

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DETERMINAÇÃO DE UM MODELO DE FORÇA DE USINAGEM  
PARA A FURAÇÃO, A PARTIR DO MODELO DE FORÇA DE  
USINAGEM DO TORNEAMENTO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE  
SANTA CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM ENGENHARIA

ANTÔNIO SALVADOR DA ROCHA

FLORIANÓPOLIS - SC, FEVEREIRO DE 1985

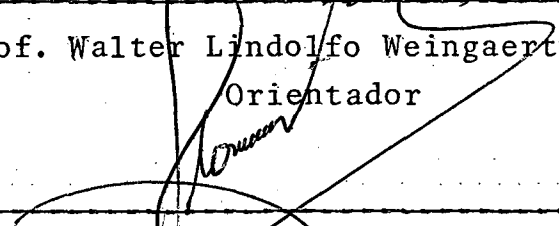
DETERMINAÇÃO DE UM MODELO DE FORÇA DE USINAGEM  
PARA A FURAÇÃO, A PARTIR DO MODELO DE FORÇA DE  
USINAGEM DO TORNEAMENTO

ANTÔNIO SALVADOR DA ROCHA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTEN  
ÇÃO DO TÍTULO DE  
MESTRE EM ENGENHARIA  
E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE  
PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr. Ing.  
Orientador



Prof. Clóvis Raimundo Maliska, Ph.D.  
Coordenador da Pós-Graduação em Eng. Mecânica

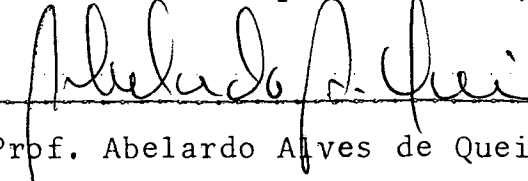
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr. Ing.



Prof. Aureo Campos Ferreira, Ph.D.



Prof. Abelardo Alves de Queiroz, Ph.D.

Aos meus pais e  
ã Maria Lúcia.

## A G R A D E C I M E N T O S

À Universidade de Fortaleza, Escola Técnica Federal do Ceará e MEC/CAPES/PICD, pelo incentivo e apoio financeiro que possibilitaram a realização deste trabalho.

As Empresas:

Aços Finos Piratini S.A.;

Mannesmann S.A.;

Eletrometal Aços Finos S.A.;

Fábrica Paulista de Brocas e Ferramentas de Corte;

Indústria e Comércio Twill S.A.,

pelas doações de materiais e ferramentas de corte.

Aos companheiros de pós-graduação e professores do departamento de Engenharia Mecânica.

Ao Prof. Dr. Ing. Walter Weingaertner, pela orientação deste trabalho.

Aos técnicos e bolsistas do Laboratório Máquinas e Ferramenta (MOPS), GRUCON e LABMETRO, pela participação neste trabalho.

Em especial, ao graduando em Engenharia Mecânica, Luciano José T. Moreira, pelo auxílio no desenvolvimento de "SOFTWARE" para o experimento.

I N D I C E

SIMBOLOGIA ..... vii

RESUMO ..... xii

ABSTRACT ..... xiii

1 - INTRODUÇÃO ..... 01

2 - RESUMO TEÓRICO ..... 03

    2.1 - Modelos de Forças de Usinagem ..... 03

    2.2 - Medição das Forças de Usinagem no Torneamento e na Furação ..... 14

        2.2.1 - Conceitos Básicos ..... 14

        2.2.2 - Fatores de Influência sobre a Força Específica de Usinagem ..... 17

        2.2.3 - Medição da Força de Usinagem..... 26

3 - PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO..... 30

    3.1 - Semelhança entre as Componentes da Força de Usinagem do Torneamento e da Furação... 31

    3.2 - Planejamento dos Ensaios..... 34

    3.3 - Equipamentos para Análise Experimental.... 38

        3.3.1 - Máquinas Operatrizes..... 38

        3.3.2 - Medição e Controle da Rotação..... 42

        3.3.3 - Sistemas de Medição..... 43

3.3.4	- Ferramentas de corte.....	46
3.3.5	- Condições de corte.....	48
3.3.6	- Material ensaiado.....	50
3.3.7	- Aquisição Automática dos Dados.....	51
3.3.8	- Equipamentos Diversos.....	52
3.4	- Programas para Aquisição e Processamento de dados.....	53
3.5	- Procedimento dos Ensaios.....	59
4	-- DOCUMENTAÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS.....	63
4.1	- Cálculos.....	63
4.2	- Tabela de Dados Brutos.....	69
4.3	- Tabela de Dados Processados .....	72
4.4	- Gráficos .....	73
4.5	- Apresentação dos Resultados.....	101
5	- ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	104
6	- CONCLUSÕES .....	108
7	- CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	110
7.1	- Proposição de Novos Trabalhos .....	110
8	- BIBLIOGRAFIA .....	114

## S I M B O L O G I A

$a^{1)}$	mm	Profundidade de corte
A	$\text{mm}^2$	Seção aparente de contato
$A^{1)}$	kg	Força axial
a	$\text{mm}^2$	seção de corte
$a_p$	mm	Profundidade de corte
$a_f^{1)}$	mm	Profundidade axial de corte na fresagem
b -	mm	Largura de usinagem
$b_F$	mm	Largura de corte na fresagem
c		Cunha do cavaco
$C_1 - C_8$		Constantes do modelo
D	mm	Diâmetro externo
$D_Q$	mm	Comprimento do gume transversal
d	mm	Diâmetro interno (diâmetro inicial do furo)
$E_s$		Erro sistemático
$E_a$		Erro aleatório
$F_x$	N	Componente da força passiva na furação
$F_y$	N	Componente da força passiva na furação
$F_z$	N	força axial
$F_c$	N	força de corte
$F_f$	N	força de avanço
$F_p$	N	força passiva

f	mm	Avanço
F	N	Força de usinagem
f		Fator do processo
$f_B$		Fator do processo para a furação
$F_a$	N	Força ativa
$F_{ap}$	N	Força de apoio
$F_a$	N	Força axial (na furação)
g		Constante hiperbólica
$H^{1)}$	kg	Força principal de corte
h	mm	Espessura de corte
HB		Dureza Brinell
$I_r$		Incerteza de resultado
j		Constante hiperbólica
$K_{SB}$	$N/mm^2$	Força específica de corte na furação
$K_{SD}$	$N/mm^2$	Força específica de corte no torneamento
$K_{SF}$	$N/mm^2$	Força específica de corte na fresagem
$K_{SH}$	$N/mm^2$	Força específica de corte no aplainamento
$K_{SR}$	$N/mm^2$	Força específica de corte no brochamento
$K_S^{1)}$	$N/mm^2$	Força específica de corte
$K_{S 1.1}^{1)}$	$N/mm^2$	Força específica de corte
$K_r$		Fator de deformação do cavaco
$K_C$	$N/mm^2$	Força específica de corte (para qualquer seção)



$K_C$ 1.1	$N/mm^2$	Força específica de corte (para uma seção $b \cdot h = 1 \text{ mm} \cdot 1 \text{ mm}$ )
$K_f$ 1.1	$N/mm^2$	Força específica de avanço
$K_p$ 1.1	$N/mm^2$	Força passiva específica
$K_v$	mm	Espessura da alma
$K_{ver}$		Fator de correção para o desgaste
$K_{sch}$		fator de correção para o material da peça
$K_\gamma$		Fator de correção para o ângulo de saída
$K$		Fator de deformação do cavaco
$K$ 1.1	N	valor da força específica
$l_a$	mm	Comprimento da aresta transversal
$M^{1)}$	Kg m	Momento torsor
$M_d$	N m	Momento torsor
$M_z$	N m	Momento torsor
$l - m$		Expoente (geral)
$l - m_c$		Expoente para a força de corte (em dependência da espessura da corte $h$ )
$l - m_f$		Expoente para a força de avanço
$l - m_p$		Expoente para a força passiva
$n$	rpm	Rotação
$N$		Número de medidas
$P_H^{1)}$	kg	Força principal de corte
$P_S^{1)}$	kg	Força de corte

$P_1^{1)}$	kg/mm <sup>2</sup>	Pressão específica de corte
Q		Corte transversal
$Q_1$		Fator representativo da influência do corte transversal sobre os expoentes
$Q_2$		Fator representativo da influência do corte transversal sobre os valores das forças específicas
$q_s^{1)}$	kg/mm <sup>2</sup>	Força específica de corte parcial
$R_1^{1)}$	kg	Força de torção
$R_1$		Fator representativo da influência do atrito do cavaco e aresta transversal sobre os expoentes
$R_2$		Fator representativo da influência do atrito do cavaco e aresta transversal sobre as forças específicas
$R_B$		Atrito da ferramenta, na furação
$R_D$		Atrito da ferramenta, no torneamento
r	mm	Alavanca da força de corte na furação
r	mm	Raio da ponta
RM		Resultado da medição
$S^{1)}$	mm/rot	Avanço
S		Desvio padrão
t	s	Tempo de medição
t		Coeficiente de confiança de Student
U.M		Unidade Mecânica

$V_C$	m/min	Velocidade de corte
$V_B^{1)}$	m/min	Velocidade de corte na furação
$V_D^{1)}$	m/min	Velocidade de corte no torneamento
$\bar{X}$		Média das medidas
$X_i$		Medida
$\alpha$	Grau	Ângulo de folga
$\alpha_x$	Grau	Ângulo lateral de folga
$\beta$	Grau	Ângulo de cunhamento
$\bar{\gamma}$	Grau	Ângulo de saída corrigido ao longo do comprimento de corte b
$\gamma_B$	Grau	Ângulo de saída na furação
$\gamma_D$	Grau	Ângulo de saída no torneamento
$\gamma_x$	Grau	Ângulo de saída lateral
$\delta$	Grau	Ângulo da hélice
$\epsilon$	Grau	Ângulo da ponta
$\lambda$	Grau	Ângulo de inclinação
$\chi$		Fator de deformação
$\mu$		Coefficiente de atrito
$\sigma$	Grau	Ângulo da ponta
$\sigma_R$	N/mm <sup>2</sup>	Tensão de ruptura
$\tau_o$	N/mm <sup>2</sup>	Tensão de cisalhamento
$\psi$	Grau	Ângulo da aresta transversal
$\chi$	Grau	Ângulo de posição
$\Delta M_{max}$		Máximo desvio em relação ao valor médio.

1) Designação Antiga.

## R E S U M O

Neste trabalho, as componentes da força de usinagem do torneamento e furação foram medidas experimentalmente com dinamômetros piezelétricos, sendo seus valores armazenados e processados automaticamente por um micro computador.

Para os ensaios de torneamento foi utilizado um torno com regulagem contínua da rotação, enquanto que para os de furação, foi utilizado um centro de usinagem CNC.

Os ensaios foram planejados de modo que os diversos fatores de influência sobre a força de usinagem, comum aos dois processos, permanecessem constantes, e apresentassem identidade, enquanto os fatores de influência específicos do processo de furação, fossem visíveis e pudessem ser determinados.

Após o processamento dos dados, foram determinados fatores de usinagem para a furação, representativos dos fatores: aresta transversal e atrito da aresta lateral, existentes na furação em cheio e furação com pré-furo.

Acrescentando-se estes fatores na equação de Kienzle, foi possível a determinação das forças específicas de corte e de avanço para a furação, a partir dos valores das forças específicas do torneamento, com boa precisão de fácil manuseio, na utilização prática.

## A B S T R A C T

In this work, the components of the power in the will for turning and boring were determined experimentally using piezoelectric dynamometers and their values stored and processed automa-cally by micro-computer.

For the turning essays was used a continuous adjustment of rotation lathe, while a center of milling CNC was used for the ones of boring.

The essays were planned in a way that the different kinds of influence on the tooling power kept constant in both projects and presented identity, while the specific factors of influence in the process of boring could be perceivable and determined.

After the data process were determined factors of tooling for boring, representative of these other factors: transverse edge and attrition of the lateral edge in the boring of once and in the progressive boring.

Adding these factors to Kienzle's equation the determination of specific power of cutting and advance for boring was possible based in the values of the specific power of turning with precision of easy handling in the practical utilization.

## C A P I T U L O 1

## I N T R O D U Ç Ã O

O advento das máquinas controladas numericamente (CNC) e os constantes desenvolvimentos no campo da construção de máquinas ferramentas, técnicas de comando e processamento eletrônico de dados, tem exigido redobrados esforços para a obtenção de maior número de dados e melhores conhecimentos sobre as condições de usinagem para os diversos materiais e processos de usinagem, fatores decisivos na produtividade destas máquinas.

Os parâmetros que determinam as condições ótimas de usinagem, atualmente no Brasil, exigem um reestudo, uma vez que não se dispõe de dados atualizados para os materiais nacionais e a formação de um Banco de Dados de Usinagem Nacional, somente agora, é iniciado.

A determinação destes parâmetros requer um grande número de ensaios, implicando em grandes quantidades de materiais, ferramentas e tempo de ensaio, tornando proibitivo o estudo de todos os processos de usinagem, necessários à formação de um Banco de Dados de Usinagem.

Dentre os diversos parâmetros, destacam-se as forças de usinagem, indispensáveis para o cálculo da potência de usinagem e, conseqüentemente, a determinação do rendimento da máquina para diferentes cargas de trabalho. Encontra aplicações no cálculo de estrutura e dos mecanismos de acionamentos das máquinas-ferramentas, podendo ainda ser usado como variável controlada nos ACC (Adaptive Control Constraint) e nos ACO (Adaptive Control Optimi

zation).

A maioria das pesquisas efetuadas no Brasil, na área de usinagem, referem-se ao torneamento e embora a furação seja um dos processos mais usados na fabricação mecânica, poucos trabalhos referem-se a ela.

Este trabalho tem por objetivo medir e comparar as forças específicas de corte e de avanço no torneamento e na furação, determinando um fator de usinagem para a furação em relação ao torneamento, usando a equação de Kienzle, válido para determinadas condições pré-estabelecidas. Será o ponto de partida para trabalhos posteriores que o complementarão e possibilitarão a determinação da força de usinagem para a furação a partir da força de usinagem do torneamento, considerando os fatores de influência específicos da furação.

## C A P Í T U L O 2

## R E S U M O T E Ó R I C O

## 2.1 Modelos de Força de Usinagem

A força de usinagem, que representa a resistência oferecida pelo material da peça de trabalho à penetração do gume da ferramenta, é influenciada por diversos fatores, tais como: material da peça, material da ferramenta, condições de corte, geometria do corte e o próprio processo de usinagem.

Apesar dos esforços dos pesquisadores, não foi possível, até o momento, construir um modelo de força de usinagem que englobe todos os fatores de influência sobre as forças de usinagem, já que nenhum deles pode ser subordinado a uma lei única.

No entanto, pode-se construir leis para modelos abrangentes, através da medição das componentes da força de usinagem e introdução de fatores de correção, sendo o processo de torneamento preferido aos demais.

Neste sentido, vários trabalhos foram realizados por diversos pesquisadores, dos quais destacamos aqueles que fizeram alguma manipulação com as forças de torneamento e de furação.

Estes trabalhos podem ser divididos em 3 categorias:

- I - tentativas para apresentação de modelos generalizados de força de usinagem;
- II - leis de força de corte referente a um processo, com aplicações de características específicas distintas para cada caso;



III - leis de força de corte referentes a um processo com aplicações de características específicas do processo de torneamento e fatores de correção especiais.

#### Categoria I

O fato de que na usinagem se trata de uma separação mecânica, levou uma série de pesquisadores a estudarem a inter-relação entre a força de usinagem e as características mecânicas dos materiais metálicos.

Assim, em 1945, Brandenberger ( 1 ) desenvolveu a seguinte fórmula para a força de corte:

$$K_s = \sigma_r \cdot \lambda \quad ( 1 )$$

que determina a força na seção de corte em função da tensão de ruptura do material  $\sigma_r$  e do fator de deformação  $\lambda$ , que corresponde ao recalque do cavaco.

A vantagem da utilização desta fórmula, segundo ele, está na relativamente simples disposição técnico-experimental dos valores  $\sigma_r$  e  $\lambda$ . A tensão de ruptura nos metais é uma constante genuína do material, tendo seu valor determinado separadamente da usinagem. O fator de deformação  $\lambda$ , que deve ser considerado como fator integrador de todas as condições de corte, é determinado através de simples medidas do cavaço arrancado.

A pouca exatidão e a não validade para a usinagem do ferro fundido fizeram com que o modelo seja pouco aproveitável.

Em 1951, Hucks ( 2 ) interveio no chamado plano de Merchant ( 3 ), 1945, e conduziu, com o auxílio da mecânica plás

tica, a uma fórmula para a força de corte, válida universalmente, sobre o fundamento de que"... todas as tensões no cavaco dependem unicamente das constantes do material  $\tau_0$ ,  $\sigma_0$  e do coeficiente de atrito  $\mu$ ."

$$H = \tau_0 \cdot b \cdot h \cdot K_\lambda \quad (K_\lambda = f(\mu, \gamma, h)) \quad (2)$$

Embora a determinação da tensão de cisalhamento  $\tau_0$  e o valor do coeficiente  $K_\lambda$  sejam razoavelmente simples, esta equação não leva em consideração a influência do atrito entre a superfície de incidência da ferramenta e a peça, não podendo ser aplicada para pequenos avanços, pois o erro torna-se mais significativo.

Kronenberg em 1954 (4) colocou a força específica de corte sob a influência da dureza Brinell HB, do ângulo de cunha  $\beta$  e da seção do cavaco F, através da equação:

$$K_S = \frac{25,9 \cdot \sqrt[2,2]{HB} \cdot \sqrt[1,68]{\beta/50}}{\sqrt[5,07]{F}} \quad (3)$$

Esta relação pressupõe condições geométricas iguais, com uma proporcionalidade direta entre a força de corte e a dureza do material, fato que pode levar a erros consideráveis.

Em 1958, Klein (5) tentou, teoricamente, chegar a uma lei única de força de corte. Ele achava que  $K_S$  poderia ser descrita como função hiperbólica de h, da seguinte forma:

$$K_S = j \cdot \frac{g}{h} \quad (4)$$

de modo que, por exemplo, para o momento torsor na furação o resultado fosse:

$$M = \frac{D^2}{4} \cdot \frac{g}{\text{sen } \sigma/2} + j \cdot \frac{s}{2} \quad (5)$$

Conclui, porém, que os valores de  $g$  e  $j$  para a força de corte, válidos para o torneamento, não são válidos para outras formas de usinagem.

Em 1965, Keil (16) empenhou-se não por uma lei geral, mas em determinar uma lei de força de corte, válida somente para o torneamento e a furação.

Suas sondagens basearam-se numa consideração da força específica de corte no elemento de corte.

Para tal, defendeu que a força específica de corte parcial  $q_s$  é obtida em função do momento torsor e que a força de corte dependê do raio do gume, e da relação entre o diâmetro da broca e o diâmetro do furo inicial.

Os modelos resultantes desta análise para o torneamento e furação, devido a sua dificuldade nos cálculos para a determinação da força específica de corte  $q_s$ , não conseguiram se impor, e ainda desprezavam a dificuldade de saída do cavaco na furação, não considerando a influência da variação do processo de formação do cavaco.

#### Categoria II:

A determinação de leis de força de corte para processos específicos envolve, atualmente, a maior parte das publicações sempre relacionadas à lei de Kienzle e formam o embasamento para

o cálculo da força de corte e potência de corte para a usinagem.

Em 1927, Kurrein ( 7 ) publicou uma equação com o objetivo de determinar a força específica de corte no torneamento e na furação, permitindo a determinação do momento torsor na furação:

$$M = K_s \cdot \frac{s}{8} \cdot (D^2 - D_Q^2) \quad (6)$$

Seu próximo passo foi uma separação do par de forças colocando-as no centro da broca. No entanto, dois anos mais tarde, Kronenberg ( 8 ) verificou que as forças específicas na furação são superiores às forças do torneamento.

Kronenberg deslocou o ponto de apoio da força para a periferia da broca, até que as forças se iguallassem às do torneamento.

$$M = P_s \cdot 0,73 D \quad (7)$$

Em 1932, Schlesinger ( 9 ) obteve maiores forças na furação comparadas ao torneamento, usando brocas com o ângulo de saída constante ao longo da aresta principal da broca, o que hoje já não é mais exigido na determinação dos valores específicos.

Em 1951, Schallbroch ( 10 ) determinou o momento torsor na furação, usando o raio  $R_1$  como alavanca da força de torção, sendo  $P_1$  a pressão específica de corte.

$$Md = P_1 \cdot \frac{s}{2} \cdot \frac{D}{2} \cdot 2 \cdot R_1 \quad (8)$$

As indicações referenciadas na literatura são bastan

tes contraditórias quanto à posição do ponto de apoio da força na furação. Devido a isso, Spur ( 11 ), em 1961, procurou determinar o ponto de apoio usando peças especialmente projetadas para este fim.

Embora tenha usado  $r = 0,51 \cdot D/2$  como alavanca na furação com pré-furo como valor específico e  $r = 0,38 \cdot D/2$  na furação em cheio, fazendo uma boa base para a comparação entre a força de torneamento e furação, utilizou também o raio como alavanca, já que para ele eram mais importantes as variações das somas absolutas do que propriamente elas.

A desvantagem das leis de força de usinagem referentes aos processo fica clara no seguinte resumo de fórmulas de forças de corte propostas por Hirschfeld (12) no ano 1961.

$$\text{Aplainamento} \quad P_H = a \cdot s \cdot K_{SH} \quad (9)$$

$$\text{Brochar} \quad P_H = Z_e \cdot b \cdot h \cdot K_{SR} \quad (10)$$

$$\text{Tornear} \quad P_H = a \cdot s \cdot K_{SD} \quad (11)$$

$$\text{Furar} \quad M_B = \frac{D^2 \cdot S}{6} \cdot K_{SB} \quad (12)$$

$$\text{Fresar} \quad P_H = a_F \cdot b_F \cdot K_{SF} \quad (13)$$

Se esta sequência de equações for utilizada para um processo diferente, será necessário um número de ensaios extremamente alto e de difícil obtenção para determinar-se experimentalmente os valores da força específica de corte. Este fato justifica o empenho de alguns pesquisadores em utilizar os valores básicos do processo de torneamento e determinar os demais fatores, através de fatores de correção específicos para os demais processos, mesmo sabendo-se que haverá erros razoavelmente grandes, que não podem ser evitados.

Posteriormente, apresentaremos alguns trabalhos que enfocam este tema, antes, porém, fornecemos algumas leis mais recentes de força de usinagem.

Em 1976, Klicpera (13) publicou a fórmula modelo:

$$\frac{F_1}{b} = P + g \cdot h + \frac{q}{c} \cdot e^{c \cdot h} \quad (14)$$

Implicando que a força de corte devido ao atrito na superfície de folga para uma espessura de corte  $h = 0$  mm é maior do que zero. Observação esta, também feita por Richter (14) em 1953.

No entanto, para a determinação da força de corte do torneamento sem considerar outras influências, além da espessura de corte e comprimento de corte, é necessário um número dobrado de constantes em relação às que eram utilizadas até então.

Além do aumento do cálculo matemático necessário, deve-se questionar a sua relevância prática.

O mesmo serve para o ampliamto desta lei, feita por Engelhard (15), que estudou a influência do ângulo de saída com ajuda de duas outras constantes:

$$\frac{F_1}{b} = P + g \cdot h + \frac{q}{c} \cdot e^{c \cdot h} + K ( e^{m \gamma} - e^{m \gamma_1} ) \quad (15)$$

Em 1979, Amarego (16) formulou possíveis leis para o momento torsor e força axial para a furação com brocas helicoidais:

$$M_d = c_1 \cdot 10^5 \cdot f^{c_2} \cdot D^{c_3} \cdot (1_Q/D)^{c_4} \cdot \sigma^{c_5} \cdot \gamma_X^{c_6} \cdot \psi^{c_7} \quad (16)$$

$$F_z = c_8 \cdot 10^3 \cdot f^{c_9} \cdot D^{c_{10}} \cdot (1_Q/D)^{c_{11}} \cdot \sigma^{c_{12}} \cdot \gamma_x^{c_{13}} \cdot \psi^{c_{14}} \quad (17)$$

Sua pura significação acadêmica está principalmente no fato de que as constantes determinadas sempre tenham validade para as condições secundárias, já que elas, na grande maioria, foram determinadas sem variação especial do parâmetro.

### Categoria III:

Visando uma lei geral de força de corte para a usinagem, que acompanhasse a constante evolução da tecnologia e que também fosse apropriada, Kienzle e Victor ( 17 ), 1957, compararam as forças específicas de corte do torneamento, do aplainamento e da furação, baseando-se na própria usinagem para obter um fator de usinagem que possa ser usado em uma lei única de força de corte para os três processos.

$$P_s = f \cdot b \cdot h^1 - z \cdot K_{s1.1} \quad (18)$$

Para o processo de furação eles encontraram um fator de processo  $f = 1$ , em relação ao processo de torneamento, pois Victor declara explicitamente que "... os diversos fatores de influência se anulam mutuamente... de modo que também o processo de furação pode ser considerado regular quanto às forças".

No mesmo ano, Degner, Lutze e Smejkal ( 19 ) determinaram quatro fatores de correção para os valores do torneamento, que descrevem a influência do ângulo de saída ( $K_\gamma$ ), da velocidade de corte ( $K_v$ ), do material da ferramenta ( $K_{sch}$ ) e do desgaste ( $K_{ver}$ )

$$P_1 = b \cdot h \cdot K_s \cdot K_\gamma \cdot K_v \cdot K_{sch} \cdot K_{ver} \quad (19)$$

Para a furação, eles aceitaram o fator processual  $f=1$ , publicado por Victor, complementando-o com um fator para a furação com pré-furo ( $f = 0,95$ ). Desprezando  $K_\gamma$ ,  $K_v$  e  $K_{sch}$ , obtiveram a seguinte fórmula:

$$P_{1z} = \frac{D}{2} \cdot S_z \cdot K_s \cdot f_B \cdot K_{ver} \quad (20)$$

$$(f_B = 1,0 \quad ; \quad K_{ver} = 1,4 \text{ para o aço})$$

No entanto, de acordo com os conhecimentos atuais, a força de corte na furação, com ferramentas afiadas, é até 80 % superior à do torneamento e a influência das ferramentas com desgaste sobre a força estática é pequena, podendo ser desprezada.

	Torneamento	Furação	Variação da força de corte em relação ao torneamento
Velocidade de Corte:	$V_D >$	$V_B$	+ 1,05 - 1,07
Atrito da Ferramenta:	$R_D <$	$R_B$	+ 1,08 - 1,10
Atrito de Cavaco:	inexistente		+ 1,03 - 1,05
Angulo de Saída:	$\gamma_D >$	$\gamma_B$	- 1,18

QUADRO 1 - Influências sobre as forças do torneamento e furação segundo Victor ( 18 ).



Witte (20), em 1980, determinou equações que possibilitam a transmissibilidade de valores conhecidos do torneamento para a furação, usando a equação de Kienzle com fatores de correção que consideram a influência dos fatores dependentes e independentes do processo de furação.

Verificou que a influência da velocidade de corte com ferramentas de aço rápido, em geral, não necessita ser levada em consideração.

Para verificar a influência do ângulo de saída na furação, ele considerou o ângulo  $\gamma = 29^\circ$  para a afiação normal como base, sendo a força de corte e a de avanço, para outros ângulos de saída, determinadas pelas equações:

$$F_c = b \cdot h^{1 - m_c} \cdot K_{c1.1} \Big|_{\gamma_x = 29^\circ} \cdot |1 - (0,015 \cdot \Delta\gamma)| \quad (21)$$

$$F_f = b \cdot h^{(1 - m_f)} \Big|_{\gamma_{xx} = 29^\circ} \cdot |1 - (0,02 \cdot \Delta\gamma)| \cdot K_{f1.1} \Big|_{\gamma_x = 29^\circ} \cdot |1 - (0,05 \cdot \Delta\gamma)| \quad (22)$$

O aumento (diminuição) de um grau no ângulo lateral de saída na broca helicoidal causa uma baixa (elevação) de 1,5% na força específica de corte e 5% na força específica de avanço para a afiação normal.

Verificou que a influência do ângulo da ponta e conseqüentemente, do ângulo de posição na força de corte na furação é pequena, podendo ser determinada pela equação de Kienzle:

$$F_c = b \cdot h^{1 - m_c} \cdot K_{c1.1} \quad (23)$$

enquanto que para a força de avanço, vale a equação:

$$F_f = b \cdot h^{1-m_f} \left|_{\sigma = 118^\circ} \cdot K_{f_{1.1}} \right|_{\sigma = 118^\circ} \cdot |1 + (0,01 \cdot \Delta\sigma)| \quad (24)$$

Determinou ainda a influência dos fatores específicos da furação, tais como:

- Relação furo/pré-furo
- ângulo de saída corrigido
- corte transversal
- ângulo da hélice
- afiação da ponta
- refrigeração

agrupando-os em uma fórmula geral para a força de corte e de avanço:

$$F = b \cdot h^{(1-m)} \cdot R_1 \cdot Q_1 \cdot K_{1.1} \cdot R_2 \cdot Q_2 \quad (25)$$

onde:

$K_{1.1}$  = valor específico da força

$(1-m)$  = valor do expoente

$R_1$  = fator que descreve a influência do atrito do cavaco e do gume transversal sobre o valor do expoente

$Q_1$  = fator que descreve a influência do corte transversal sobre o valor do expoente

$R_2$  = fator que descreve a influência do atrito do cavaco e do gume transversal sobre o valor específico da força

$Q_2$  = fator que descreve a influência do corte transversal sobre o valor específico da força.

## 2.2 Medição das Forças de Usinagem no Torneamento e na Furação

### 2.2.1 Conceitos Básicos (21)

#### Força de Usinagem $F$

É a força total que atua sobre uma cunha cortante durante a usinagem. (Fig. 1).

#### Componentes da Força de Usinagem

A componente da força de usinagem, num plano ou numa direção qualquer, é obtida pela projeção da força de usinagem  $F$  sobre este plano ou direção.

Praticamente, assumem importância especial aquelas componentes contidas no plano de trabalho e no plano efetivo de referência (22).

#### Componentes da Força de Usinagem no Plano de trabalho

##### Força Ativa - $F_a$

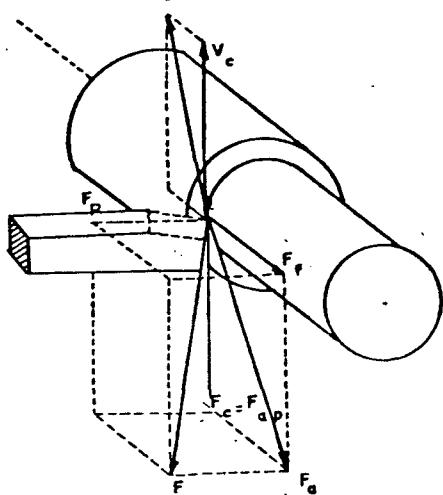
É a projeção da força de usinagem  $F$  sobre o plano de trabalho. (Fig. 1).

##### Força de Corte $F_c$

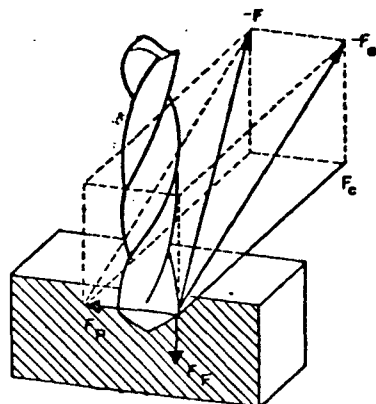
É a projeção da força de usinagem  $F$  sobre a direção de corte (dada pelo vetor da velocidade de corte). Também denominada força principal de corte. (Fig. 1).

##### Força de Avanço $F_f$

Projeção da força de usinagem  $F$  sobre a direção de avanço. (Fig. 1).



Torneamento



Furação

FIGURA 1 - Força de usinagem e suas componentes, no torneamento e furação.

Força de Apoio  $F_{ap}$

É a projeção da força de usinagem  $F$  sobre a direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho. (Fig. 1)

Todas estas componentes contribuem para a potência de usinagem.

Entre a força ativa  $F_a$ , a força de apoio  $F_{ap}$  e a força de avanço  $F_f$ , valem as seguintes relações:

$$F_a^2 = F_{ap}^2 + F_f^2 \quad (26)$$

$$F_{ap}^2 = F_a^2 - F_f^2 \quad (27)$$

No torneamento, a força de apoio  $F_{ap}$  confunde-se com a força de corte  $F_c$ , valendo então as relações:

$$F_a^2 = F_c^2 + F_f^2 \quad (28)$$

$$F_c^2 = F_a^2 - F_f^2 \quad (29)$$

Componentes da Força de Usinagem no Plano Efetivo de Referência

Força Passiva  $F_p$

É a projeção da força de usinagem  $F$  sobre uma perpendicular ao plano de trabalho, também conhecida por força de recuo e força de profundidade. (Fig. 1)

$$F_p^2 = F^2 - F_a^2 \quad (30)$$

Para o torneamento:

$$F_p^2 = F^2 - (F_c^2 + F_f^2) \quad (31)$$

As componentes situadas no plano efetivo de referência não contribuem para a potência de corte.

Força Específica de Corte e de Avanço

É a força de corte ou de avanço referente a uma seção de corte qualquer (dada pelo produto da profundidade de corte  $a_p$  e do avanço  $f$  ou pelo produto do comprimento de corte  $b$  com a espessura de corte  $h$ ) (Fig. 2) simbolizadas por  $K_c$  e  $K_f$ , respectivamente.

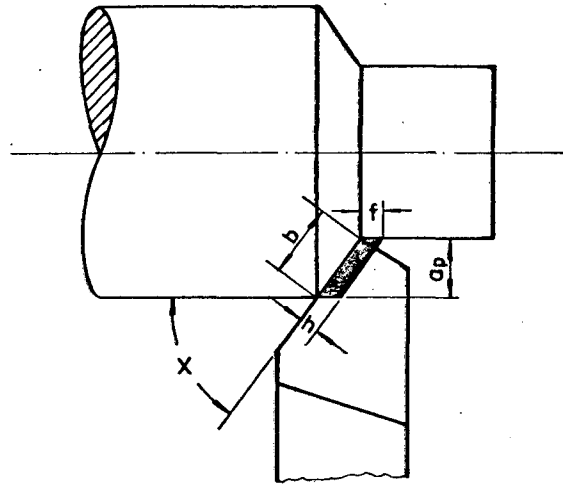


FIGURA 2 - Seção de corte para o torneamento.

A força referente a uma seção de corte  $b \cdot h = 1 \text{ mm} \cdot 1 \text{ mm}$ , também é denominada de força específica de corte ou de avanço, porém são simbolizadas por  $K_{c \ 1.1}$  e  $K_{f \ 1.1}$ , respectivamente.

Os valores de  $K_{c \ 1.1}$  e  $K_{f \ 1.1}$  podem ser determinados de diversas maneiras, porém, atualmente, os seus cálculos, através da equação potencial de Kienzle, são os mais difundidos mundialmente.

$$\frac{F_c}{b} = K_{c \ 1.1} \cdot h^{1-m_c} \quad K_{c \ 1.1} = F_c / b \cdot h^{1-m_c} \quad (32)$$

$$\frac{F_f}{b} = K_{f \ 1.1} \cdot h^{1-m_f} \quad K_{f \ 1.1} = F_f / b \cdot h^{1-m_f} \quad (33)$$

### 2.2.2 Fatores de Influência sobre a Força Específica de Usinagem

A força específica de usinagem depende de uma série de fatores, alguns comuns para os diversos processos de usinagem e outros específicos de determinados processos.

