

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

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA FÓRMULA  
EXPANDIDA DE TAYLOR

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

NOEMIA GOMES DE MATTOS DE MESQUITA

FLORIANÓPOLIS, AGOSTO DE 1980

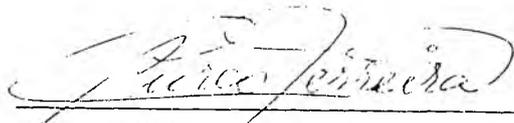
DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA  
FÓRMULA EXPANDIDA DE TAYLOR

NOEMIA GOMES DE MATTOS DE MESQUITA

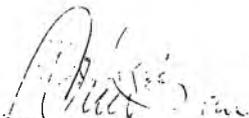
ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A ORIENTAÇÃO DO  
TÍTULO DE

"MESTRE EM ENGENHARIA"

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA  
FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

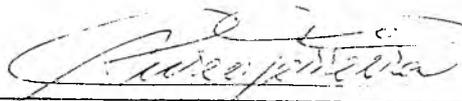


ÁUREO CAMPOS FERREIRA  
ORIENTADOR

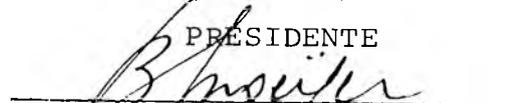


ARNO BLASS  
COORDENADOR DO CURSO

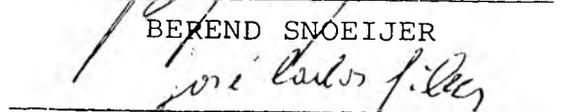
BANCA EXAMINADORA



ÁUREO CAMPOS FERREIRA  
PRESIDENTE



BEREND SNOEIJER



JOSÉ CARLOS RIBEIRO DA SILVA

AOS MEUS PAIS

## AGRADECIMENTOS:

- ao professor Áureo Campos Ferreira pela orientação e incentivo;
- ao professor Ottomar Armstroff que orientou a parte experimental deste trabalho;
- à Claudete Ruas professora do Departamento de Estatística;
- a colaboração dos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, em especial ao professor Lourival Boehs;
- a Kurt Jungmann pela ajuda dada na utilização dos programas de computação;
- a Rui Baumgarten pelo auxílio prestado nos experimentos;
- a Eletrometal Aços Finos S/A pela doação dos aços usados nos ensaios;
- a Brassinter S/A pela doação das ferramentas;
- a UFPE., a CAPES e a UFSC pelo apoio financeiro.

## ÍNDICE

	Página
1. INTRODUÇÃO .....	01
2. TÓPICOS SOBRE A TEORIA DA USINAGEM .....	02
2.1 - Forças de Corte, Velocidade de Corte, Avanço e Profundidade de Corte .....	02
2.2 - Critério de Fim de Vida da Ferramenta .....	03
2.3 - Condições Econômicas de Usinagem .....	05
2.4 - Pressão Específica de Corte .....	06
3. MÉTODOS, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS .....	09
3.1 - Desenvolvimento Matemático para Solução da Equação Expandida de Taylor .....	09
3.2 - Análise Estatística .....	11
3.2.1 - Teste de Kolmogorov-Smirnov .....	11
3.2.2 - Cálculo do Tamanho da Amostra .....	14
3.3 - Caracterização dos Materiais Ensaçados .....	15
3.3.1 - Análise Química .....	15
3.3.2 - Testes Metalográficos .....	16
3.3.3 - Propriedades Mecânicas .....	19
3.3.3.1 - Ensaio de Dureza .....	19
3.3.3.2 - Ensaio de Tração .....	22
3.4 - Montagem e Características dos Equipamentos Usados nos Ensaios de Usinagem .....	25
3.5 - Aferições .....	29
3.5.1 - Aferição do Taco-Gerador .....	29
3.5.2 - Aferições dos Avanços .....	30
3.5.3 - Aferição do Dinamômetro .....	30
3.6 - Condições de Usinagem .....	31
4. RESULTADOS .....	35
4.1 - Valores Obtidos Experimentalmente .....	35
4.2 - Valores da Constante e dos Expoentes da Fórmula Expandida de Taylor .....	38
4.3 - Cálculo da Pressão Específica de Corte .....	49
4.4 - Forças de Usinagem .....	54
5. DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS .....	67
5.1 - Condição Econômica de Usinagem e a Fórmula Expandida .....	67

	Página
da de Taylor .....	67
5.2 - Distribuição do Desgaste de Flanco .....	69
5.3 - Comparações com Materiais Alemães .....	72
5.4 - Testes Comparativos e Valores Estatísticos .....	73
6. CONCLUSÕES .....	80
BIBLIOGRAFIA .....	81
APÊNDICE I .....	85
APÊNDICE II .....	87
APÊNDICE III .....	90
APÊNDICE IV .....	96

## SIMBOLOGIA

A	- profundidade de corte	(mm)
b	- largura de corte	(mm)
C	- constante da fórmula expandida de Taylor	
$D_n$	- estatística de Kolmogorov-Smirnov calculada	
$d_{\alpha,n}$	- estatística de Kolmogorov-Smirnov tabelada	
E, F, G, H	- expoente da fórmula expandida de Taylor	
F	- estatística F	
$F_a$	- força de avanço	(N)
$F_c$	- força principal de corte	(N)
$F_r$	- força de recuo	(N)
$F_u$	- força de usinagem	(N)
h	- espessura de corte	(mm)
K	- constante da fórmula de Taylor simples	
$K_s$	- pressão específica de corte	(N/mm <sup>2</sup> )
N	- tamanho da amostra	
n	- tamanho da população	
R	- coeficiente de correlação	
$R^2$	- coeficiente de determinação	
S	- avanço e desvio padrão*	(mm/rot)
s	- área da seção de corte	(mm <sup>2</sup> )
T	- vida da ferramenta	(min)
$T_{mc}$	- tempo de vida da ferramenta para o mínimo custo de fabricação	(min)
$T_{mp}$	- tempo de vida da ferramenta para a máxima produção	(min)
V	- velocidade de corte	(m/min)
VB	- desgaste da ferramenta	(mm)
$V_{mp}$	- velocidade de máxima produção	(m/min)
$V_o$	- velocidade para o mínimo custo de fabricação	(m/min)
x	- expoente da fórmula de Taylor simples	
$\alpha$	- ângulo de incidência	(graus)
$\gamma$	- ângulo de saída	(graus)
$\xi$	- ângulo de ponta	(graus)
$\chi$	- ângulo de posição	(graus)

\*Usou-se a mesma simbologia para o avanço e o desvio padrão sem haver confusão, pois eles são mencionados em itens distintos.

## RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvido um método para calcular os parâmetros da fórmula expandida de Taylor e aplicou-se este método para os aços ABNT 1038 e ABNT 1045.

Através de um desenvolvimento matemático transformou-se a fórmula expandida de Taylor em um sistema de equações heterogêneas.

Calculou-se a quantidade de valores que os coeficientes deste sistema deveria ter para que os resultados, obtidos com a aplicação da Taylor Expandida, ficassem dentro de limites estatisticamente aceitáveis.

Os dados para o cálculo dos parâmetros foram levantados, durante os experimentos, através dos valores adotados para a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte bem como através dos valores medidos do tempo de usinagem e do desgaste.

Utilizando-se um programa estatístico de computação foi resolvido o sistema de equações, obtendo-se assim os parâmetros da Taylor Expandida.

É necessária uma grande quantidade de experimentos para a obtenção destes parâmetros, mas, uma vez determinados, permitem o cálculo do intervalo de máxima eficiência, para qualquer condição de usinagem.

## ABSTRACT

This work presents a method developed to calculate the parameters of the extended Taylor equation, applying it for two kinds of steels: ABNT 1038 and ABNT 1045.

The extended Taylor equation was mathematically converted into an heterogeneous equation system.

In order to keep the values calculated by the extended Taylor equation, within the statistical acceptance limits, the minimum quantity of the coefficients values was calculated.

The data, to calculate the parameters, were obtained, during the experiments, from the assumed values for the cutting velocity, feedrate and depth of cut as well as from the measured values of the cutting time and wear length.

In order to calculate the parameters of the extended Taylor equation a statistical computer programme was used, solving the equation system.

A large number of experiments is necessary to calculate those parameters, but, once this is done, the economic machining conditions are easily defined.

## 1 - INTRODUÇÃO

A complexidade do processo de usinagem foi sempre um desafio aos pesquisadores que, continuamente, buscam exprimir seu mecanismo, através de expressões que possam levar em conta o maior número possível de elementos, na tentativa de acrescentar, ao que já existe, novas informações, que levem, mais precisa e rapidamente, a otimização das condições de usinagem.

A fórmula de Taylor (simples) (16), uma das expressões mais largamente difundidas, relaciona velocidade de corte e tempo de vida da ferramenta, sem no entanto levar em conta dois elementos importantes do processo de usinagem, avanço e profundidade de corte.

Um grupo de pesquisadores alemães (30), na tentativa de levar em consideração estes dois elementos, desenvolveu uma expressão chamada de Taylor Expandida. Esta expressão foi aplicada para vários materiais europeus, resultando num conjunto de condições de corte recomendadas.

A maneira pela qual os pesquisadores alemães chegaram à fórmula de Taylor Expandida não foi divulgada. Considerando a importância de tal expressão no estabelecimento das condições ótimas de usinagem e a falta de dados sobre o assunto, para materiais nacionais, desenvolveu-se, matematicamente, uma técnica capaz de chegar à fórmula de Taylor Expandida. Para a determinação dos parâmetros desta expressão foram feitos vários testes de usinagem, empregando-se dois aços de fabricação nacional. Os resultados mostraram que é possível utilizar, a expressão deduzida, para calcular as condições ótimas de usinagem dos aços empregados, bem como elaborar uma tabela, das condições para diversas situações, que possa ser utilizada na prática.

Embora não se tenha a pretensão de afirmar que, com este trabalho, foi dado um grande passo, no sentido de resolver problemas relacionados à usinagem, a teoria desenvolvida e as experiências realizadas além de levar a conclusões que representam uma certa contribuição neste campo, abriu novas perspectivas para trabalhos futuros.

## 2 - TÓPICOS SOBRE A TEORIA DA USINAGEM

## 2.1 - Forças de Corte, Velocidade de Corte, Avanço e Profundidade de Corte.

A figura 01 apresenta a força de usinagem,  $F_u$ , para o processo de torneamento, e as suas três componentes ortogonais:  $F_c$ , a força principal de corte;  $F_a$ , a força de avanço; e  $F_r$ , força de recuo (também conhecida como força passiva).

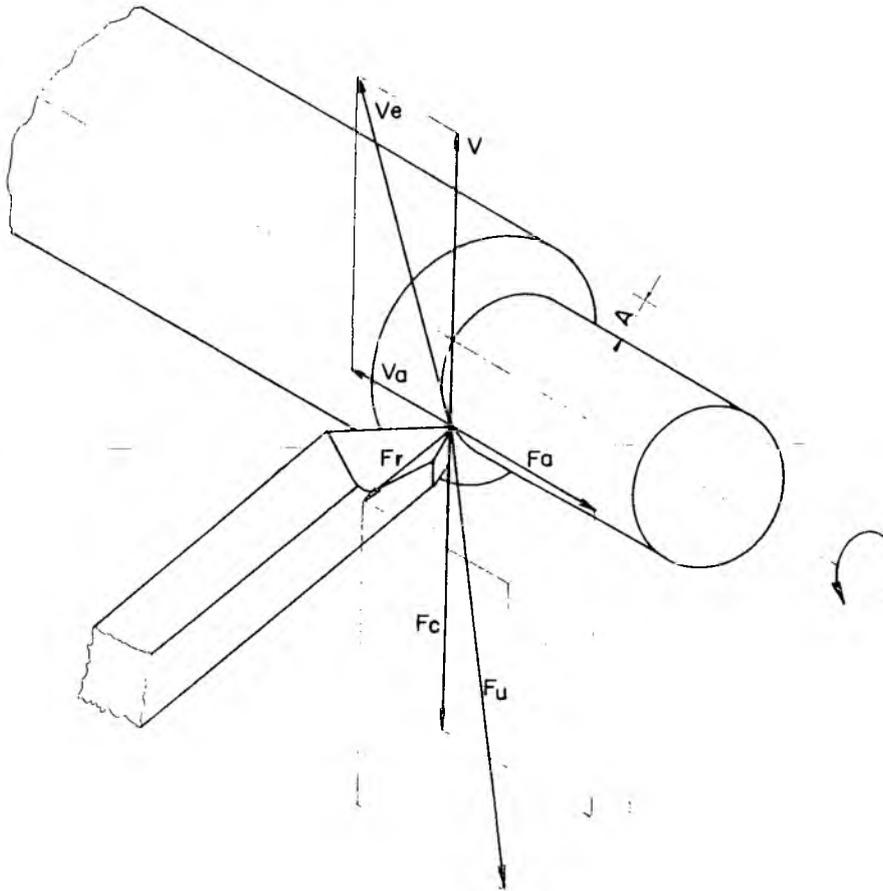


FIG. 01 - Componentes da força de usinagem

Sabe-se da teoria da usinagem que:

- $F_c$  - é a componente de  $F_u$  segundo a direção de corte, que é dada pela velocidade de corte,  $V$ .
- $F_a$  - é a componente de  $F_u$  segundo a direção de avanço, dada pela velocidade de avanço,  $V_a$ .

$F_r$  - é a componente de  $F_u$  segundo uma direção perpendicular ao plano de trabalho, que é o plano que contém as direções de corte e avanço e passa pelo ponto de referência da aresta de corte.

Ponto de referência é um ponto genérico da aresta de corte. A velocidade de corte,  $V$ , representada na figura 01, definida como "a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta de corte, segundo a direção e sentido de corte" (16).

No torneamento, o avanço é o percurso da ferramenta em milímetros em cada volta da peça. A profundidade de corte,  $A$ , é a penetração da aresta de corte na peça, medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho.

