B. 111, Rio de Janeiro,

1977, 3 páginas.

[9] - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Broca Helicoidal de Aço Rápido. Especificação, Norma NBR 7432, Rio de Janeiro, 1982, 14 páginas.

[10] - Pal, A. K., Bhattacharyya, A., Sen, G. C., Investigation of the torque in drilling ductile materials, Índia, 1964.

[11] - Trent, E. M., Metal cutting, 2 ed, Butterworths, London, 1984.

[12] - Oxford, C. J. Jr, Rochester, On the drilling of metals 1 - Basic mechanics of the process, Transaction of the ASME, february, 1955.

[13] - Galloway, D.F.- Some experiments on the influence of various factors on drill performance, Transactions of the ASME, February, 1957.

[14] - Shaw, M. C., Oxford, C. J. Jr, On the drilling of metals 2 - The torque and thrust in drilling, Transaction of the ASME, february, 1955.

[15] - Kronenberg, M., Machining science and applications, Pergamon Press, London, 1966.

[16] - Cruz, C., Fonseca, E. M., Calderani, F<sup>o</sup>. J., - Contribuição ao conhecimento da força de corte no processo de furação com brocas helicoidais, COBEM, 1989.

[17] - Monein, A., Effect of drilling speed on the required torque and thrust for non-ferrous materials, wear, 66, Elsevier

Sequoia, Lausanne, 1981, páginas 65-75.

[18] - Danai, J., Ulsoy, A. G., Dynamic modeling of cutting forces in turning, Milling and drilling for industry, from experimental data, ASME J. of Engineering for industry, 1988 páginas 27 a 34.

[19] - Shaw, M. C., Metal cutting principles, Oxford University Press, 1986, 594 páginas.

[20] - Bostn, O.W., Oxford, J., Power required drill cast iron and steel, Transaction of ASME, vol 32, 1930, 5 páginas.

[21] - Spur, G., Ergebnisse Von Schnittkraftmessungen Beim Bohren mit Spiralbohrern, Maschinenmarkt, 69, 1963.

[22] - American Society of Metals, Metals Park, Machining, 8 ed, vol 3, 1967.

[23] - Metcut Research Associates, Cincinnati ( USA ), Machining Data Hand book, 3 ed, 2 vol., 1980.

[24] - Schey, J. A., Tribology in metalworking, 2<sup>a</sup>ed, American Society for metals, Ohio, 1984, 735 páginas.

[25] - Boston. O. W., Gilbert, W. W., The torque and thrust in small drills operating in various metals, Transaction of ASME 58,79, 1936.

[26] - Kienzle, O. Victor, H. - Die bestimmung von kraeften und leistungen an spanendem werkzeugen und werkzeugmaschinen, Z. V.D.I., 94 ( 1952 ), p 299.

[27] - Victor, H. - Beitrag zur kenntnis der schnittkraefte beim

drehen, Hobeln und Bohren, Tese de Doutorado, T. H. Hannover, 1956.

[28] - Spur, G. - Beitrag zur schnittkraftmessung beim bohren mit spiralbohrern unter beruecksichtigung der radial kraefte, Tese de Doutorado, T. H. Braunschweig, 1961.

[29] - Kronenberg, M. - Grindzüge der Zerspanungslehre Springer Verlag, Berlin, 1963, 3v.

[30] - Weingaertner, W. L., Rocha, A.S. - Determinação da força específica de usinagem para furação a partir do modelo da força da força específica para torneamento, 1986.

[31] - Pankine, A. V., Usinage des Métaux par la coupe, Editions Ecola Supérieure, Moscou, 1965.

[32] - Ferraresi, D. - Fundamentos da usinagem dos metais, 1ed, São Paulo, Edgard Blücher Ltda, 1977, 1v

[33] - Pahlitzsch, G., Spur, G., Einrichtungen zum Messen der Schnittkraefte beim Bohren, Werkstattstechnik 49, 1959.

[34] - Bird, W. W., Fairfield, H. P., A twist drill dynamometer, Transaction, ASME 26, 1905, página 355.

[35] - Cook, N. H., Loewen, E. G., Shaw, M. C., Machine Tool Dynamometers, American Machinist, may 1954, página 125.

[36] - Spur, G., Ergebnisse von Schnittkraftmessungen beim Bohren mit Spiralbohrern, Maschinenmarkt 36, 1963, página Wp75.

[37] - Hatamura, Y., Nagao, T., Watanabe, Y., Development of a tool-holder type torque sensor, Proceeding of the 5th

International Conference on Production Engineering, Tóquio, 1984.

[38] - Kistler, Optimize Metal Cutting By Measuring the Cutting Forces, Kistler Instruments AG, Suíça, 1991.

[39] - Lalane, M., Berthier, P., Hagopian, J. D., Mechanical Vibrations for engineers, John Wiley, New York, 1983.