O estudo pormenorizado foi feito por vários pesquisadores, analisando a influência destes fatores sobre as componentes da força de usinagem para o processo de torneamento e de furação.

Podemos pois, dividi-los em dois grupos: fatores de influência sobre as forças de usinagem que independem do processo de usinagem e fatores de influência dependentes do processo de usinagem.

#### Fatores de Influência Independentes do Processo

- Material da Peça
  - composição
  - tratamento térmico
  - estrutura
- Condições de Corte
  - avanço
  - profundidade de corte
  - velocidade de corte
- Ferramenta
  - material de corte
  - ângulo de saída
  - ângulo de posição
  - ângulo de inclinação
  - râio da ponta.

### Fatores de Influência Dependentes do Processo de Furação

- Atrito provocado pela saída do cavaco e atrito da aresta lateral
- Corte transversal
- Ângulo de saída (corrigido)
- Ângulo da ponta
- Afiação da ferramenta
- Refrigeração

Na literatura há referências às seguintes influências sobre as forças específicas:

#### a) Material da Peça

Para os aços, o aumento da porcentagem de carbono aumenta o valor da força específica de corte, enquanto o aumento da porcentagem de fósforo acarreta uma diminuição de  $K_c$  1.1.

As forças específicas de usinagem sofrem influências da composição química, do tratamento térmico e da estrutura da matéria bruta a ser usinada.

#### b) Condições de Corte

O avanço  $f$  e a profundidade de corte  $a_p$  são variáveis da equação de Kienzle, através da espessura de corte  $h$  e do comprimento de corte  $b$ , de modo que, através dela, pode-se observar suas influências sobre a força específica de corte e de avanço. Quanto à influência da velocidade de corte, esta foi estudada por vários pesquisadores que obtive



ram resultados análogos.

Em 1949, Dinnebier (23) encontrou uma pequena influência da velocidade de corte sobre a força de corte na furação, dentro da faixa de velocidades recomendadas.

Para velocidades de corte muito altas ou muito baixas e para pequenos diâmetros de brocas, encontrou que o comportamento da curva do momento torsor se aproxima do da força axial.

Em 1960, Spur (11) verificou para crescentes velocidades de corte, inicialmente uma inclinação de crescente na curva do momento torsor e da força de avanço, para na faixa usual de velocidades (20 - 30 m/min) permanecerem aproximadamente constantes, apresentando um valor mínimo, voltando a crescer para velocidades maiores, aproximando-se dos valores iniciais. Fig.(3).

Em 1973, Dorrenberg (24) estudou a faixa de velocidade de corte de 18 até 51 m/min, em brocas com furo interno para refrigeração, encontrando o mesmo comportamento.

### c) Geometria da Ferramenta

#### - Ângulo de Saída

Quanto maior o valor do ângulo de saída, menor é o valor da força específica de usinagem.

Em 1959, Vieregge (25) determinou a influência do ângulo de saída e do ângulo de posição nas componentes da força de usinagem para o torneamento.

(Fig. 4).

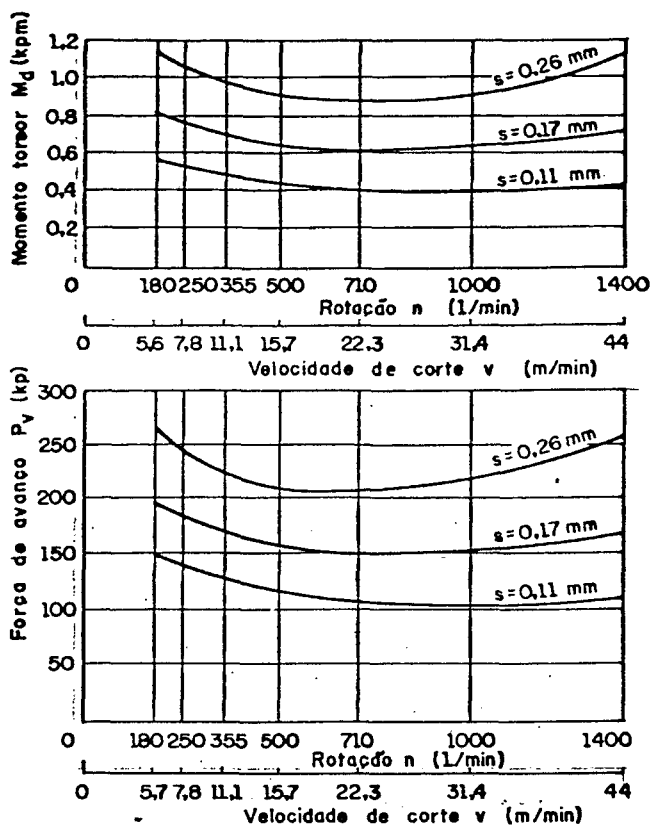


FIGURA 3 - Momento torsor e força de avanço na furação em função da velocidade de corte segundo Spur (11).

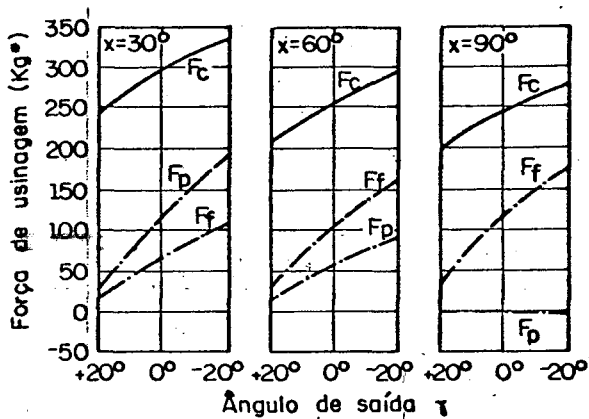


FIGURA 4 - Variação das componentes da força de usinagem no torneamento, em função dos ângulos de posição  $\chi$  e de saída  $\gamma$  (25).

A influência do ângulo de saída  $\gamma$  na furação é especialmente interessante, uma vez que ele varia em amplos limites durante a usinagem.

Spur (11) estudou a influência do ângulo de saída lateral ( = ângulo da hélice (26) ) sobre as forças específicas de corte e de avanço na furação, encontrando o resultado mostrado na Figura 5.

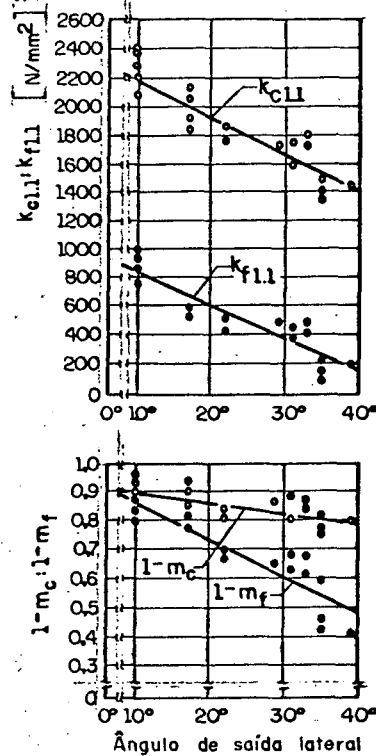


FIGURA 5 - Dependência das forças específicas de usinagem na furação em função do ângulo de saída lateral  $\gamma_x$ , segundo Spur (11).

Segundo Witte (20), a diminuição (elevação) de  $1^\circ$  grau no ângulo de saída, na faixa de  $10^\circ$  a  $39^\circ$ , implica no aumento (diminuição) de aproximadamente 1,5% na força de corte e 5% na força de avanço.

- Ângulo de Folga

A influência do ângulo de folga sobre as forças de usinagem se dá, principalmente, para valores muito pequenos, quando há um aumento do atrito entre a peça e a superfície de incidência de ferramenta, aumentando a força de usinagem.

- Ângulo de Inclinação

É verificada somente para valores negativos elevados. Neste caso, no torneamento, a força passiva  $F_p$  aumenta consideravelmente, podendo fletir a peça ou deslocar transversalmente a ferramenta. A Figura 6 apresenta os resultados obtidos por Abendroth & Menzel.(27).

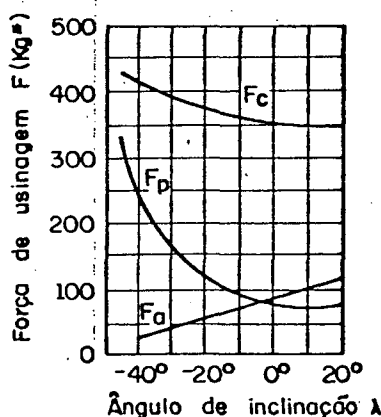


FIGURA 6 - Influência do ângulo de inclinação  $\lambda$  sobre a força de usinagem, no torneamento (27).

### - Ângulo de Posição

A influência do ângulo de posição nas componentes da força de usinagem no torneamento, pode ser visto na Figura 4 e Figura 7.

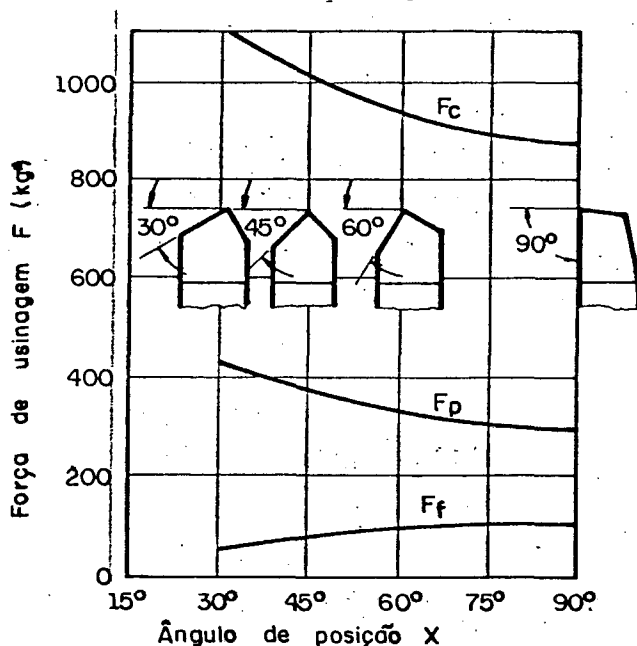


FIGURA 7 - Influência do ângulo de posição na força de usinagem no torneamento, segundo Schlesinger (28).

Para a furação, Witte (20) encontrou os resultados mostrados na Figura 8, usando um ângulo de ponta, variando entre 80° e 140°, o que corresponde a um ângulo de posição de 40° - 70°.

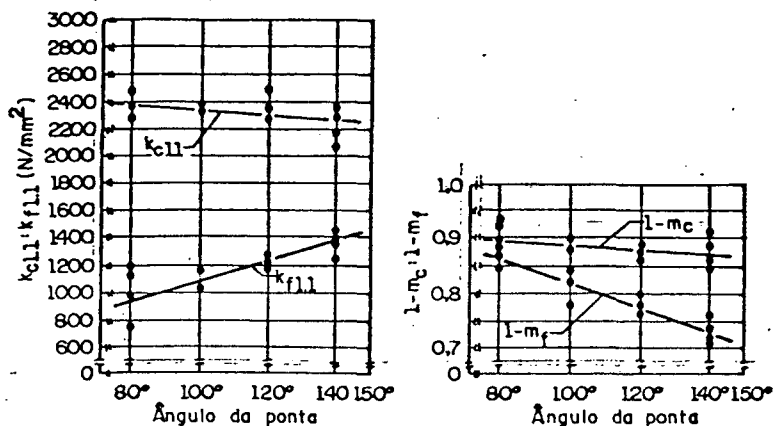


FIGURA 8 - Influência do ângulo da ponta de uma broca sobre a força específica de usinagem (20)

#### - Afição da Ferramenta

O estado de afiação da ferramenta exerce grande influência sobre a força de usinagem. Assim, tanto o acabamento inicial como o próprio desgaste durante a usinagem alteram, sensivelmente, as componentes da força de usinagem.

Na furação, o tipo de afiação da broca (29) também influi na força de usinagem.

#### - Fluido de Corte

No torneamento, somente para baixas velocidades de corte, os fluidos de corte contribuem para o abaixamento da força de usinagem. Geralmente, a refrigeração é usada para diminuir o desgaste da ferramenta e permitir maiores velocidades de corte.

Na furação, com broca helicoidal, os fluidos de corte ajudam no transporte do cavaco.

### 2.2.3 Medição da Força de Usinagem

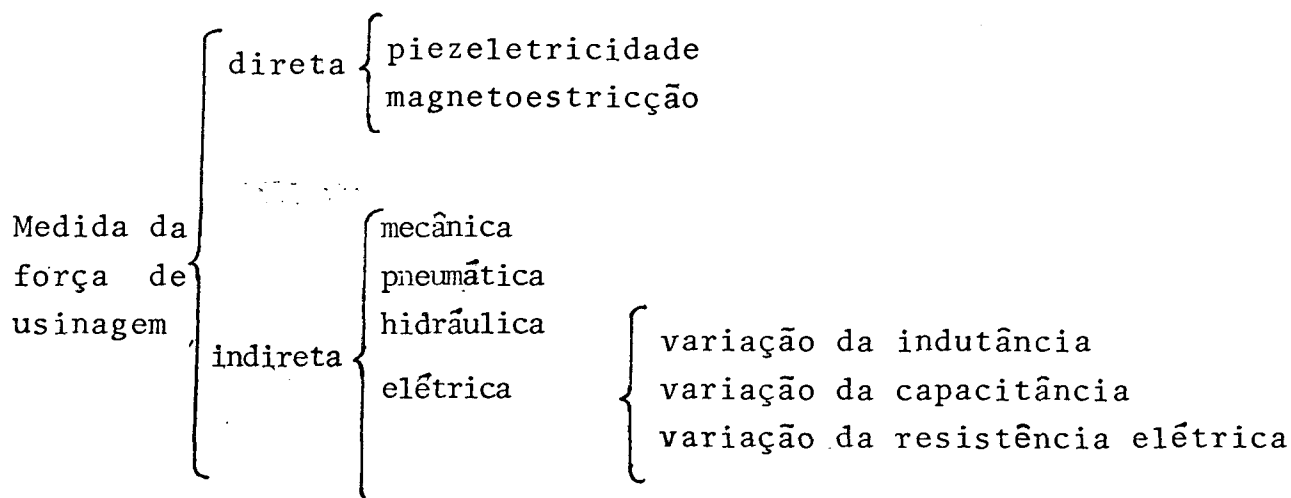
Para as principais aplicações da força de usinagem, geralmente, é suficiente a determinação da força de corte média (medição estática), mas, para o estudo do mecanismo de formação do cavaco e para estudos de estabilidade dinâmica da máquina e ferramenta, é necessária a determinação da variação da força de corte (medição dinâmica).

As componentes da força de usinagem são medidas através de sistemas de medição que satisfaçam os seguintes requisitos:

- boa sensibilidade
- boa precisão
- rigidez
- exatidão de reprodução de forças variáveis com tempo
- insensibilidade quanto à variação de temperatura e à umidade
- elevada frequência própria.

#### Princípios de Medida

A medição da força de usinagem pode ser direta ou indireta:



A medida indireta é realizada através da medição do deslocamento de molas, utilizando-se meios mecânicos, pneumáticos, hidráulicos e elétricos.

Para a medição direta, tem-se o método baseado na piezoelectricidade e o baseado na magnetoestricção.

Atualmente o sistema de medição mais utilizado para a medição de forças de usinagem são aqueles que usam transdutores de força com elementos sensíveis feito de cristal de quartzo, com aproveitamento do efeito piezelétrico, pois estes possibilitam medir precisamente as três componentes de força e o momento torsor nos diversos processos de fabricação.

O efeito piezelétrico é a propriedade existente em certos cristais de se tornarem eletricamente carregados quando submetidos a esforços mecânicos, e inversamente, deformar-se elasticamente quando submetidos a uma polarização elétrica.

Esta polarização consiste na libertação de cargas elétricas iguais e contrárias no cristal. Os cristais mais sensíveis a esta propriedade são o quartzo e a turmalina. Porém, certos sais, como o sal de Rochele, o tartarato de potássio e o titanato de bário, apresentam propriedades análogas.

Os transdutores piezelétricos com elemento de quartzo oferecem:

- alta resistência de isolamento
- alta resistência mecânica
- alto módulo de Young
- não apresenta efeito piroelétrico
- baixa histerese
- linearidade extremamente alta
- excelente estabilidade.



Além disto, somente o quartzo apresenta, em três direções ortogonais, efeito longitudinal, efeito transversal e efeito de cisalhamento, como mostra a Figura 9.

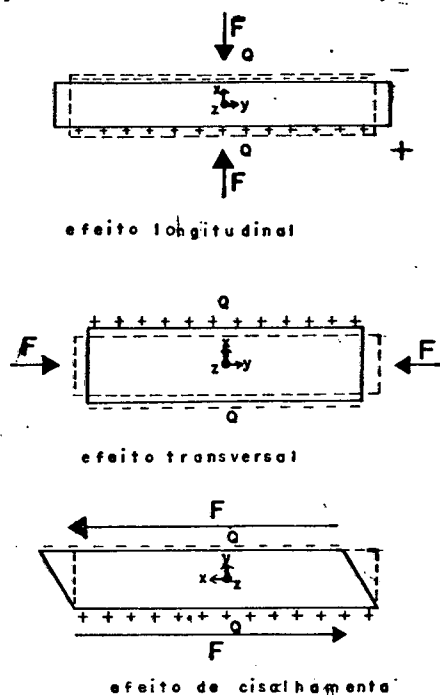


FIGURA 9 - Efeito piezelétrico no quartzo.

O eixo  $y$  refere-se ao eixo cristalográfico do quartzo, o eixo  $z$  é chamado de eixo óptico e o eixo  $x$ , de eixo elétrico.

Nos efeitos longitudinais e de cisalhamento a carga elétrica é diretamente proporcional à força total aplicada, aparecendo nas superfícies mecanicamente carregadas, independentemente do tamanho e forma dos elementos de quartzo.

No efeito transversal, a proporcionalidade entre a força aplicada e a carga elétrica continua, porém, a carga aparece na face normal ao eixo  $x$ , e depende da relação entre as dimensões  $y/x$ . Por isso, é, principalmente, usado para transdutores de pressão e transdutores de força de alta sensibilidade.

A sensibilidade nominal para o efeito longitudinal é 2,31 pC/N e para o efeito de cisalhamento é de 4,62 pC/N; para o efeito transversal, pode-se obter sensibilidade de até 500 pC/N.

## C A P Í T U L O 3

## P L A N E J A M E N T O D O E X P E R I M E N T O

Após uma análise dos trabalhos realizados sobre forças de usinagem, constata-se que uma lei universal de força de usinagem não pode ser definida. No entanto, a determinação de caracteres dependentes do processo de fabricação é possível, e em relação a isto pode-se fazer uma análise comparativa entre os diversos processos de usinagem. Por outro lado, isto implica em um grande número de dados, exigindo-se uma pesquisa mais abrangente.

Considerações de novos valores de influência sobre as forças de corte no torneamento são possíveis, bem como a transmissibilidade dos valores específicos para outros processos de usinagem, porém não poderão ser aceitos com a necessária precisão.

O objetivo deste experimento é fazer uma comparação relativa entre os processos de torneamento e furação, medindo-se as componentes da força de usinagem nos dois processos, determinando-se um modelo de força de usinagem baseada na equação de Kienzle, com um fator de usinagem representativo dos diversos fatores de influência, de modo que na utilização prática, apresente uma boa precisão e fácil manuseio.

Como se pretende fazer uma comparação entre os dois processos, parece útil, que as forças que atuam na broca sejam analisadas e separadas de acordo com as influências dependentes e independentes do processo, como mostra a Figura 10.

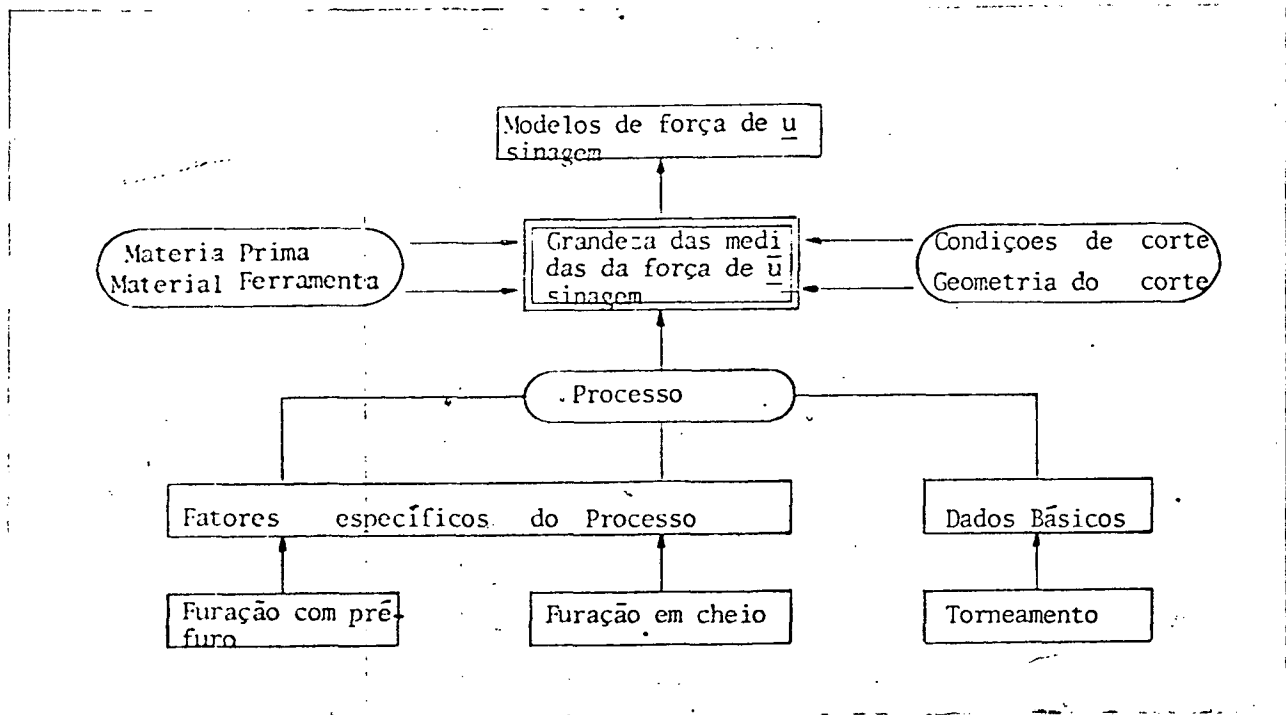


FIGURA 10 - Representação esquemática para a construção de modelos de força de usinagem para o torneamento e furação.

A manutenção constante dos fatores independentes do processo nos ensaios de torneamento e furação, e o estudo dos componentes processuais dependentes do processo de furação, possibilitam a determinação dos dados básicos da equação de Kienzle ( $K_c^{1.1} ; 1-m_c ; K_f^{1.1} ; 1-m_f ; K_p^{1.1} ; 1-m_p$ ) no torneamento e sua ligação com os valores específicos dos processos de furação em cheio e furação com pré-furo.

### 3.1 - Semelhança entre as Componentes da Força de Usinagem do Torneamento e da Furação

Schallbroch (30) e Rohlke (31) demonstraram, há tempos atrás, a semelhança entre o corte de uma ferramenta de tornear e o de uma broca. Figura 11.

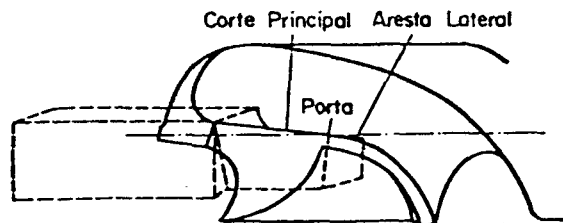


FIGURA 11 - Semelhança entre o corte de uma broca e uma ferramenta de torneamento, de acordo com Röhlike (31).

Pode-se observar que a broca helicoidal, a princípio, é constituída de duas ferramentas de corte, havendo pois, grande semelhança entre as duas ferramentas. Entretanto, a broca possui algumas propriedades sem similares na ferramenta de torneamento. Sua ponta de corte é parcialmente composta de um gume transversal (22) que produz um ângulo de saída altamente negativo ( $\gamma = -55^\circ$ ), sendo a velocidade de corte no centro da broca igual a zero. Figura 12.

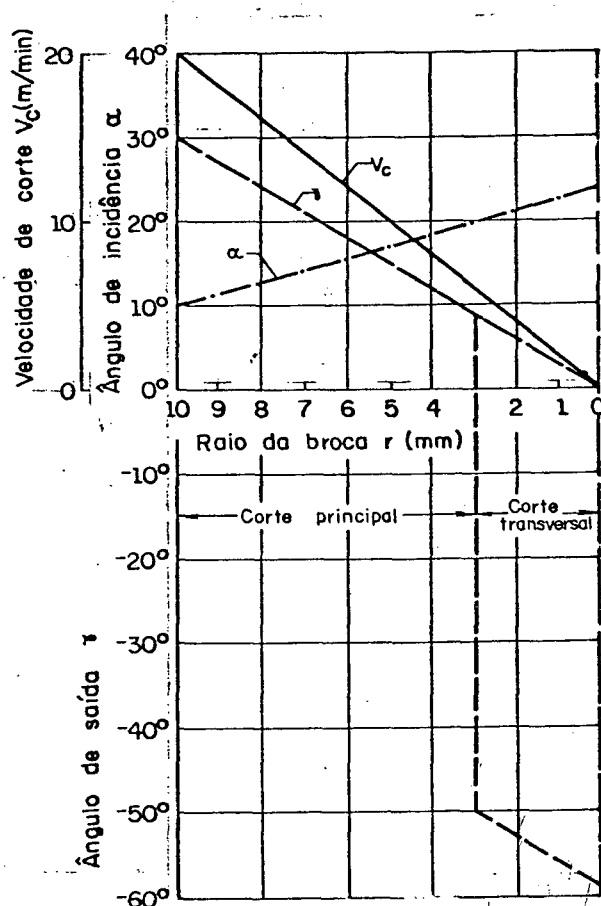
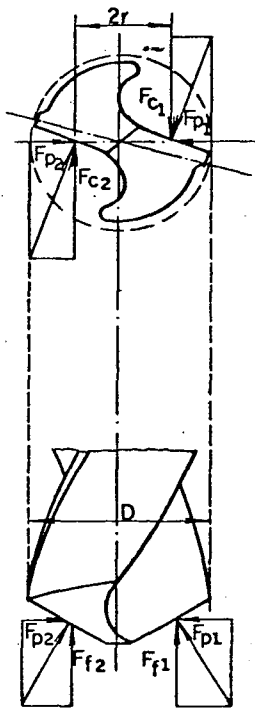


FIGURA 12 - Ângulo de saída  $\gamma$ , ângulo de folga  $\alpha$  e a velocidade de corte  $V_c$ , em função do diâmetro da broca (20).

O ângulo de folga, e principalmente o ângulo de saída, não é constante ao longo da aresta principal de corte, aumentando do centro para a periferia, onde atinge seu valor máximo.

Durante a furação, há atrito entre o gume transversal e o fundo do furo e entre o gume lateral e as paredes do furo, havendo também atrito durante a saída do cavaco, com o canal e a parede do furo. Figura 12.

A Figura 13 mostra a disposição das componentes da força de usinagem na ferramenta de torneiar e na broca.



- F = Força de usinagem
- $F_c$  = Força de corte
- $F_f$  = Força de avanço
- $F_p$  = Força passiva
- D = Diâmetro da broca
- r = Ponto de aplicação da força na broca.

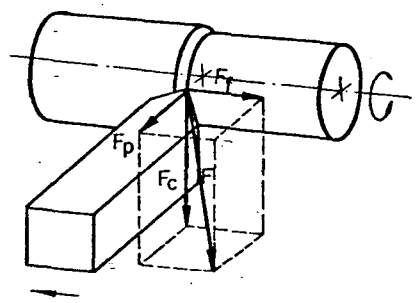


FIGURA 13 - Relações de forças na broca helicoidal e na ferramenta de torneiar.

### 3.2 Planejamento dos Ensaio

Com o intuito de eliminar a influência do corte transversal e da aresta lateral, planejou-se a experiência abaixo. Figura 14.

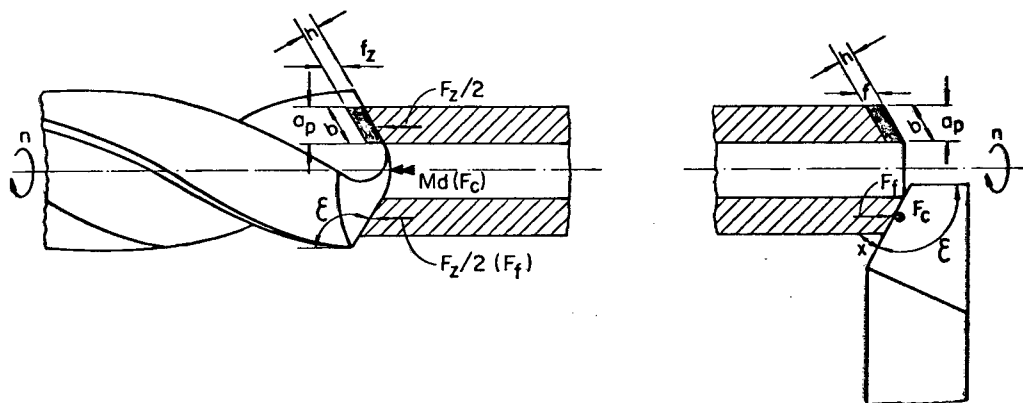


FIGURA 14 - Experiência planejada para estudar a composição das componentes da força específica de usinagem, sob a eliminação das influências específicas do processo de furação.

Esta montagem, mostra grande semelhança com o corte ortogonal, e assim será denominado posteriormente, e possibilita grande similaridade entre os processos de torneamento e furação, à exceção da não constância do ângulo de saída  $\gamma$  da broca, ao longo do comprimento de corte, que será substituído por um ângulo de saída mediano  $\bar{\gamma}$  na ferramenta de toronar.

O ângulo de folga  $\alpha$ , ângulo de inclinação  $\lambda$ , ângulo de posição  $\chi$ , ângulo da ponta  $\epsilon$ , e a profundidade de corte serão iguais para os dois processos, enquanto as demais variáveis deverão ser mantidas sob idênticas condições.

A partir destes resultados, pretende-se determinar a influência dos fatores atrito do cavaco e atrito da aresta lateral, bem como a influência da "aresta transversal", comparando-os com os resultados de outras experiências a seguir mencionadas.

Para se determinar a influência dos componentes atri

to do cavaco e atrito do gume lateral, planejou-se o processo de furação com pré-furo, uma vez que, neste caso, apenas as já conhecidas forças do corte ortogonal: momento torsor e força axial, têm influência sobre estes componentes. Figura 15.

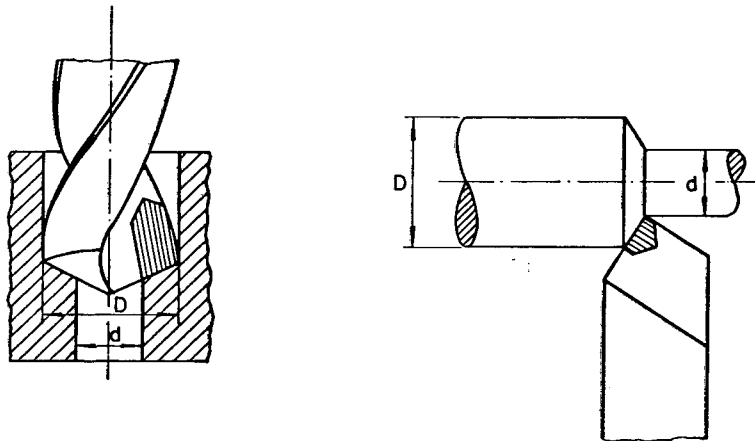


FIGURA 15 - Experiência planejada para estudar a composição das componentes da força específica de usinagem, sob a eliminação da influência da aresta transversal.

A força de corte na furação ortogonal e furação com pré-furo é determinada com o auxílio do momento torsor  $Md$  e sob a suposição de que a força de corte resultante localiza-se no centro da largura de corte  $b$ , sendo calculada de acordo com as seguintes equações (20) :

força de corte:

$$F_c = \frac{2 \cdot Md}{D + d} \quad (34)$$

força de corte relativa:

$$\frac{F_c}{b} = \frac{4 \cdot Md \cdot \sin \chi}{D^2 - d^2} \quad \text{Onde: } b = \frac{D - d}{2 \sin \chi} \quad (35)$$



A força de avanço  $F_f$  corresponde basicamente à força axial parcial.

força de avanço:

$$F_f = \frac{F_a}{2} \quad (36)$$

força de avanço relativa:

$$\frac{F_f}{b} = \frac{F_a \cdot \text{sen } \chi}{D - d} \quad (37)$$

Quanto às forças passivas  $F_p$ , estas estão colocadas umas contra as outras, anulando-se, e não podem ser comparadas às forças passivas do torneamento, conforme está indicado na Figura 13.

A influência do corte transversal, que não aparece na furação com pré-furo, é visível na furação em cheio, de modo que com esta experiência pode-se determinar quantitativamente este componente de força para uma broca. Figura 16.

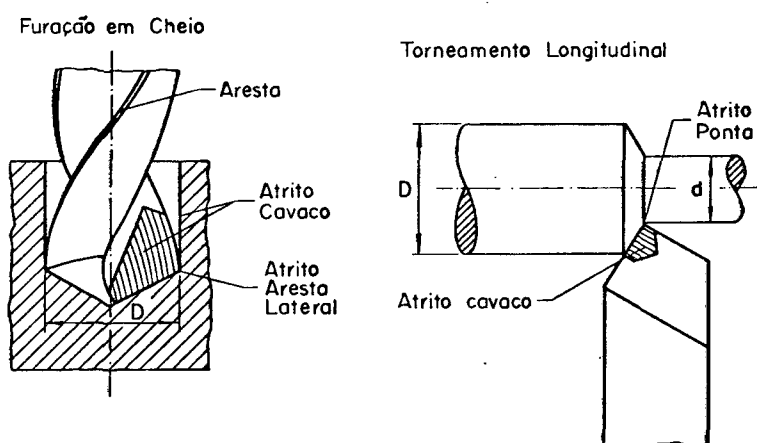


FIGURA 16 - Experiência planejada para estudar a composição das componentes da força específica de usinagem considerando a influência dos fatores específicos do processo de furação

Neste caso, as forças de corte não se situam no centro do gume principal, e sim, atuam sob a alavanca (20):

$$r = 0,38 \cdot \frac{D}{2} \quad (38)$$

Para a determinação das forças na furação em cheio, utilizam-se as seguintes equações:

força de corte:

$$F_c = \frac{Md}{0,38 \cdot D} \quad (39)$$

força de corte relativa:

$$F_c = \frac{2 \cdot Md \cdot \text{sen } \chi}{0,38 \cdot D^2} \quad b = \frac{D}{2 \cdot \text{sen } \chi} \quad (40)$$

força de avanço:

$$F_f = \frac{F_a}{2} \quad (41)$$

força de avanço relativa:

$$\frac{F_f}{b} = \frac{F_a \cdot \text{sen } \chi}{D} \quad (42)$$

Como para o torneamento usou-se um ângulo de saída igual ao ângulo de saída médio da broca, planejou-se uma expe

riência com o ângulo constante ao longo do comprimento de corte da broca na furação em cheio, para verificar-se a sua influência sobre as componentes da força de usinagem.