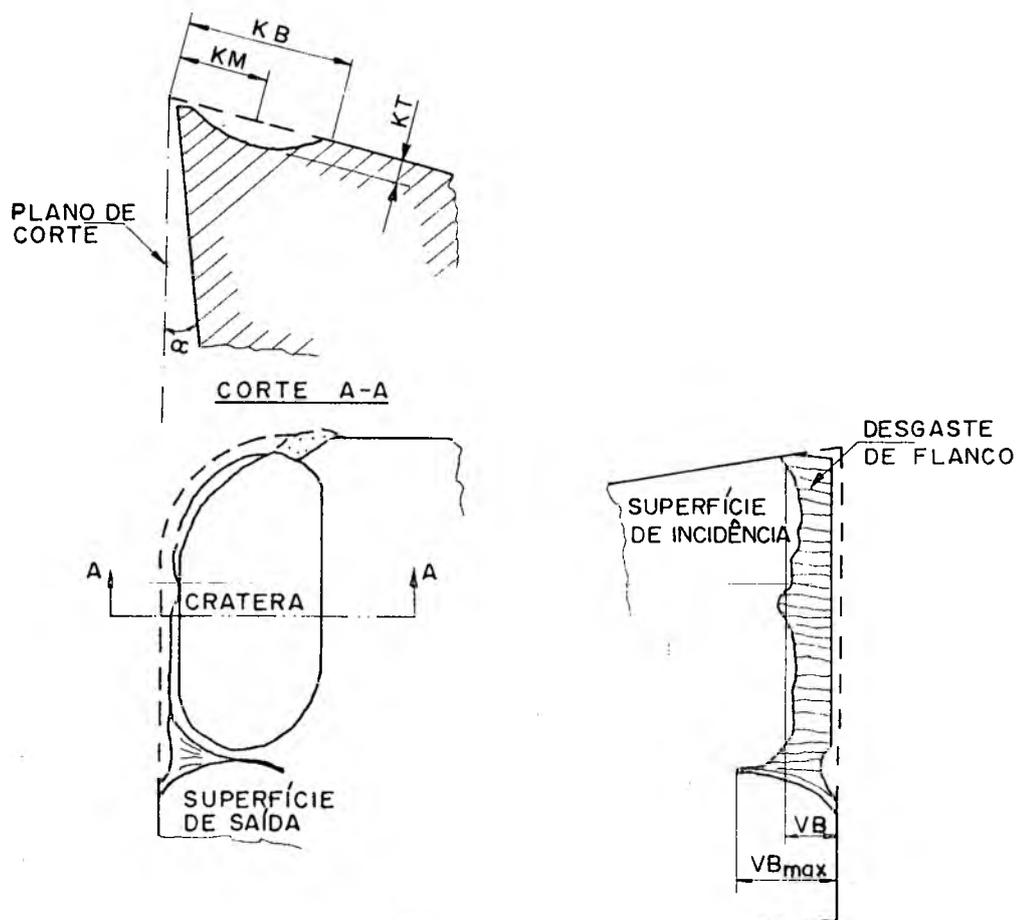
## 2.2 - Critério de Fim de Vida da Ferramenta

O caso mais evidente de "desgaste" que pode ocorrer é aquele no qual a ferramenta se torna completamente inútil, por quebra. Na maioria dos casos, no entanto, a ferramenta se desgasta gradualmente e o trabalho feito por ela se torna menos satisfatório seja por aumento de rugosidade da superfície acabada, seja por aumento das forças de corte, causando grandes deflexões e vibrações, seja por mudança nas dimensões da peça, de tal forma que as tolerâncias dimensionais não podem ser mantidas. No caso de quebra o fim da vida é evidente, mas no caso de desgaste gradual há a necessidade de se definir um critério baseado no qual se possa dizer que a ferramenta não está mais em condições de ser utilizada adequadamente. A maneira de abranger estas duas situações (quebra e desgaste gradual) pode ser expressa através da seguinte definição: "Critério de fim de vida da ferramenta é um predeterminado valor limiar da quantidade de desgaste da ferramenta ou a ocorrência de um fenômeno\*" (22).

Os dois principais tipos de desgaste gradual, tradicionalmente consagrados, são o de flanco e o de cratera (figura 02). Destes, o mais largamente estudado por diversos pesquisadores (03, 14, 22) no mundo inteiro, devido a sua importância e relativa facilidade para ser medido, é o de flanco, que também foi levado em

\*Tais fenômenos são os já citados: aumento da rugosidade da superfície acabada; aumentos das forças de corte; mudanças nas dimensões da peça; quebra da ferramenta; etc.

conta neste trabalho onde se adotou um valor para VB igual a 0,40 mm, pois segundo recomendações da ISO 3685, (22) pode-se tomar como critério de fim de vida o desgaste de flanco numa faixa de 50% acima ou abaixo de 0,30 mm.



VB = Desgaste médio de flanco  
 VB<sub>max</sub> = Desgaste máximo de flanco  
 KB = Largura da cratera  
 KM = Distância ao centro da cratera  
 KT = Profundidade da cratera

FIG. 02 - Desenho esquemático dos desgastes de flanco e de cratera.

### 2.3 - Condições Econômicas de Usinagem

A otimização das condições de usinagem é difícil de ser atingida, devido a fatores tais como:

- variáveis na ferramenta: como mudanças das formas por causa dos desgastes;
- variáveis na peça: como variações da estrutura e das propriedades mecânicas;
- limitações da máquina operatriz: como valores escalonados da velocidade de corte e do avanço;
- dados de custo inadequados (19). Os tipos de despesas que se tem desde a compra da matéria prima até a obtenção do produto final são muitos e nem todos facilmente determinados com a precisão desejável (impostos prediais, manutenção dos prédios, iluminação, administração, supervisão, depreciação e juros de capital, manutenção dos equipamentos, energia elétrica e outros).

É importante observar que a condição ótima para uma operação pode não ser a mesma para o sistema completo de fabricação.

A condição ideal de usinagem seria aquela que permitisse uma máxima produção a, simultaneamente, um mínimo custo. Porém pesquisas realizadas (16) demonstram que a velocidade de corte para a máxima produção normalmente não coincide com velocidade de corte de mínimo custo.

"Define-se intervalo de máxima eficiência o intervalo compreendido entre as velocidades de corte  $V_{mp}$  e  $V_0$ ", (19), (fig.03). A velocidade de máxima produção,  $V_{mp}$ , ocorre para um tempo de fabricação mínimo, e a velocidade  $V_0$  ocorre para um custo de fabricação mínimo.

As melhores condições de usinagem são atingidas quando se trabalha dentro deste intervalo. A figura 03 mostra que para velocidades de corte menores que  $V_0$ , tem-se um aumento do custo de produção por peça e uma queda de produção e para velocidades de corte maiores que  $V_{mp}$  o mesmo acontece, isto é, o custo de produção cresce e tem-se uma redução na produção.

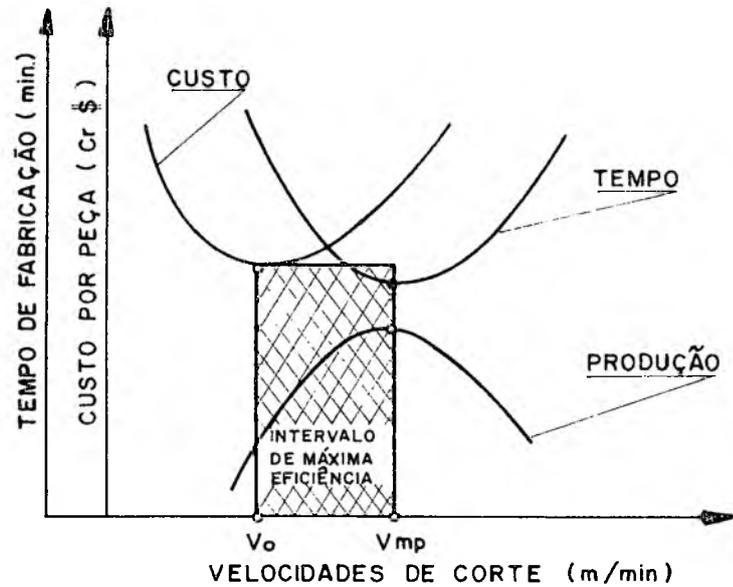


FIG. 03 - Intervalo de máxima eficiência (19).

#### 2.4 - Pressão Específica de Corte

A pressão específica de corte é definida como sendo a relação entre a força principal de corte e a área da seção de corte,

$$K_S = \frac{F_C}{s} \quad (01)$$

onde:

$s$  = área da seção de corte ( $\text{mm}^2$ )

$K_S$  = pressão específica de corte ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

$F_C$  = força principal de corte (N)

Os principais fatores que influem na pressão específica de corte são: o material da peça; a seção de corte; e a geometria da ferramenta. A influência de outros fatores tais como: a velocidade de corte; fluido de corte; rigidez da ferramenta; têm pequena influência e não são levados em consideração no cálculo da pressão específica de corte pela maioria dos pesquisadores. Portanto

para um dado par peça-ferramenta estes pesquisadores estudaram a variação de  $K_S$  em função da área e da forma da seção de corte, (16).

No cálculo da pressão específica de corte usou-se o modelo de Kienzle, que é um modelo simples e bastante preciso para os cálculos práticos da força de usinagem (17). Kienzle expressou a pressão específica de corte,  $K_S$ , em função da espessura de corte,  $h$ , usando a seguinte fórmula:

$$K_S = K_{S11} \cdot h^{-Z} \quad (02)$$

que logaritmada dará a equação de uma reta,

$$\ln K_S = \ln K_{S11} - Z \ln h \quad (03)$$

onde:

-  $Z$  - é o coeficiente angular da reta;

$K_{S11}$  - é a constante específica do metal para uma seção de corte de 1 mm de espessura e 1 mm de largura.

A figura 04 mostra o que vem a ser seção de corte ( $s$ ) no torneamento, espessura de corte ( $h$ ) e largura de corte ( $b$ ). Desta

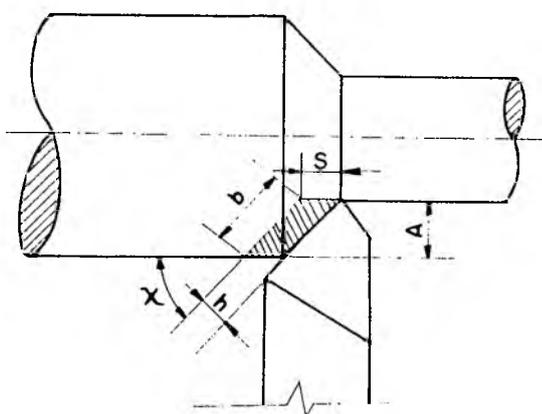


FIG. 04 - Seção de corte no torneamento

figura pode-se tirar as seguintes relações:

$$b = \frac{A}{\text{sen}\chi} \quad (04)$$

$$h = S \text{ sen}\chi \quad (05)$$

$$s = h \cdot b = S \cdot A \quad (06)$$

onde,  $\chi$ , é o ângulo de posição.

Substituindo-se (02) e (06) em (01), tem-se:

$$F_C = K_{S11} h^{1-Z} b \quad (07)$$

A pressão específica de corte pode também ser definida (05) como a relação entre a energia consumida e a unidade de volume de material removido,

$$K_S = \frac{N_C}{Z_W} \quad (08)$$

onde:

$N_C$  - é a energia consumida no corte (ou a potência de corte); e  
 $Z_W$  - é a taxa de material removido.

$K_S$  definido deste modo é um parâmetro que dá uma idéia da eficiência do processo de usinagem. Quanto menor o valor de  $K_S$  mais eficiente é o processo, isto é, para uma mesma potência de corte tem-se um maior volume de material removido.

Na seleção das condições de usinagem que permitam uma máxima produção é necessário que se calcule a potência de corte, pois ela não deve exceder a potência útil fornecida pelo motor da máquina operatriz. A potência de corte é dada em função de  $K_S$ , daí a importância de se calcular este parâmetro.

### 3 - MÉTODOS, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

#### 3.1 - Desenvolvimento Matemático para Solução da Equação Expandida de Taylor

A fórmula expandida de Taylor (15), relaciona as variáveis de usinagem da seguinte forma:

$$V = C S^E A^F T^G VB^H \quad (09)$$

onde:

V - é a variável dependente;

S, A, T, VB - são as variáveis independentes;

C, E, F, G, H - são parâmetros que devem assumir valores diferentes para cada par material-ferramenta.

As variáveis assumirão valores  $V_i$ ,  $S_i$ ,  $A_i$ ,  $T_i$  e  $VB_i$  nos testes realizados, onde  $i$  varia de 1 a N, ou seja:

$$V_i = C.S_i^E.A_i^F.T_i^G.VB_i^H \quad (10)$$

$$\ln V_i = \ln C + E \ln S_i + F \ln A_i + G \ln T_i + H \ln VB_i \quad (11)$$

Designou-se aqui  $\xi_i$  como sendo o resíduo em cada ponto  $i$ , e ele será dado pela expressão (02):

$$\xi_i = \ln C + E \ln S_i + F \ln A_i + G \ln T_i + H \ln VB_i - \ln V_i \quad (12)$$

A soma do quadrado dos resíduos será:

$$M = \sum_{i=1}^N \xi_i^2 = \sum_{i=1}^N (\ln C + E \ln S_i + F \ln A_i + G \ln T_i + H \ln VB_i - \ln V_i)^2 \quad (13)$$

Considerando-se M como uma função de C, E, F, G e H, a condição para que a soma dos quadrados dos resíduos, M, seja mínima é que:

$$\frac{\partial M}{\partial C} = 0; \quad \frac{\partial M}{\partial E} = 0; \quad \frac{\partial M}{\partial F} = 0; \quad \frac{\partial M}{\partial G} = 0; \quad \frac{\partial M}{\partial H} = 0 \quad (14)$$

Então:

$$\frac{\partial M}{\partial C} = 2 \sum_{i=1}^N (\ln C + E \ln S_i + F \ln A_i + G \ln T_i + H \ln VB_i - \ln V_i) \frac{1}{C} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial M}{\partial E} = 2 \sum_{i=1}^N (\ln C + E \ln S_i + F \ln A_i + G \ln T_i + H \ln V B_i - \ln V_i) \ln S_i = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial M}{\partial F} = 2 \sum_{i=1}^N (\ln C + E \ln S_i + F \ln A_i + G \ln T_i + H \ln V B_i - \ln V_i) \ln A_i = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial M}{\partial G} = 2 \sum_{i=1}^N (\ln C + E \ln S_i + F \ln A_i + G \ln T_i + H \ln V B_i - \ln V_i) \ln T_i = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial M}{\partial H} = 2 \sum_{i=1}^N (\ln C + E \ln S_i + F \ln A_i + G \ln T_i + H \ln V B_i - \ln V_i) \ln V B_i = 0 \quad (19)$$

$$\text{Seja: } \sum \ln C = N \ln C = NI \quad (20)$$

Portanto:

$$NI + E \sum_{i=1}^N \ln S_i + F \sum_{i=1}^N \ln A_i + G \sum_{i=1}^N \ln T_i + H \sum_{i=1}^N \ln V B_i = \sum_{i=1}^N \ln V_i \quad (21)$$

$$\begin{aligned} NI \sum_{i=1}^N \ln S_i + E \sum_{i=1}^N (\ln S_i)^2 + F \sum_{i=1}^N \ln A_i \cdot \ln S_i + G \sum_{i=1}^N \ln T_i \cdot \ln S_i + \\ + H \sum_{i=1}^N \ln V B_i \cdot \ln S_i = \sum_{i=1}^N \ln V_i \cdot \ln S_i \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} NI \sum_{i=1}^N \ln A_i + E \sum_{i=1}^N \ln S_i \cdot \ln A_i + F \sum_{i=1}^N (\ln A_i)^2 + G \sum_{i=1}^N \ln T_i \cdot \ln A_i + \\ + H \sum_{i=1}^N \ln V B_i \cdot \ln A_i = \sum_{i=1}^N \ln V_i \ln A_i \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} NI \sum_{i=1}^N \ln T_i + E \sum_{i=1}^N \ln S_i \cdot \ln T_i + F \sum_{i=1}^N \ln A_i \cdot \ln T_i + G \sum_{i=1}^N (\ln T_i)^2 + \\ + H \sum_{i=1}^N \ln V B_i \cdot \ln T_i = \sum_{i=1}^N \ln V_i \cdot \ln T_i \end{aligned} \quad (24)$$

$$NI \sum_{i=1}^N \ln V B_i + E \sum_{i=1}^N \ln S_i \cdot \ln V B_i + F \sum_{i=1}^N \ln A_i \cdot \ln V B_i + G \sum_{i=1}^N \ln T_i \cdot \ln V B_i + H \sum_{i=1}^N (\ln V B_i)^2 = \sum_{i=1}^N \ln V_i \ln V B_i$$

$$\ln VB_i + H \sum_{i=1}^N (\ln VB_i)^2 = \sum_{i=1}^N \ln V_i \cdot \ln VB_i \quad (25)$$

Tem-se 5 equações e 5 incógnitas (I, E, F, G, H). A solução deste sistema de equações heterogêneas será obtida utilizando-se o programa Tradutor da Linguagem Estatística (TRALE), (26).

### 3.2 - Análise Estatística

O desgaste da ferramenta, VB, é uma variável que é função da velocidade de corte, do avanço, da profundidade de corte e do tempo de usinagem.

$$VB = f (V, S, A, T) \quad (26)$$

Para que o resultado dos experimentos tenha um grau de confiabilidade aceitável deve-se medir o desgaste da ferramenta para um determinado número de vezes de variações destas variáveis das quais ele depende. Portanto é necessário calcular este número de variações, isto é, o tamanho da amostra.

No cálculo do tamanho da amostra é necessário que se conheça o tipo de distribuição de VB para que se possa usar uma expressão adequada para o valor de N (tamanho da amostra).

A verificação do tipo de distribuição de VB foi feita aplicando-se o teste de Kolmogorov-Smirnov (06) nos dados experimentais de um trabalho desenvolvido na Universidade de Aachen, na Alemanha (Apêndice I). Estes dados são constituídos de 68 valores de VB, V, S, A e T. Os 68 valores de VB foram tomados como uma população razoável dos desgastes no estudo do tipo de distribuição dos mesmos.

Este teste de verificação do tipo de distribuição dos desgastes foi feito com este conjunto de dados experimentais de Aachen porque não se dispunha de material suficiente a um pré teste.

#### 3.2.1 - Teste de Kolmogorov-Smirnov

Divide-se a população dos desgastes em classes de amplitudes iguais. O número de classes deve ser igual ao número inteiro mais próximo de  $1 + 3,3 \log n$ , (18). Onde "n" é o tamanho da população, igual a 68.

Como:

$$1 + 3,3 \log 68 = 7,05 \quad (27)$$

a população em estudo foi dividida em 7 classes.

A frequência,  $f_i$ , com que os desgastes, VB, aparecem dentro de cada classe foi contada na população, (23). A figura 05 mostra o gráfico da frequência dos desgastes para o caso analisado.

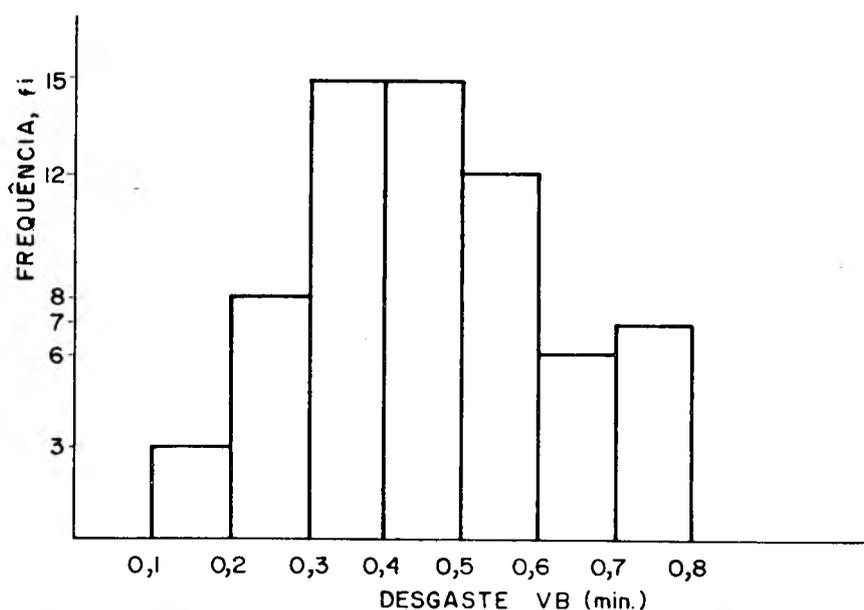


FIG. 05 - Gráfico da frequência dos desgastes.

Foi feita a suposição que os desgastes tinham uma distribuição normal e depois foram calculados os valores de  $F_n$  (VB), que é a função de distribuição acumulada, e de  $F_o$  (VB), que é a função de distribuição acumulada da normal reduzida. Onde  $F_n$  (VB) e  $F_o$  (VB) são definidas como:

$$F_n \text{ (VB)} = \frac{i}{n} \quad , \text{ com } i = 0, \dots, n \quad (28)$$

$$F_o \text{ (VB)} = \phi \left( \frac{VB - \overline{VB}}{S} \right) \quad (29)$$

com os valores da função  $\phi$  tirados da tabela da distribuição normal, (04, 27).

Os valores da média do desgaste,  $\overline{VB}$ , e do desvio padrão,  $S$ , são dados por:

$$\overline{VB} = \frac{\sum_{i=1}^n VB_i}{n} = \frac{30,85}{68} = 0,45 \quad (30)$$

CLASSES	$f_i$	$F_n(VB)$	$F_o(VB)$	$ F_n(VB) - F_o(VB) $
$0,11 \leq VB \leq 0,20$	$5$	$\frac{5}{68} = 0,0735$	$\emptyset \left( \frac{0,20 - 0,45}{0,16} \right) = 0,0594$	$ 0,0735 - 0,0594  = 0,0141$
$0,21 \leq VB \leq 0,30$	$8$	$\frac{13}{68} = 0,1912$	$\emptyset \left( \frac{0,30 - 0,45}{0,16} \right) = 0,1736$	$ 0,1912 - 0,1736  = 0,0176$
$0,31 \leq VB \leq 0,40$	$15$	$\frac{28}{68} = 0,4118$	$\emptyset \left( \frac{0,40 - 0,45}{0,16} \right) = 0,3783$	$ 0,4118 - 0,3783  = 0,0335$
$0,41 \leq VB \leq 0,50$	$15$	$\frac{43}{68} = 0,6324$	$\emptyset \left( \frac{0,50 - 0,45}{0,16} \right) = 0,6217$	$ 0,6324 - 0,6217  = 0,0107$
$0,51 \leq VB \leq 0,60$	$12$	$\frac{55}{68} = 0,8088$	$\emptyset \left( \frac{0,60 - 0,45}{0,16} \right) = 0,8264$	$ 0,8088 - 0,8264  = 0,0176$
$0,61 \leq VB \leq 0,70$	$6$	$\frac{61}{68} = 0,8970$	$\emptyset \left( \frac{0,70 - 0,45}{0,16} \right) = 0,9406$	$ 0,8970 - 0,9406  = 0,0436$
$0,71 \leq VB \leq 0,80$	$7$	$\frac{68}{68} = 1,0000$	$\emptyset \left( \frac{0,80 - 0,45}{0,16} \right) = 0,9857$	$ 1,0000 - 0,9857  = 0,0143$

Tabela 01 - Teste de Kolmogorov-Smirnov

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (VB_i - \overline{VB})^2}{n}} = \sqrt{\frac{1,8659}{68}} = 0,16 \quad (31)$$

A estatística de Kolmogorov-Smirnov,  $D_n$ , foi calculada segundo sua definição, (04, 06):

$$D_n = \max |F_n (VB) - F_0 (VB)| \quad (32)$$

Segundo os resultados apresentados na tabela 01 e de acordo com sua definição a estatística de Kolmogorov-Smirnov,  $D_n$ , é:

$$D_n = 0,0436 \quad (33)$$

Tomando-se um nível de significância igual a 5%, ( $\alpha = 5\%$ ) e tendo a população 68 elementos, encontra-se  $d_{\alpha,n} = 0,1649$  segundo valores tabelados, (06).

O valor da estatística de Kolmogorov-Smirnov tabelado,  $d_{\alpha,n}$ , foi comparado com o valor da estatística de Kolmogorov-Smirnov, calculado,  $D_n$ . Uma vez que  $D_n < d_{\alpha,n}$ ,  $0,0436 < 0,1649$ , o teste revela que a população em estudo tem uma distribuição normal, sendo então aceita a suposição feita anteriormente.

### 3.2.2 - Cálculo do Tamanho da Amostra

A expressão que permite calcular o tamanho da amostra para uma distribuição normal é,

$$N = \left[ \frac{z_{\alpha} S}{\delta} \right]^2 \quad (34)$$

onde:

$N$  - tamanho da amostra

$z_{\alpha}$  - coeficiente extraído da curva normal, igual a 1,96 para 95% de probabilidade dos resultados estarem certos

$S$  - desvio padrão

$\delta$  - erro percentual máximo admissível, tomado igual a  $\pm 5\%$ , (28)

$$N = \left[ \frac{1,96 \times 0,16}{0,05} \right]^2 = 39,3 \quad \therefore \quad N = 40 \quad (35)$$

### 3.3 - Caracterização dos Materiais Ensaiaados

Algumas propriedades dos materiais ensaiados foram estudadas com a finalidade de melhor caracterizá-los. Não se pode caracterizar adequadamente um material simplesmente por sua nomenclatura, uma vez que as propriedades de tal material variam dentro de determinadas faixas de valores que muitas vezes se interceptam.

É importante se conhecer a estrutura e as propriedades dos materiais porque elas dão condições de se tentar explicar porque existem materiais que são mais facilmente usinados que outros, isto é, de se tentar explicar a usinabilidade dos materiais.

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram fabricados pela Eletrometal Aços Finos S/A, em forno a arco, desgaseificadas sob vácuo, normalizadas e fornecidas em duas barras com dimensões de 200 mm de diâmetro e 1500 mm de comprimento.

Os resultados apresentados pela análise química, pelos testes de dureza, resistência a tração, escoamento, alongamento, estrição e testes metalográficos permitiram, através de comparações com normas, gráficos e tabelas das propriedades dos aços nacionais, identificar os dois materiais como sendo aços ABNT 1038 e ABNT 1045, (09,10).

#### 3.3.1 - Análise Química

A análise química está apresentada na tabela 02.

MATERIAL	COMPOSIÇÃO QUÍMICA				
	%C	%Si	%Mn	%P	%S
ABNT 1038	0,40	0,18	0,73	0,031	0,028
ABNT 1045	0,49	0,21	0,83	0,030	0,026

Tabela 02 - Composição química, percentual em peso, dos aços usinados.

### 3.3.2 - Testes Metalográficos

Para se verificar o tipo de microestrutura dos materiais usinados foram feitos alguns testes metalográficos. Nestes testes foram analisadas áreas de seções ortogonais retiradas dos corpos de prova de dureza, a distâncias aproximadamente iguais a 15 e 90 mm do centro, figura 12 detalhe B.

Como se pode observar nas figuras 06, 07, 08 e 09 os dois materiais apresentaram uma estrutura perlítica bastante semelhante, com tamanhos de grãos na faixa de 5 a 6 na região central e 3 a 4 próximos a periferia, segundo a A.S.T.M., (10).



FIG. 06 - Micrografia do aço ABNT 1045, corpo de prova D, aumento 100X, ataque com nital 2%.

Vários grãos não apresentaram uma forma equiaxial o que prova não ter havido uma total recristalização.

As figuras 10 e 11 são micrografias do aço ABNT 1045, notando-se uma grande quantidade de sulfeto de manganês. Este material apresentou 5,34% de sulfetos segundo cálculos usando-se a metalografia quantitativa, enquanto o ABNT 1038 apenas 0,17%.



FIG. 07 - Micrografia do aço ABNT 1045, corpo de prova C, aumento 100X, ataque com nital 2%.



FIG. 08 - Micrografia do aço ABNT 1038, corpo de prova D, aumento 100X, ataque com nital 2%.

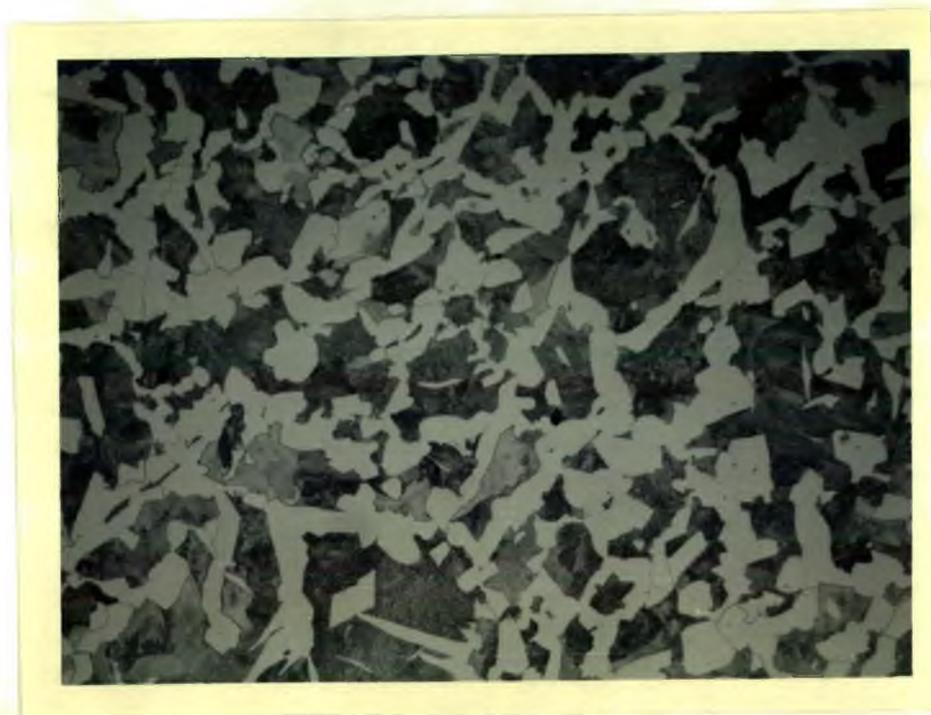


FIG. 09 - Micrografia do aço ABNT 1038, corpo de prova C, aumento 100X, ataque com nital 2%.