Com o intuito de simular o atrito da aresta lateral existente na furação, realizou-se uma experiência de torneamento longitudinal com o ângulo de ponta  $\epsilon = 121^\circ$ , onde se pretende observar a influência do atrito de corte lateral, em analogia a broca helicoidal, mesmo sabendo-se que o transporte de cavaco não pode ser simulado.

### 3.3 Equipamentos para Análise Experimental

Esta pesquisa que será realizada no Laboratório Máquinas Ferramentas da Universidade Federal de Santa Catarina, pretende comparar os valores de força de usinagem do torneamento e da furação; procura-se, portanto, eliminar os erros sistemáticos desde as condições de ensaios, escolhendo-se:

- máquinas
- sistemas de medição
- ferramentas de corte
- matéria-bruta.

de maneira a apresentarem uma considerável analogia, e quando possível, terem identidade.

#### 3.3.1 Máquinas Operatrizes

Para os ensaios concernentes às forças de usinagem no torneamento, será utilizado o torno IMOR P 400 (32), adaptado com motor de corrente contínua e regulador de rotação:

Torno: Imor

Fabricante: Indústria Romi S/A - São Paulo.

Modelo: MVN - V

Distância entre pontas: 1000 mm

Diâmetro máximo sobre o barramento: 430 mm

Sistema de Acionamento: Ward Leonard

Potência do Motor: 22 KW a 1800 rpm

A Figura 17 mostra a representação esquemática da montagem para a medição das componentes da força de usinagem no torneamento.

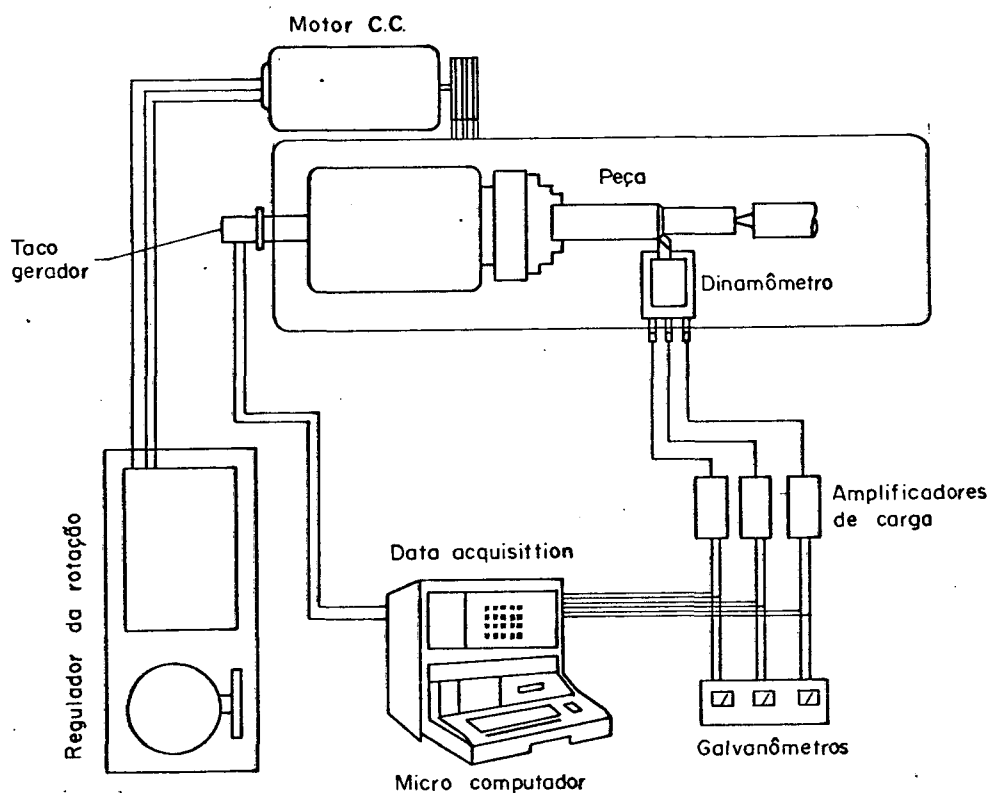


FIGURA 17 - Esquema geral da medição da força de usinagem no torneamento.

Para os ensaios de furação, será utilizado um centro de usinagem Hüller Hille nb-h 65 comandado numericamente (33) com as seguintes características:

#### Dados Técnicos

Comando: SInumerik 7 M - Siemens

Campo de trabalho:	eixo x	450 mm
	eixo y	400 mm
	eixo z	400 mm

Faixa de velocidades: 25 ... 4000 min<sup>-1</sup>

Incremento para a velocidade: 1 min<sup>-1</sup>

Avanço contínuo:

Incrementado para o avanço: 0,001 mm/min

Máxima potência motora: 7,6 kW

Maximo torque: 160 Nm

Capacidade de armazenamento

de ferramentas: 20

Erro de posicionamento: 10 μm

Precisão de giro da mesa: ±3"

A Figura 18 mostra a representação esquemática para a medição das componentes da força de usinagem na furação.

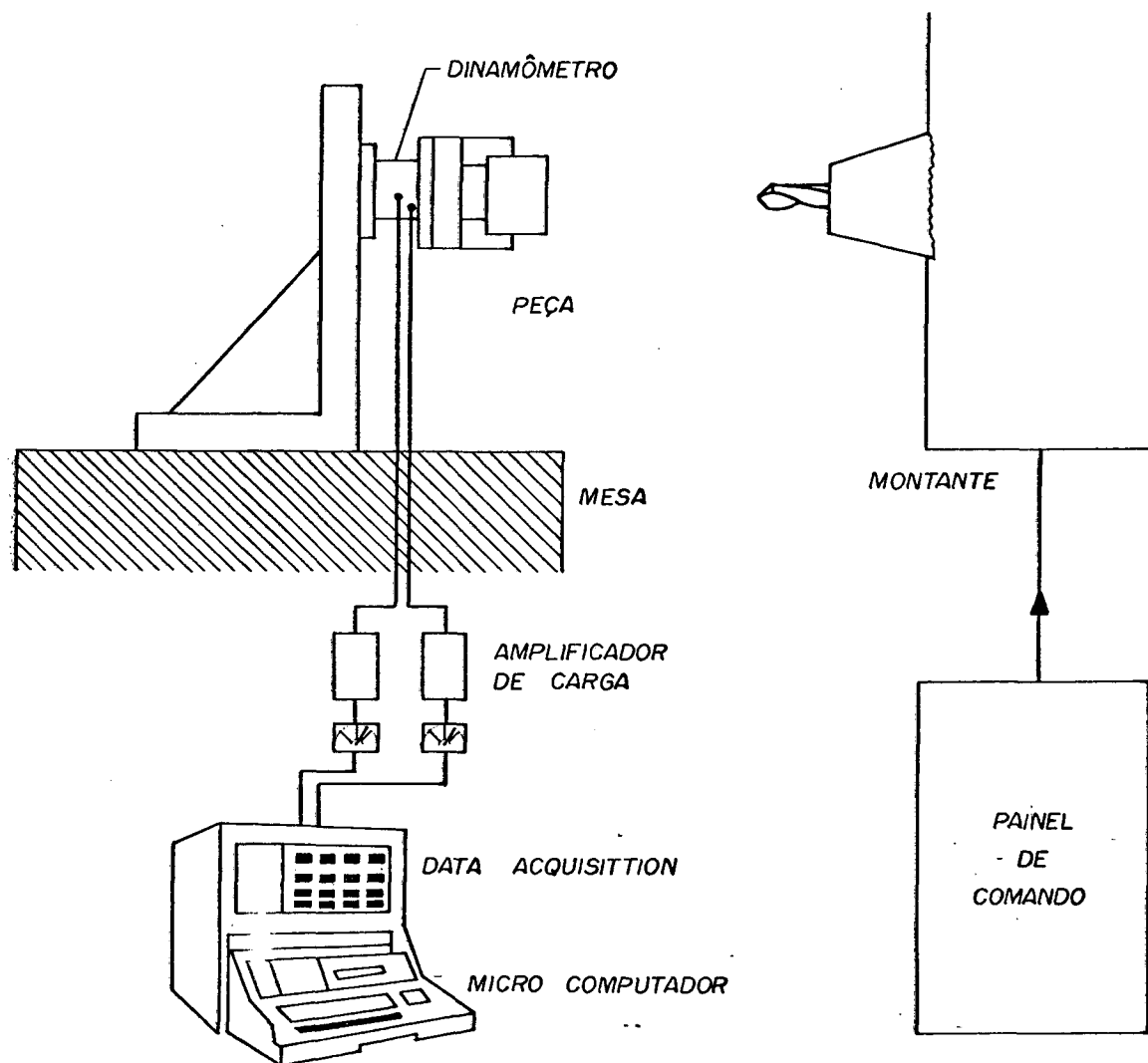


FIGURA 18 - Representação esquemática para a medição das componentes da força de usinagem na furação.

### 3.3.2 Medição da Rotação

A rotação do torno será medida por um taco-gerador, fixado na extremidade anterior da árvore, sendo o sinal da tensão de saída introduzida no "data acquisition". Este converterá o sinal analógico em sinal digital enviando-o para o micro computador, onde será transformado em uma rotação proporcional, cujo valor será apresentado na tela para que possa ser comparado com o valor anteriormente calculado para o ensaio, conforme Figura 19.

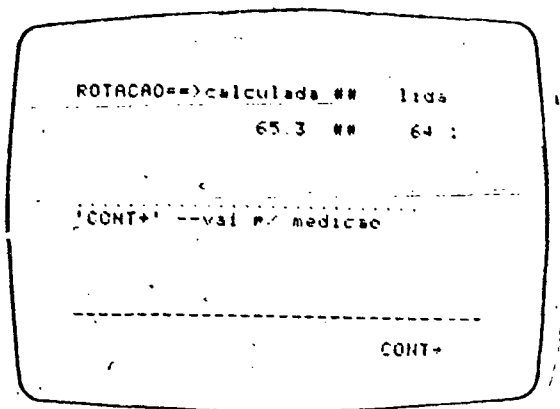


FIGURA 19 - Tela do micro computador mostrando a rotação calculada e a rotação medida no taco gerador.

Dados técnicos do taco-gerador

Fabricante : WEG Máquinas S/A

Modelo : 1 R/60

Constante de proporcionalidade: 0,06 V/rpm

rpm máx. : 8000

### 3.3.3 Sistemas de Medição

Dinamômetro a 3 componentes (ensaios de torneamento)

O dinamômetro piezelétrico a cristal de quartzo com 3 componentes tipo 9263A da Firma Kistler A.G. (34) serve exclusivamente para medição de forças de corte no torneamento, medindo a força de corte  $F_c$  (na direção Z), força de avanço  $F_f$  (na direção x) e força passiva  $F_p$  (na direção y) com alta resolução e mínimo desvio. Possui projeto compacto, de fácil instalação sobre o carro porta-ferramenta do torno, sendo necessário, em alguns casos, a colocação de chapas de aço paralelas e retificadas para ajustar sua altura.

Cada canal requer um amplificador de carga para transformar o sinal de cargas elétricas geradas na plataforma em uma tensão de saída proporcional às forças aplicadas, o que é feito com um mínimo desvio.

Suas principais características técnicas são:

faixa de operação máxima:	$F_x, F_y$	±15	kN
	$F_z$	0...30	kN
capacidade de sobrecarga:		50	%
resolução:		0,01	N
sensibilidade:		-3,9	pC/N
linearidade:		≤±1	%VFE
histerese:		≤ 1	%VFE
frequência de ressonância		≥2,5	kHz
rigidez: direção x e y		~ 2	kN/μm
direção z		~ 5	kN/μm
impedância de entrada:		> 10 <sup>13</sup>	Ω
faixa de temperatura de trabalho:		0...70	°C



### Dinamômetro a 4 componentes (ensaios de furação)

Dinamômetro piezelétrico a cristal de quartzo com 4 componentes (35) é utilizado para a medição da força axial ( $F_z$ ), do momento ( $M_z$ ) e das forças defletivas ( $F_x$ ,  $F_y$ ) da furação, fresa gem, etc.

O dinamômetro é compacto e se caracteriza por uma grande rigidez e elevada frequência própria, propiciando a medição dinâmica e quase estática das principais forças básicas.

É composto de dois discos de carga a duas componentes, montados um sobre o outro entre duas placas com pré-carregamento. Os discos de carga compreendem cada um, dois jogos de lamelas de quartzo dispostas de modo circular e orientadas em função de sua sensibilidade.

Um dos discos de carga emite uma carga elétrica proporcional à  $F_z$  e à  $M_z$  enquanto a outra emite uma carga proporcional à  $F_x$  e  $F_y$ . As componentes são mediadas praticamente sem deformação.

É protegido contra a corrosão e contra infiltrações de água ou refrigerantes

Além do dinamômetro, são necessários 4 amplificadores de carga que transformam as cargas elétricas, vindas do dinamômetro, em tensões de saída proporcionais às forças aplicadas.

Suas principais características técnicas são:

Fabricante: Kistler Instrumente A.G.

Tipo: 9273

	$F_x, F_y$	$F_z$	$M_z$
Faixa de Operação:	-5...5	-5...20 kN	-100...100 Nm
Sobrecarga:	-6/6	-6/24 kN	-120/120 Nm

	$F_x, F_y$	$F_z$	$M_z$
Sensibilidade:	-3,5	-1,9 pC/N	-1,5 pC/Ncm
Linearidade:	$\leq \pm 1$	$\leq \pm 1$	$\leq \pm 1$ %VFE
Histerese:	$\leq 1$	$\leq 1$	$\leq 1$ %VFE
Rigidez:	0,1	2 kN/ $\mu$ m	30 Ncm/ $\mu$ rad
Frequência natural:	1,5	3 kHz	
Temp. de trabalho:			0...70 °C
Impedância de entrada:			>10 T $\Omega$

### Amplificador de Carga com Saída para Galvanômetro (36)

Tem a finalidade de transformar as cargas elétricas em tensões proporcionais às forças aplicadas. Estas tensões de saída podem ser reguladas de modo a terem uma relação de 1/1 com as Unidades Mecânicas, sendo apenas necessário o ajuste do capacitor variável do amplificador de carga conforme indicação do fabricante do transdutor.

O amplificador possui doze faixas de medição em Unidades Mecânicas por Volt, com três constantes de tempo reguláveis (longo, médio e curto) e filtros eficazes para adaptação da gama de frequência ao grau de medição desejado.

Para medições estáticas, é necessário regular a constante de tempo do amplificador de carga para "longo" e um filtro com limite de frequência de 180 kHz. A duração máxima de medição depende do sinal emitido pelo transdutor e do erro admissível.

Para o amplificador 5006 o desvio máximo é de 0,03 pC/s, portanto, a faixa de tempo de duração possível de medição, para a sensibilidade de 1...11 pC/U.M. é de aproximadamente:

$$t_{\min} = \frac{1 \text{ pC}}{0,03 \text{ pC/s}} = 33,3 \text{ s}$$

$$t_{\max} = \frac{5000 \text{ pC}}{0,03 \text{ pC/s}} = 166666,6 \text{ s}$$

Através do comando "Reset", é possível eliminar-se periodicamente o erro, resolvendo o problema da duração de medição nos sistemas onde a medição deve ser estritamente estática.

Suas principais características técnicas são:

Fabricante: Kistler Instrument A.G.

Tipo: 5006

Gama de medição - 12 escalas:	±10 ... ±500'000	pC
Sensibilidade do transdutor:	0,1 ... 11'000	pC/U.M.
Impedância de Entrada:	~100	TΩ
Faixa de Frequência:	0...180	kHz
Constantes de Tempo:	longo	1'000...100'000 s
	médio	1...5'000 s
	pequeno	0,01...50 s
Linearidade:	0,05	%
Precisão:	<±1	%
Sinal parasita do cabo:	$-3 \cdot 10^{-5}$	pCrms/pF
Temperatura de utilização:	0...50	°C

#### 3.3.4 Ferramentas de Corte

Durante a pesquisa, serão utilizadas as seguintes ferramentas de corte:

Ferramenta Reta de Tornear Monocortante de Aço Rápido. (22).

Seus principais ângulos estão mostrados na Figura 20.

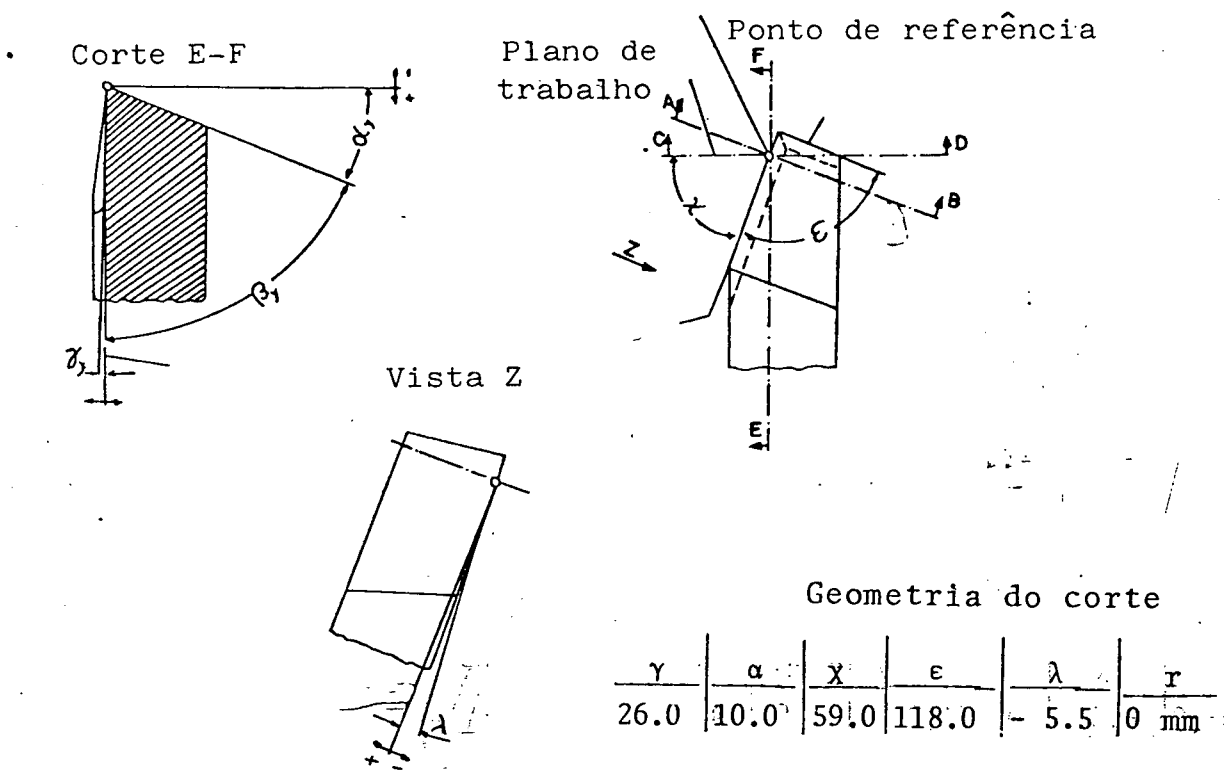


FIGURA 20 - Ferramenta de toronar e seus principais ângulos.

Broca Helicoidal com Haste Cilíndrica (22)

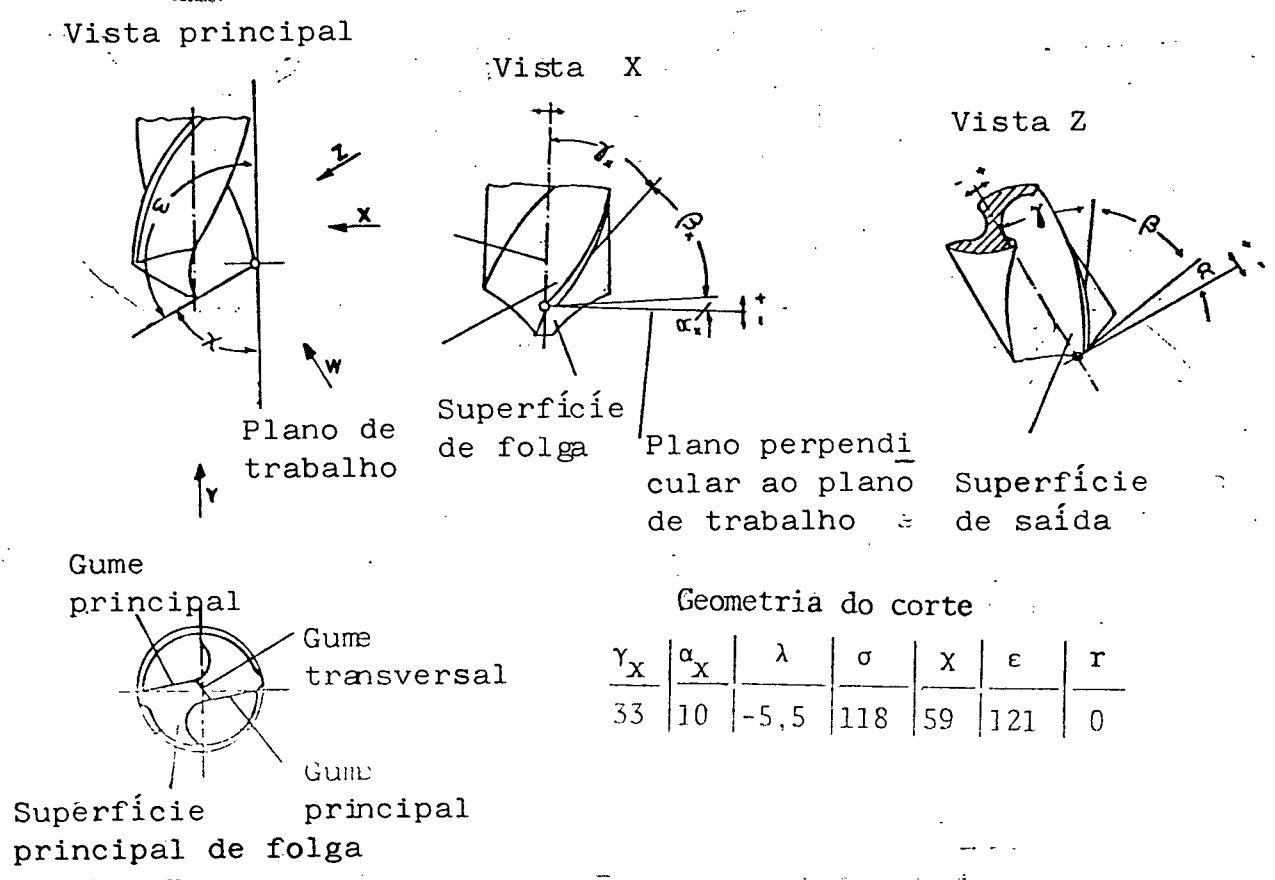


FIGURA 21 - Broca helicoidal e seus principais ângulos.

### Formas de Afição (29)

Serão usadas brocas com afiação normal e uma afiação especial não especificada na norma (afiação U) que consiste em manter o ângulo de saída constante ao longo do gume principal, conforme indica a Figura 22.

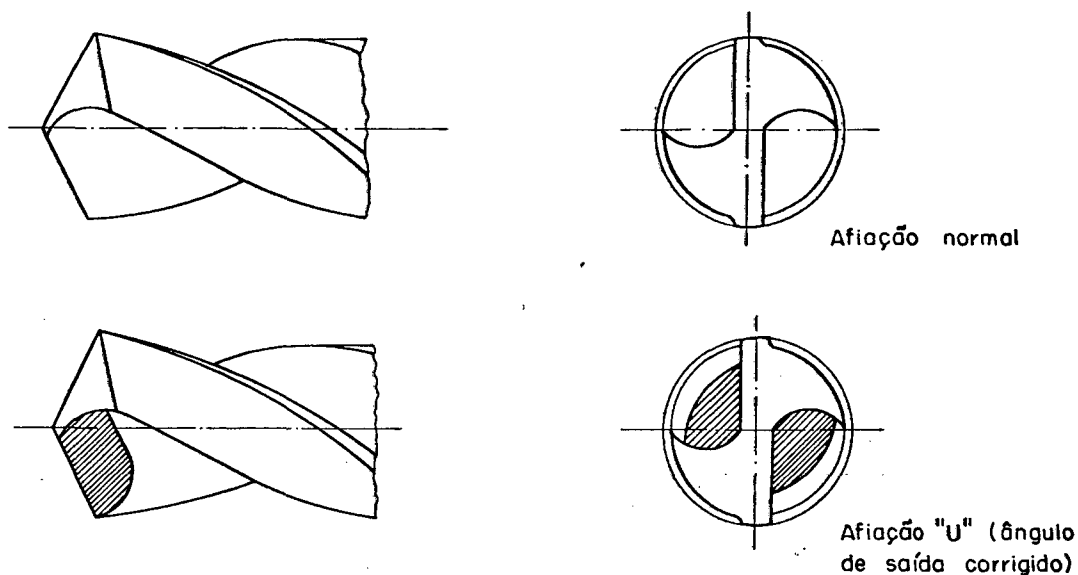


FIGURA 22 - Tipos de afiação utilizadas para os ensaios de furação.

#### 3.3.5 Condições de Corte

Com o objetivo de padronizar os ensaios, os avanços e as velocidades de corte serão escolhidos dentre os valores das séries normalizadas (37).

Serão selecionados os valores de avanço existentes no torno, que mais se aproximem da série base R 10, compreendidos entre 0,05 e 0,4 mm.

Para tanto será necessário uma montagem especial no avelal do torno  $\frac{26}{127} \times \frac{38}{120}$ . Esta mesma montagem foi utilizada

e aferida por Queiroz (38), sendo o resultado mostrado na Tabela 1. Para obter-se maior precisão, o acionamento dos avanços será feito pelo fuso e não pela vara.

Avanços aferidos no torno de ensaios com a montagem no avental									
26:127x38:120 $i_t=15,46$ (redução)									
Caixa de blocos deslocáveis	Caixa Norton								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
B	0,052	0,056	0,061	0,066	0,071	0,077	0,083	0,090	0,097
A	0,104	0,112	0,121	0,131	0,142	0,153	0,166	0,179	0,194
D	0,208	0,225	0,243	0,263	0,284	0,307	0,332	0,359	0,388
C	0,416	0,450	0,486	0,525	0,568	0,614	0,664	0,718	0,776

TABELA 1 - Avanços obtidos com a montagem especial no avental do torno.

Para as velocidades de corte, serão utilizados os valores da série R 10 (14. .31,5), compreendendo, portanto, as velocidades indicadas para usinar o aço ABNT 1020, escolhido para o ensaio.

A profundidade de corte para todos os ensaios será de 3 mm com exceção dos ensaios para furação em cheio, que será de 5 mm.

Os ângulos de saída, de folga, de inclinação e de posição serão mantidos sob idênticas condições (valores base da broca) em todos os ensaios, uma vez que não será estudada a influência destes elementos nas forças de corte.

Todas as medições de força de usinagem serão realizadas

com ferramentas de corte afiadas, sem raio de arredondamento, sem refrigeração e repetidas três vezes.

### 3.3.6 Material ensaiado

As pesquisas foram executadas em um aço laminado ABNT 1020 apresentando as seguintes características:

Composição química média (%)

C	Si	Mn	P	S
0,20	0,19	0,48	0,016	0,023

Ensaio mecânicos

Limite de escoamento:	417	N/mm <sup>2</sup>
Limite de resistência:	484	N/mm <sup>2</sup>
Alongamento em $L_0 = 5 d_0$ :	29,5	%
Estricção:	63,5	%

Dimensões: Figuras 23, 24 e 25.

torneamento longitudinal

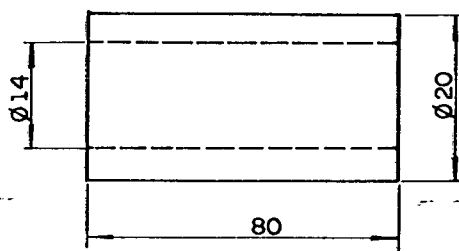


FIGURA 23 - Dimensões do corpo de prova utilizado nos ensaios de torneamento longitudinal.

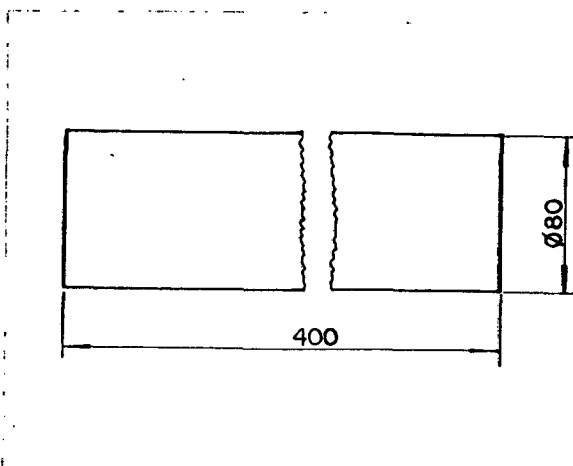


FIGURA 24 - Dimensões do corpo de prova utilizado nos ensaios de torneamento e furação ortogonal.

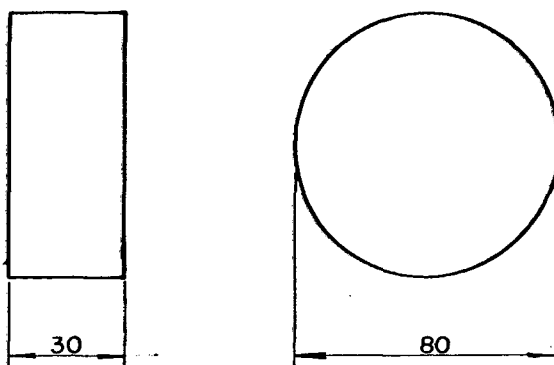


FIGURA 25 - Dimensões do corpo de prova utilizado nos ensaios de furação em cheio e com pré-furo.

### 3.3.7 Aquisição Automática de Dados

A aquisição, processamento e documentação dos dados serão realizados automaticamente por um micro computador da HEWLETT PACKARD, Modelo HP - 85, com 32 KBYTES de memória RAM, dotado de unidade de fita magnética, impressora térmica embutida ( 32 caracteres, formulário contínuo ) e vídeo.

Durante os ensaios, após a realização das leituras, os dados serão armazenados em cartucho de fita magnética, sendo uma parte do processamento realizada imediatamente, através da



utilização da INPUT/OUTPUT ROM, MASS STORAGE ROM, PLOTTER/PRINTER ROM, existentes no HP-85.

Para o restante do processamento, serão utilizados os seguintes periféricos:

- HP 7225 Graphics Plotter
- 9871 a Printer - HP
- 9895 a Flexible Disc Memory-HP
- 82937 a HP-IB Interface.

O "SOFTWARE" será desenvolvido em linguagem Basic, procurando-se máxima facilidade de operação e rapidez de aquisição.

Os sinais elétricos gerados nas plataformas, após sua amplificação, serão convertidos em um sinal digital, para que possam ser introduzidos no micro computador. Esta operação será realizada pelo data acquisition/Control Unit 3497 A da HEWLETT PACKARD.

### 3.3.8 Equipamentos Diversos

Paquímetro :

Fabricante : Mitotoyo

Faixa de medição : 0 - 150 mm

Resolução : 0,05 mm

Microscópio de ferramentaria

Fabricante: NIKON - Japão

Modelo: MEA SURESCOPEN

### 3.4 Programas para Aquisição e Processamento de Dados

Devido à grande quantidade de ensaios e, consequentemente, grande quantidade de dados, sua manipulação é muito laboriosa sem o emprego da computação. Por isso foi necessário a criação de um programa de computação para aquisição de forças no torneamento e na furação.

O programa é constituído de várias sub-rotinas, cada uma com uma função específica, de modo que, com pequenas alterações, o programa pode ser usado para medir as componentes da força de usinagem: força de corte  $F_c$ ; força de avanço  $F_f$  e força passiva  $F_p$ , para o torneamento, ou medir a força axial  $F_a$  e o momento torsor  $M_d$  na furação. A Figura 26 apresenta o fluxograma do programa

São as seguintes as sub-rotinas:

#### a) Monta (montagem do ensaio)

Tem a finalidade de abrir um arquivo de dados, reservando espaço para armazenar as leituras realizadas pelo sistema de medição. Após a criação do arquivo, grava a montagem do ensaio, constituída das constantes que caracterizam a experiência, válidas para todos os ensaios da mesma.

A introdução destes dados é feito de modo interativo com a tela, respondendo-se às seguintes perguntas:

- Executor do ensaio?
- Comentário?
- Material a ser usinado?
- Material da ferramenta?

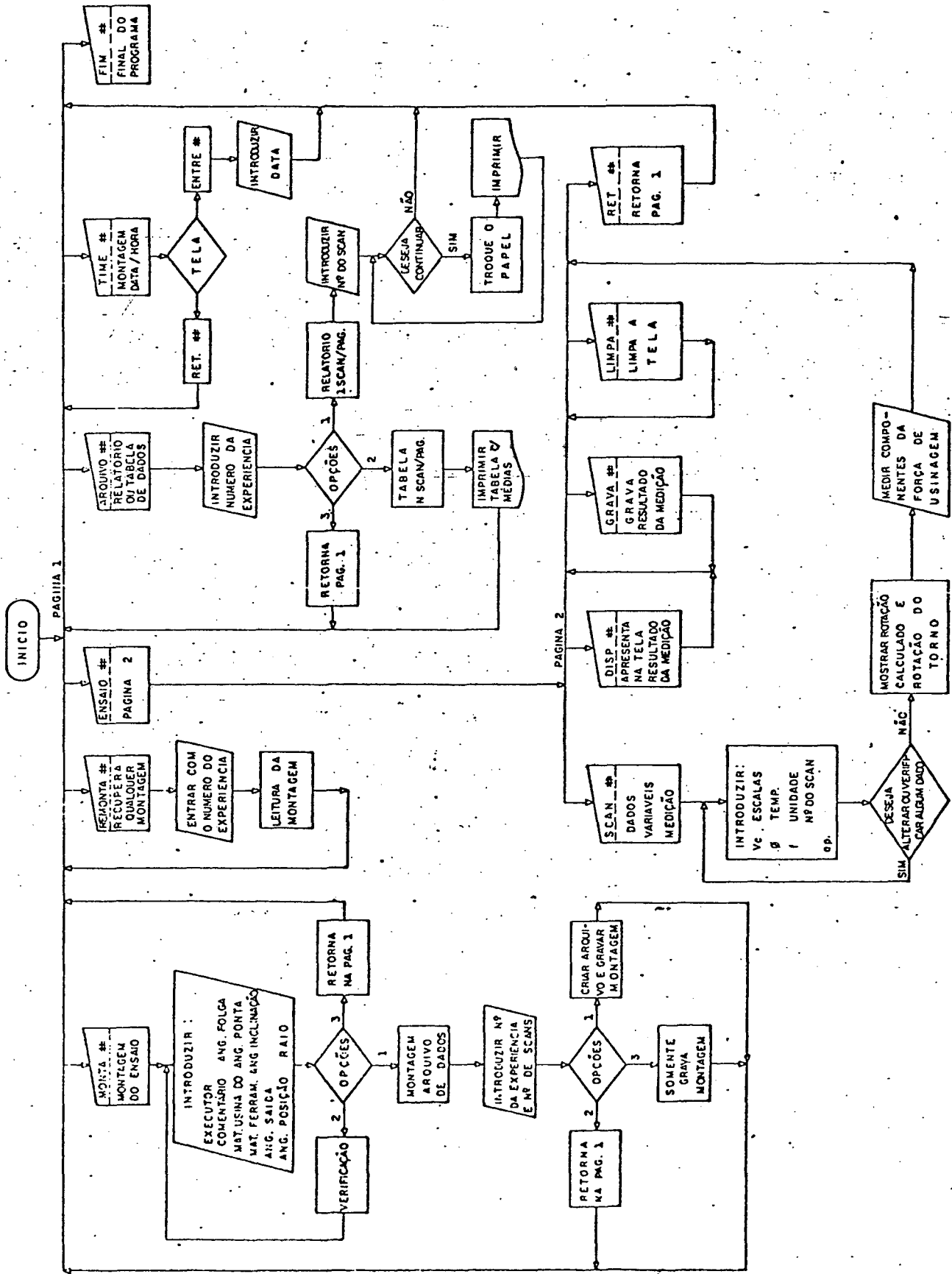


FIGURA 26 - Fluxograma do programa para aquisição automática de dados. ( torneamento e furação )

- Ângulo de saída?
- Ângulo de folga?
- Ângulo de posicionamento?
- Ângulo da ponta?
- Ângulo da inclinação?
- Raio de arredondamento?
- Diâmetro da broca? (na furação)

b) Remonta (recupera qualquer montagem)

Tem a finalidade de recuperar os dados da montagem de uma experiência, possibilitando a execução de um ensaio ou a sua repetição sem a necessidade de usar novamente a rotina "monta".

Para se ter acesso ao arquivo de dados e recuperar os dados introduzidos pela rotina "monta", basta introduzir o número da experiência.

c) Ensaio

Tem por objetivo introduzir as variáveis características de cada ensaio e possibilitar a medição das componentes de força.

É composta de outras sub-rotinas que são ativadas por teclas:

c-1) "SCAN"

Possibilita a introdução das variáveis características de cada ensaio, feita de modo interativo, respondendo-se às perguntas:

- Velocidade de corte?
- Diâmetro da peça? ou da broca? (torno ou fura

ção)

- Avanço?
- Profundidade de corte?
- Escalas dos amplificadores?
- Temperatura ambiente?
- Umidade relativa do ar?
- Número do ensaio?

Após a introdução do diâmetro da peça, no ensaio de torneamento, será ativada a sub-rotina "Rot" que tem a finalidade de converter a carga gerada no taco gerador em uma rotação equivalente, através do seu fator de conversão, apresentando o resultado na tela juntamente com o valor da rotação calculada, possibilitando assim, o ajuste preciso da rotação da peça.

Em seguida, pode-se chamar a rotina "Mede" que tem a finalidade de armazenar as leituras das cargas geradas na plataforma piezelétrica.

Antes de ser iniciada a leitura, será apresentado na tela o sinal "Aguardando" até que a tensão atinja um valor maior que zero, quando então a ferramenta terá tocado na peça. Será aguardado um tempo de 1 s quando então será iniciado a leitura e emitido o sinal "Lendo". Assim, teremos a garantia de que os valores foram lidos após a estabilidade do corte. Após a leitura, será emitido um sinal indicativo, com a tela acendendo e apagando. As leituras das cargas da plataforma piezelétrica serão transformadas em uma tensão equivalente,

multiplicando-se pela escala do amplificador de carga, sendo o resultado da medida expresso em unidades mecânicas: Newton para as componentes de força e Newton entímetro para o momento torsor, sendo realizada pela sub-rotina "Conver".

A média, o desvio padrão e a incerteza do resultado serão calculados pela Sub-rotina "Calcl".

O fluxograma desta rotina é mostrado na Figura 27.

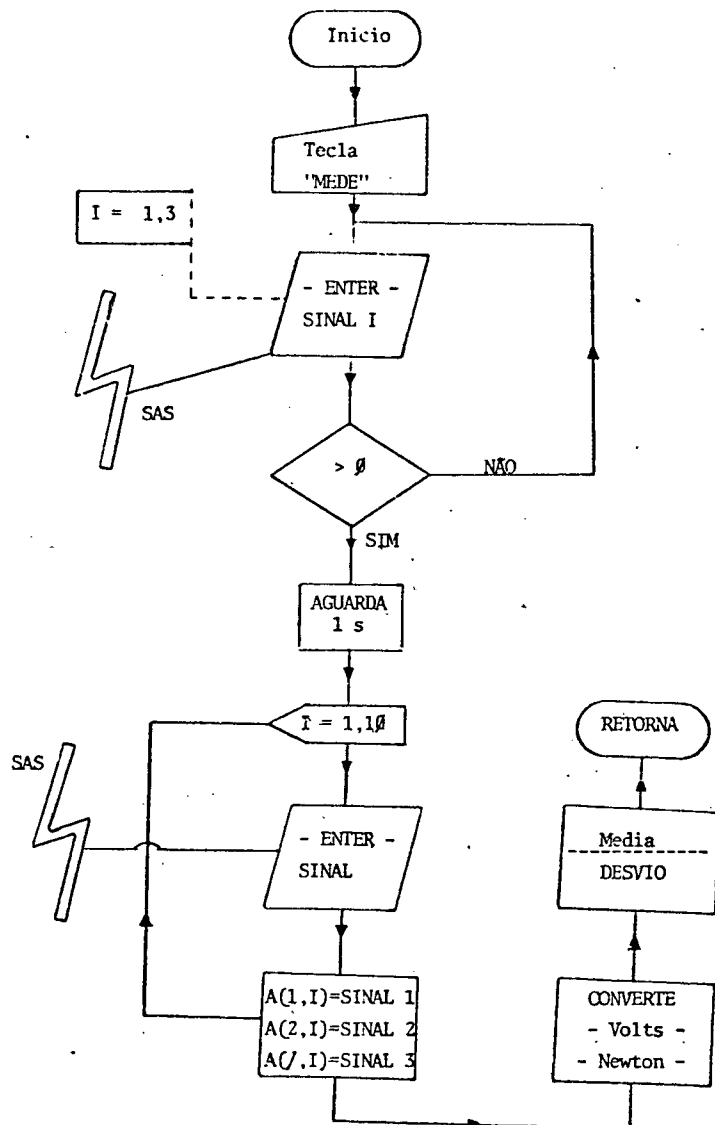


FIGURA 27 - Fluxograma da rotina para medir as componentes da força de usinagem.

## C-2) "DISP"

Apresenta na tela os valores medidos, com suas médias, desvio padrão e incertezas de resultados, possibilitando a verificação da coerência dos valores medidos, que indicarão se o ensaio deve ser gravado ou repetido.

## C-3) "GRAVA"

Tem por finalidade armazenar, em um cartucho de fita magnética, os valores das leituras no arquivo de dados, aberto pela rotina "Monta".

## C-4) "LIMPA"

Apaga os valores medidos da tela, possibilitando a repetição do ensaio.

## C.5) "RET"

Retorna ao início da experiência, apresentando na tela o menu das sub-rotinas disponíveis.

## D) ARQUIV (relatório ou tabela dos resultados)

Os dados armazenados podem ser resgatados e apresentados sob forma de relatório, apresentando os dados brutos de cada ensaio ou sob a forma de tabela, onde as médias, devidamente corrigidas com o erro sistemático obtido na calibração e as incertezas de resultados de todos os ensaios que compõem uma experiência, são apresentadas juntamente com os dados constantes e as variáveis de cada ensaio.

E) TIME (montagem data/hora)

Possibilita o registro automático da data e hora da realização de cada ensaio.

F) FIM

Indica o final da experiência.

### 3.5 Procedimento dos Ensaios

Durante os ensaios deverá ser observado o seguinte procedimento:

Torneamento Longitudinal e Ortogonal

- 1 - Verificar condições de funcionamento da máquina, sistema de medição e ferramentas.
- 2 - Fixar e preparar peça para o ensaio.
- 3 - Introduzir os dados constantes e variáveis no programa de aquisição relativo ao ensaio.
- 4 - Selecionar o avanço.
- 5 - Regular a rotação.
- 6 - Zerar o amplificador de carga.
- 7 - Regular a profundidade. (Não é necessário para torneamento ortogonal).
- 8 - Apertar tecla para iniciar a medição das forças.
- 9 - Ligar o avanço, iniciando a usinagem.
- 10 - Desligar avanço e afastar a ferramenta.
- 11 - Verificar, na tela, coerência das forças medidas.



12 - Gravar valores da força ou repetir o ensaio.

13 - Repetir o procedimento para o próximo ensaio.

#### Furação em cheio e Furação com Pré-Furo

1 - Verificar condições de funcionamento da máquina, sistema de medição e ferramenta.

2 - Fixar e preparar peça para o ensaio, posicionando a broca no centro da peça a 5 mm face.

3 - Introduzir dados constantes e variáveis relativos ao ensaio no programa de aquisição.

4 - Introduzir no painel de comando da máquina, os valores da profundidade do furo, avanço e rotação.

5 - Zerar o amplificador de carga.

6 - Apertar tecla para iniciar medição de forças.

7 - Iniciar a usinagem.

8 - Após o sinal, interromper avanço e deslocar a broca para a posição inicial.

9 - Verificar na tecla a coerência dos valores medidos.

10 - Gravar valores medidos ou repetir o ensaio.

11 - Repetir o procedimento para o próximo ensaio até o furo atingir uma profundidade de, aproximadamente, 2,5 o diâmetro da broca.

12 - Deslocar a broca para nova posição, conforme especificado na Tabela 2 e Figura 28.

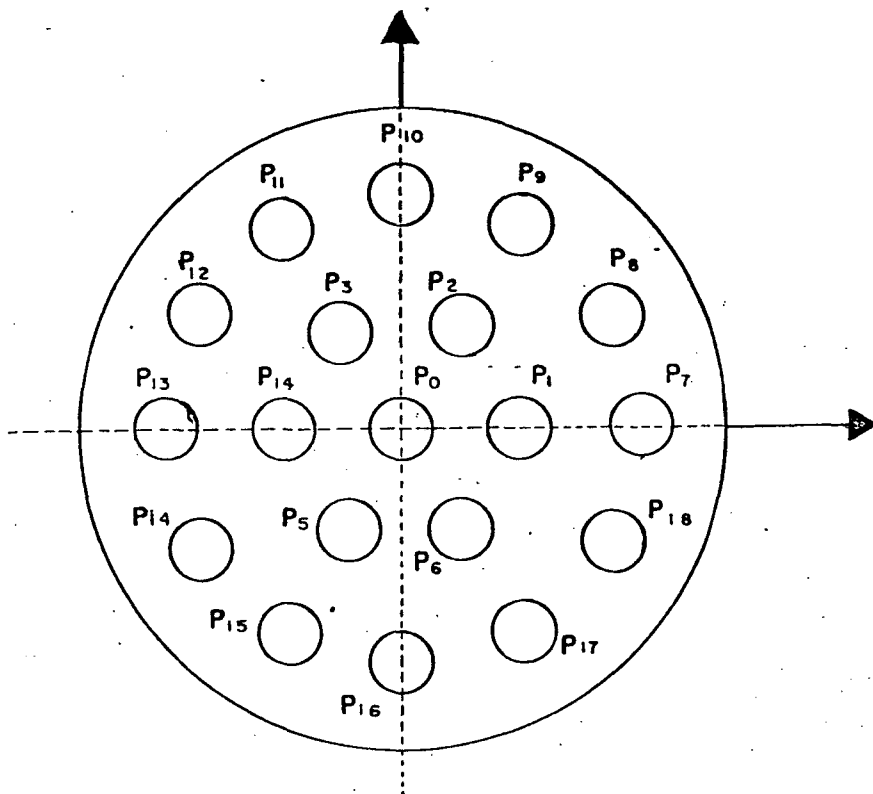


FIGURA 28 - Posição dos furos na furação em cheio e com pré-furo.

PONTO	$\Delta x$	$\Delta y$
P <sub>0</sub>	225	170
P <sub>1</sub>	-15	0
P <sub>2</sub>	7,5	12,9
P <sub>3</sub>	15	0
P <sub>4</sub>	7,5	-12,9
P <sub>5</sub>	-7,5	-12,9
P <sub>6</sub>	-15	0
P <sub>7</sub>	-22,5	12,9
P <sub>8</sub>	4,2	15
P <sub>9</sub>	10,8	10,8
P <sub>10</sub>	15	4,2
P <sub>11</sub>	15	-4,2
P <sub>12</sub>	10,8	-10,8
P <sub>13</sub>	4,2	-15
P <sub>14</sub>	-4,2	-15
P <sub>15</sub>	-10,8	-10,8
P <sub>16</sub>	-15	-4,2
P <sub>17</sub>	-15	4,2
P <sub>18</sub>	-10,8	10,8

TABELA 2 - Tabela dos deslocamentos para posicionamento da broca (introduzir no gabinete de comando-CNC).

### Furação Ortogonal

- 1 - Verificar condições de funcionamento da máquina, sistema de medição e ferramenta.
- 2 - Fixar e preparar a peça com um comprimento de 25 - 30 mm da placa, posicionando a broca no centro da peça a 5 mm de sua face.
- 3 - Introduzir dados relativos ao ensaio no programa de aquisição.
- 4 - Introduzir, no painel de controle da máquina, os valores da profundidade, do avanço e da rotação.
- 5 - Zerar o amplificador de carga.
- 6 - Apertar tecla para iniciar medição das forças.
- 7 - Iniciar a usinagem.
- 8 - Após o sinal, interromper o avanço e recuar a broca de 5 mm.
- 9 - Verificar, na tela, a coerência dos valores medidos.
- 10 - Gravar valores medidos ou repetir o ensaio.
- 11 - Repetir o procedimento para o próximo ensaio.

## C A P Í T U L O 4

## DOCUMENTAÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS

A coleta das medidas das componentes da força de usinagem serão armazenadas e processadas pelo micro computador HP 85. Para facilitar sua operação e para melhor visualização dos resultados, os dados serão apresentados sob forma de tabelas e gráficos.

Assim, as leituras das componentes da força de usinagem de cada ensaio, serão armazenadas em uma tabela de dados brutos, e, após a realização dos três ciclos que compõem cada experiência, as médias das forças de cada ensaio serão apresentadas em uma única tabela, onde se terá uma visualização da experiência como um todo.

Após um cálculo matemático adequado, para determinação das variáveis da equação de Kienzle, será apresentado um gráfico comparativo  $V_c \times K_c 1.1$  e  $V_c \times K_f 1.1$  para o torneamento e furação, onde os resultados obtidos para as diversas experiências poderão ser analisados.

## 4.1 CÁLCULOS

A metodologia e a terminologia adotadas estão em conformidade com normas e recomendações técnicas internacionais (39), estando as unidades das grandezas de acordo com o sistema internacional de unidades - SI.

## a) Cálculo da Medida

A leitura efetuada pelo sistema de medição terá como unidade de leitura o Volt, devendo esta leitura ser convertida em uma medida, com sua respectiva unidade, com sua multiplicação pela escala selecionada em Unidades Mecânicas/Volt.

$$\text{Medida} = \text{Leitura } |V| \cdot \text{Escala em } \frac{\text{U.M. } |N \text{ ou Ncm}|}{|V|} \quad (43)$$

b) Média das Medidas ( $\bar{X}$ )

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N} \quad (44)$$

c) Erro Sistemático ( $E_s$ )

É a parcela de erro do sistema de medição que se repete para todas as medições.

$$E_s = \text{média das medidas} - \text{valor verdadeiro.} \quad (45)$$

Este erro será determinado através da calibração do sistema de medição e posteriormente será eliminado do resultado de medição.

d) Erro Aleatório ( $E_a$ )

Durante a medição, surge um erro em função de fatores aleatórios dado por:

$$E_a = \text{medida} - \text{média das medidas} \quad (46)$$

Como este erro será calculado para um número finito de medidas, estes valores apresentam uma incerteza, incerteza de resultado, que, para uma probabilidade estatística definida, é dada por:

$$I_r = \pm \frac{t \cdot s}{N} \quad (47)$$

Onde:

$s$  = desvio padrão

$t$  = coeficiente de confiança de Student

$N$  = número de medidas

O desvio padrão  $s$  é calculado pela fórmula.

$$s = \sqrt{\frac{(X_i - \bar{X})^2}{N - 1}} \quad (48)$$

Para  $N = 30$  e uma probabilidade de 95%, o coeficiente de Student ( $t$ ) é 2,0

#### e) Resultado da Medição (RM)

O erro sistemático do sistema de medição, determinado através da calibração, será corrigido, de modo que o resultado da medição se aproxime ao máximo, do valor verdadeiro, ou seja:

$$RM = (\bar{X} - E_s) \pm \Delta M_{\max} \quad (49)$$

Onde:

$\Delta M$  = máximo desvio em relação ao valor médio.

f) Espessura de Corte (h)

$$h = f \cdot \text{sen } \chi \quad (50)$$

g) Largura de corte (b)

Torno:  $b = a_p / \text{sen } \chi \quad (51)$

Furação Ortogonal e  
com pré-furo:  $b = \frac{D - d}{2 \text{ sen } \chi} \quad (52)$

Furação em cheio:  $b = \frac{D}{2 \text{ sen } \chi} \quad (53)$

h) Força de Corte por Unidade de Largura de Corte

Torno:  $\frac{F_c}{b} = \frac{F_c \cdot \text{sen } \chi}{a_p} \quad (54)$

Furação Ortogonal e  
com pré-furo:  $\frac{F_c}{b} = \frac{4 \cdot M_d \cdot \text{sen } \chi}{D^2 - d^2} \quad (55)$

Furação em cheio:  $\frac{F_c}{b} = \frac{M_d \cdot \text{sen } \chi}{0,19 \cdot D^2} \quad (56)$

## i) Força de Avanço por Unidade de Comprimento

$$\text{Torno:} \quad \frac{F_f}{b} = \frac{F_f \cdot \text{sen } \chi}{a_p} \quad (57)$$

$$\text{Furação Ortogonal e} \\ \text{com pré-furo:} \quad \frac{F_f}{b} = \frac{F_z \cdot \text{sen } \chi}{D - d} \quad (58)$$

$$\text{Furação em cheio:} \quad \frac{F_f}{b} = \frac{F_z \cdot \text{sen } \chi}{D} \quad (59)$$

## j) Equação de Kienzle para a Força de Corte

$$\frac{F_c}{b} = K_{c \ 1.1} \cdot h^{(1-m_c)} \quad (60)$$

Onde:

$$K_{c \ 1.1} = \text{força específica de corte para } u \\ \text{ma seção de corte } s=b.h = \text{lmm} \cdot \text{lmm}.$$

$$(1-m_c) = \text{expoente.}$$

## l) Equação de Kienzle logaritmada

$$\text{Log } (F_c/b) = \text{Log } K_{c \ 1.1} + (1 - m_c) \text{ Log } h \quad (61)$$

Para os diferentes valores de  $h$  usados nos ensaios, obtêm-se diferentes valores de  $F_c/b$  para uma dada velocidade de corte.

Entretanto com os valores de  $\text{log } (F_c/b)$  e  $\text{log } h$  em



um gráfico, através do método dos mínimos quadrados determina-se a equação da reta (equação de Kienzle logaritmada) ficando determinado os valores de  $K_{c 1.1}$  e  $(1 - m_c)$ .

O mesmo procedimento é válido para a determinação de  $K_{f 1.1}$  e  $(1 - m_f)$ .

m) Cálculo da Reta pelo Método dos Mínimos Quadrados

$$\text{Log } \frac{F_c}{b} = A \text{ Log } h + B \quad (62)$$

Onde:

$$A = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^N X_i Y_i - \sum_{i=1}^N Y_i \cdot \sum_{i=1}^N X_i}{N \cdot \sum_{i=1}^N X_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N X_i \right)^2} \quad (63)$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i - A \cdot \sum_{i=1}^N X_i}{N} \quad (64)$$

Logo:

$$A = (1 - m_c) \quad (65)$$

$$B = \text{Log } K_{c 1.1} \quad (66)$$

Resulta:

$$K_{c 1.1} = 10^B \quad (67)$$

## 4.2 Tabela de Dados Brutos

Esta tabela possibilita uma visualização das medidas efetuadas em cada ensaio, sendo mostrada na tela, após a aquisição das medidas, para que o operador decida se o ensaio será validado ou não.

É constituída pelos dados constantes, válidos para todos os ensaios da experiência, dados variáveis, característicos de cada ensaio, e pelas medidas realizadas.

A média, o desvio padrão e a incerteza do resultado são calculados e apresentados logo abaixo, facilitando a análise.

Apenas para ilustração, é mostrada uma tabela para a furação, Tabela (3), e outra para o torneamento, Tabela (4).

FURACAO EM CHEIO-AFIACAO N				
Executor: SALVADOR				
SCAN# 1	Data 11:14:11:04:28			
Material da Peça: ABNT 1020				
Material da Ferramenta: HSS				
Temperatura: 22.0deg C				
Umidade: 78.0%				
ESCALAS Fa = 200				
Md = 200				
DADOS Constantes				
A	B	C	D	E
$\gamma_x$	$\alpha$	$\chi$	$\epsilon$	$\lambda$
30.0	10.0	59.0	118.0	-5.5
DADOS Variaveis				
Velocidade de Corte: 16 m/min				
Diametro da BROCA: 10 mm				
Avanço: .052 mm/rot				
DADOS Brutos				
Fr10-4 SCAN# 1 11:14:11:04:28				
Leit.	Fa (N)	Md (Ncm)		
1	836.00	196.00		
2	830.00	240.00		
3	772.00	294.00		
4	758.00	248.00		
5	738.00	229.00		
6	840.00	220.00		
7	803.00	224.00		
8	836.00	262.00		
9	836.00	218.00		
10	884.00	226.00		
.....				
-M	813.80	235.60		
-S	44.72	27.26		
-Ir	39.59	24.14		

TABELA 3 - Tabela de dados brutos para a furação.

-----  
Ensaio TORNEAMENTO Longitudinal

Executor: SALVADOR

SCAN# 1 Data 10:05:16:53:21

Material da Peça: ABNT 1020

Material da Ferramenta: HSS

Temperatura: 26.5deg C

Umidade: 72.0%

ESCALAS Ff(X)= 500

Ff(Y)= 500

Fc(Z)= 500

DADOS Constantes

A	B	C	D	E	F
$\delta$	$\alpha$	$\chi$	$\epsilon$	$\lambda$	$\pi$
26.0	10.0	59.0	90.0	-5.5	0.0

DADOS Variaveis

Velocidade de Corte: 16 m/min

Diametro da Peça: 78 mm

Avanço: .052 mm/rot

Profundidade de Corte: 3 mm

DADOS Resultados

EXPI SCAN# 1 10:05:16:53:21

Leit.	Ff(N)	Fp(N)	Fc(N)
1	125.00	175.00	350.00
2	120.00	170.00	240.00
3	140.00	205.00	415.00
4	155.00	225.00	355.00
5	170.00	225.00	490.00
6	180.00	250.00	365.00
7	155.00	245.00	480.00
8	170.00	250.00	285.00
9	155.00	235.00	405.00
10	135.00	205.00	300.00
.....			
+M	151.50	216.50	366.50
+S	20.56	29.16	81.24
+Ir	12.20	25.82	71.93

TABELA 4 - Tabela de dados brutos para o torneamento.

Posteriormente, os ensaios que compõem cada experiência, são agrupados em uma única tabela, onde é apresentada a média das medidas dos três ciclos de medição e as respectivas incertezas de resultado, como está exemplificado na Tabela (5).

-----  
FURACAO EM CREIO-AFIACAO N

Excutor: SALVADOR

Material da peça: ABNT 1020

Material da Ferramenta: HSS

A	B	C	D	E
$\gamma_x$	$\alpha$	$\chi$	$\epsilon$	$\lambda$
33.0	10.0	59.0	118.0	-5.5

SCAN	Vc m/min	f mm/rot	Fa (N)	Ir (N)	Md (Pcm)	Ir (Pcm)
1	16.0	.05	821.94	39.59	237.96	24.14
2	16.0	.06	977.68	61.78	317.65	21.53
3	16.0	.08	1181.20	13.27	534.80	12.94
4	16.0	.10	1492.80	73.47	570.15	23.00
5	16.0	.12	1736.70	26.27	627.21	23.03
6	16.0	.15	2095.20	23.10	808.51	27.49
7	16.0	.19	2631.10	57.50	1015.60	71.55
8	16.0	.24	2965.50	50.92	1238.80	86.61
9	20.0	.05	821.94	39.59	237.96	24.14
10	20.0	.06	977.68	61.78	317.65	21.53
11	20.0	.08	1123.60	44.48	323.20	11.62
12	20.0	.10	1383.70	24.96	440.87	12.36
13	20.0	.12	1565.00	19.74	505.51	27.80
14	20.0	.15	1954.90	31.75	687.31	19.74
15	20.0	.19	2645.20	68.71	1117.60	50.82
16	20.0	.24	2836.60	70.59	1202.40	45.89
17	25.0	.05	821.94	39.59	237.96	24.14
18	25.0	.06	987.28	24.98	345.93	16.47
19	25.0	.08	1383.70	24.96	440.87	12.36
20	25.0	.10	1492.80	73.47	570.15	23.00
21	25.0	.12	1736.70	26.27	627.21	23.03
22	25.0	.15	2095.20	23.10	808.51	27.49
23	25.0	.19	2648.70	96.82	1027.70	56.86
24	25.0	.24	2836.60	70.59	1202.40	45.89
25	31.5	.05	821.94	39.59	237.96	24.14
26	31.5	.06	977.68	61.78	317.65	21.53
27	31.5	.08	1348.40	29.14	398.95	23.33
28	31.5	.10	1471.60	77.95	523.69	25.05
29	31.5	.12	1565.00	19.74	505.51	27.80
30	31.5	.15	2302.80	42.36	901.93	42.73
31	31.5	.19	2648.70	96.82	1027.70	56.86
32	31.5	.24	2836.60	70.59	1202.40	45.89

TABELA 5 - Tabela com média dos dados brutos, para a furação.

## 4.3 Tabela de Dados Processados

Para cada uma das quatro velocidades de corte que compõem uma experiência, será montada uma tabela para calcular os valores específicos de força  $K_{c1.1}$ ,  $K_{f1.1}$  e os expoentes da equação de Kienzle  $(1 - m_c)$  e  $(1 - m_f)$ . Tabela (6) e Tabela (7).

TOCNEAMENTO Long. (9C) 1 rep.

SCAN	Vc m/min	f mm/rot	ap mm	a mm	b mm	Log h	Icg Fc/b	Log Ff/b	Log Fp/b
1	16.0	.052	3.00	.045	3.50	-1.351	2.09	1.64	1.77
2	16.0	.061	3.00	.052	3.50	-1.282	2.18	1.76	1.82
3	16.0	.077	3.00	.066	3.50	-1.180	2.27	1.79	1.92
4	16.0	.097	3.00	.083	3.50	-1.080	2.35	1.87	2.00
5	16.0	.121	3.00	.104	3.50	-.984	2.40	1.92	2.06
6	16.0	.153	3.00	.131	3.50	-.882	2.49	1.99	2.15
7	16.0	.194	3.00	.166	3.50	-.779	2.56	2.04	2.22
8	16.0	.243	3.00	.208	3.50	-.681	2.62	2.07	2.27
9	16.0	.307	3.00	.263	3.50	-.580	2.71	2.15	2.38
10	16.0	.368	3.00	.333	3.50	-.478	2.79	2.20	2.46

Log Kc11	Kc11 N/mm <sup>2</sup>	(1-mc)	Log Kf11	Kf11 N/mm <sup>2</sup>	(1-mf)	Log Kp11	Kp11 N/mm <sup>2</sup>	(1-mp)
3.16	1455.46	.771	2.52	330.45	.628	2.82	659.02	.768

TABELA 6 - Tabela para calcular os valores específicos de força  $K_{c1.1}$  e  $K_{f1.1}$  para o torneamento.

FURAÇÃO EM CHEIO-RETRACÃO

SCAN	Vc m/min	f mm/rot	ap mm	a mm	b mm	Log h	Log Fc/L	Log Ff/b
1	16.0	.052	5.00	.045	5.83	-1.351	2.08	1.86
2	16.0	.061	5.00	.052	5.83	-1.282	2.14	1.90
3	16.0	.077	5.00	.066	5.83	-1.180	2.26	1.97
4	16.0	.097	5.00	.083	5.83	-1.080	2.34	2.06
5	16.0	.121	5.00	.104	5.83	-.984	2.41	2.14
6	16.0	.153	5.00	.131	5.83	-.882	2.51	2.20
7	16.0	.194	5.00	.166	5.83	-.779	2.61	2.32
8	16.0	.243	5.00	.208	5.83	-.681	2.76	2.39

Log Kc11	Kc11 N/mm <sup>2</sup>	(1-mc)	Log Kf11	Kf11 N/mm <sup>2</sup>	(1-mf)
3.36	2406.58	.964	2.94	664.77	.809

TABELA 7 - Tabela para calcular os valores específicos de força  $K_{c1.1}$  e  $K_{f1.1}$  para a furação.

## 4.4 Gráficos

Estes resultados serão apresentados em gráficos  $h \times F_c/b$  e  $h \times F_f/b$  em esclas dilogarítmicas, onde será apresentado os valores específicos de força, o expoente e a incerteza de resultado para as diversas velocidades de corte. Gráficos 1 a 56.

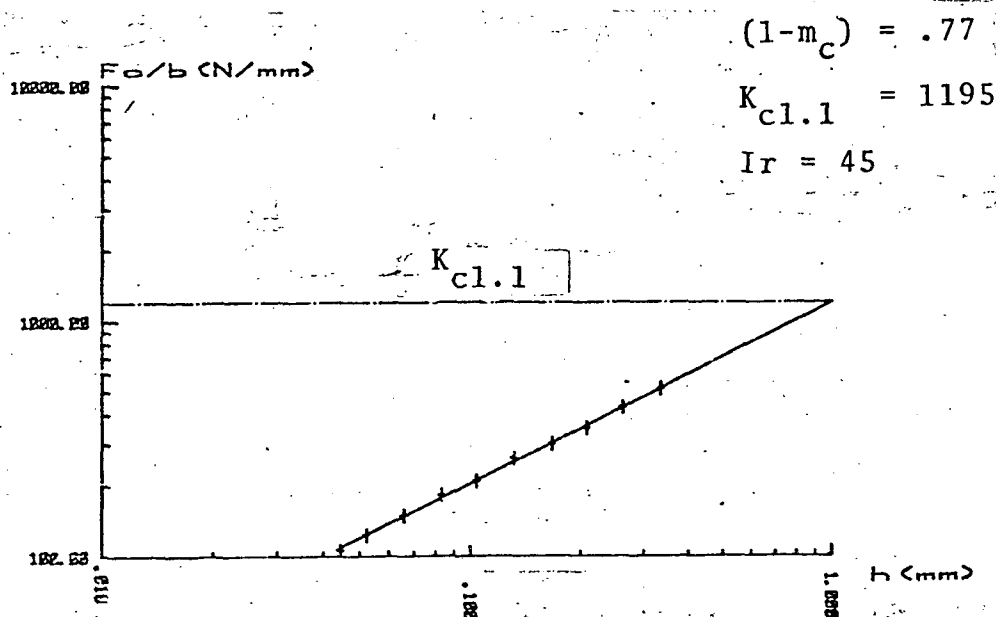


GRÁFICO 1 - Força específica de corte no torneamento ortogonal para  $v_c = 16$  m/min.

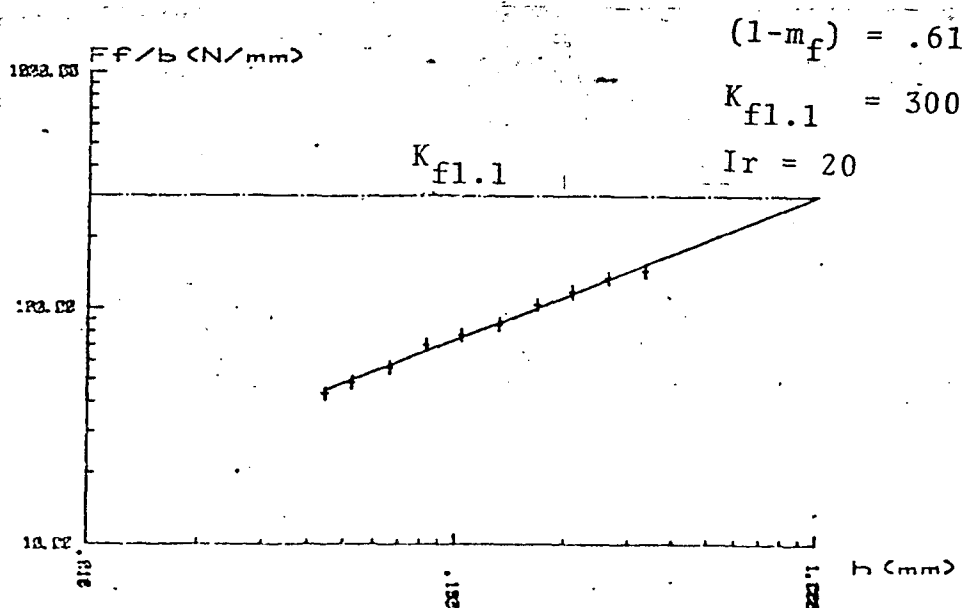


GRÁFICO 2 - Força específica de avanço no torneamento ortogonal para  $v_c = 16$  m/min.

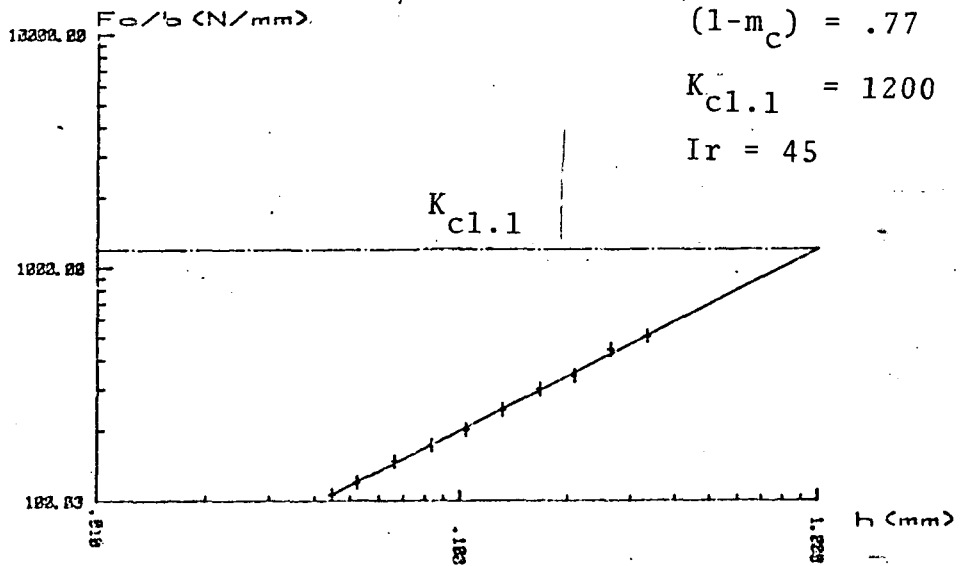


GRÁFICO 3 - Força específica de corte no torneamento ortogonal para  $v_c = 20$  m/min.