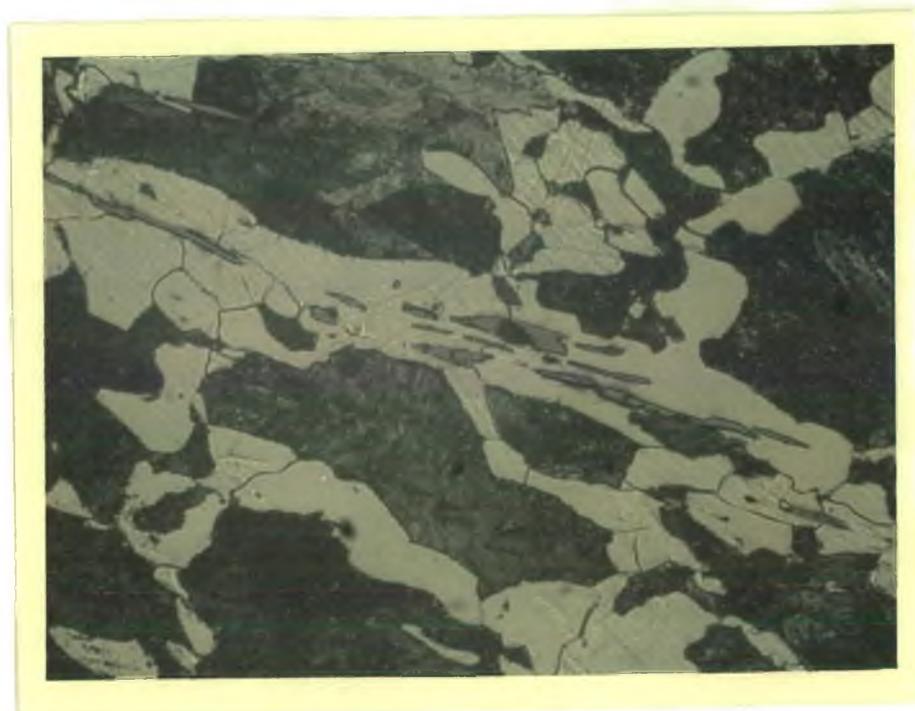


FIG. 10 - Aço ABNT 1045 apresentando áreas de sulfeto de manganês, aumento 250X, ataque com nital 2%.

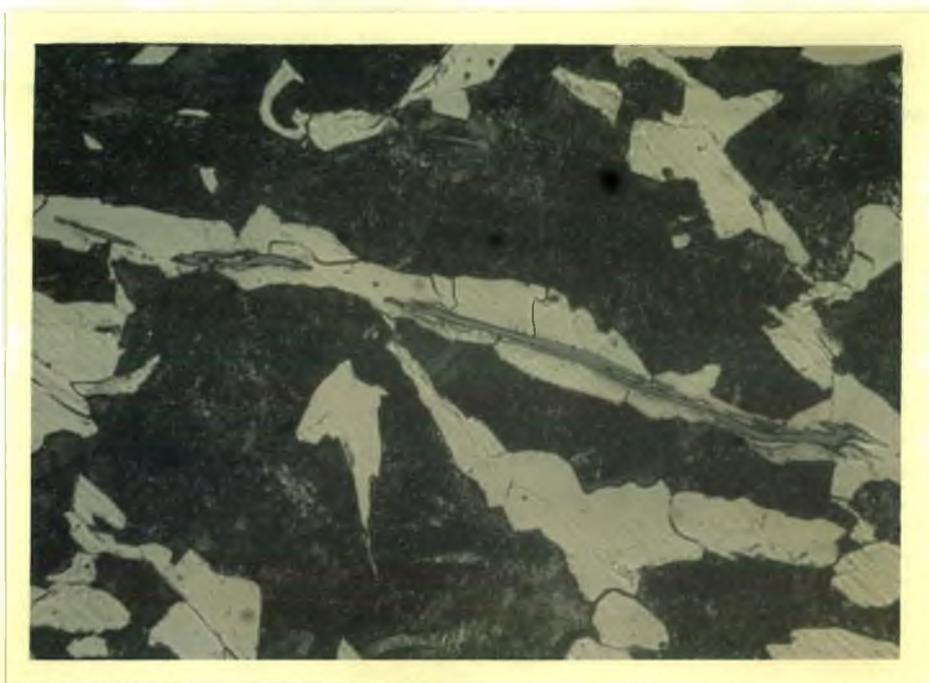


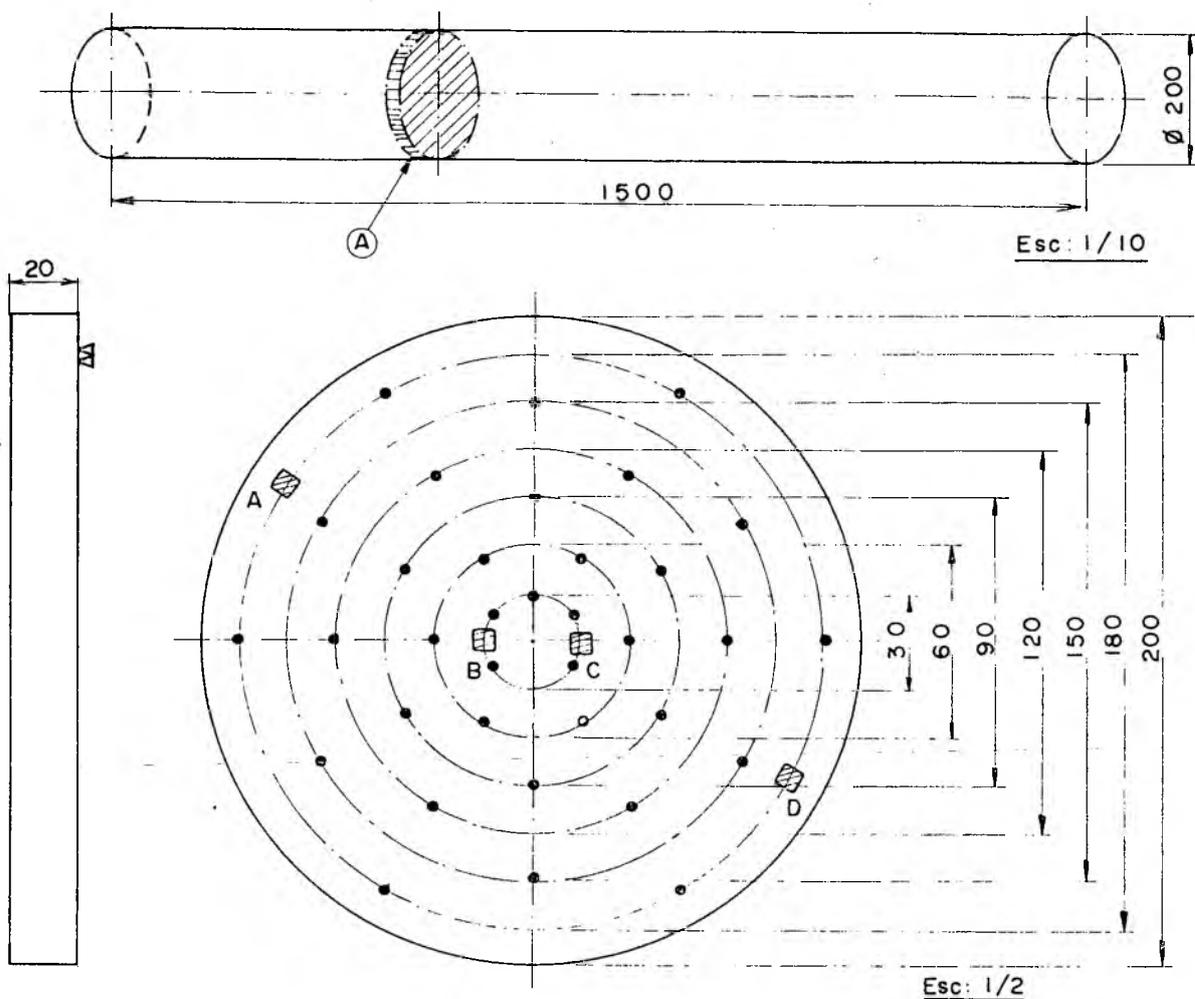
FIG. 11 - Aço ABNT 1045 com grande quantidade de sulfeto de manganês, aumento 250X, ataque com nital 2%.

### 3.3.3 - Propriedades Mecânicas

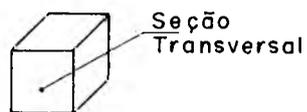
#### 3.3.3.1 - Ensaio de Dureza

Os corpos de prova para o ensaio de dureza Brinell eram constituídos de duas seções transversais retiradas das barras dos materiais que iriam ser usinados, figura 12.

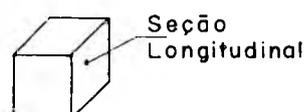
Foram feitas 6 impressões em cada uma das 6 circunferências de diâmetros: 30; 60; 90; 120; e 180 mm. Entre uma impressão e outra sempre foi mantida uma distância maior que 5 vezes o diâmetro da impressão e a espessura do corpo de prova era maior que 10 vezes o diâmetro da impressão. As impressões foram feitas aplican-



Detalhe A - Corpo de prova para ensaio de dureza



Corpos de prova A e B



Corpos de prova C e D

Detalhe B - Corpos de prova para metalografia

FIG. 12 - Corpos de prova para ensaios de dureza e metalografia.

do-se uma carga de 1840,4 Newtons, durante um tempo aproximadamente igual a 30 segundos, com uma esfera de 2,5 mm de diâmetro. O valor do diâmetro de cada impressão foi tomado como a média de duas leituras feitas a  $90^{\circ}$  uma da outra, (21).

Nos ensaios de dureza utilizou-se os seguintes equipamentos:

durômetro - marca: Testor Wolpert

tipo: HT 1 a

fabricação brasileira

microscópio - marca: Nikon-Kogako K.K78771

modelo: Mesuriscopes

resolução: 0,001 mm

fabricação japonesa

Os resultados dos ensaios de dureza são apresentados nas tabelas 03 e 04.

Distância do centro	Dureza Brinell-D=2,5mm-1840,4N						MÉDIA	DESVIO PADRÃO
	1	2	3	4	5	6		
15	198	191	202	191	195	187	194	5,0
30	184	180	191	187	187	191	187	3,9
40	180	187	180	195	184	187	186	5,1
60	180	187	187	180	180	187	184	3,5
75	174	184	184	187	180	184	182	4,2
90	180	184	187	180	187	177	182	3,8

Tabela 03 - Resultados do ensaio de dureza do aço ABNT 1038

Distância do centro	Dureza Brinell-D=2,5mm-1840,4N						MÉDIA	DESVIO PADRÃO
	1	2	3	4	5	6		
15	202	207	202	215	215	207	208	5,4
30	207	215	207	207	202	207	208	3,8
40	211	207	202	207	207	202	206	3,2
60	207	202	202	195	198	202	201	3,7
75	202	198	191	207	198	198	199	4,8
90	202	202	198	211	207	211	205	4,9

Tabela 04 - Resultados do ensaio de dureza ao aço ABNT 1045

O aço ABNT 1038 apresentou uma dureza média de 186 HB e um desvio padrão final de 5,9. Pode-se dizer que a dureza média deste material se encontra entre 184 HB e 188 HB com uma confiabilidade de 95%.

O aço ABNT 1045 apresentou uma dureza média de 204 HB, um desvio padrão final de 5,5 o pode-se dizer que para uma confiabilidade de 95% sua dureza média se encontra dentro do intervalo de 202 a 206 HB.

Os intervalos de confiança (23) foram calculados pela expressão,

$$\overline{HB} \pm t_c \frac{S}{\sqrt{N-1}} \quad (36)$$

onde:

$\overline{HB}$  - é a dureza média;

$t_c$  - é dada pela distribuição de Students (23);

$S$  - é o desvio padrão das durezas;

$N$  - é o tamanho da amostra, ou seja, o número de impressões.

$t_c = 2,028$  para um tamanho de amostra igual a 36,  $N = 36$ , e uma confiabilidade de 95%.

### 3.3.3.2 - Ensaio de Tração

Os corpos de prova para os ensaios de tração tinham a forma e as dimensões apresentadas na figura 13. Estas dimensões e formas correspondem ao tipo de corpo de prova A8, segundo a norma MB-4, (13).

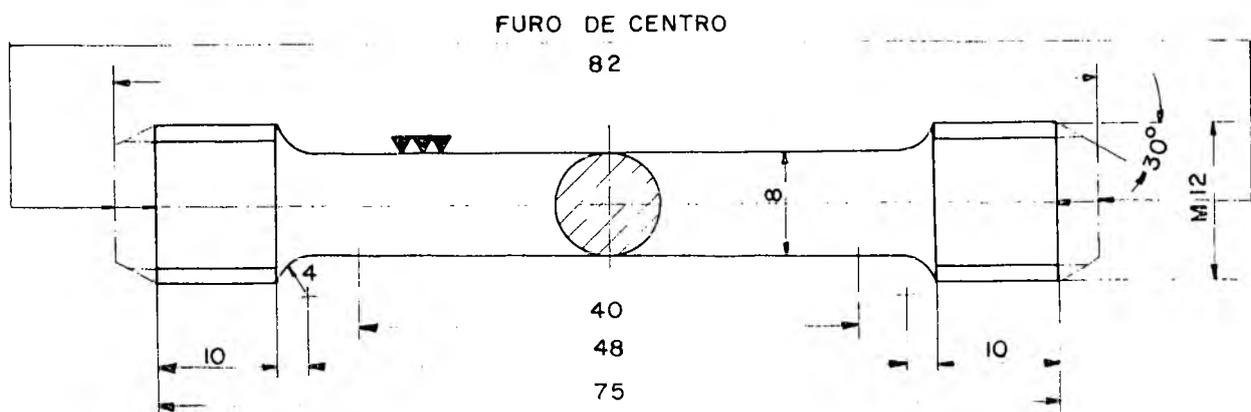


FIG. 13 - Corpos de prova para os ensaios de tração.

CORPO DE PROVA	TENSÃO DE RUPTURA (N/mm <sup>2</sup> )	TENSÃO DE ESCOAMENTO (N/mm <sup>2</sup> )	ALONGAMENTO (%)	ESTRICÇÃO (%)
I	643	317	22	31
II	622	296	24	32
III	708	393	21	27
IV	660	344	23	35
V	652	328	20	34
VI	668	330	19	29
VII	687	355	21	34
MÉDIA	622,8	337,6	21	32
DESVIO PADRÃO	26	28,6	1,6	2,7
INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95%	±26	±28,6	±1,6	±2,7
$\bar{X} \pm t(S/\sqrt{N-1})$	$636,8 \leq \sigma_{rup} \leq 688,8$	$309 \leq \sigma_{esc} \leq 366,2$	$19,4 \leq \delta \leq 22,6$	$29,3 \leq \psi \leq 34,7$

Tabela 05 - Resultado dos testes de tração do aço ABNT 1045

CORPOS DE PROVA	TENSÃO DE RUPTURA (N/mm <sup>2</sup> )	TENSÃO DE ESCOAMENTO (N/mm <sup>2</sup> )	ALONGAMENTO (%)	ESTRICÇÃO (%)
I	595	298	25	44
II	596	296	28	44
III	633	325	22	43
IV	599	294	27	44
V	578	273	26	42
VI	640	321	25	42
VII	618	304	21	41
MÉDIA	608	302	25	43
DESvio PADRÃO	20,8	16,3	2,4	1,1
INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95%	$\pm 20,8$	$\pm 16,3$	$\pm 2,4$	$\pm 1,1$
$\bar{X} \pm t(S/\sqrt{N-1})$	$587,2 \leq \sigma_{rup} \leq 628,8$	$285,7 \leq \sigma_{esc} \leq 318,3$	$22,6 \leq \delta \leq 27,4$	$41,9 \leq \psi \leq 44,1$

Tabela 06 - Resultados dos testes de tração do aço ABNT 1038

As tabelas 05 e 06 apresentam os resultados dos ensaios de tração.

Os corpos de prova de tração foram extraídos dos núcleos das barras dos materiais depois de usinados, pois não havia grandes variações, do centro à periferia, nas outras propriedades anteriormente determinadas.

Os testes de tração foram realizados na máquina marca Wolpert, modelo Testatron 100 KN, de fabricação alemã.

### 3.4 - Montagem e Características dos Equipamentos Usados nos Ensaios de Usinagem

A montagem dos equipamentos usados nos ensaios de usinagem está esquematicamente representada na figura 14. A figura 15 apresenta uma vista da montagem.

Características dos equipamentos:

01 - torno Imor

tipo: P-400

fabricante: Indústria Romi S/A - Sta Bárbara d'Oeste - São Paulo

distância entre pontos: 1000 mm

altura dos pontos: 250 mm

diâmetro máximo torneável: 430 mm

02 - ferramenta de corte e porta-ferramenta

ferramenta - insertos reversíveis

fabricante: Brassinter S/A - São Paulo

referência: SNGN 12 04 08 TXL

formato: quadrada 12,700 x 12,700 mm

espessura: 4,762 mm

tipo: ABNT P-20

número de arestas cortantes: 8

porta-ferramenta

fabricante: Brassinter S/A - São Paulo

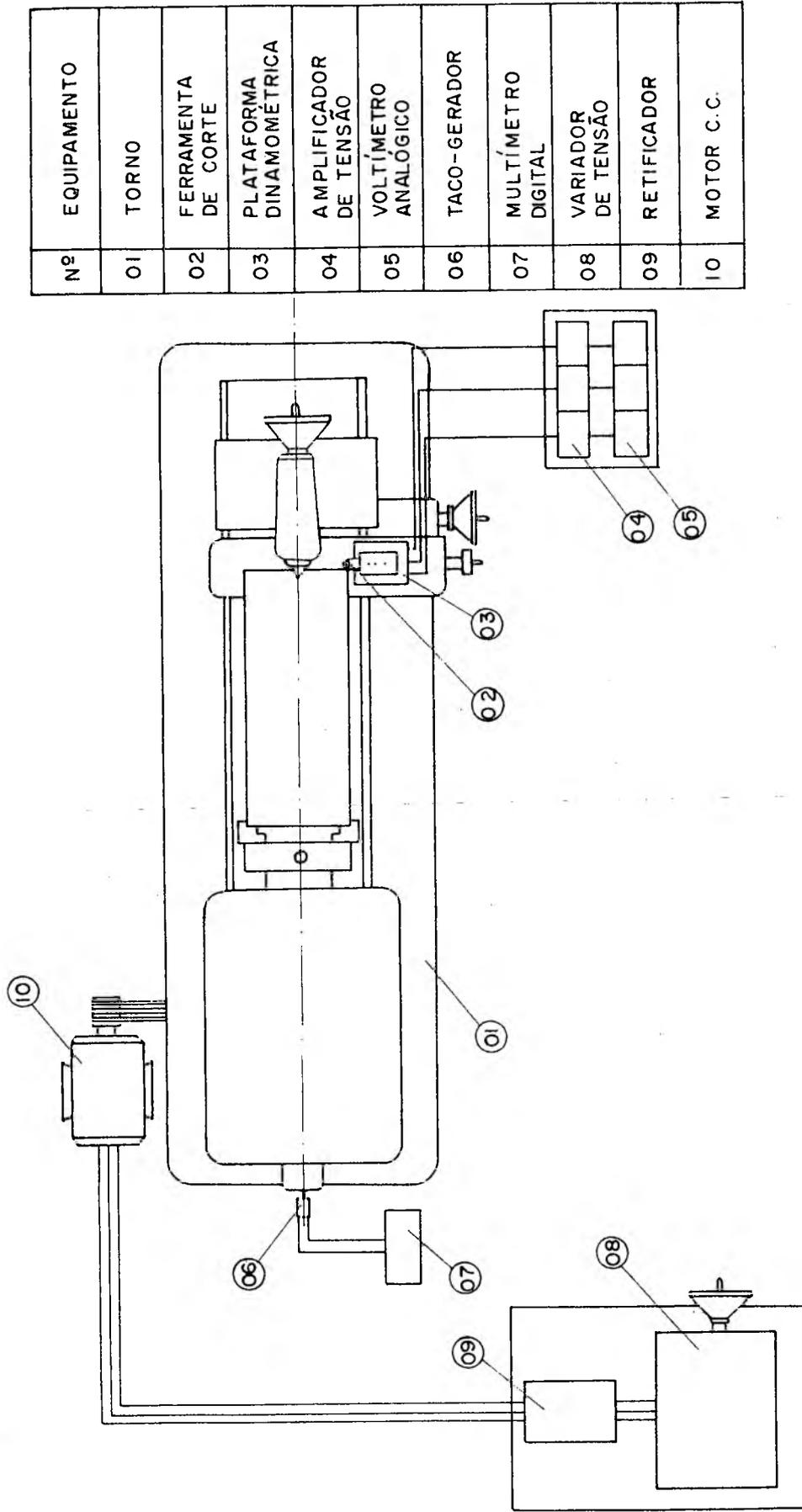
modelo: SBTR - 16 mm

dimensões: 25 x 25 x 150 mm

ângulo: de saída  $\gamma = -6^\circ$

de incidência  $\alpha = 6^\circ$

de posição  $\chi = 75^\circ$



Nº	EQUIPAMENTO
01	TORNO
02	FERRAMENTA DE CORTE
03	PLATAFORMA DINAMOMÉTRICA
04	AMPLIFICADOR DE TENSÃO
05	VOLTÍMETRO ANALÓGICO
06	TACO-GERADOR
07	MULTÍMETRO DIGITAL
08	VARIADOR DE TENSÃO
09	RETIFICADOR
10	MOTOR C. C.

FIG. 14 - Desenho esquemático da montagem dos equipamentos utilizados nos ensaios de usinagem

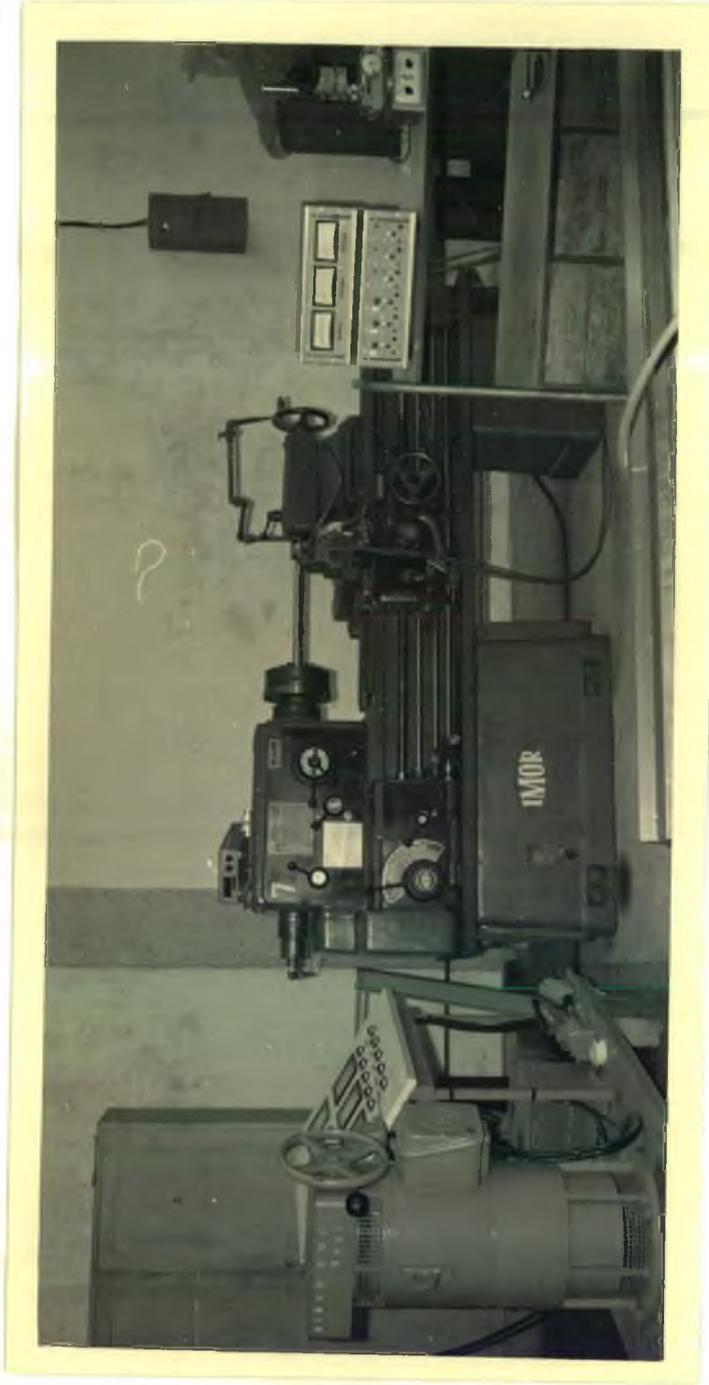


FIG. 15 - Vista frontal da montagem dos equipamentos utilizados nos ensaios de usinagem

de ponta  $\xi = 90^\circ$

- 03 - plataforma dinamométrica de três componentes  
sistema de medição: cristais piezoelétricos  
fabricante: Kistler Instruments - Suíça  
modelo: 9257 D  
tipo: SN 61370
- 04 - amplificadores de tensão com três módulos (um para cada componente da força de usinagem)  
fabricante: Kistler Instruments - Suíça  
tipo: 5001
- 05 - voltímetros analógicos (um para cada componente da força de usinagem)  
fabricante: Kistler Instruments - Suíça  
tipo: 5501
- 06 - taco-gerador  
modelo: 9150, DC TACHOMETER  
constante de medição: 7,0 volts de saída, correspondendo a 1000 rpm  
fabricante: Beckman, Helipot Div.
- 07 - multímetro digital  
modelo: M 35 13 nº 261  
fabricante: Analog Instrumentos Analógicos Digitais Ltda - Indústria Brasileira  
medição de tensão em C.C.  
faixa de medição: 0 a 20 volts
- 08 - variador de tensão  
tipo: RT1 - 8B  
fabricante: Eletro Máquinas "Anel" S/A - São Paulo  
potência: 25KVA
- 09 - retificador  
fabricante: Eletro Máquinas "Anel" S/A - São Paulo
- 10 - motor de corrente contínua  
potência: 22 Kwatts  
fabricante: Eletro Máquinas "Anel" S/A - São Paulo

### 3.5 - Aferições

#### 3.5.1 - Aferição do Taco-Gerador

Na aferição do taco-gerador foi usada a montagem esquematizada na figura 16.

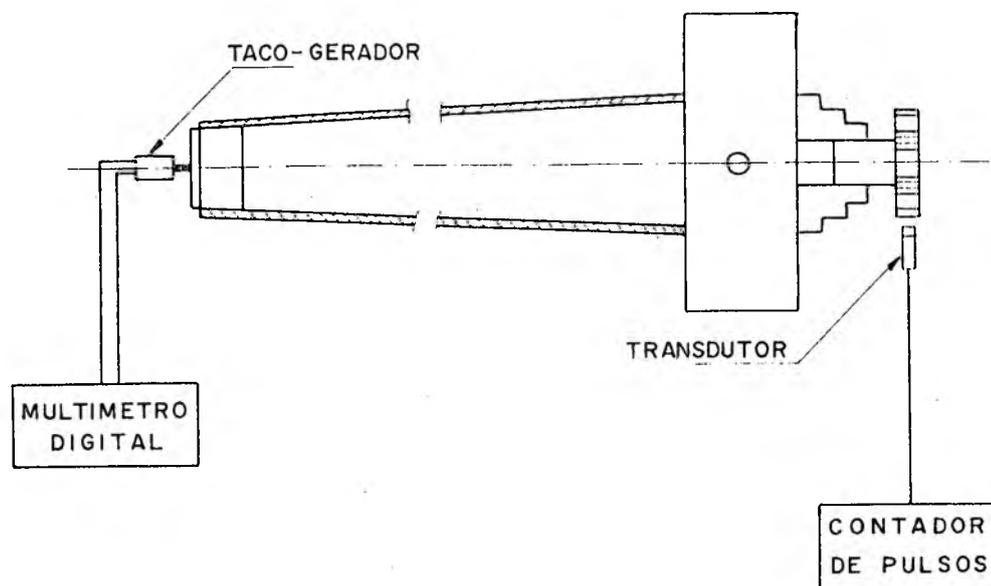


FIG. 16 - Desenho esquemático da montagem utilizada na aferição do taco-gerador

O taco-gerador foi adaptado no centro da extremidade da árvore principal do torno. Ele tem a característica de gerar uma tensão proporcional a um número de rotações. Quando a árvore girava a tensão gerada era lida em um multímetro digital.