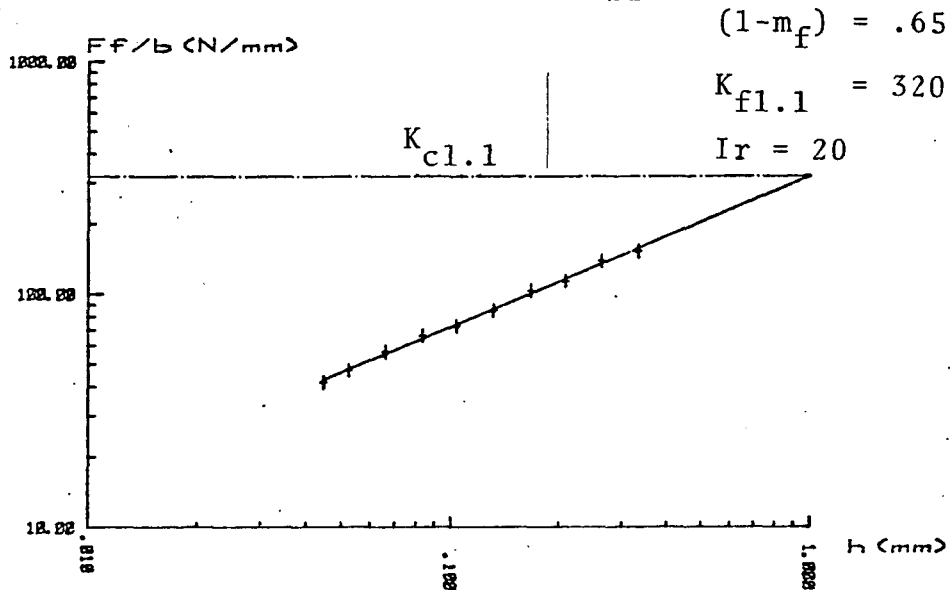


GRÁFICO 4 - Força específica de avanço no torneamento ortogonal para  $v_c = 20$  m/min.

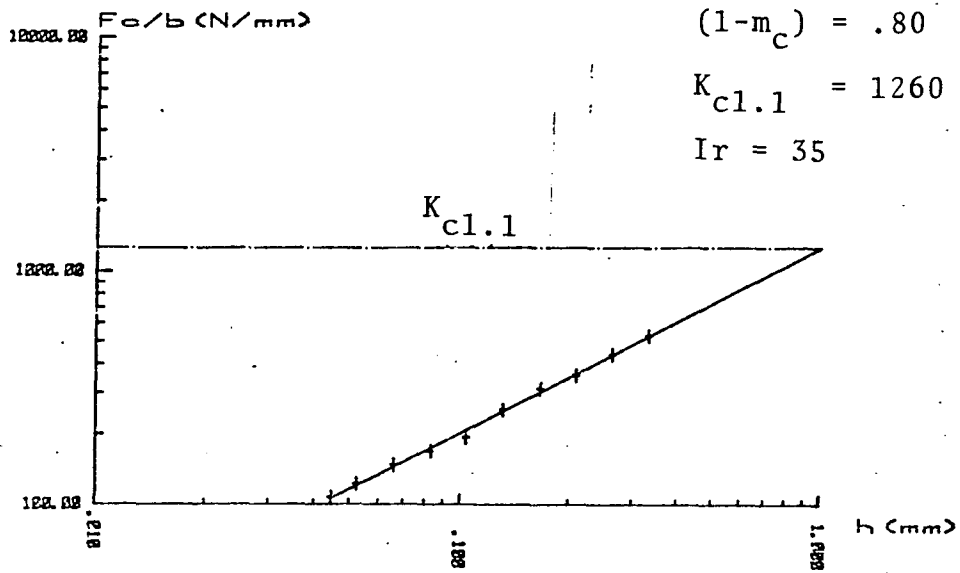


GRÁFICO 5 - Força específica de corte no torneamento ortogonal para  $v_c = 25 \text{ m/min}$ .

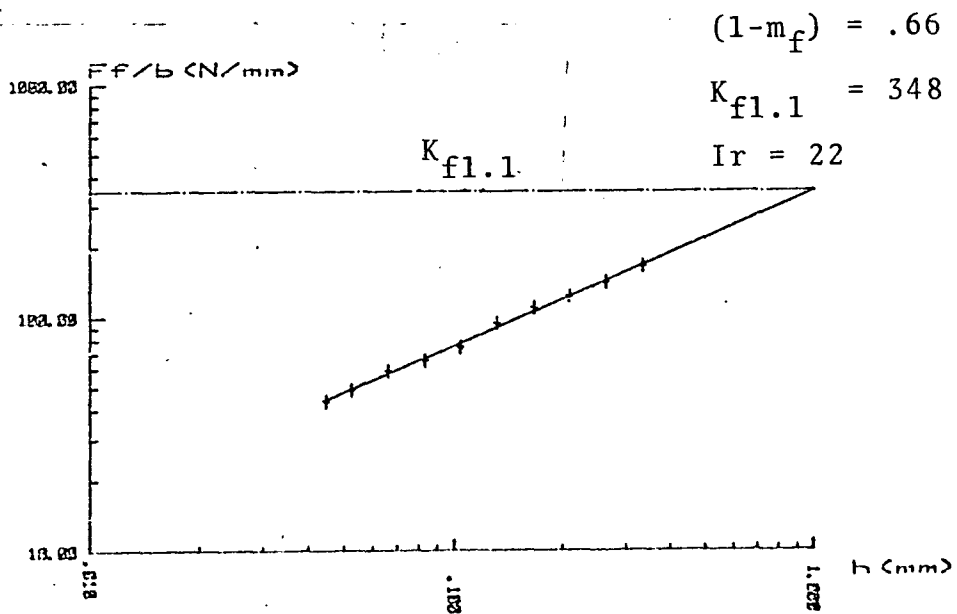


GRÁFICO 6 - Força específica de avanço no torneamento ortogonal para  $v_c = 25 \text{ m/min}$ .



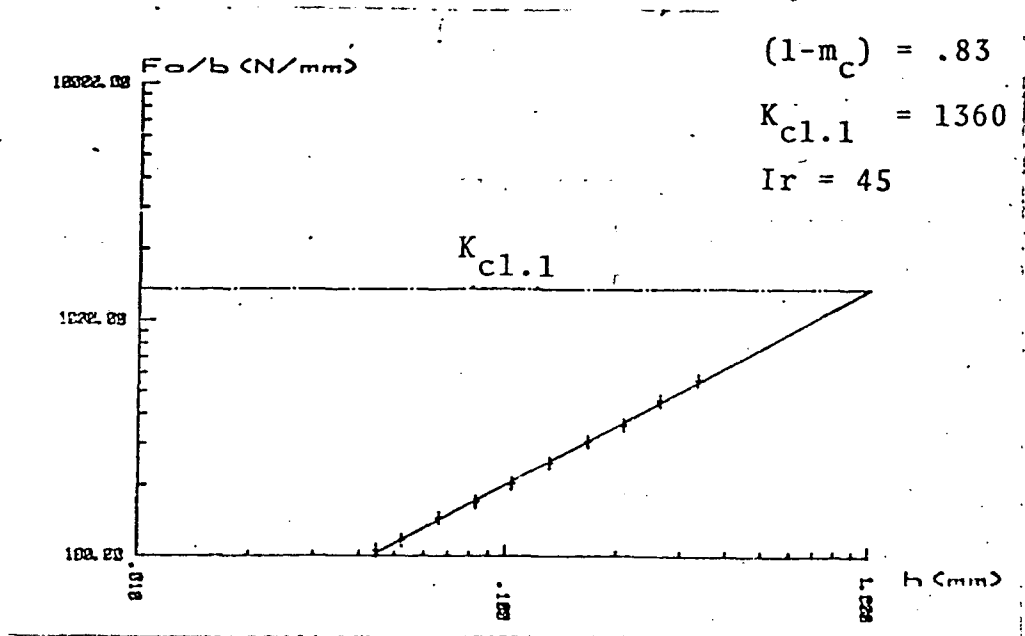


GRÁFICO 7 - Força específica de corte no torneamento ortogonal para  $v_c = 31,5$  m/min.

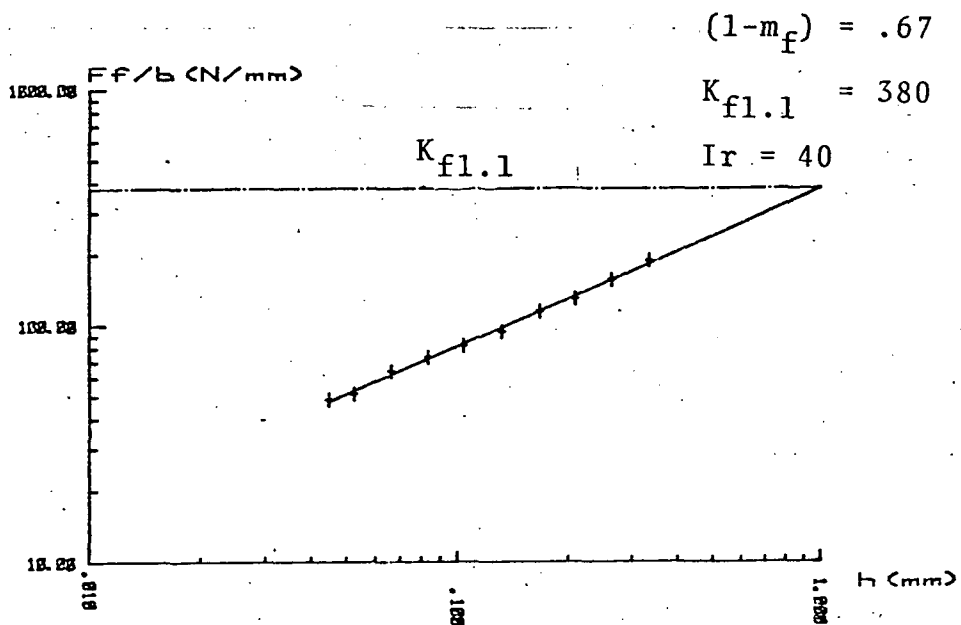


GRÁFICO 8 - Força específica de avanço no torneamento ortogonal para  $v_c = 31,5$  m/min.

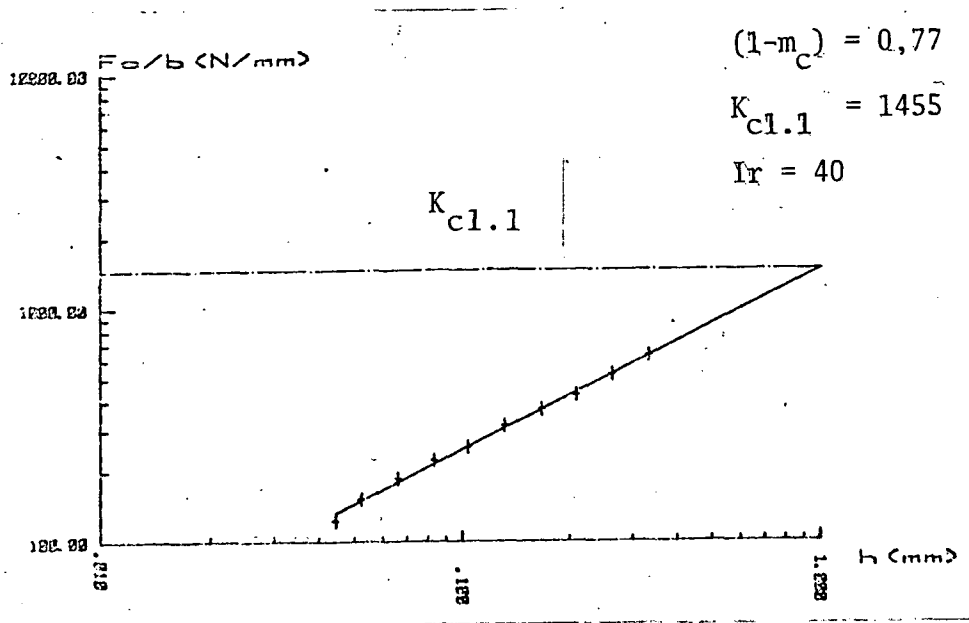


GRÁFICO 9 - Força específica de corte no torneamento longitudinal ( $90^\circ$ ) para  $v_c = 16$  m/min.

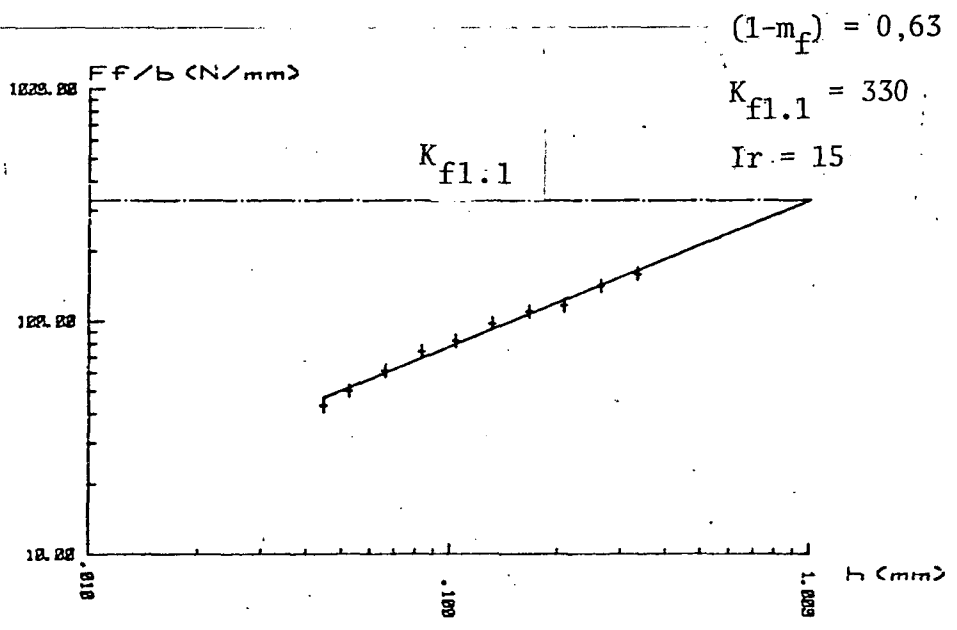


GRÁFICO 10 - Força específica de avanço no torneamento longitudinal ( $90^\circ$ ) para  $v_c = 16$  m/min.

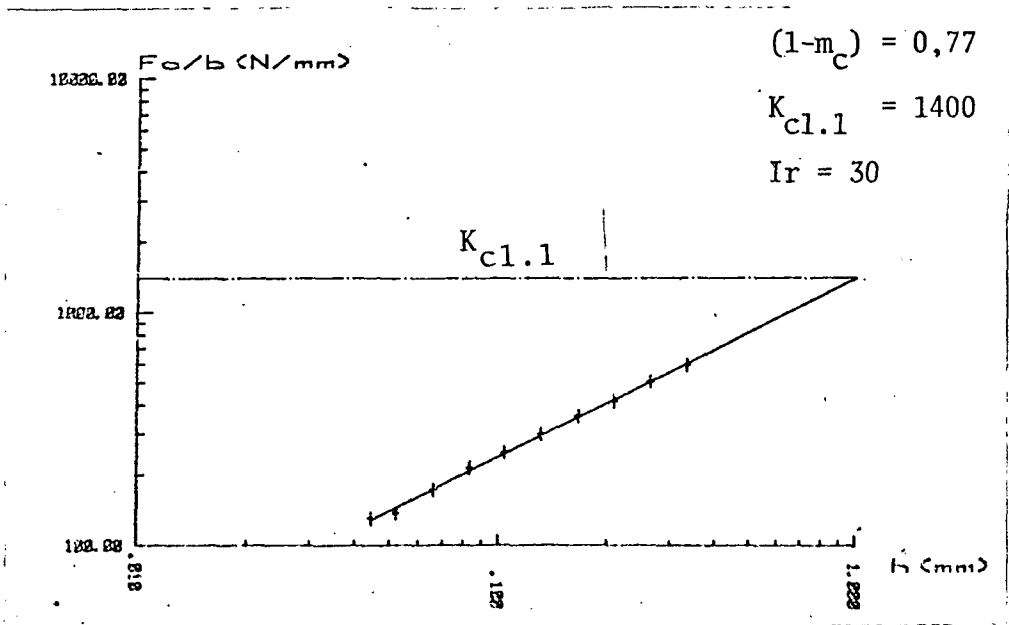


GRÁFICO 11 - Força específica de corte no torneamento longitudinal ( $90^\circ$ ) para  $v_c = 20$  m/min.

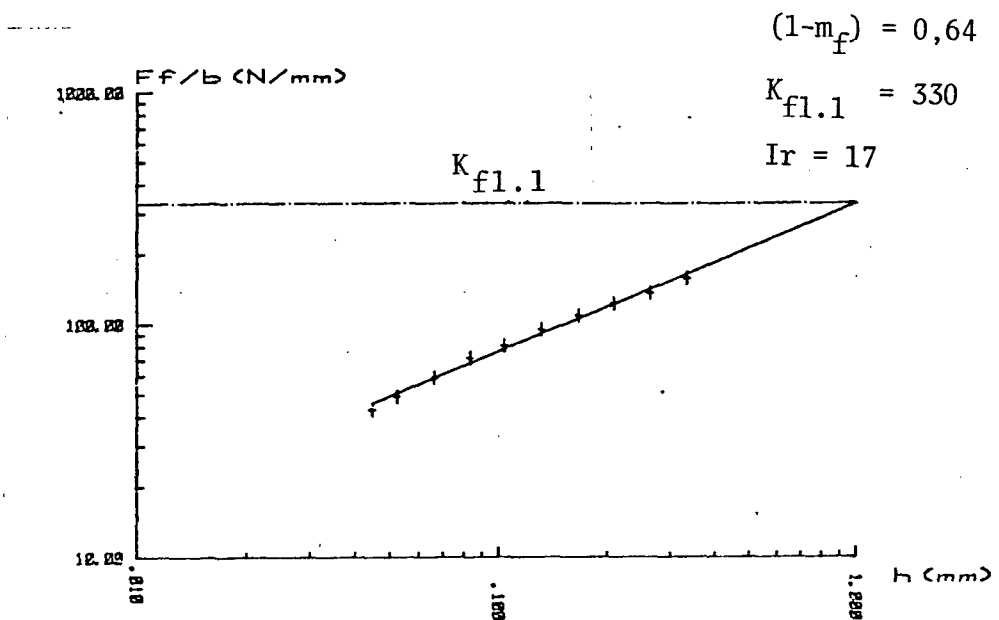


GRÁFICO 12 - Força específica de avanço no torneamento longitudinal ( $90^\circ$ ) para  $v_c = 20$  m/min.

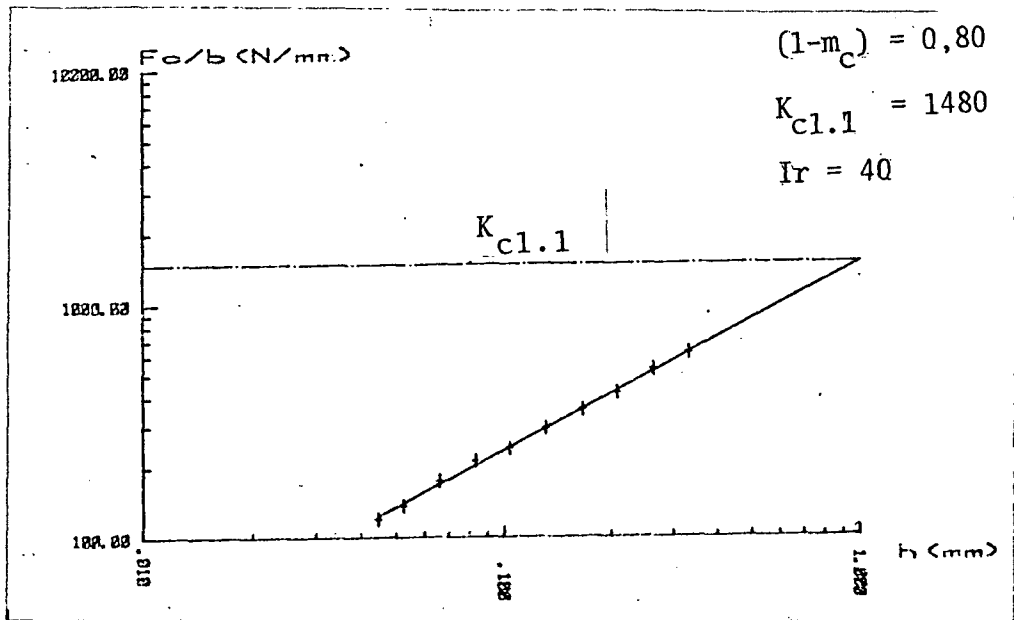


GRÁFICO 13 - Força específica de corte no torneamento longitudinal ( $90^\circ$ ) para  $v_c = 25 \text{ m/min}$ .

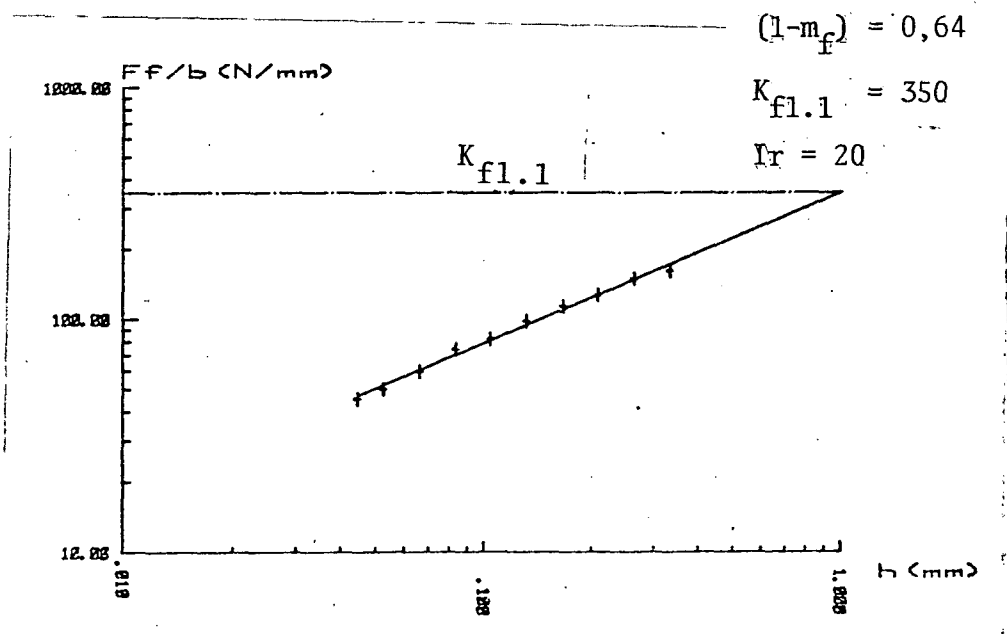


GRÁFICO 14 - Força específica de avanço no torneamento longitudinal ( $90^\circ$ ) para  $v_c = 25 \text{ m/min}$ .

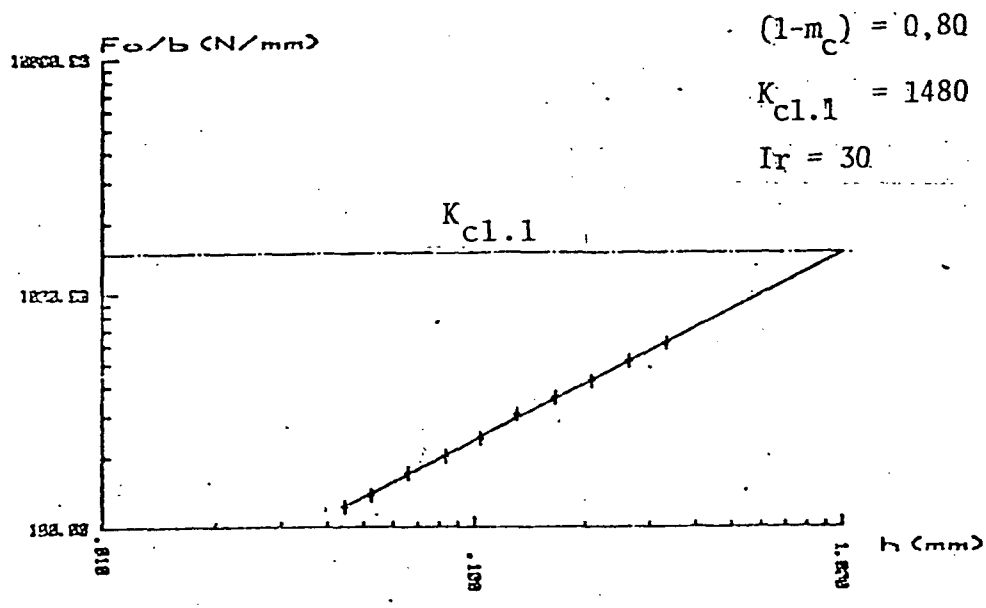


GRÁFICO 15 - Força específica de corte no torneamento longitudinal (90°) para  $v_c = 31,5$  m/min.

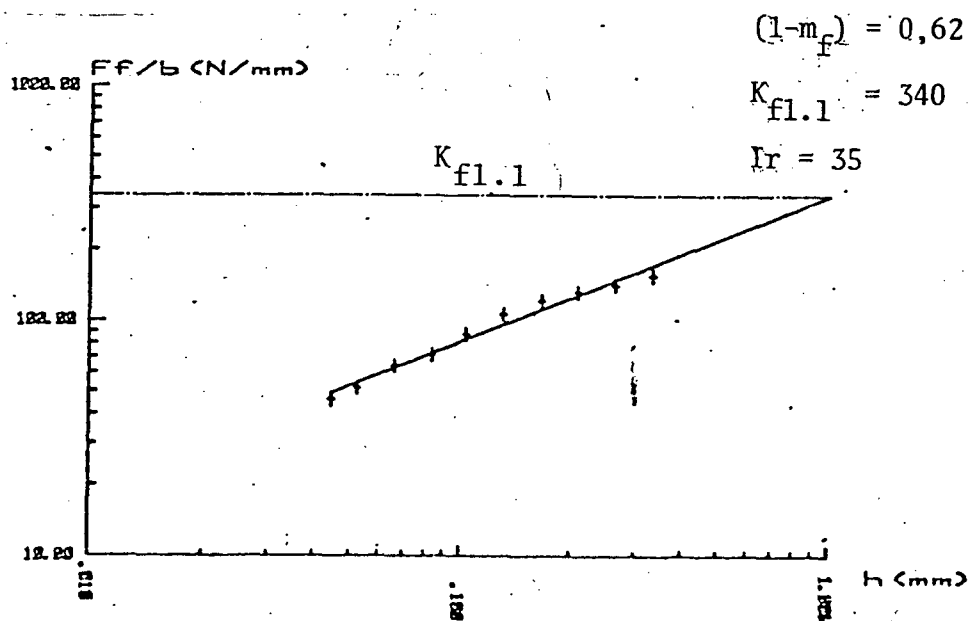


GRÁFICO 16 - Força específica de avanço no torneamento longitudinal (90°) para  $v_c = 31,5$  m/min.

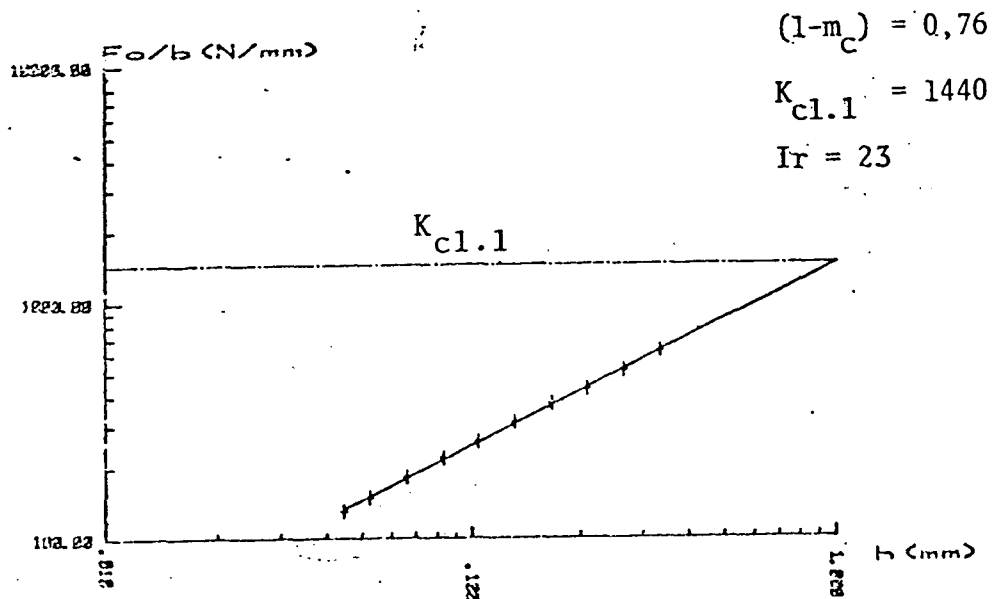


GRÁFICO 17 - Força específica de corte no torneamento longitudinal ( $121^\circ$ ) para  $v_c = 16$  m/min.

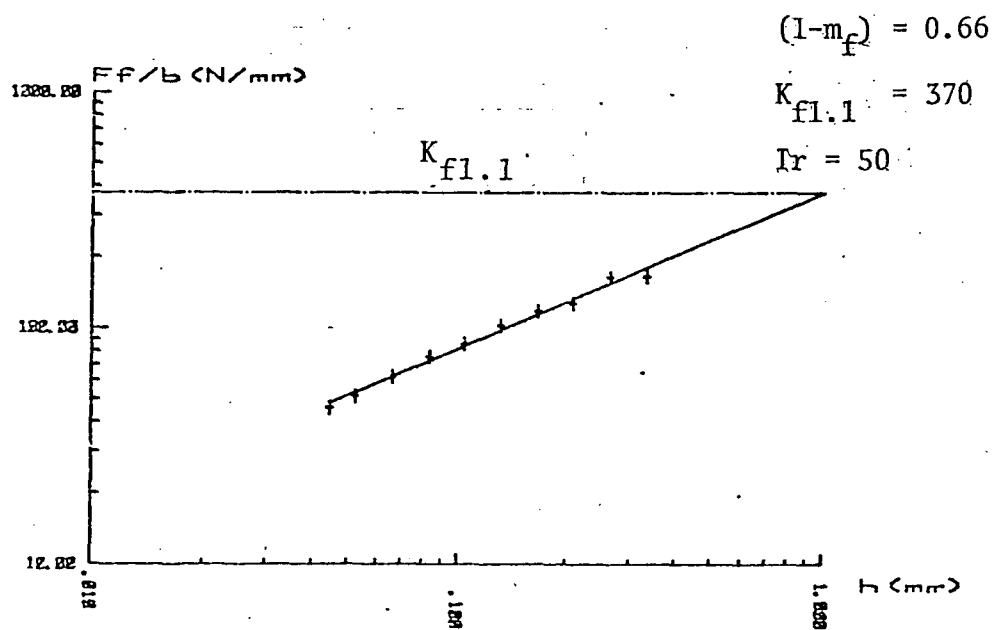


GRÁFICO 18 - Força específica de avanço no torneamento longitudinal ( $121^\circ$ ) para  $v_c = 16$  m/min.

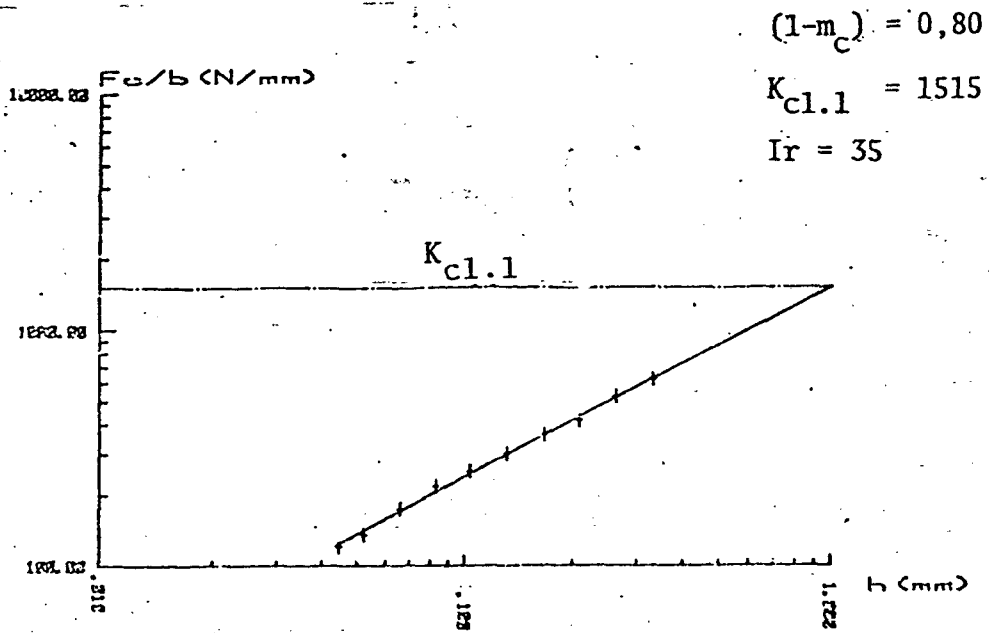


GRÁFICO 19 - Força específica de corte no torneamento longitudinal (121°) para  $v_c = 20$  m/min.

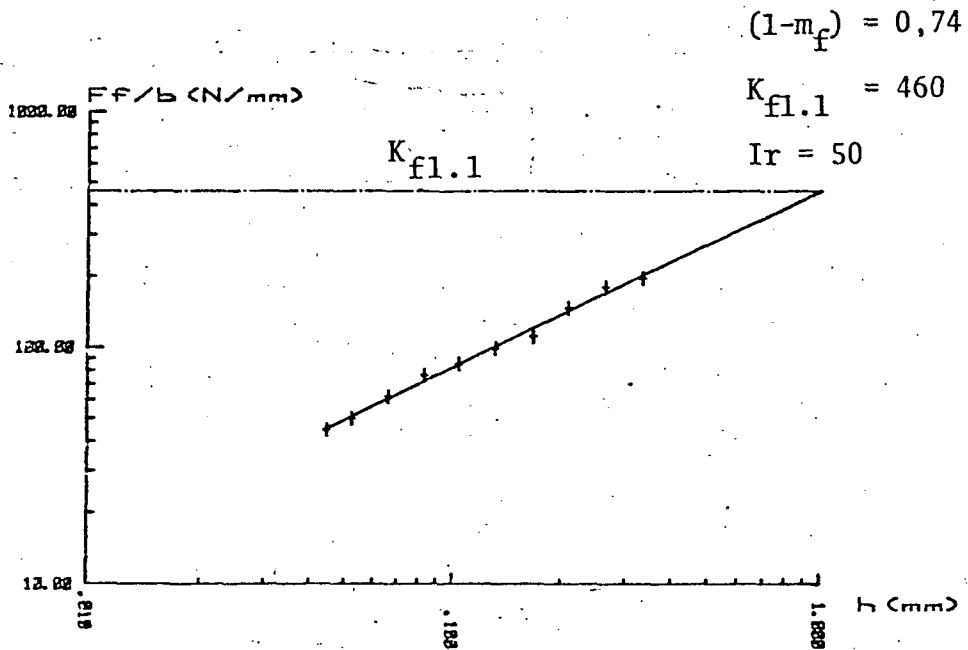


GRÁFICO 20 - Força específica de avanço no torneamento longitudinal (121°) para  $v_c = 20$  m/min.