Uma roda dentada foi fixada através de um eixo na placa do torno. Um transdutor magnético colocado junto a roda dentada gerava pulsos que eram captados por um contador de pulsos.

Para uma determinada tensão mantida fixa tinha-se um determinado número de pulsos. Os controles do contador digital foram manipulados para se contar os pulsos em dez segundos. A roda dentada tinha seis dentes, deste modo o número de rotações por minuto era dado por:

$$\text{rpm} = \frac{n \cdot 60}{Z \cdot 10} \quad (37)$$

onde:

$n$  = número de pulsos indicados em 10 seg

$Z$  = número de dentes da roda dentada = 6

Substituindo-se o valor de  $Z$  na expressão (37) tem-se:

$$\text{rpm} = n \quad (38)$$

Desta forma as rotações por minuto eram dadas diretamente pelo número de pulsos fornecidos pelo contador digital.

Para cada valor de tensão selecionado previamente o número de pulsos foi contado 5 vezes. Com as tensões fornecidas pelo taco-gerador, lidas no multímetro, e os proporcionais valores médios das rotações, lidas no contador de pulsos, foi feita uma regressão linear e obtida a seguinte expressão:

$$\text{Volts} = 0,0053389 \text{ rpm} - 0,0227247 \quad (39)$$

com um coeficiente de determinação,  $R^2$ , igual a 1.

### 3.5.2 - Aferições dos Avanços

No acionamento do carro transversal foi utilizado o fuso em vez de vara, devido a maior precisão dada por ele. Avanços precisos são de grande importância por causa de sua influência na usinabilidade e nas medições das forças de corte.

Cada avanço que seria utilizado nos ensaios foi cuidadosamente aferido. As medições para a aferição destes avanços foram feitas em três locais (início, meio e fim) do curso que o carro porta ferramenta iria ter durante os ensaios de usinagem. Nelas usou-se um relógio comparador de resolução 0,01 mm e mediu-se o deslocamento do carro porta ferramenta para dez voltas da árvore principal do torno.

Os desvios percentuais calculados não excederam a 2,0% em todas as medições efetuadas, portanto os erros estão dentro de faixas admissíveis ao se usar os valores teóricos dos avanços.

### 3.5.3 - Aferição do Dinamômetro

Para medir as forças de usinagem foram utilizados os seguintes equipamentos:

- plataforma dinamométrica de três componentes;
- amplificadores de tensões; e

- voltímetros analógicos;

cujas características e disposição de montagem estão mostradas no item 3.4 (figuras 14 e 15).

A plataforma dinamométrica usada era constituída de cristais piezoelétricos que possuem a propriedade de carregarem eletricamente suas superfícies quando sobre eles atuam tensões mecânicas. As tensões mecânicas nos testes de usinagem, eram produzidas pelas componentes da força de usinagem.

O sistema de medição das forças de corte foi aferido para as três componentes da força de usinagem. Para isto carregou-se a plataforma dinamométrica nas direções dessa três forças, com o auxílio de uma balança e pesos aferidos.

As diferenças de potenciais geradas eram amplificadas e, através do ajuste do capacitor do amplificador de sinais, a amplificação era tal que havia uma relação de 1/1 entre as tensões elétricas e as forças mecânicas medidas, isto é, a 1 Volt correspondia 1 Newton.

Após esta ajustagem foram feitas várias medições dentro da faixa de valores das forças de corte que se teria nos ensaios de usinagem. Em todas as medições efetuadas a maior variação percentual não atingiu 3%.

### 3.6 - Condições de Usinagem

Os ensaios de usinagem foram realizados no Laboratório de Máquinas Operatrizes da Universidade Federal de Santa Catarina.

Para os ensaios de usinagem, foram confeccionados, de cada material, três corpos de prova. Destes, dois tinham 500 mm de comprimento e um 480 mm, pois um disco de 20 mm de espessura foi retirado para o teste de dureza, figura 17.

Os corpos de prova foram fixados no torno entre placa de três castanhas e ponto rotativo, figura 18.

Em cada corpo de prova foi feito furo de centro nas duas faces, podendo-se assim virá-los depois de determinado tempo de usinagem para um melhor aproveitamento do material.

Depois de fixado o corpo de prova era feito um pequeno desbaste para eliminar a superfície oxidada e garantir uma boa centração.

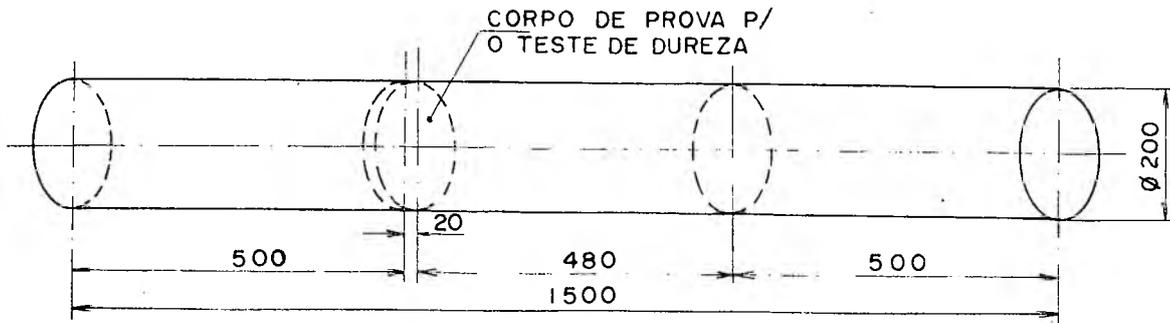


FIG. 17 - Corpos de prova para o ensaio de usinagem.



FIG. 18 - Fixação dos corpos de prova no torno

Em cada condição de teste eram mantidos constantes os coeficientes  $V_i$ ,  $S_i$  e  $A_i$ , enquanto que  $T_i$  e  $VB_i$  foram sendo medidos durante o experimento.

A velocidade de corte era mantida fixa através do controle da tensão lida no multímetro digital. A equação (39) fornecia uma relação entre tensão e rotações por minuto. A velocidade de corte é dada pela expressão,

$$v = \frac{\pi D n}{1000} \quad (40)$$

donde:

$$n = \frac{1000 v}{\pi D} \quad (41)$$

O diâmetro do corpo de prova era medido com um paquímetro CSE de 6500 mm de curso e resolução 0,02, após cada passe de usinagem. Medido o diâmetro do corpo de prova e para uma dada velocidade de corte era calculada pela expressão (41),  $n$ , o número de rotações por minuto.

Substituindo-se o valor  $n$  nas equações (38) e (39) calculava-se a tensão necessária para a velocidade de corte desejada. Após cada passe de usinagem este cálculo era feito novamente, levando-se em conta o novo valor para o diâmetro do corpo de prova,  $D$ .

Os avanços eram selecionados diretamente no torno pelo posicionamento de duas alavancas. A profundidade de corte era dada pelo posicionamento cuidadoso do carro porta ferramenta em cada passe de usinagem.

Os tempos de corte foram cronometrados e após cada corte era medido o valor de VB num microscópio de ferramentaria, figura 19. Este microscópio foi o mesmo utilizado no ensaio de dureza e suas características foram apresentadas no item 3.3.3.1.

Durante o tempo que os corpos de prova estavam sendo usinados foram medidas as forças de corte  $F_R$ ,  $F_a$  e  $F_C$ .

As condições dos testes de usinagem dos dois materiais são apresentadas nas tabelas 07 e 08. Foram adotados valores os mais diversificados possíveis, dentro da faixa recomendada pelo fabricante da ferramenta para os materiais utilizados.

CONDIÇÃO DE TESTE	V (m/min)	S (mm/rot)	A (mm)
01	100	0,30	3,0
02	140	0,60	5,0
03	180	0,40	3,0
04	220	0,30	5,0
05	140	0,50	1,5
06	100	0,60	5,0
07	140	0,30	5,0
08	180	0,20	5,0

Tabela 07 - Condições de teste do aço ABNT 1038

CONDIÇÃO DE TESTE	V (m/min)	S (mm/rot)	A (mm)
01	240	0,30	2,0
02	150	0,40	5,0
03	190	0,60	2,0
04	210	0,20	2,0

Tabela 08 - Condições de teste do aço ABNT 1045



FIG. 19 - Microscópio de ferramentaria pa a medição do desgaste de flanco.

## 4 - RESULTADOS

## 4.1 - Valores Obtidos Experimentalmente

Os valores que os coeficientes da fórmula expandida de Taylor ( $V_i$ ,  $S_i$ ,  $A_i$ ,  $T_i$ ,  $VB_i$ ) assumiram durante os experimentos são apresentados nas tabelas 09 e 10.

OBS	V m/min	S mm/rot	A mm	T min	VB mm	OBS	V m/min	S mm/rot	A mm	T min	VB mm
1	100	0,30	3,0	2,00	0,12	31	180	0,40	3,0	7,00	0,27
2	100	0,30	3,0	4,00	0,14	32	180	0,40	3,0	9,00	0,30
3	100	0,30	3,0	7,00	0,15	33	180	0,40	3,0	11,00	0,32
4	100	0,30	3,0	9,00	0,20	34	180	0,40	3,0	12,00	0,33
5	100	0,30	3,0	11,00	0,20	35	180	0,40	3,0	13,98	0,40
6	100	0,30	3,0	13,00	0,21	36	180	0,40	3,0	16,20	0,41
7	100	0,30	3,0	15,00	0,21	37	180	0,40	3,0	16,87	0,42
8	100	0,30	3,0	17,00	0,21	38	180	0,40	3,0	18,19	0,42
9	100	0,30	3,0	19,00	0,22	39	180	0,40	3,0	19,46	0,46
10	100	0,30	3,0	21,00	0,23	40	180	0,40	3,0	20,94	0,46
11	100	0,30	3,0	23,00	0,23	41	220	0,30	5,0	2,00	0,21
12	100	0,30	3,0	25,00	0,24	42	220	0,30	5,0	4,00	0,23
13	100	0,30	3,0	27,00	0,26	43	220	0,30	5,0	5,00	0,27
14	100	0,30	3,0	29,00	0,26	44	220	0,30	5,0	5,62	0,28
15	100	0,30	3,0	31,00	0,27	45	220	0,30	5,0	7,00	0,30
16	100	0,30	3,0	33,00	0,28	46	220	0,30	5,0	8,20	0,31
17	100	0,30	3,0	35,00	0,28	47	220	0,30	5,0	8,48	0,32
18	140	0,60	5,0	2,00	0,10	48	220	0,30	5,0	8,88	0,32
19	140	0,60	5,0	3,00	0,16	49	220	0,30	5,0	9,23	0,34
20	140	0,60	5,0	5,00	0,19	50	220	0,30	5,0	9,58	0,34
21	140	0,60	5,0	5,68	0,24	51	220	0,30	5,0	10,62	0,36
22	140	0,60	5,0	6,68	0,28	52	220	0,30	5,0	11,53	0,38
23	140	0,60	5,0	7,68	0,28	53	220	0,30	5,0	12,83	0,38
24	140	0,60	5,0	8,68	0,29	54	220	0,30	5,0	13,83	0,39
25	140	0,60	5,0	9,68	0,30	55	220	0,30	5,0	14,86	0,42
26	140	0,60	5,0	10,66	0,34	56	140	0,50	1,5	1,00	0,14
27	140	0,60	5,0	11,49	0,35	57	140	0,50	1,5	2,00	0,15
28	180	0,40	3,0	2,00	0,20	58	140	0,50	1,5	3,97	0,18
29	180	0,40	3,0	3,00	0,22	59	140	0,50	1,5	5,88	0,19
30	180	0,40	3,0	5,00	0,25	60	140	0,50	1,5	8,00	0,20

OBS	V m/min	S mm/rot	A mm	T min	VB mm	OBS	V m/min	S mm/rot	A mm	T min	VB mm
61	140	0,50	1,5	9,58	0,24	95	140	0,30	5,0	9,45	0,23
62	140	0,50	1,5	12,00	0,24	96	140	0,30	5,0	10,53	0,23
63	140	0,50	1,5	13,18	0,25	97	140	0,30	5,0	12,98	0,26
64	140	0,50	1,5	15,00	0,28	98	140	0,30	5,0	15,10	0,31
65	140	0,50	1,5	16,72	0,28	99	140	0,30	5,0	16,85	0,32
66	140	0,50	1,5	18,50	0,30	100	140	0,30	5,0	18,25	0,33
67	140	0,50	1,5	20,17	0,31	101	140	0,30	5,0	19,17	0,33
68	140	0,50	1,5	22,00	0,32	102	140	0,30	5,0	19,85	0,33
69	140	0,50	1,5	22,55	0,34	103	140	0,30	5,0	20,78	0,33
70	140	0,50	1,5	24,25	0,34	104	140	0,30	5,0	21,78	0,34
71	140	0,50	1,5	25,90	0,34	105	140	0,30	5,0	23,78	0,34
72	140	0,50	1,5	27,55	0,36	106	140	0,30	5,0	25,21	0,36
73	140	0,50	1,5	29,13	0,38	107	140	0,30	5,0	26,78	0,37
74	140	0,50	1,5	30,75	0,39	108	140	0,30	5,0	28,28	0,38
75	140	0,50	1,5	32,35	0,40	109	140	0,30	5,0	29,36	0,38
76	140	0,50	1,5	35,00	0,40	110	140	0,30	5,0	30,78	0,38
77	140	0,50	1,5	36,52	0,41	111	140	0,30	5,0	32,28	0,39
78	140	0,50	1,5	38,05	0,43	112	140	0,30	5,0	33,18	0,40
79	140	0,50	1,5	39,65	0,44	113	140	0,30	5,0	34,70	0,42
80	100	0,60	5,0	2,00	0,12	114	180	0,20	5,0	2,50	0,12
81	100	0,60	5,0	3,12	0,16	115	180	0,20	5,0	5,00	0,18
82	100	0,60	5,0	5,00	0,17	116	180	0,20	5,0	7,85	0,20
83	100	0,60	5,0	8,00	0,18	117	180	0,20	5,0	10,00	0,23
84	100	0,60	5,0	11,12	0,20	118	180	0,20	5,0	12,00	0,24
85	100	0,60	5,0	13,32	0,22	119	180	0,20	5,0	15,25	0,26
86	100	0,60	5,0	15,17	0,23	120	180	0,20	5,0	17,00	0,29
87	100	0,60	5,0	18,84	0,25	121	180	0,20	5,0	19,00	0,31
88	140	0,30	5,0	0,92	0,06	122	180	0,20	5,0	20,50	0,32
89	140	0,30	5,0	2,67	0,12	123	180	0,20	5,0	22,23	0,33
90	140	0,30	5,0	3,92	0,14	124	180	0,20	5,0	24,25	0,34
91	140	0,30	5,0	5,08	0,15	125	180	0,20	5,0	26,35	0,38
92	140	0,30	5,0	6,35	0,18	126	180	0,20	5,0	28,80	0,39
93	140	0,30	5,0	7,28	0,18	127	180	0,20	5,0	30,00	0,41
94	140	0,30	5,0	8,30	0,22						