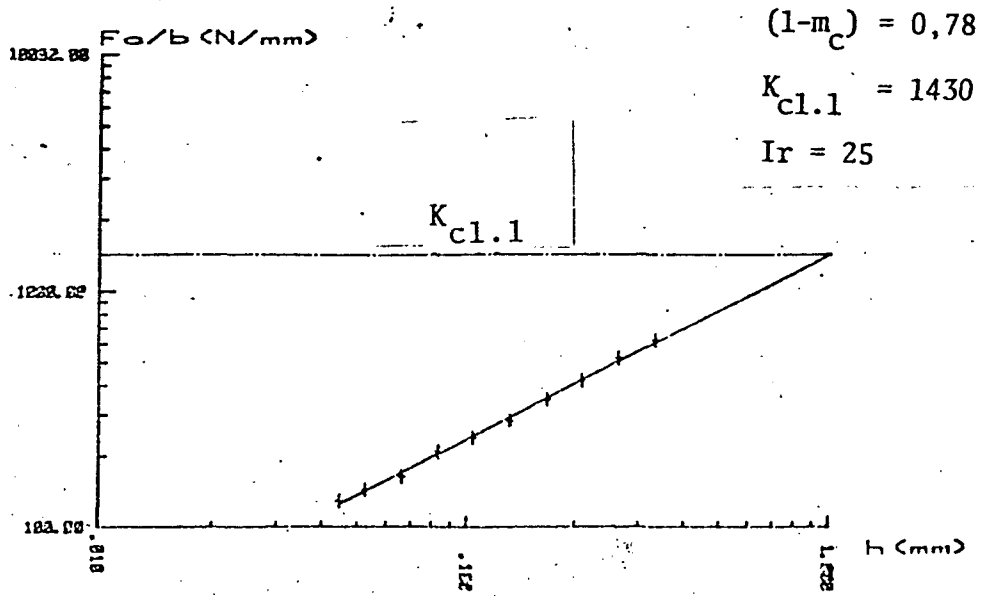


GRÁFICO 21 - Força específica de corte no torneamento longitudinal ( $121^\circ$ ) para  $v_c = 25$  m/min.

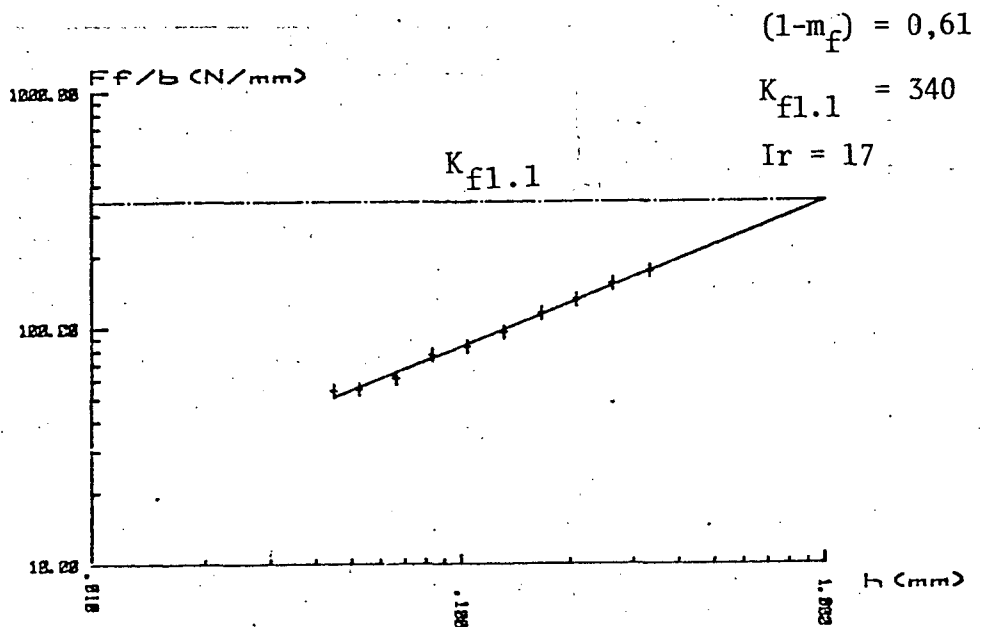


GRÁFICO 22 - Força específica de avanço no torneamento longitudinal ( $121^\circ$ ) para  $v_c = 25$  m/min.



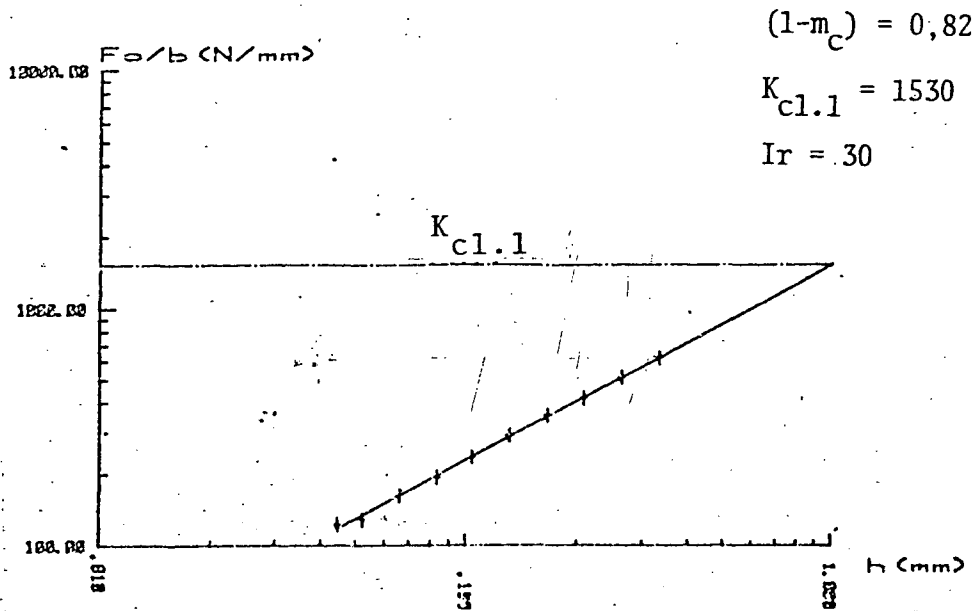


GRÁFICO 23 - Força específica de corte no torneamento longitudinal ( $121^\circ$ ) para  $v_c = 31,5$  m/min.

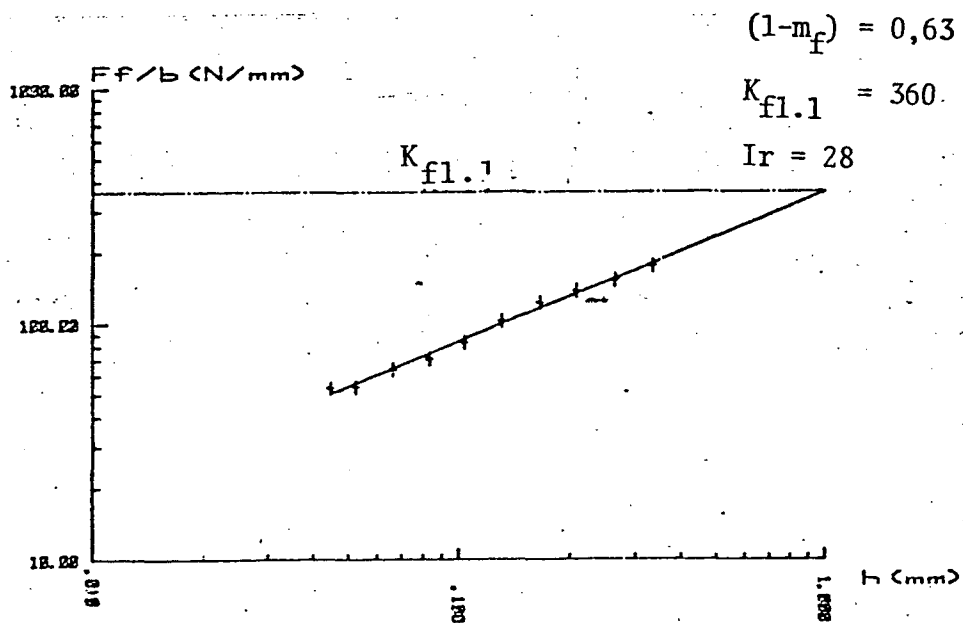


GRÁFICO 24 - Força específica de avanço no torneamento longitudinal ( $121^\circ$ ) para  $v_c = 31,5$  m/min.

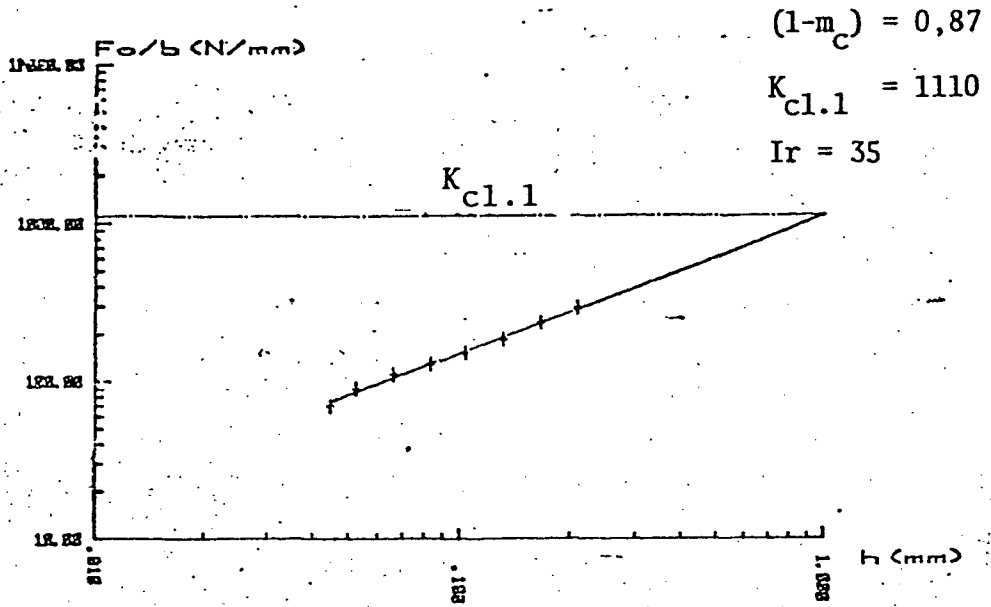


GRÁFICO 25 - Força específica de corte na furação ortogonal para  $v_c = 16$  m/min.

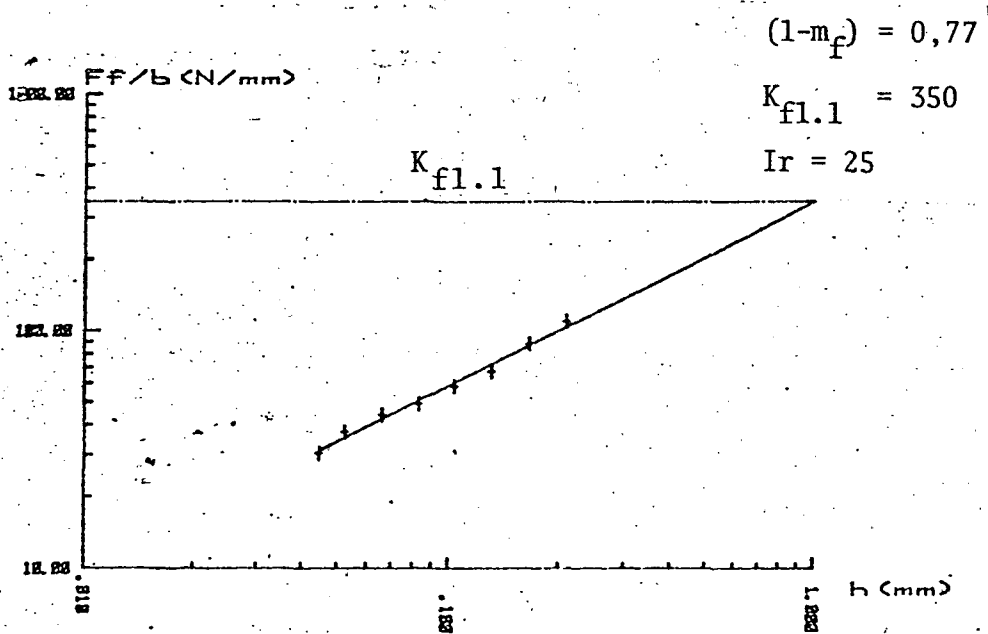


GRÁFICO 26 - Força específica de avanço na furação ortogonal para  $v_c = 16$  m/min.

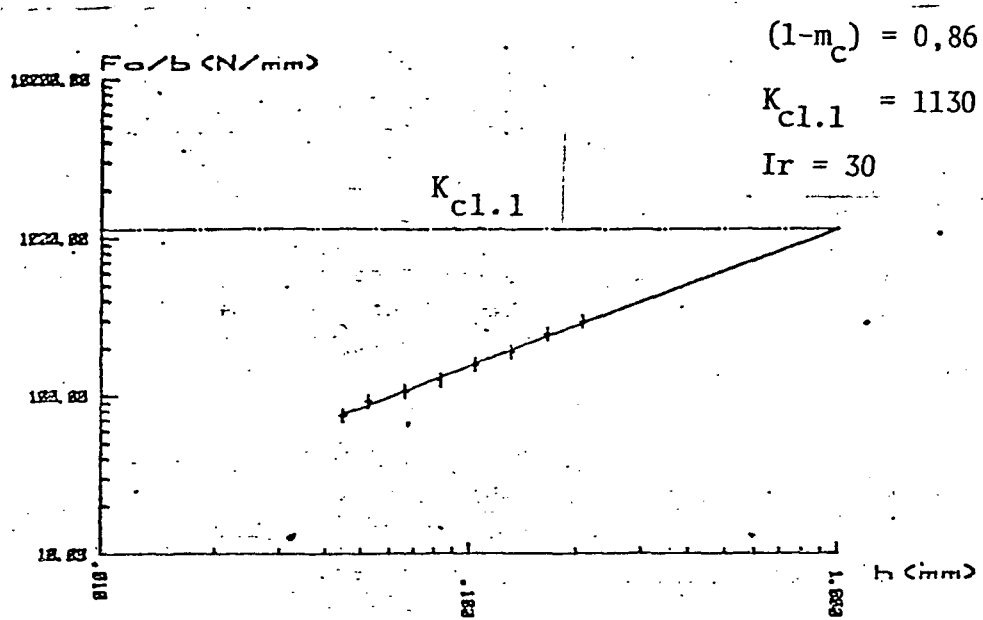


GRÁFICO 27 - Força específica de corte na furação ortogonal para  $v_c = 20$  m/min.

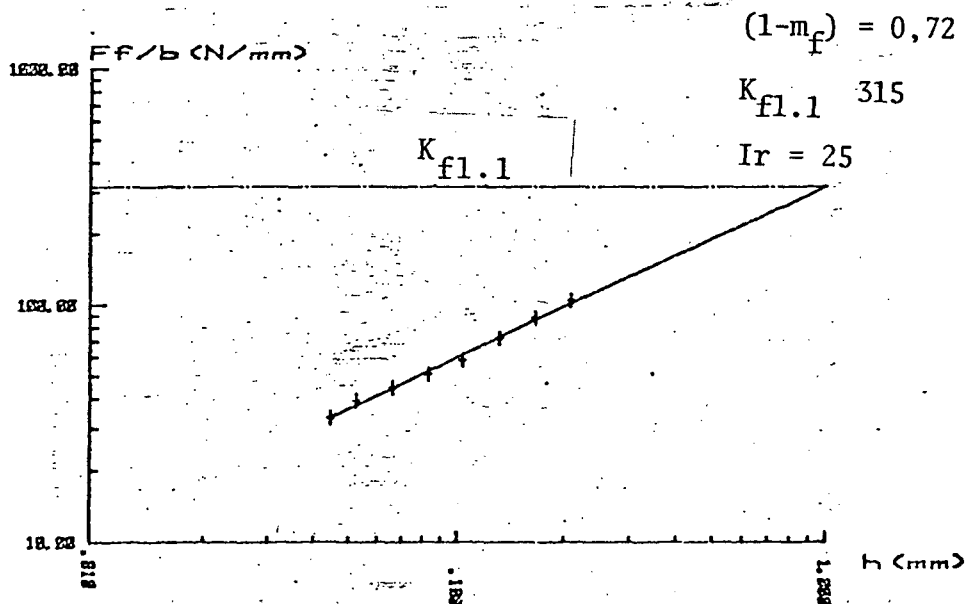


GRÁFICO 28 - Força específica de avanço na furação ortogonal para  $v_c = 20$  m/min.

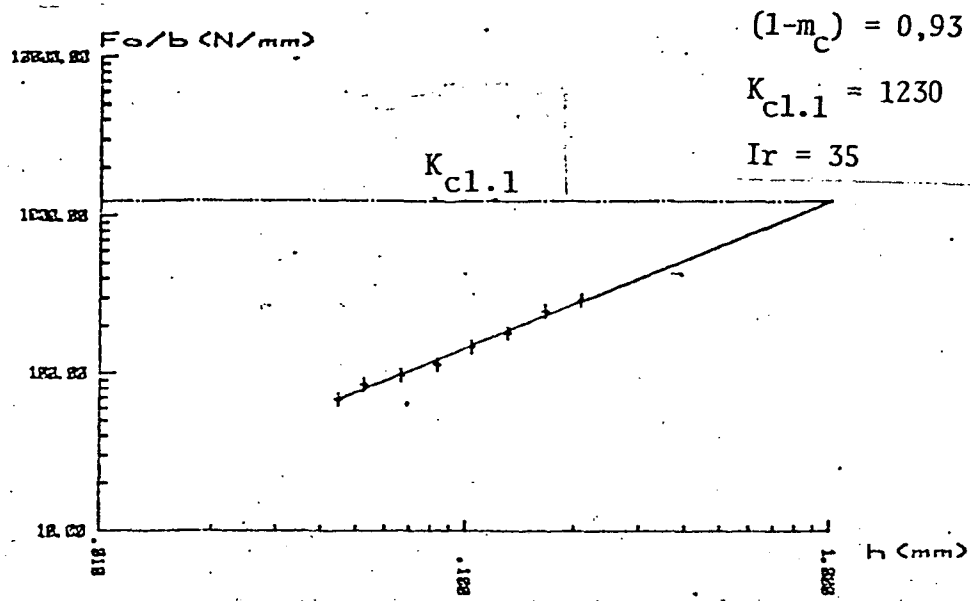


GRÁFICO 29 - Força específica de corte na furação ortogonal para  $v_c = 25$  m/min.

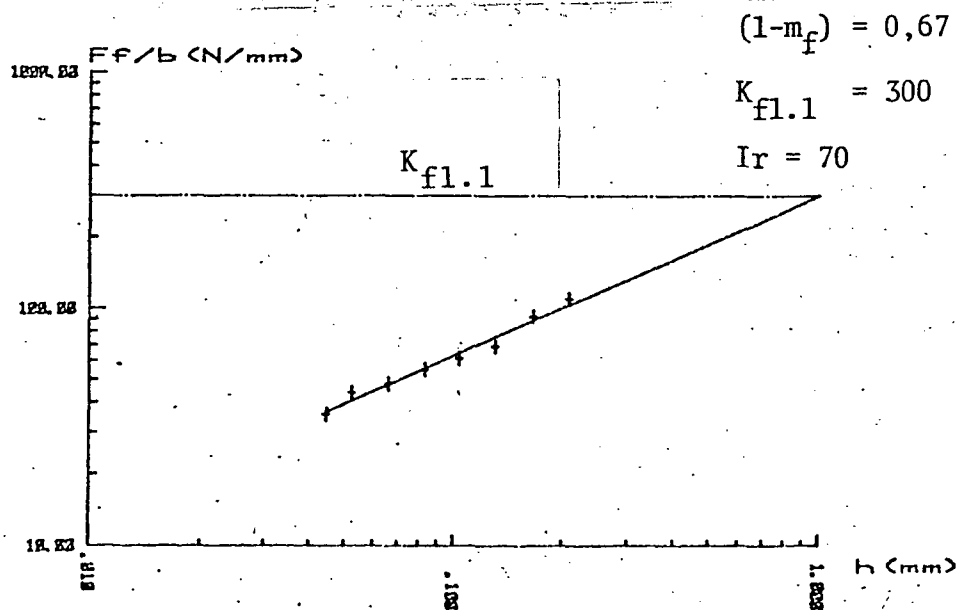


GRÁFICO 30 - Força específica de avanço na furação ortogonal para  $v_c = 25$  m/min.

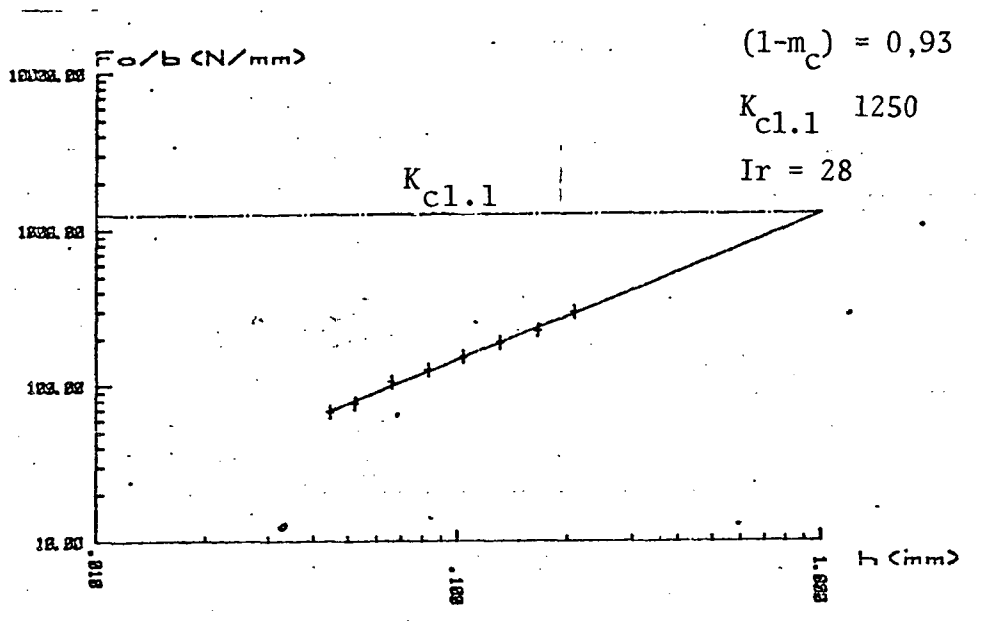


GRÁFICO 31 - Força específica de corte na furação ortogonal para  $v_c = 31,5$  m/min.

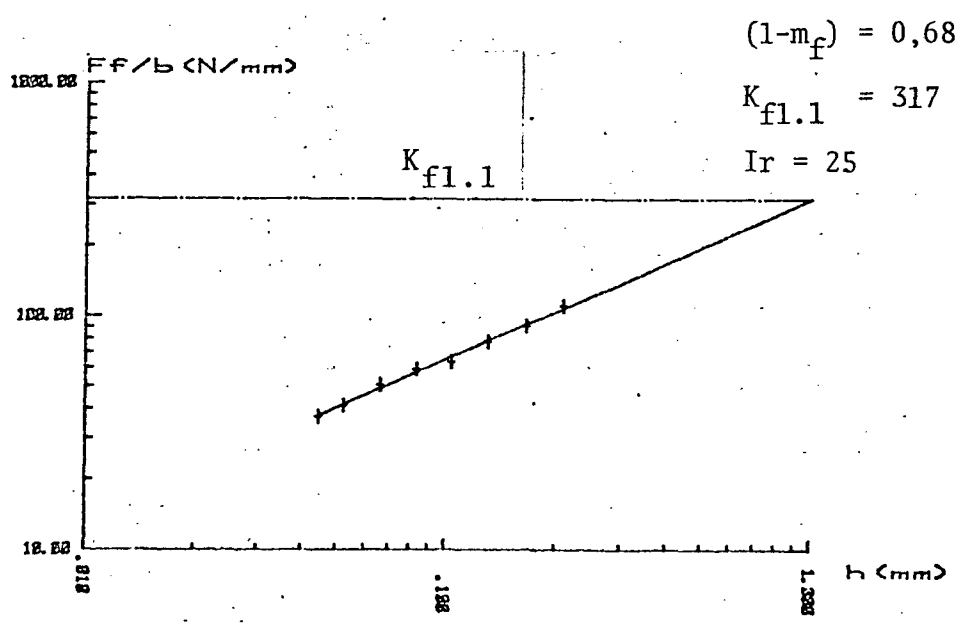


GRÁFICO 32 - Força específica de avanço na furação ortogonal para  $v_c = 31,5$  m/min.

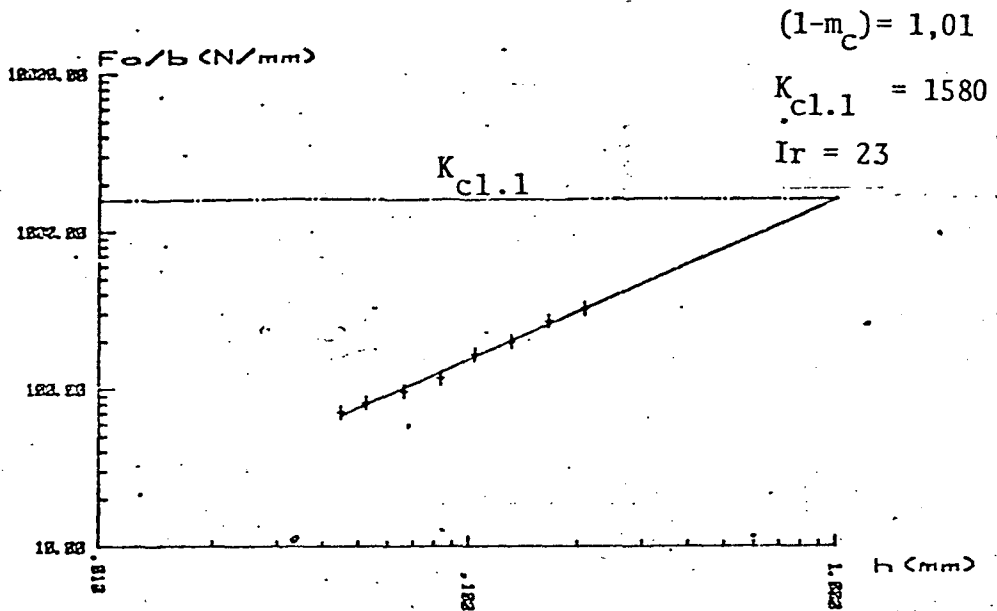


GRÁFICO 33 - Força específica de corte na furação com pré-furo para  $v_c = 16$  m/min.

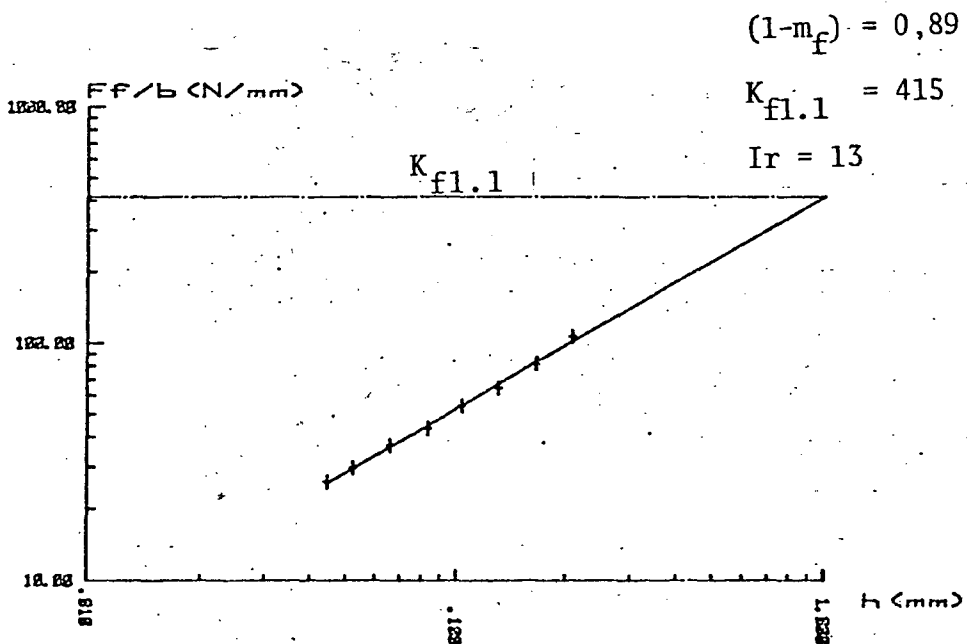


GRÁFICO 34 - Força específica de avanço na furação com pré-furo para  $v_c = 16$  m/min.

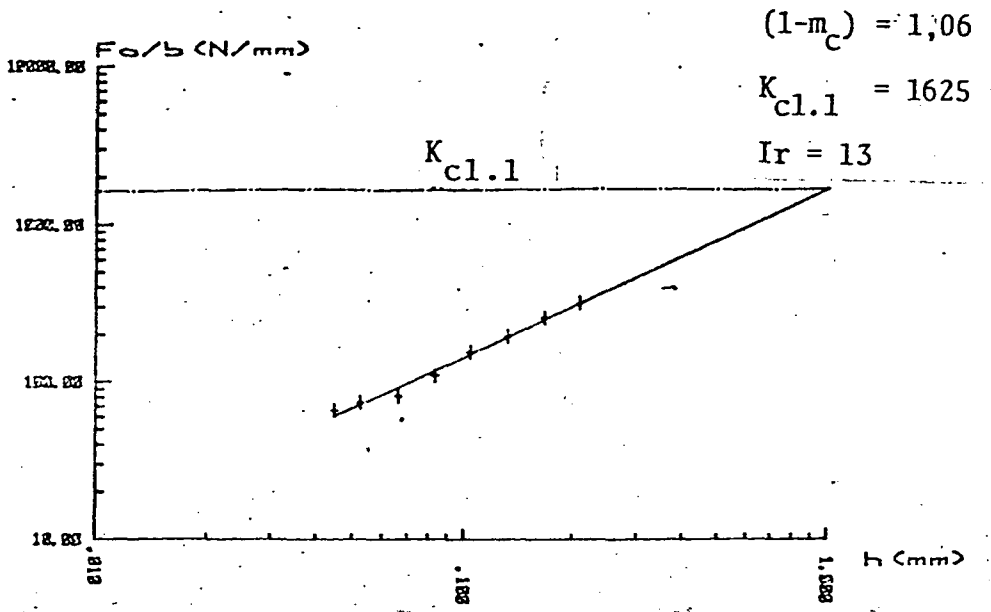


GRÁFICO 35 - Força específica de corte na furação com pré-furo para  $v_c = 20$  m/min.

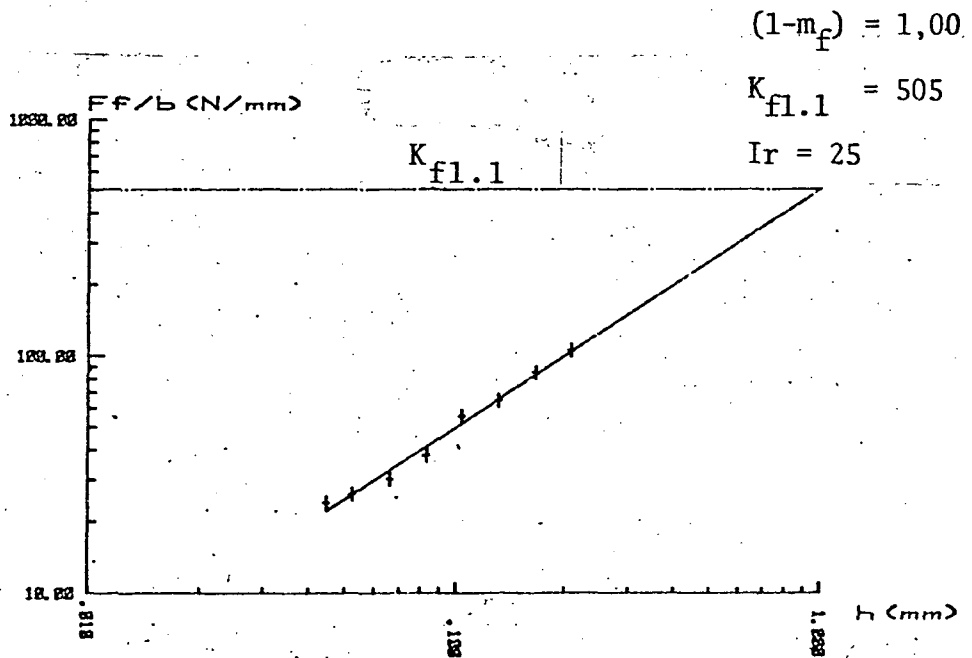


GRÁFICO 36 - Força específica de avanço na furação com pré-furo para  $v_c = 20$  m/min.

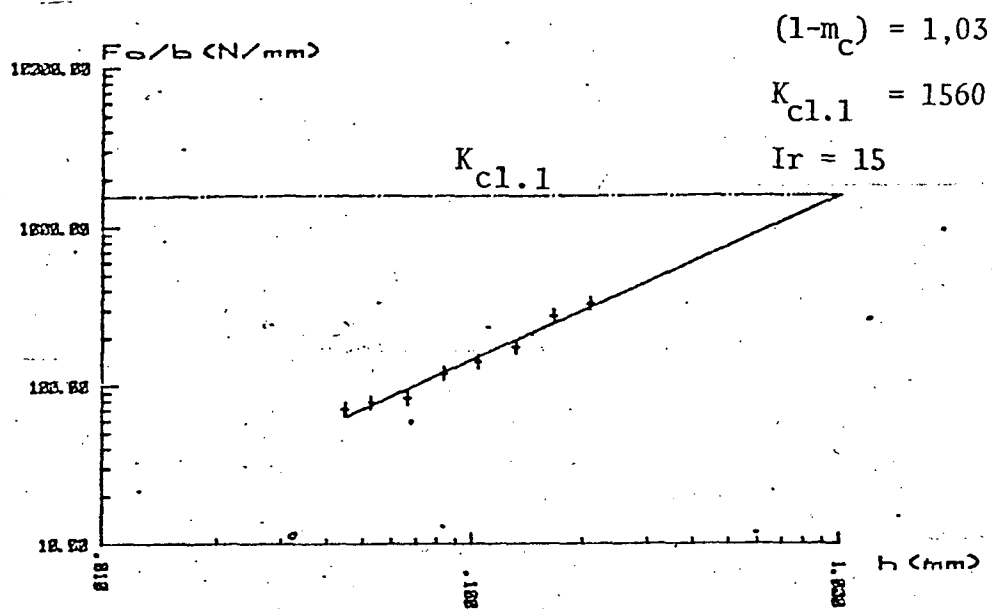


GRÁFICO 37 - Força específica de corte na furação com pré-furo para  $v_c = 25 \text{ m/min}$ .

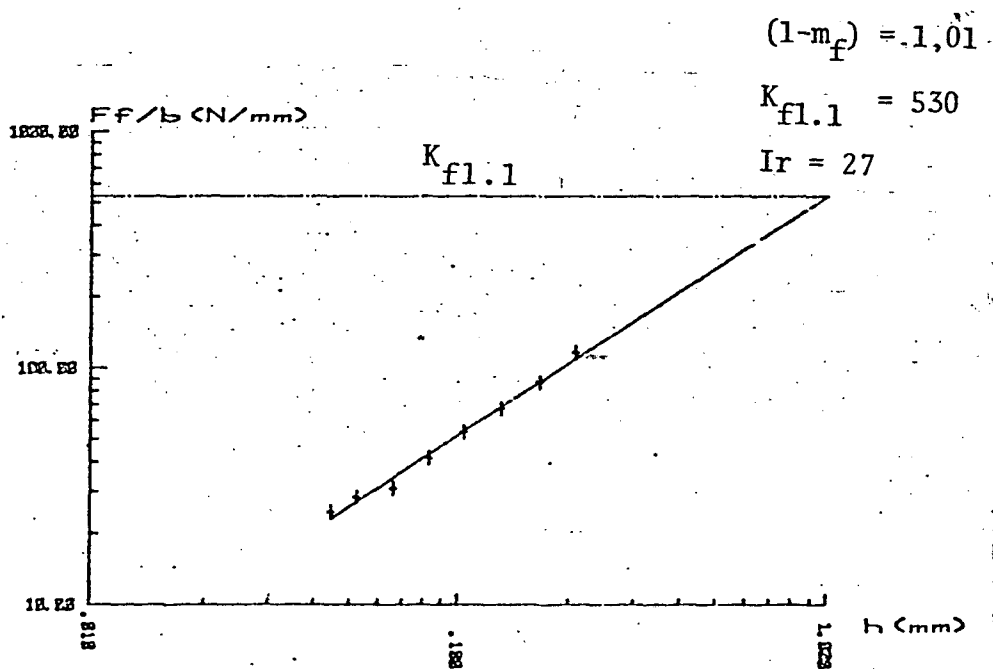


GRÁFICO 38 - Força específica de avanço na furação com pré-furo para  $v_c = 25 \text{ m/min}$ .



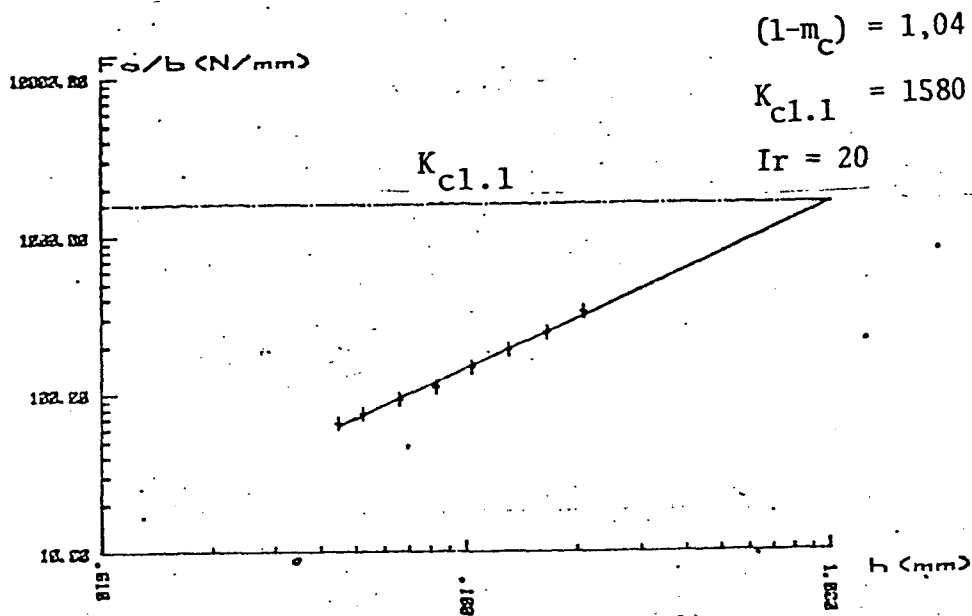


GRÁFICO 39 - Força específica de corte na furação com pré-furo para  $v_c = 31,5$  m/min.

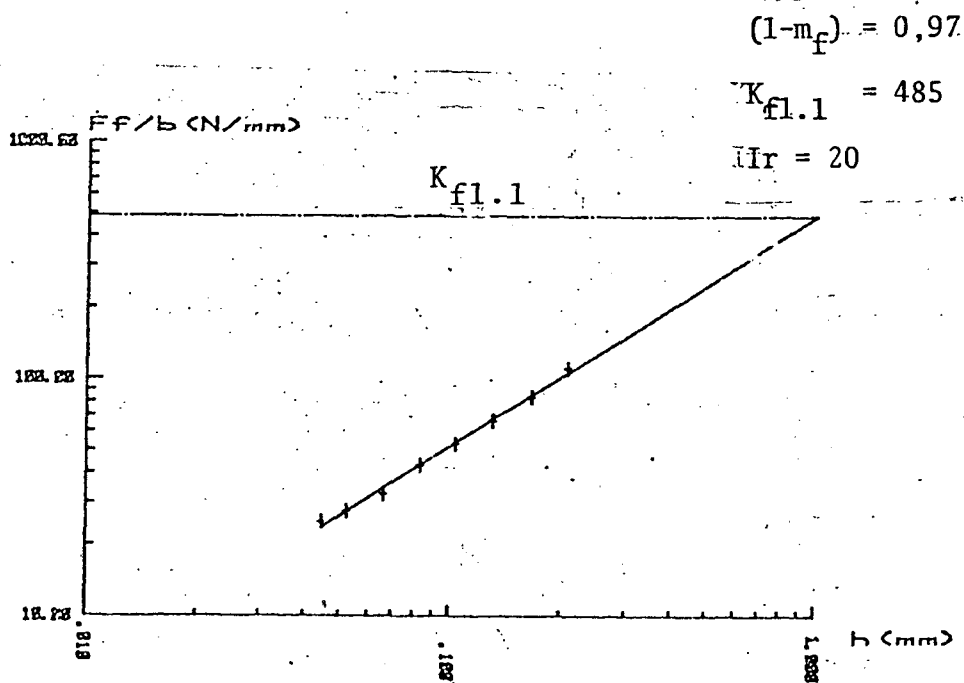


GRÁFICO 40 - Força específica de avanço na furação com pré-furo para  $v_c = 31,5$  m/min.

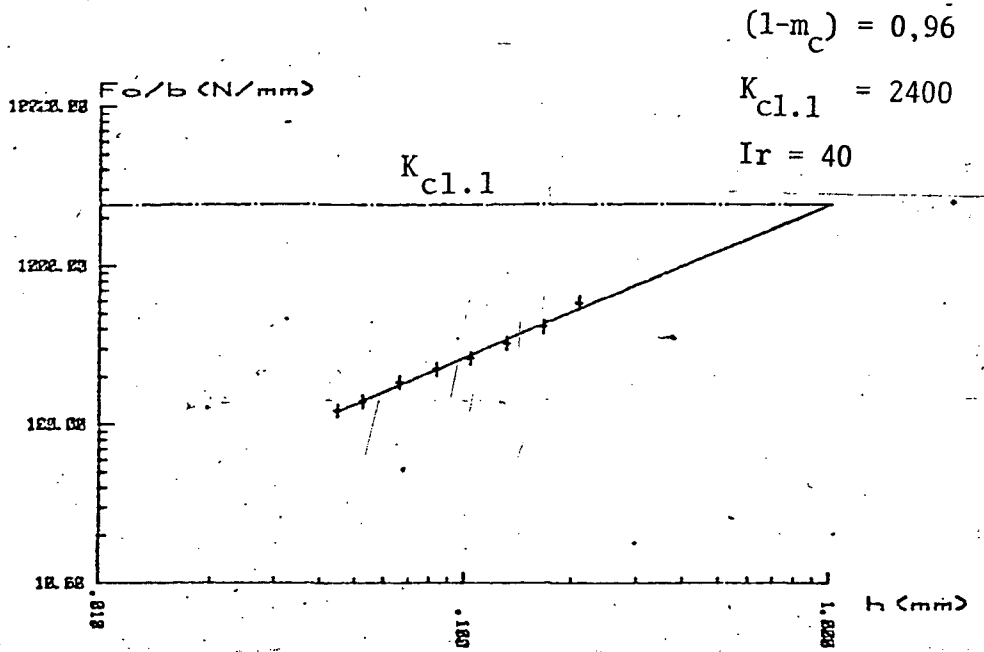


GRÁFICO 41 - Força específica de corte na furação em cheio  
(afiação N) para  $v_c = 16$  m/min.

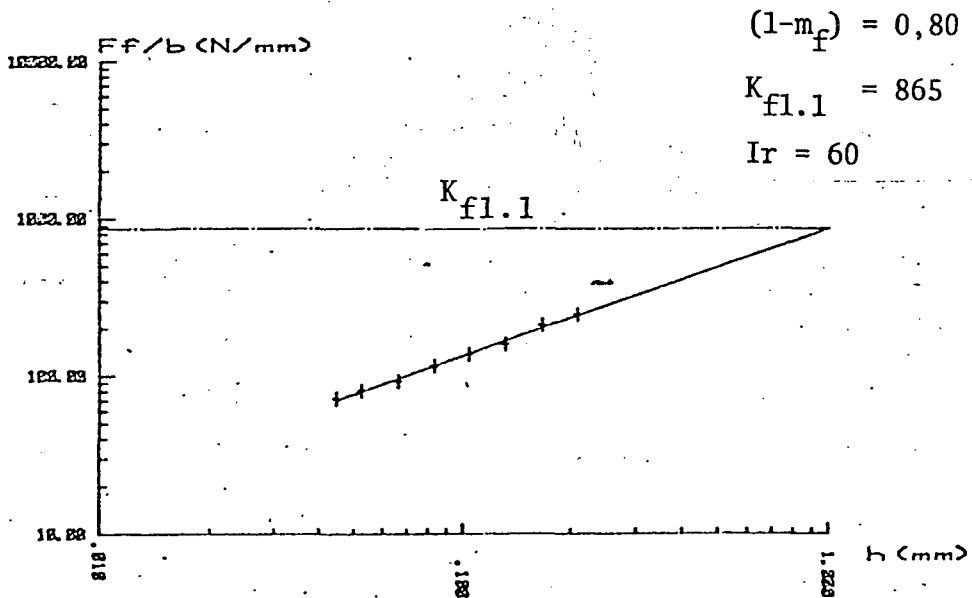


GRÁFICO 42 - Força específica de avanço na furação em cheio  
(afiação N) para  $v_c = 16$  m/min.

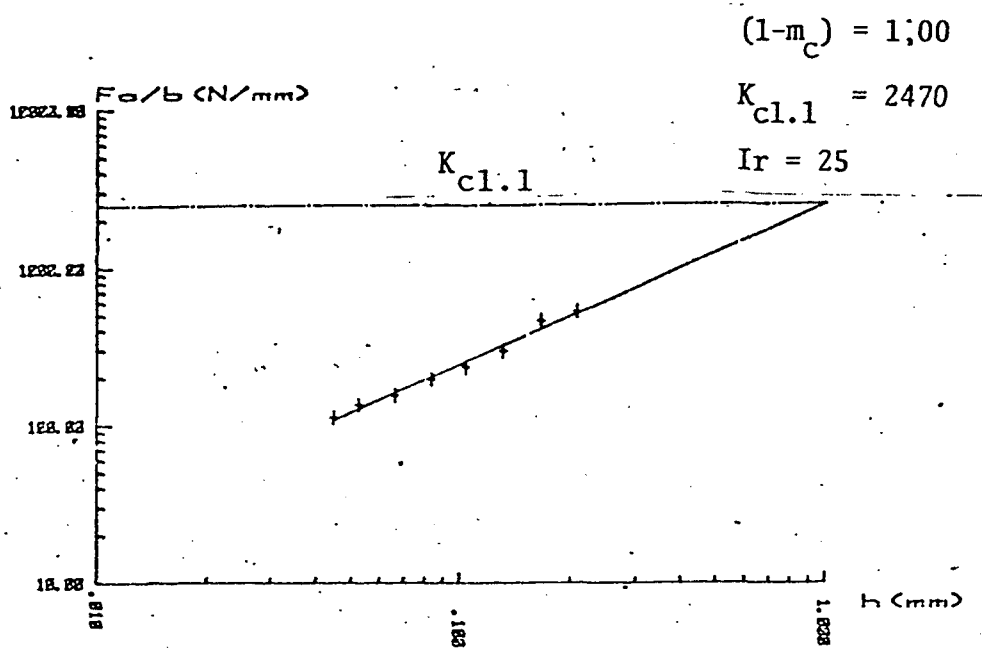


GRÁFICO 43 - Força específica de corte na furação em cheio  
 (afiação N) para  $v_c = 20$  m/min.

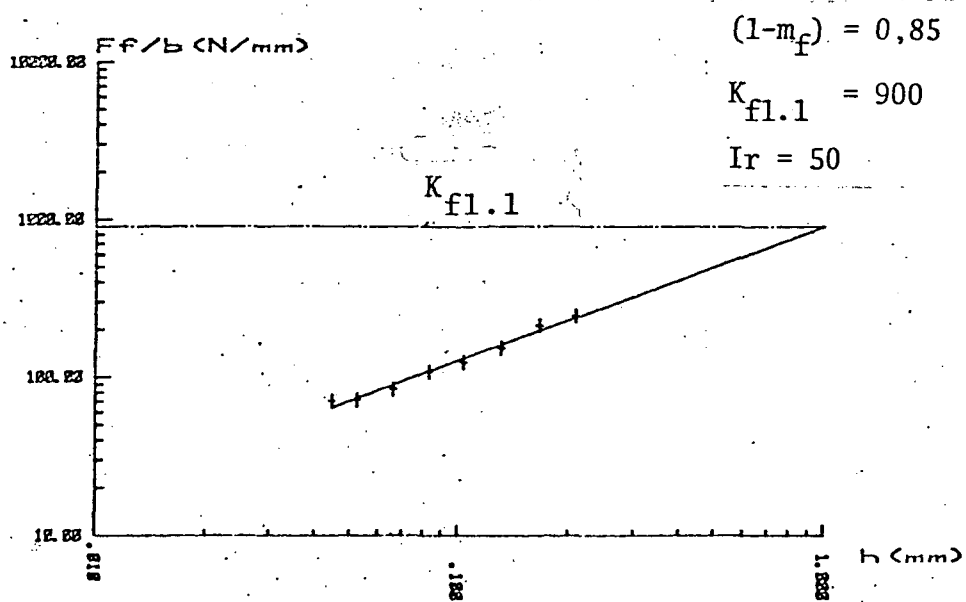


GRÁFICO 44 - Força específica de avanço na furação em cheio  
 (afiação N) para  $v_c = 20$  m/min.

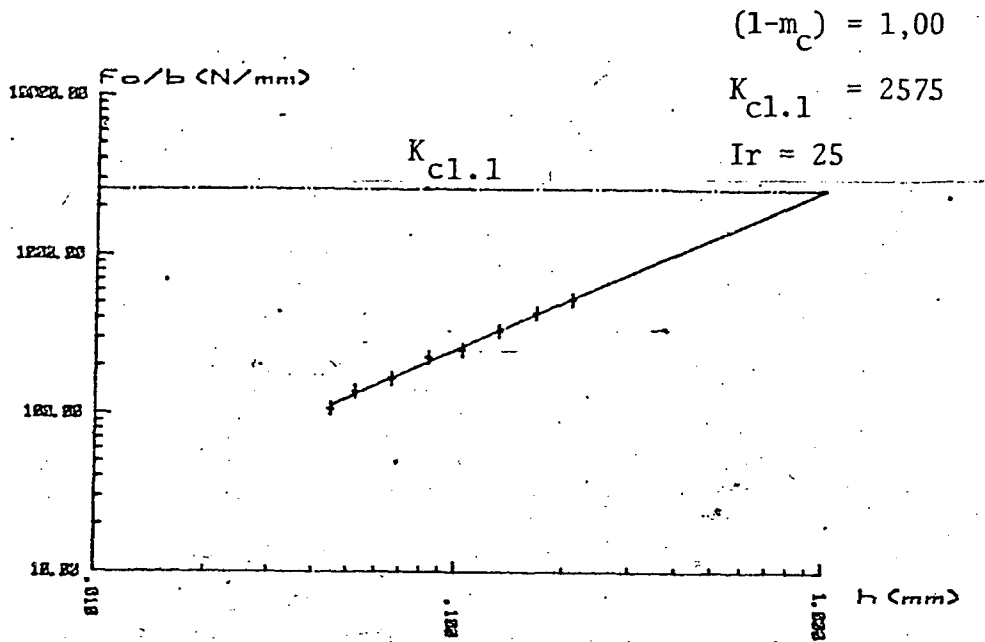


GRÁFICO 45 - Força específica de corte na furação em cheio  
(afiação N) para  $v_c = 25$  m/min.

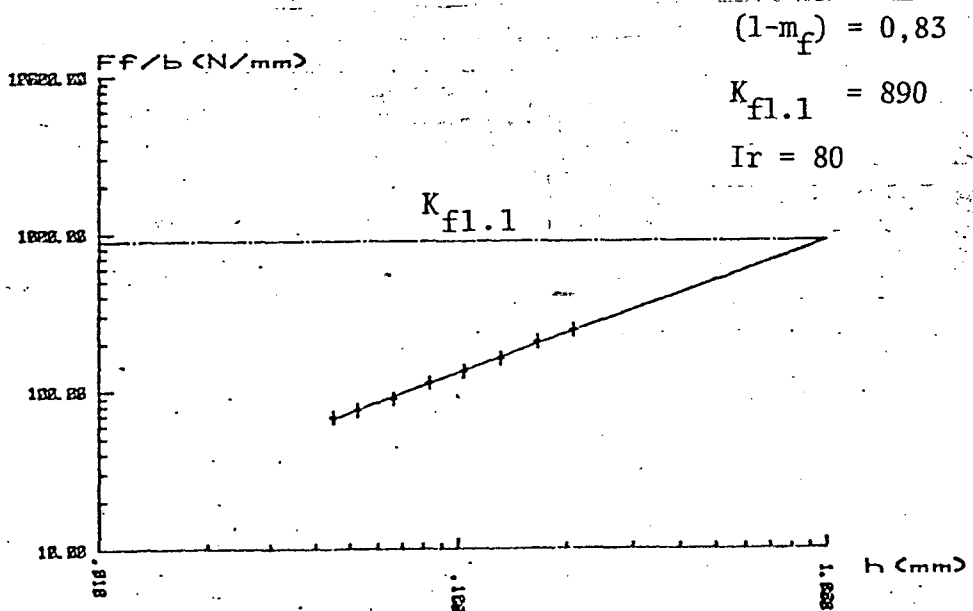


GRÁFICO 46 - Força específica de avanço na furação em cheio  
(afiação N) para  $v_c = 25$  m/min.

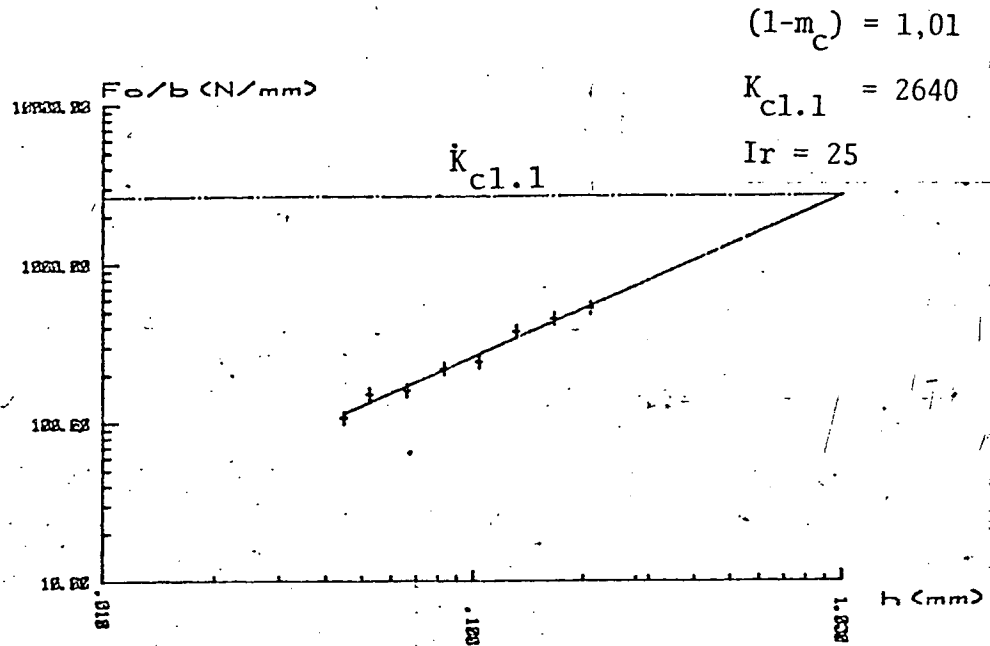


GRÁFICO 47 - Força específica de corte na furação em cheio  
(afiação N) para  $v_c = 31,5 \text{ m/min.}$

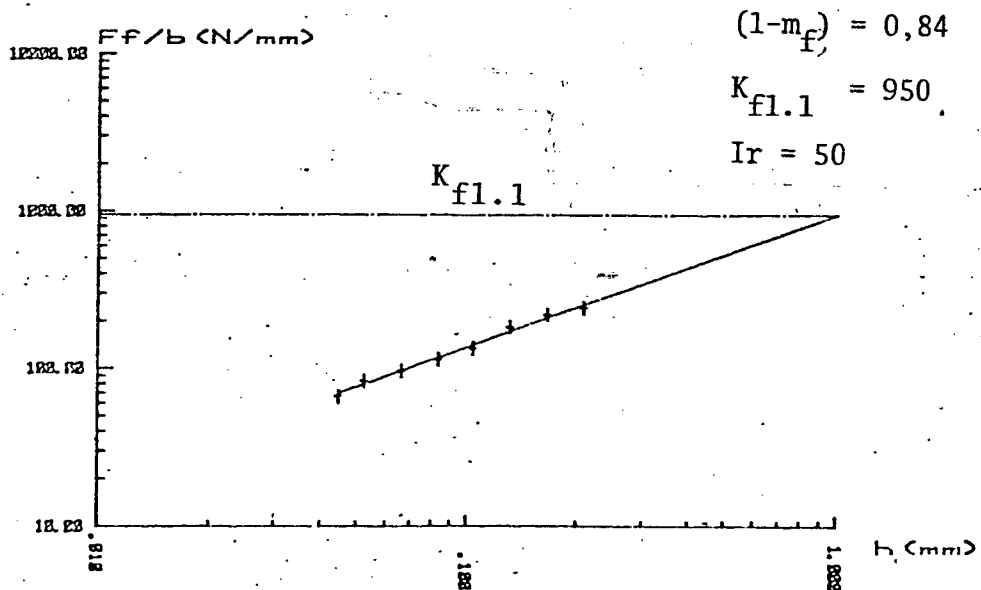


GRÁFICO 48 - Força específica de avanço na furação em cheio  
(afiação N) para  $v_c = 31,5 \text{ m/min.}$

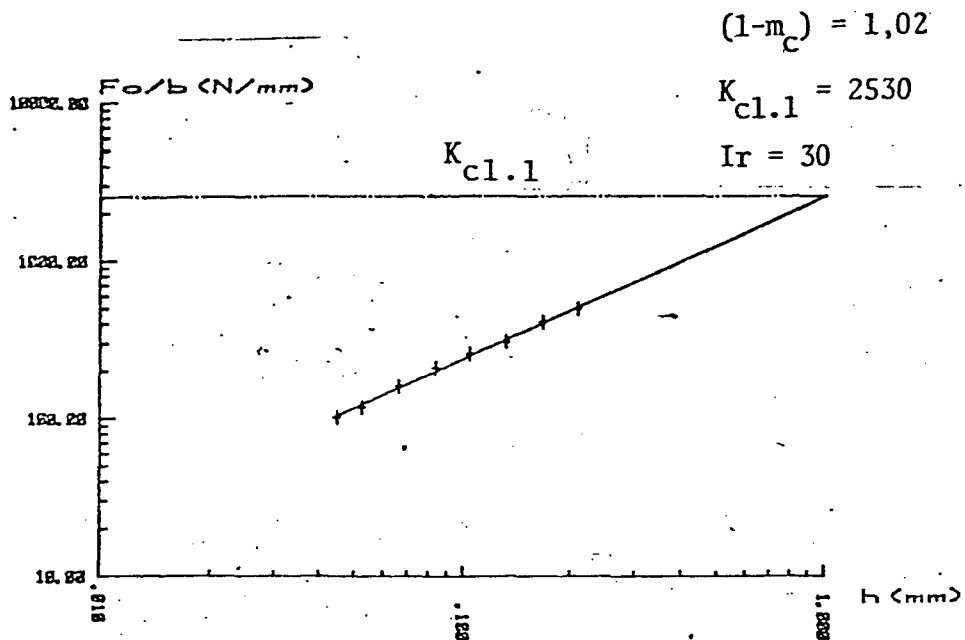


GRÁFICO 49 - Força específica de corte na furação em cheio (afiação.U) para  $v_c = 16 \text{ m/min}$ .

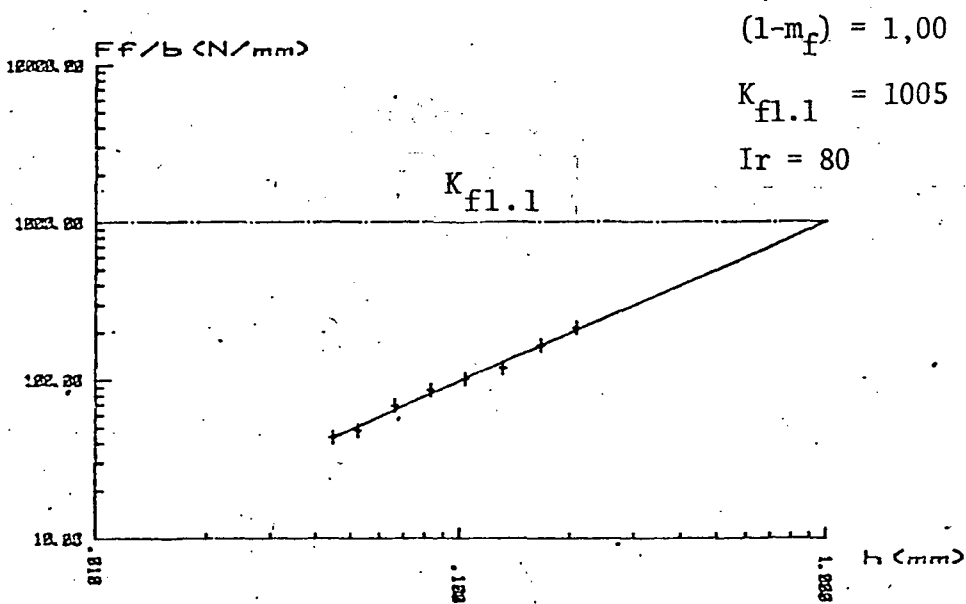


GRÁFICO 50 - Força específica de avanço na furação em cheio (afiação U) para  $v_c = 16 \text{ m/min}$ .

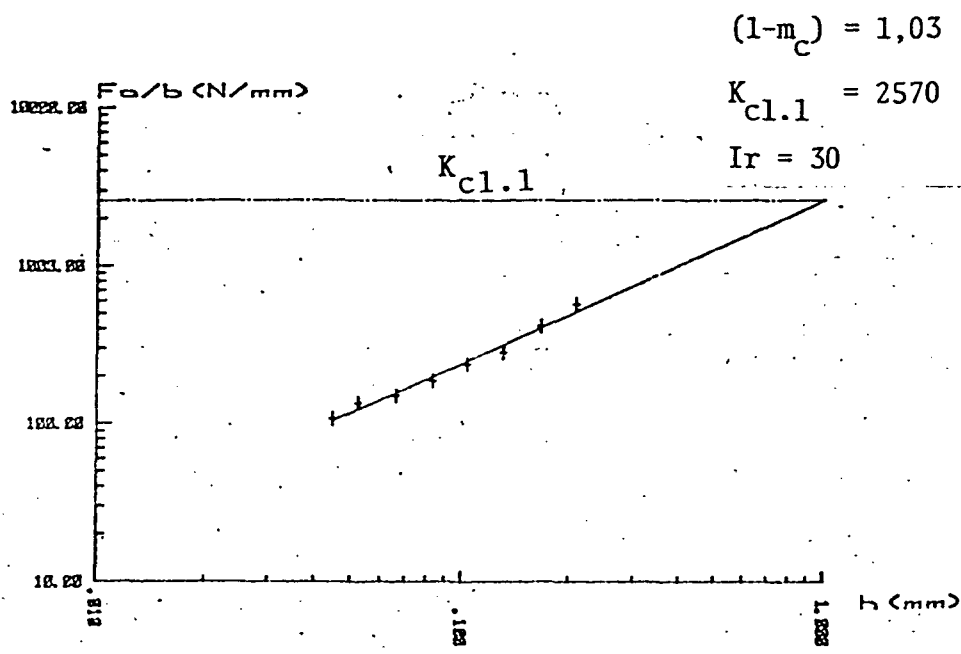


GRÁFICO 51 - Força específica de corte na furação em cheio  
 (afiação U) para  $v_c = 20$  m/min.

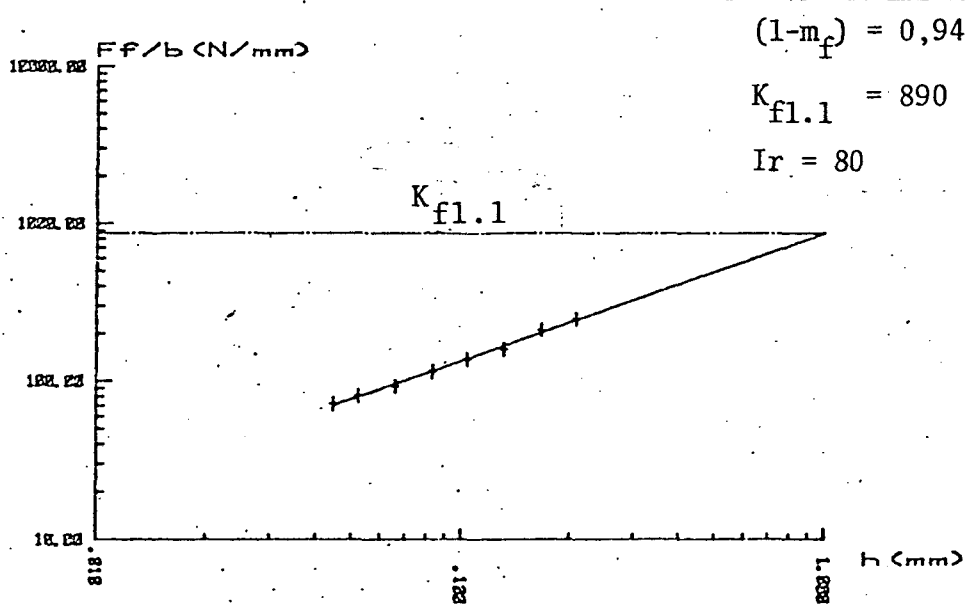


GRÁFICO 52 - Força específica de avanço na furação em cheio  
 (afiação U) para  $v_c = 20$  m/min.

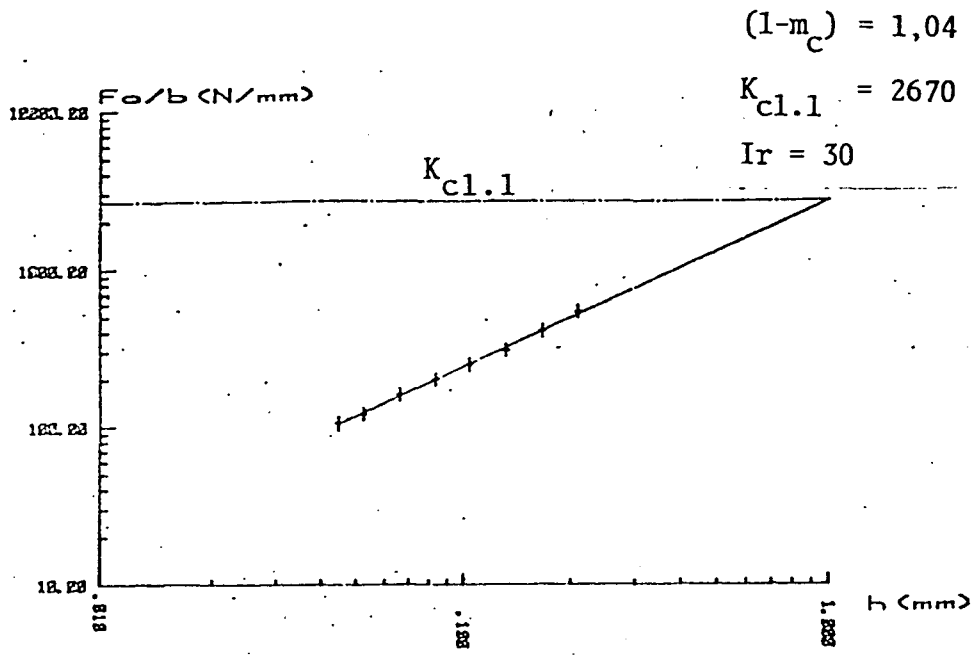


GRÁFICO 53 - Força específica de corte na furação em cheio (afiação U) para  $v_c = 25 \text{ m/min}$ .

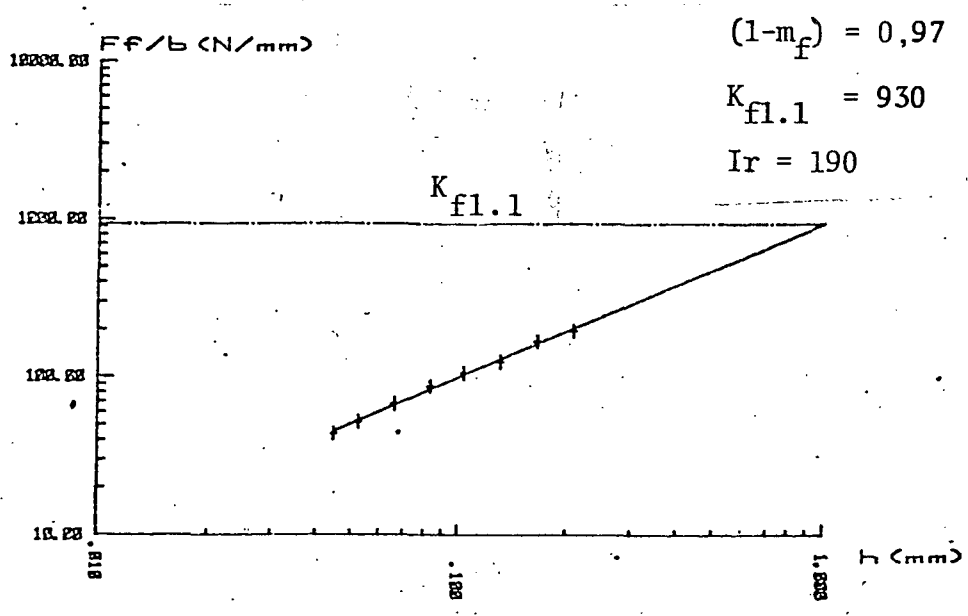


GRÁFICO 54 - Força específica de avanço na furação em cheio (afiação U) para  $v_c = 25 \text{ m/min}$ .