Tabela 09 - Valores que as variáveis assumiram durante os ensaios de usinagem do aço AENF 1038

OBS	V m/min	S mm/rot	A mm	T min	VB mm	OBS	V m/min	S mm/rot	A mm	T min	VB mm
1	240	0,30	2,0	1,00	0,12	37	150	0,40	5,0	25,46	0,30
2	240	0,30	2,0	2,67	0,18	38	150	0,40	5,0	27,01	0,32
3	240	0,30	2,0	3,67	0,20	39	150	0,40	5,0	28,26	0,33
4	240	0,30	2,0	4,00	0,21	40	150	0,40	5,0	29,65	0,35
5	240	0,30	2,0	5,00	0,24	41	150	0,40	5,0	31,10	0,36
6	240	0,30	2,0	6,00	0,24	42	150	0,40	5,0	32,33	0,37
7	240	0,30	2,0	7,00	0,26	43	150	0,40	5,0	33,53	0,38
8	240	0,30	2,0	8,00	0,27	44	150	0,40	5,0	34,90	0,39
9	240	0,30	2,0	9,00	0,29	45	150	0,40	5,0	36,91	0,40
10	240	0,30	2,0	10,00	0,31	46	190	0,60	2,0	1,37	0,14
11	240	0,30	2,0	11,00	0,32	47	190	0,60	2,0	2,00	0,15
12	240	0,30	2,0	12,00	0,35	48	190	0,60	2,0	2,93	0,16
13	240	0,30	2,0	13,00	0,37	49	190	0,60	2,0	3,82	0,17
14	240	0,30	2,0	13,97	0,38	50	190	0,60	2,0	4,67	0,18
15	240	0,30	2,0	15,00	0,40	51	190	0,60	2,0	5,43	0,19
16	240	0,30	2,0	16,00	0,42	52	190	0,60	2,0	6,18	0,20
17	150	0,40	5,0	1,00	0,10	53	190	0,60	2,0	6,80	0,20
18	150	0,40	5,0	2,17	0,12	54	190	0,60	2,0	7,92	0,21
19	150	0,40	5,0	3,00	0,13	55	190	0,60	2,0	8,92	0,22
20	150	0,40	5,0	4,33	0,15	56	190	0,60	2,0	9,73	0,22
21	150	0,40	5,0	4,98	0,16	57	190	0,60	2,0	10,85	0,24
22	150	0,40	5,0	6,27	0,16	58	190	0,60	2,0	11,33	0,24
23	150	0,40	5,0	6,88	0,18	59	190	0,60	2,0	12,18	0,25
24	150	0,40	5,0	8,83	0,18	60	190	0,60	2,0	12,90	0,26
25	150	0,40	5,0	9,77	0,18	61	190	0,60	2,0	13,80	0,28
26	150	0,40	5,0	10,63	0,18	62	190	0,60	2,0	14,50	0,29
27	150	0,40	5,0	11,78	0,20	63	190	0,60	2,0	14,92	0,30
28	150	0,40	5,0	12,87	0,22	64	190	0,60	2,0	15,42	0,31
29	150	0,40	5,0	14,00	0,23	65	190	0,60	2,0	16,42	0,32
30	150	0,40	5,0	15,22	0,23	66	190	0,60	2,0	17,45	0,35
31	150	0,40	5,0	16,33	0,24	67	190	0,60	2,0	17,92	0,38
32	150	0,40	5,0	17,33	0,24	68	190	0,60	2,0	18,42	0,42
33	150	0,40	5,0	18,10	0,24	69	240	0,30	2,0	2,07	0,15
34	150	0,40	5,0	20,99	0,26	70	240	0,30	2,0	3,80	0,22
35	150	0,40	5,0	22,68	0,26	71	240	0,30	2,0	5,22	0,25
36	150	0,40	5,0	24,01	0,28	72	240	0,30	2,0	7,23	0,28

OBS	V m/min	S mm/rot	A mm	T min	VB mm	OBS	V m/min	S mm/rot	A mm	T min	VB mm
73	240	0,30	2,0	8,50	0,29	92	190	0,60	2,0	10,25	0,22
74	240	0,30	2,0	10,27	0,32	93	190	0,60	2,0	12,00	0,24
75	240	0,30	2,0	12,00	0,33	94	190	0,60	2,0	14,00	0,26
76	240	0,30	2,0	14,68	0,38	95	190	0,60	2,0	15,98	0,28
77	240	0,30	2,0	15,60	0,39	96	190	0,60	2,0	17,92	0,32
78	240	0,30	2,0	16,47	0,42	97	190	0,60	2,0	18,50	0,38
79	190	0,60	2,0	2,00	0,12	98	190	0,60	2,0	18,83	0,40
80	190	0,60	2,0	4,10	0,16	99	210	0,20	2,0	2,02	0,12
81	190	0,60	2,0	5,62	0,18	100	210	0,20	2,0	3,90	0,14
82	190	0,60	2,0	7,08	0,18	101	210	0,20	2,0	5,67	0,16
83	190	0,60	2,0	9,00	0,20	102	210	0,20	2,0	7,28	0,20
84	190	0,60	2,0	11,13	0,22	103	210	0,20	2,0	9,42	0,22
85	190	0,60	2,0	13,00	0,26	104	210	0,20	2,0	11,38	0,26
86	190	0,60	2,0	14,28	0,27	105	210	0,20	2,0	13,08	0,28
87	190	0,60	2,0	14,98	0,30	106	210	0,20	2,0	14,52	0,30
88	190	0,60	2,0	2,05	0,14	107	210	0,20	2,0	17,03	0,32
89	190	0,60	2,0	4,05	0,18	108	210	0,20	2,0	19,13	0,34
90	190	0,60	2,0	5,98	0,20	109	210	0,20	2,0	20,67	0,35
91	190	0,60	2,0	7,88	0,21	110	210	0,20	2,0	21,62	0,36

Tabela 10 - Valores que as variáveis assumiram durante os ensaios de usinagem do aço ABNT 1045

#### 4.2 - Valores da Constante e dos Expoentes da Fórmula Expandida de Taylor

Os parâmetros da fórmula expandida de Taylor foram obtidos através da resolução do sistema de equações (21), (22), (23), (24) e (25), apresentado no item 3.1.

Os valores que as variáveis  $V_i$ ,  $S_i$ ,  $A_i$ ,  $T_i$  e  $VB_i$ , assumiram nos testes foram aqueles apresentados no item 4.1.

É importante que se tenha quantidades iguais de pontos de cada condição de teste, para que uma condição não venha a ter maior influência que outra nos resultados finais. Chama-se de ponto ao conjunto de valores  $V_k$ ,  $S_k$ ,  $A_k$ ,  $T_k$  e  $VB_k$ , onde  $k$  é qualquer um dos valores de  $i = 1, \dots, N$ .

A quantidade de valores de desgaste,  $VB$ , e tempo de usina

gem,  $T$ , obtida experimentalmente não era igual em cada teste. Portanto não se pode tomar diretamente estes valores medidos dos desgastes e tempos de usinagem para as variáveis  $VB_i$  e  $T_i$ , respectivamente, da fórmula expandida de Taylor.

O procedimento para a determinação das variáveis  $T_i$  e  $VB_i$  foi o seguinte:

- foram testados os modelos 42 , 43 , 44 utilizados por alguns pesquisadores (14) e o modelo 45 utilizado por outros (25) para representar o desgaste em função do tempo de usinagem;

$$VB = a + bT \quad (42)$$

$$VB = a e^{bT} \quad (43)$$

$$VB = a + b \ln T \quad (44)$$

$$VB = a T^b \quad (45)$$

- comprovou-se através do coeficiente de determinação,  $R^2$ , que o modelo (45) era o mais representativo;
- calculou-se a equação e construiu-se a curva do modelo (45), em papel dilogarítmico a partir dos pontos experimentais, para cada teste. As tabelas 11 e 12 apresentam estas equações e as figuras de 20 a 31 representam suas construções gráficas;
- calculou-se valores de  $VB_i$ , em quantidades iguais para cada condição de teste, através das equações apresentadas nas tabelas 11 e 12 com valores estabelecidos para  $T_i$ ;
- as variáveis  $T_i$  assumiram valores  $T_j$  dentro de cada teste, tais que, tinha-se intervalos de tempos iguais entre quaisquer dos  $T_j$  e  $T_j + 1$ . Dentro de cada teste do aço ABNT 1038 o índice  $j$  variou de 1 a 10 e do aço ABNT 1045 o  $j$  variou de 1 a 12. Desta forma para o primeiro material tinha-se 8 testes o índice  $i$  variou de 1 a 80 e para o segundo tinha-se 4 testes o índice  $i$  variou de 1 a 48. Nos dois casos o tamanho da amostra foi maior que o mínimo calculado no item 3.2, que era 40. Os valores dos  $T_i$  para  $j = 10$  e  $j = 12$  nos aços ABNT 1038 e ABNT 1045 respectivamente eram aproximadamente iguais ao tempo total de usinagem de cada experimento.

Os valores  $V_i$ ,  $S_i$ ,  $A_i$ ,  $T_i$ ,  $VB_i$  que constituíram os coeficientes do sistema de equações da fórmula expandida de Taylor

CONDIÇÃO	V (m/min)	S (min/rot)	A (mm)	EQUAÇÃO $VB = a T^b$	R <sup>2</sup>
01	100	0,30	3,0	$VB = 0,0937T^{0,3014}$	0,96
02	140	0,60	5,0	$VB = 0,0689T^{0,6780}$	0,96
03	180	0,40	3,0	$VB = 0,1422T^{0,3714}$	0,95
04	220	0,30	5,0	$VB = 0,1514T^{0,3594}$	0,96
05	140	0,50	1,5	$VB = 0,1147T^{0,3405}$	0,95
06	100	0,60	5,0	$VB = 0,1047T^{0,2863}$	0,95
07	140	0,30	5,0	$VB = 0,0684T^{0,5184}$	0,99
08	180	0,20	5,0	$VB = 0,0779T^{0,4702}$	0,98

Tabela 11 - Equações do desgaste de flanco em função do tempo de usinagem para cada condição de teste do aço ABNT 1038

CONDIÇÃO	V (m/min)	S (min/rot)	A (mm)	EQUAÇÃO $VB = a T^b$	R <sup>2</sup>
01	240	0,30	2,0	$VB = 0,1139T^{0,4475}$	0,98
02	150	0,40	5,0	$VB = 0,0822T^{0,4007}$	0,94
03	190	0,60	2,0	$VB = 0,0977T^{0,4018}$	0,87
04	210	0,20	2,0	$VB = 0,0744T^{0,5080}$	0,98

Tabela 12 - Equações do desgaste de flanco em função do tempo de usinagem para cada condição de teste do aço ABNT 1045