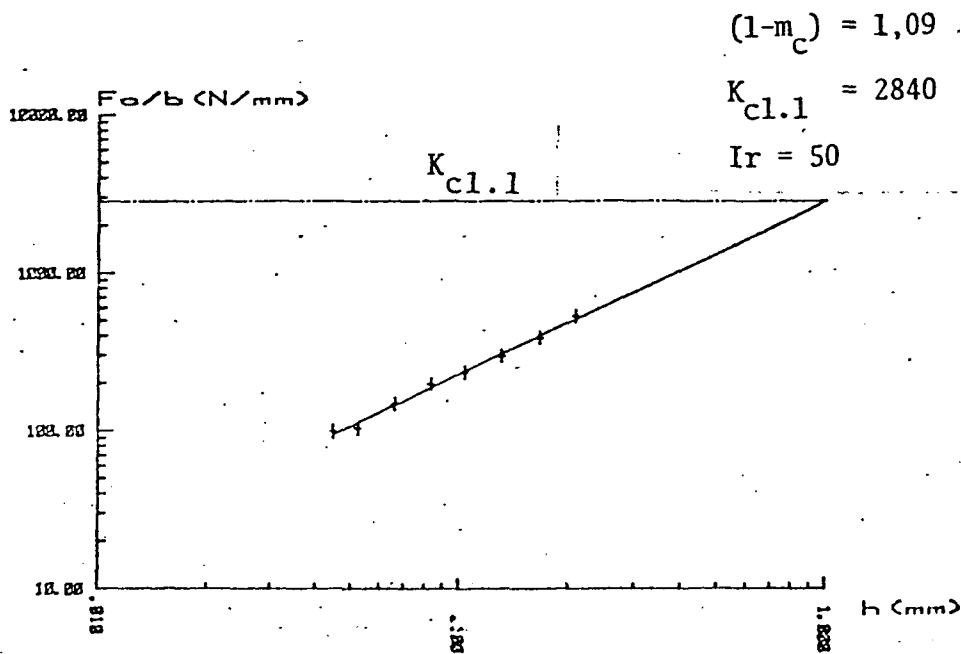


GRÁFICO 55 - Força específica de corte na furação em cheio (afiação U) para  $v_c = 31,5$  m/min.

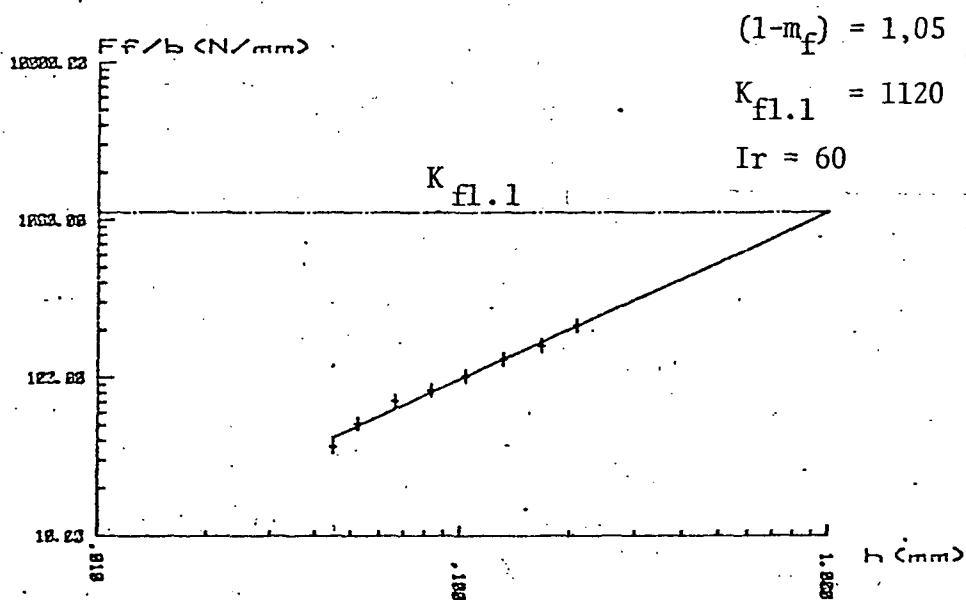


GRÁFICO 56 - Força específica de avanço na furação em cheio (afiação U) para  $v_c = 31,5$  m/min.

#### 4.5 Apresentação dos Resultados

Os resultados são mostrados em gráficos  $V_c \times K_{1.1}$  (velocidade de corte versus força específica) onde para cada velocidade são plotados os diversos valores específicos de força; obtidos para as experiências de torneamento e furação, juntamente com suas respectivas incertezas de resultado. Figuras (57) e (58).

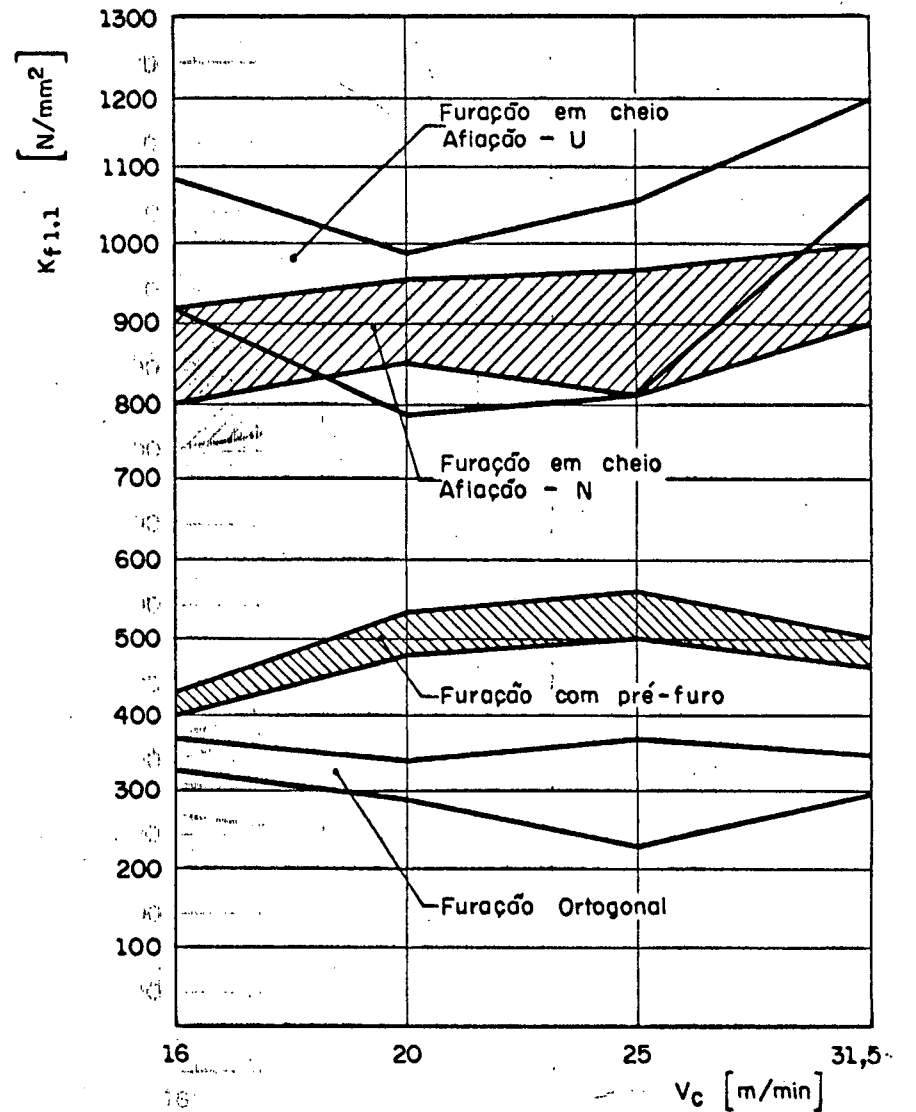
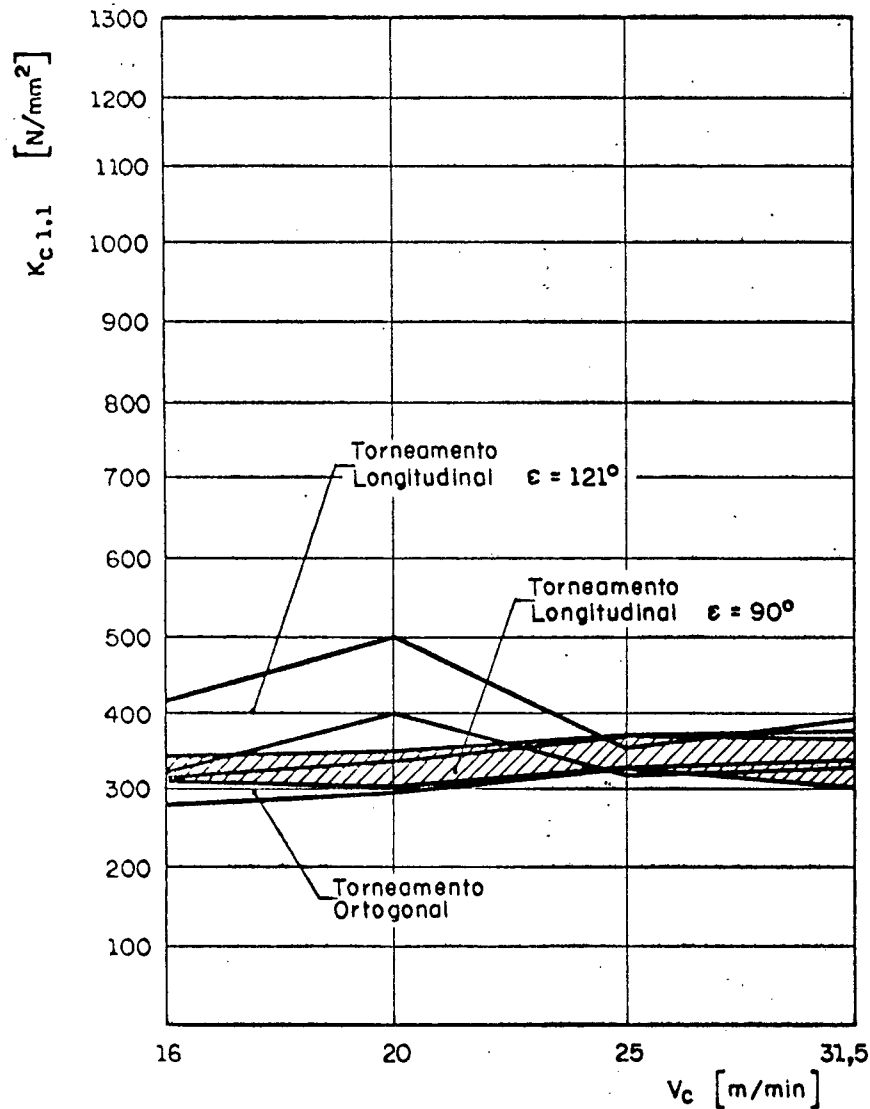


FIGURA 59 - Resultado da medição da força específica de corte para o torneamento e furação, em função da velocidade de corte.

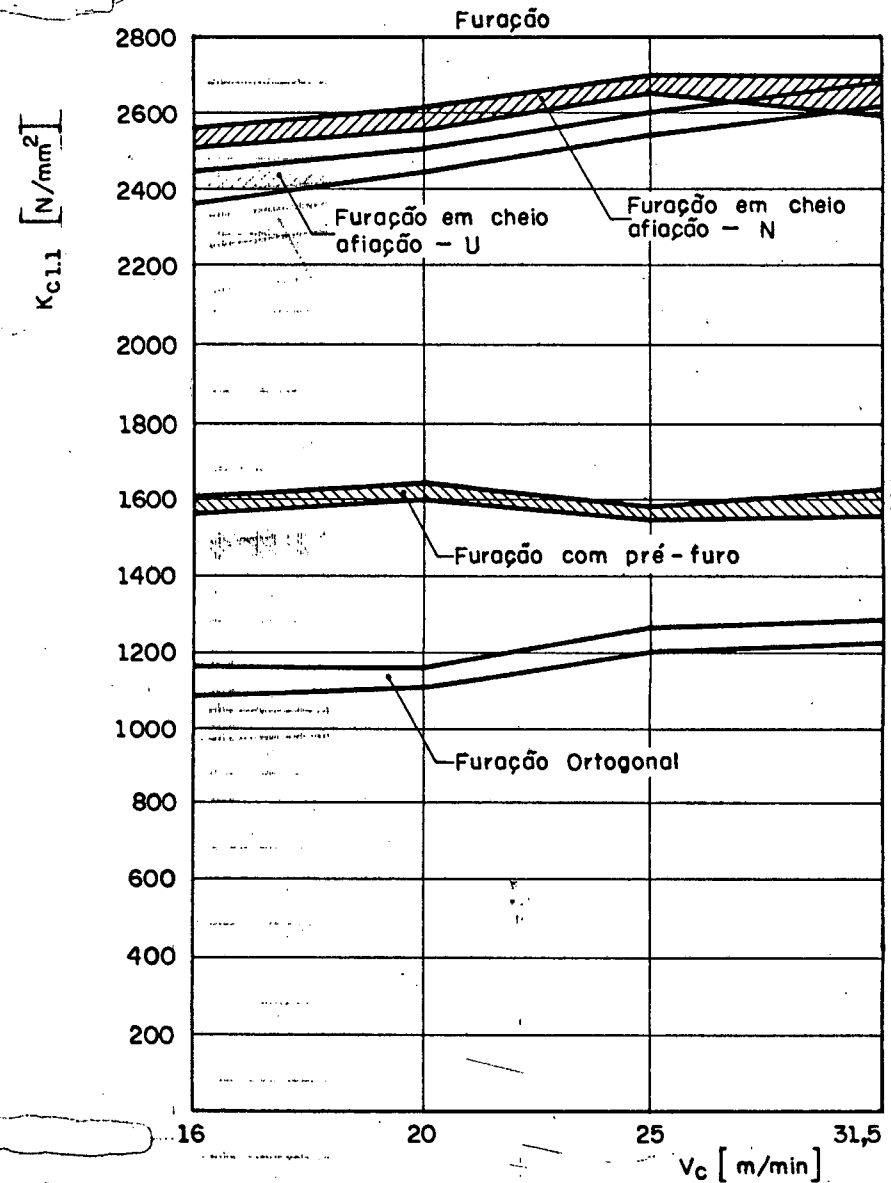
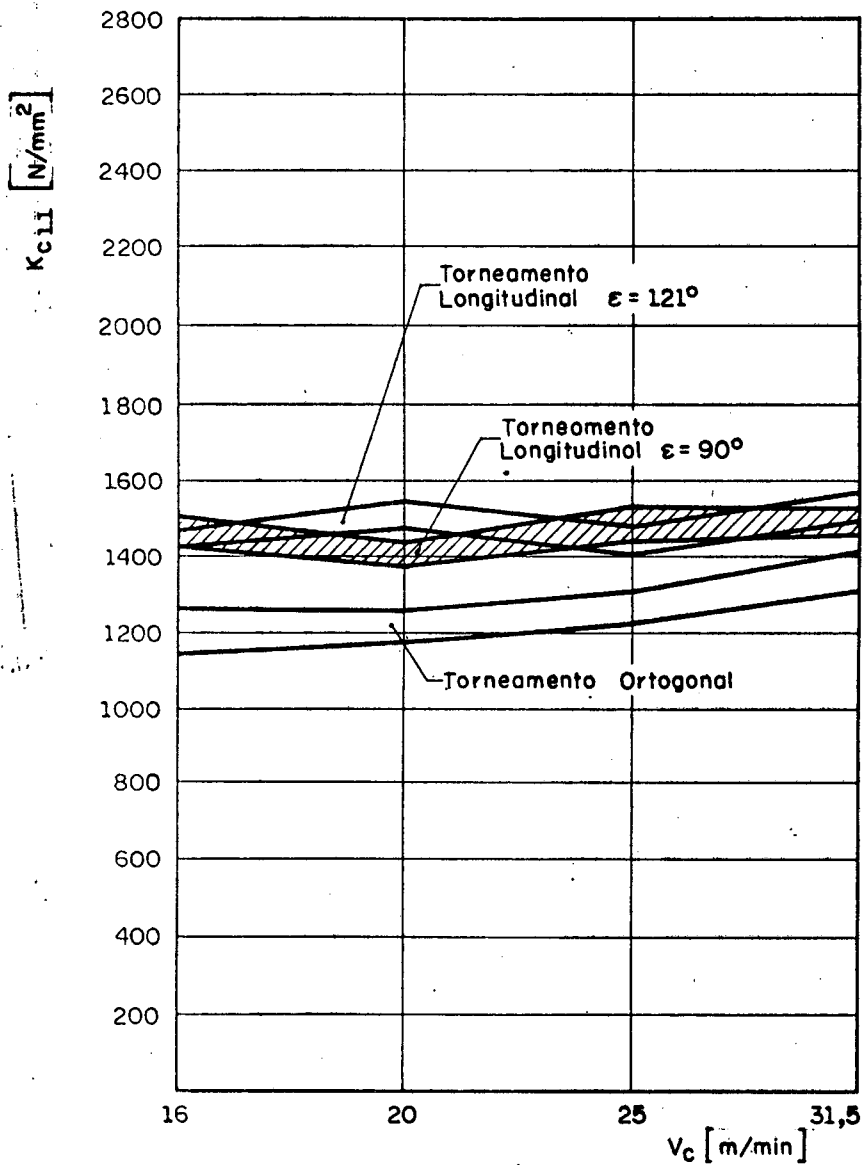


FIGURA 60 - Resultado da medição para as forças específicas de avanço para o torneamento e furação, em função da velocidade de corte.

## CAPÍTULO 5

## ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para as quatro velocidades de corte utilizadas, sob i dênticas condições, tanto no processo de furação como torneamento ortogonal, as forças específicas de corte e de avanço apresentaram valores análogos, com pequena dispersão.

Esta dispersão é devida à variação dos resultados de medição, uma vez que a saída contínua de cavaco provoca uma cons tante mudança do ângulo de saída efetivo e das relações de atrito na superfície de saída. (fenômeno da formação do gume postiço).

Comparando-se as forças da furação com pré-furo e as do processo ortogonal verifica-se uma pequena elevação nas forças do primeiro, justificada pelo fato do atrito do gume lateral e da pró pria condução do cavaco aumentarem as forças específicas de corte e de avanço.

A simulação de atrito através do torneamento longitu dinal, que por um lado foi introduzida com o ângulo usual de ponta  $\epsilon = 90^\circ$  e por outro lado, em analogia ao atrito existente na broca, com  $\epsilon = 121^\circ$ , mostra que o efeito do atrito de corte lateral ( $\epsilon = 121^\circ$ ) será, insignificamente, aumentado, e que a soma das for ças está abaixo da soma das forças da furação com pré-furo, o que pode ser justificado pelo fato da influência do transporte de cavaco não poder ser simulado no torneamento.

Para este fim, devem ser realizadas pesquisas apro priadas para estudar as relações de atrito, e a veracidade destas

observações.

Quanto as forças de usinagem da furação em cheio, fica claro que, de maneira alguma, são iguais às do processo de torneamento, como muitas vezes, é enfatizado pela literatura. As ações de todos os fatores de influência específicos do processo, e especialmente do corte transversal, provocam um aumento de cerca de 65% nas forças específicas de corte e cerca de 260% nas forças específicas de avanço, em relação ao torneamento.

A utilização de brocas com ângulo de saída constante, ao longo da aresta principal de corte, não apresentou nenhuma alteração relevante nas forças de usinagem, comparativamente à afiação normal, embora tenham apresentado um pequeno aumento na força específica de corte, e que se acredita deve-se ao fato do enfraquecimento da ponta de corte, acelerar o desgaste da ferramenta com o conseqüente aumento do esforço de corte, e o fato do ângulo de folga nas brocas utilizadas terem apresentado uma variação de  $\pm 2^\circ$  em torno do valor médio considerado.

Verifica-se que a influência da aresta lateral, sobre a força específica de corte é pequena para profundidades do furo inferiores a 2,5 diâmetro da broca, podendo-se afirmar que estas são iguais às do torneamento. O fator processual, indicativo dos fatores de influência específica da furação com pré-furo varia de + 1,01 a 1,17, em relação ao torneamento. Portanto a força de corte na furação com pré-furo, pode ser calculado pela equação:

$$F_C = f_{FP} \cdot b \cdot K_C^{1.1} \cdot h^{1-m_C} \quad (68)$$

Onde:

$f_{PP}$  = fator de usinagem, representativo da influência da aresta lateral e do atrito provocado pela saída do cavaco.

$K_{c 1.1}$  = força específica de corte, para o processo de torneamento.

Para a força específica de avanço, observa-se uma elevação nos valores da força da furação, variando de 8% a 53%. Portanto, para a força de avanço, teremos a equação.

$$F_f = f_{FP} \cdot b \cdot K_{f 1.1} \cdot h^{1-m_f} \quad (69)$$

Onde:

$$f_{FP} = 1,08 - 1,53$$

$K_{f 1.1}$  = força específica de avanço, para o torneamento.

Para a furação em cheio, a força específica de corte aumentou de 55% a 95% em relação ao torneamento. Logo a equação para a força de corte será:

$$F_c = f_{FC} \cdot b \cdot K_{c 1.1} \cdot h^{1-m_c} \quad (70)$$

Onde:

$f_{FC}$  = fator de usinagem representativo da influência dos fatores específicos da furação

em cheio.

Para a força de avanço, a equação será:

$$F_f = f_{FC} \cdot b \cdot K_f^{1.1} \cdot h^{1-m_f} \quad (71)$$

Onde:

$$f_{FC} = 2,16 - 3,33$$



## C A P Í T U L O 6

## C O N C L U S Õ E S

Devido a grande semelhança existente entre o corte de uma broca e o de uma ferramenta de tornear, é possível a determinação de um modelo para a força de usinagem na furação, a partir do modelo de força de usinagem do torneamento, resultando em grande economia de material e de tempo.

Os ensaios realizados, embora insuficientes para determinar precisamente a influência dos diversos fatores específicos do processo de furação, de maneira genérica, possibilitaram a determinação quantitativa dos principais fatores de influência: atrito da aresta lateral e aresta transversal.

Respeitando-se as peculiaridades do processo de furação, aplicando-se fatores de correção, pode-se utilizar o modelo de Kienzle para o torneamento, na furação:

força de corte

$$F_c = f \cdot b \cdot K_{c \ 1.1} \cdot h^{1-m_c} \quad (71)$$

força de avanço

$$F_f = f \cdot b \cdot K_{f \ 1.1} \cdot h^{1-m_f} \quad (72)$$

Neste sentido, determinaram-se os fatores de correção para a força específica de corte e de avanço para a furação em

cheio e furação com pré-furo, em relação ao torneamento, agrupados na Tabela ( 3 ).

Fator de correção	força específica	
	de corte	de avanço
Furação em cheio $f_{FC}$	1,55 - 1,95	2,16 - 3,33
Furação com pré-furo $f_{FP}$	1,01 - 1,17	1,08 - 1,53

Tabela 3 - Fatores de correção para a furação, em relação do torneamento.

Através de um estudo detalhado dos diversos fatores de influência, pode-se expandir a equação de Kienzle, introduzindo-se novas constantes, representativas nos diversos fatores, propiciando sua utilização para quaisquer condições de usinagem, sendo de grande valia na formação de bancos de dados de usinagem, sistemas CAD/CAM (Projeto/Fabricação com auxílio do computador), ACC (Controle Adaptativo Otimizado).

## C A P Í T U L O 7

## C O N S I D E R A Ç Õ E S F I N A I S

## 7.1 Proposição de Novos trabalhos

Como se pode constatar, é perfeitamente viável determinar as componentes da força específica de usinagem para a furação, a partir do conhecimento das forças específicas do torneamento. Para que isto seja feito com maior precisão e com maior quantidade de parâmetros de usinagem, obtendo-se maior segurança, é necessário um estudo mais rigoroso dos principais fatores de influência.

Em contraposição ao avanço  $f$  e à profundidade de corte  $a_p$ , que são parâmetros da equação de Kienzle, a velocidade de corte  $v_c$  não encontra ali nenhuma representação. Portanto, é necessária uma pesquisa minuciosa para detectar sua influência sobre as forças de usinagem na furação de materiais metálicos. Isto poderá ser feito através da medição das componentes da força de usinagem para diferentes velocidades de corte, diferentes avanços e diferentes diâmetros da broca.

O estudo da influência do ângulo de saída é especialmente interessante, uma vez que ele é amplamente variado ao longo do gume, na furação, acarretando modificações na força de usinagem. Isto poderia ser feito verificando-se sua influência sobre as forças de corte e de avanço e sobre os coeficientes  $1-m_c$  e  $1-m_f$ , através de ensaios com diferentes tipos de broca (N, H e W) e os diferentes tipos de afiação (N, A, B, C e D).

O ângulo de posição e o ângulo de ponta, embora sejam levados indiretamente em conta na equação de Kienzle, através da largura de usinagem  $b$  e espessura de usinagem  $h$ , requer estudos mais aprofundados, principalmente, para se determinar sua influência sobre as forças de avanço e passiva.

Isto pode ser feito com a medição das componentes da força de usinagem para diferentes ângulos de ponta.

O raio da ponta e o ângulo de inclinação são constantes na furação com broca helicoidal, de modo que as pesquisas para determinar suas influências podem ser feitas para apenas um par ferramenta/peça estendida, posteriormente, para os outros materiais.

Dentre os fatores de influência sobre as componentes da força de usinagem dependentes do processo, aconselha-se o estudo detalhado dos seguintes:

- atrito do cavaco e atrito do gume lateral
- corte transversal
- ângulo de saída (corrigido)
- ângulo da ponta
- afiação da ferramenta
- refrigeração

Para um melhor conhecimento da influência do atrito provocado pela saída do cavaco e pela aresta lateral na furação, pode-se fazer uma comparação entre as forças específicas de corte  $K_C$  1.1, forças específicas de avanço  $K_f$  1.1 e os coeficientes  $1-m_C$ ,  $1-m_f$  para a furação com pré-furo para as diferentes relações entre diâmetros  $d/D$  e os valores básicos do torneamento e da furação em cheio.

Para um estudo detalhado da influência do corte transversal na furação em cheio, sugerimos a determinação dos valores

específicos de força ( $K_{1.1}$ ) e dos coeficientes  $(1-m)$  em função da relação corte transversal/diâmetro da broca ( $l_Q/D$ ) e da dependência entre o diâmetro da broca e esta relação ( $l_Q/D$ ), transformando-as em constantes que possam ser introduzidas na equação de Kienzle.

A influência do ângulo de saída corrigido deve ser vista através de ensaios com diferentes valores deste ângulo, verificando-se sua influência sobre os valores  $K_C 1.1$ ,  $K_f 1.1$ ,  $1-m_C$  e  $1-m_f$ .

Do mesmo modo, estes valores devem ser determinados para diferentes ângulos da ponta.

Também o acabamento da ponta (afiação) e os tipos de afiação (N, A, B, C, D e E) merecem um estudo pormenorizado.

Finalmente, sugere-se o estudo da influência dos diversos tipos de refrigeração sobre as componentes da força de usinagem da furação.

Visando à maior exatidão e redução dos dados essenciais, propõe-se fazer uma análise da atual coleção dos valores de forças específicas para o torneamento de materiais metálicos, caso eles sejam insuficientes, determiná-los para todos os materiais nacionais, com o objetivo de condensação da consistência dos dados e da capacidade de informação dos valores das componentes das forças de usinagem.

Isto propiciaria:

- obtenção da dependência entre os materiais nacionais e os valores das componentes da força de usinagem que até o momento não são consistentes, e as pesquisas realizadas, insuficientes.
- sobre prognósticos da força de usinagem, ensaios independentes que levam a uma avaliação da confi

guração de forças de processo esperadas para a operação de torneamento.

- após o estudo de todos os materiais metálicos, pode-se dividi-los em grupos metalúrgicos, aumentando a possibilidade de se obter uma correlação entre a força de usinagem e a matéria bruta.

Como a pesquisa limitou-se ao estudo das forças de usinagem para ferramentas afiadas, é necessário estendê-las para ferramentas com diversos graus de desgastes.

## B I B L I O G R A F I A

- 1 - BRANDENBERG, H. Die Kraftverhältnisse bei der Zerspanung.  
Schweiz. Techn. Z. (10) : 113 - 121 , 1945.
- 2 - HUCKS, H. Plastizitätsmechanische Grundlagen und Kenngrößen der Zerspanung. Aachen, TH; 1951. Diss.
- 3 - MERCHANT, M.E. Journal of Applied Physics. 16 : 267 - 357,  
1945.
- 4 - KRONENBERG, M. Grundzüge der Zerspanungslehre. Berlin,  
Spring Verlag, 1954. Band 1.
- 5 - KLEIN, W. Versuch einer einheitlichen Darstellung der Kraftverhältnisse bei verschiedenen Zerspanungsarten. Berlin, TU, 1958. Diss.
- 6 - KEIL, W. Beitrag zur einheitlichen Darstellung der spez. Schnittkräfte beim Bohren und Drehen. Dresden, TU, 1965. Diss.
- 7 - KURREIN, M. Die Bearbeitbarkeit der Metalle Werkst. 21 (21) :  
612 - 621.
- 8 - KRONENBERG, M. Wissenschaft und Praxis beim Bohren. Die  
Werkzeugmasch. 33 (21) : 257 - 263, 1929.
- 9 - SCHLESSINGER, G. Die Grundlagen der Kräfteberechnung bei Spiralbohrern und Spiralsenkern Werkst. 16 (24) : 473 -  
477, 1932.
- 10 - SCHALLBROCH, H. Bohrarbeit und Bohrmaschine. München, Carl  
Hanser Verlag, 1951.
- 11 - SPUR, G. Beitrag zur Schnittkraftmessung beim Bohren mit Spiralbohrern unter Berücksichtigung der Radialkräfte.  
Braunschweig, TU, 1960. Diss.

- 12 - HIRSCHFELD, H. Spez. Schnittkraftwertwerte und verfahrensab  
hängige schnitthraftgleichungen. Werkst und Betr. 94 (8):  
537 - 540.
- 13 - KRICPERA, U. Überwachung des Werkzeugverschleisses mit Hilfe  
der Zerspankrafttrichtung. Stuttgart 1976. Diss.
- 14 - RICHTER, A. Die Zerspankraft beim Drehen im Bereich des Fli  
esspaus. Wiss. z. d. T Dresden. 2 (4) : 651, 1953.
- 15 - ENGELHARD, W. Bohren, Aufbohren, Aufsensen. Stuttgart, TU .  
1976. Diss.
- 16 - ARMAREGO, E. J. A. & S. WIRIYACOSOL. thrust and torque Pre  
diction in Drilling from a Cutting Mechanics Approach. An  
nals of the CIRP 28/1/1979, 87. Fl.
- 17 - KIENZLE, O & VICTOR, H. Spezifische Schnittkräfte bei der  
Metallbearbeitung. Werkst und Masch. 47 (5): 224--225 ,  
1957.
- 18 - VICTOR, H. Beitrag zur Kenntnis der Schnittkräfte beim Dre  
hen, Hobeln und Bohren. Hannover, TU, 1956. Diss.
- 19 - DEGNER, W., LUTZE, H. & SMEJKAL, E. Spanende Formung. Berlin,  
VEB Verlag Tecchnik, 1965.
- 20 - WITTE, L. Spezifische Zerspankräfte beim Drehen und Bohren.  
Aachen; TH, 1980. Diss.
- 21 - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, DIN - 6584. Begriffe der Zers  
pantechnik, Kräfte Energie Arbeit Leistungen. Berlin, Beuth  
Verlag GmbH, 1982.
- 22 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR - 6163. Ferra  
mentas de Usinagem Geometria da Cunha Cortante. Procedimen  
to. Rio de Janeiro, ABNT, 1980.
- 23 - DINNEBIER, J. Borher. Werkstattbücher (1949) 15. Berlin ,  
Springer Verlag.



- 24 - DORRENBURG, R. Untersuchungen an Spiralbohrern mit innenliegenden Kühlkanälen. Berlin, TU, 1973. Diss.
- 25 - VIERGE, G. Zerspanung der Eisenwerkstoffe. Düsseldorf. Verlag Stahleisen M.B.H., 1959.
- 26 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR - 7432. Broca Helicoidal de aço-rápido. Especificação. Rio de Janeiro, ABNT, jul, 1982.
- 27 - ABENDROTH, A. & MENZEL, G. Grundlagen der Zerspanungslehre. Leipzig, Fachbuchverlag, 1960.
- 28 - SCHLESINGER, G. Die Werkzeugmaschinen. Berlin, Verlag von Julius Springer, 1936.
- 29 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6176. Brocas Helicoidais. Terminologia. Rio de Janeiro, ABNT, 1980.
- 30 - SCHALLBROCH, H. Bohrarbeit und Bohrmaschine, Carl Hanser Verlag, München 1951.
- 31 - RÖHLKE, G. Der Anschliff von Wendelbohrern, Werkstoff und Maschine 47 (5) : 226 - 231, 1957.
- 32 - INDÚSTRIA ROMI S/A. Santa Bárbara - SP, Torno IMOR P 400, Manual de Instrução.
- 33 - HÜLLER HILLE GmbH. Compact Center nb-h. 65. The Machining Center for Small Components, nº 650578.
- 34 - KISTLER INSTRUMENT AG. 3 - Component Dynamometer. nº 69263. Ed. 12.79.
- 35 - KISTLER INSTRUMENT AG. 4 - Component Dynamometer  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $M_z$ . nº 6.9273. Ed. 677.
- 36 - KISTLER INSTRUMENT AG. Charge Amplifier with Galvo Output. nº 115006. Ed. 9.79.

- 37 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, ABNT 1980. NBR - 6403. Números Normalizados.
- 38 - QUEIROZ, A.A. Usinabilidade do Ferro Fundido Cinzento e Avaliação da Temperatura e Força de Corte como Sensores de Desgaste. Florianópolis, UFSC, 1976. Dissertação.
- 39 - SCHNEIDER, C.A., LUCKE, H e SHOELER, N. Calibração de Sistemas de Medição. In: Encontro Nacional de Atualização Tecnológica em Engenharia Mecânica. Florianópolis, UFSC, 1982
- 40 - MOOD, A. Introduction to the Theory of Statistics. Tóquio, McGraw Hill (sem data).
- 41 - RUFFINO, R.T. Algumas considerações sobre as Forças de Usinagem no Torneamento de Aço-Carbono. São Paulo, USP, 1976. Tese.
- 42 - CISTERNAS, M & FERRARESI, O. Determinação das Características de Usinagem das Brocas Helicoidais. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Florianópolis, 1977.
- 43 - REVISTA MUNDO MECÂNICO, Brocas. São Paulo 6 (67) 14 - 16 Fevereiro, 1982.
- 44 - BLANPAIN, E. Théorie et Prática des Outils de Coupe y les Outils en Ceramique. Paris, Eyrolles, 1956.
- 45 - FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. São Paulo, Edgard Blucher, 1970.
- 46 - KRONENBERG, M. Machining Science and Application Theory and Practice for Operation and Development of Machining Processes. 1966.