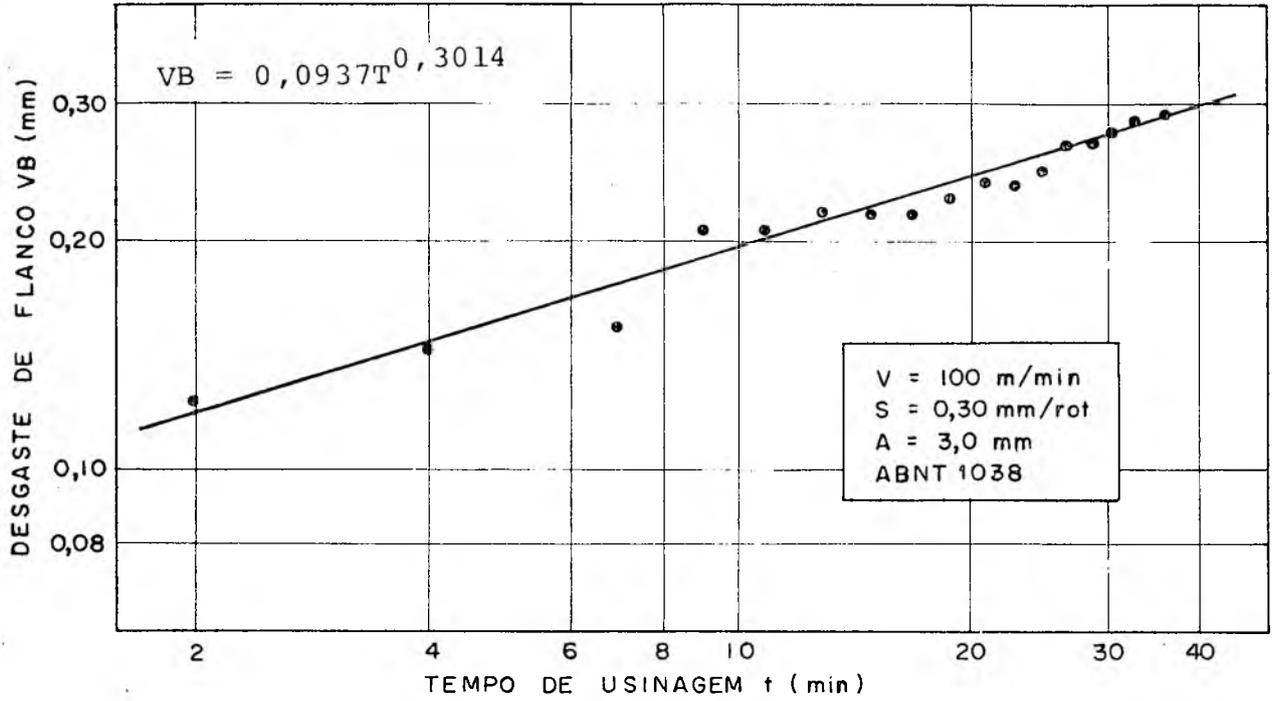


FIG. 20 - Condição de teste 01 do aço ABNT 1038

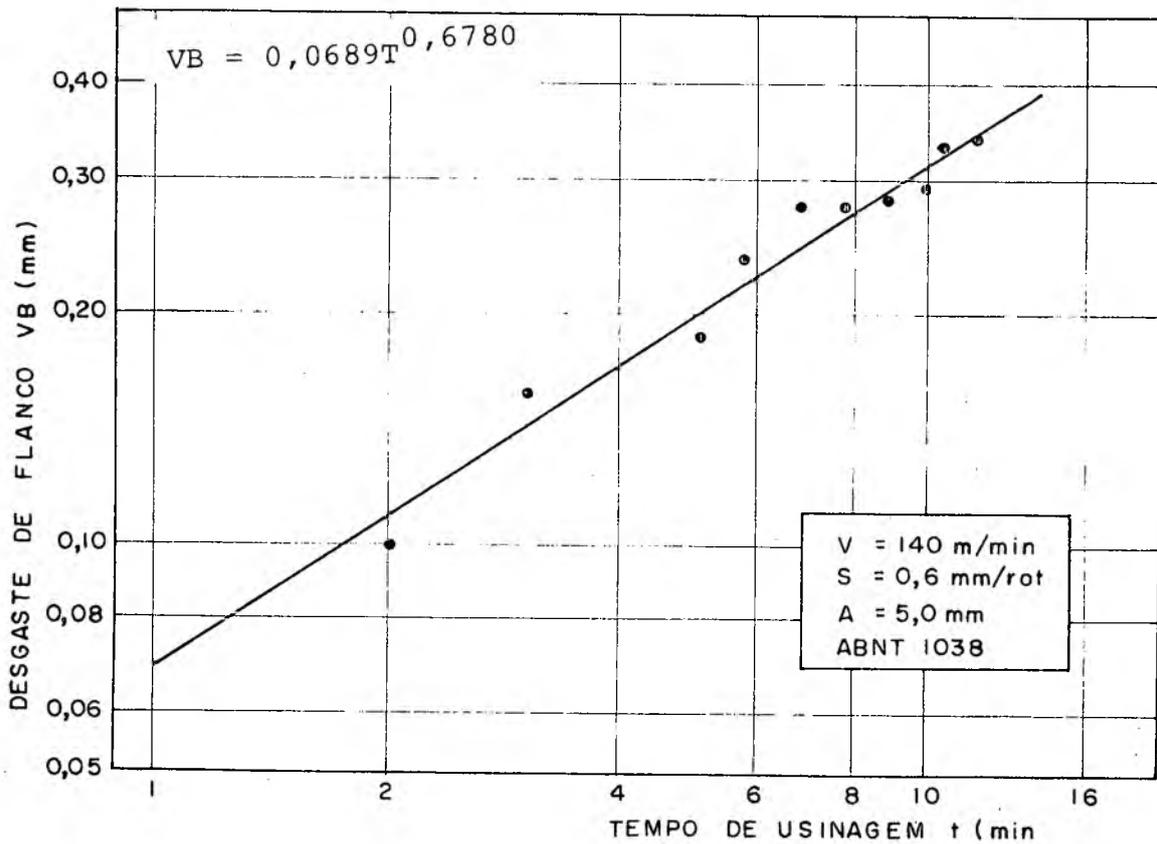


FIG. 21 - Condição de teste 02 do aço ABNT 1038

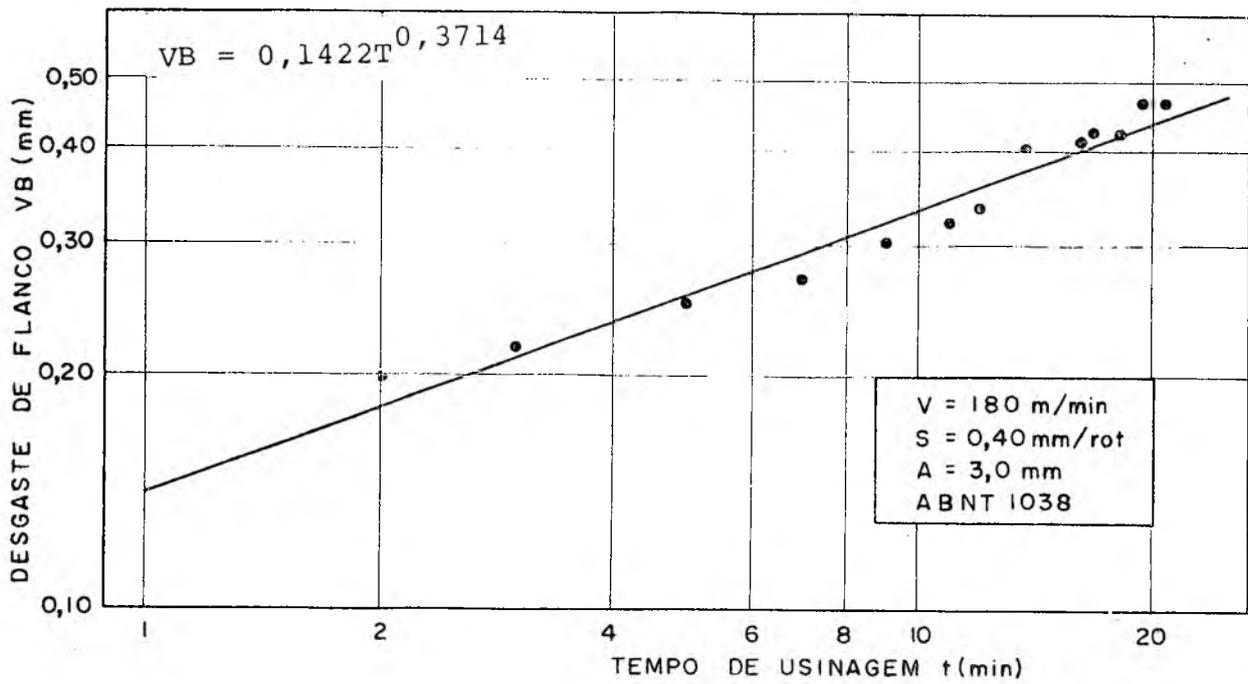


FIG. 22 - Condição de teste 03 do aço ABNT 1038

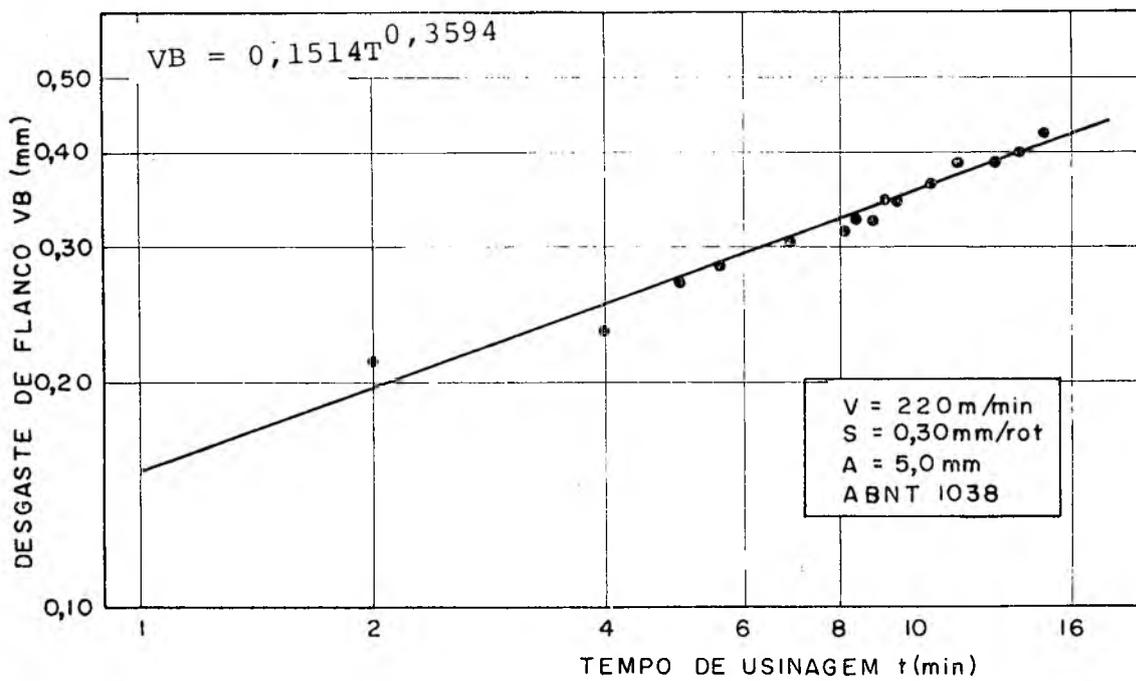


FIG. 23 - Condição de teste 04 do aço ABNT 1038

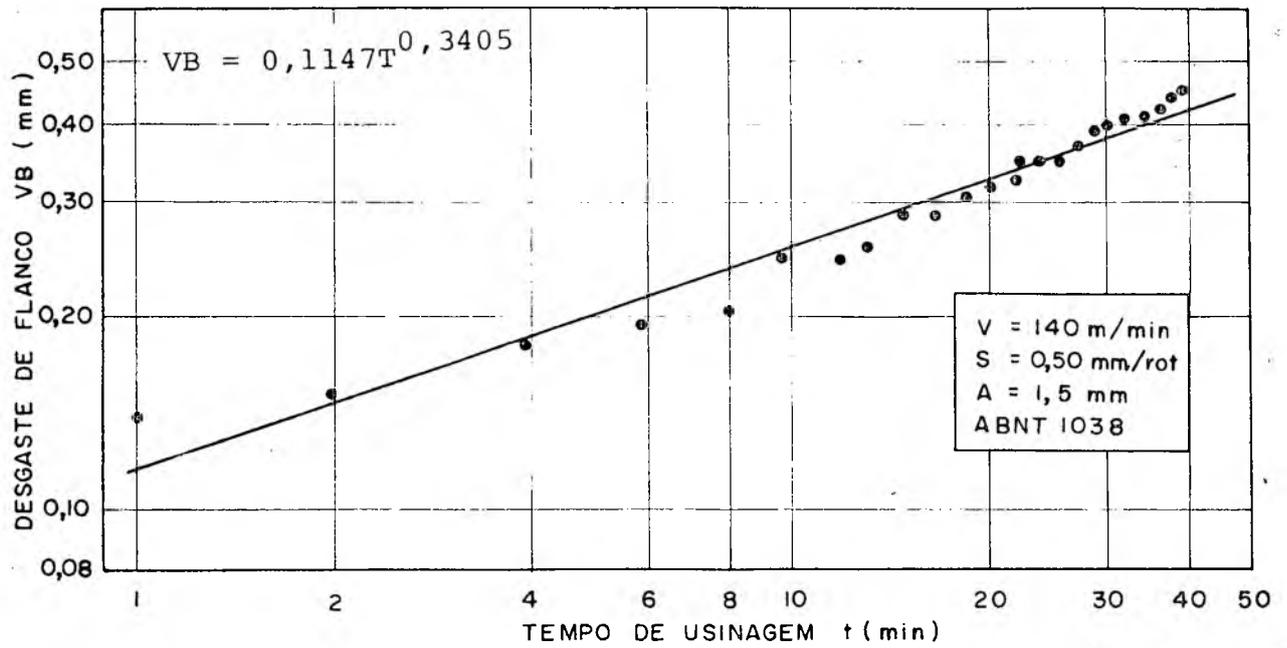


FIG. 24 - Condição de teste 05 do aço ABNT 1038

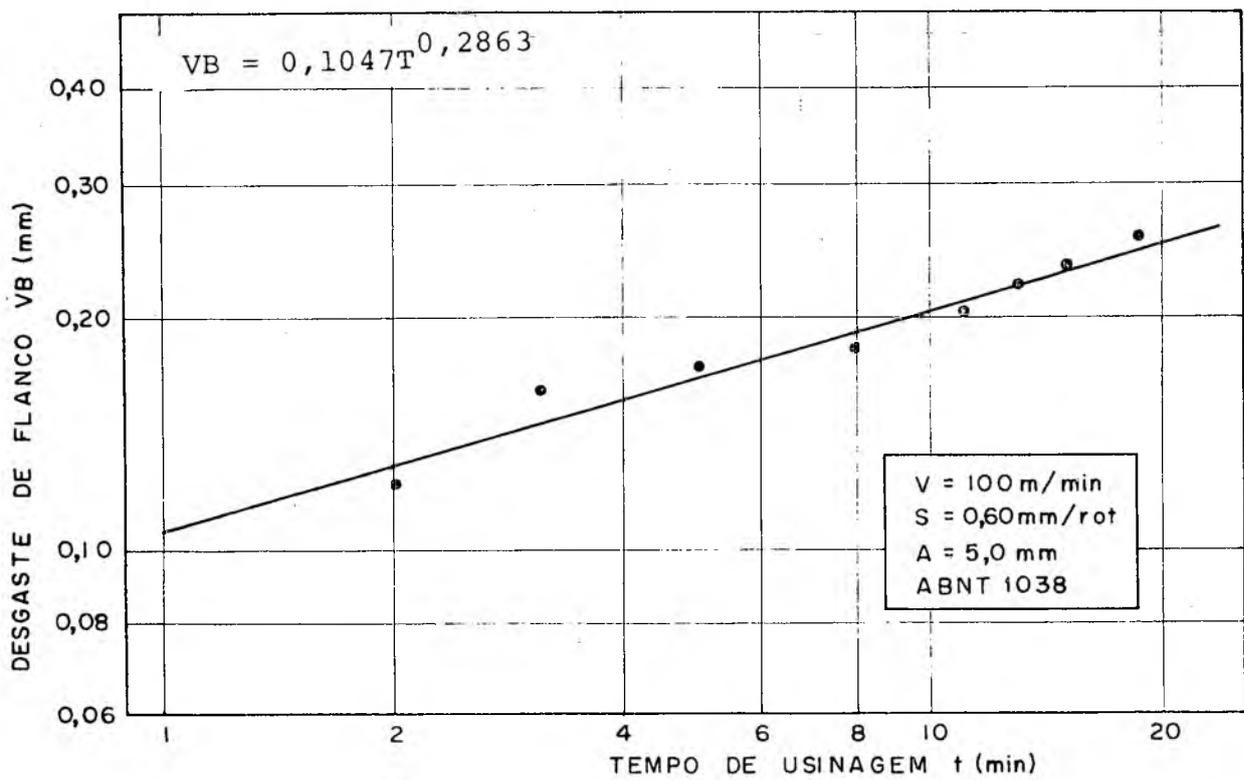


FIG. 25 - Condição de teste 06 do aço ABNT 1038

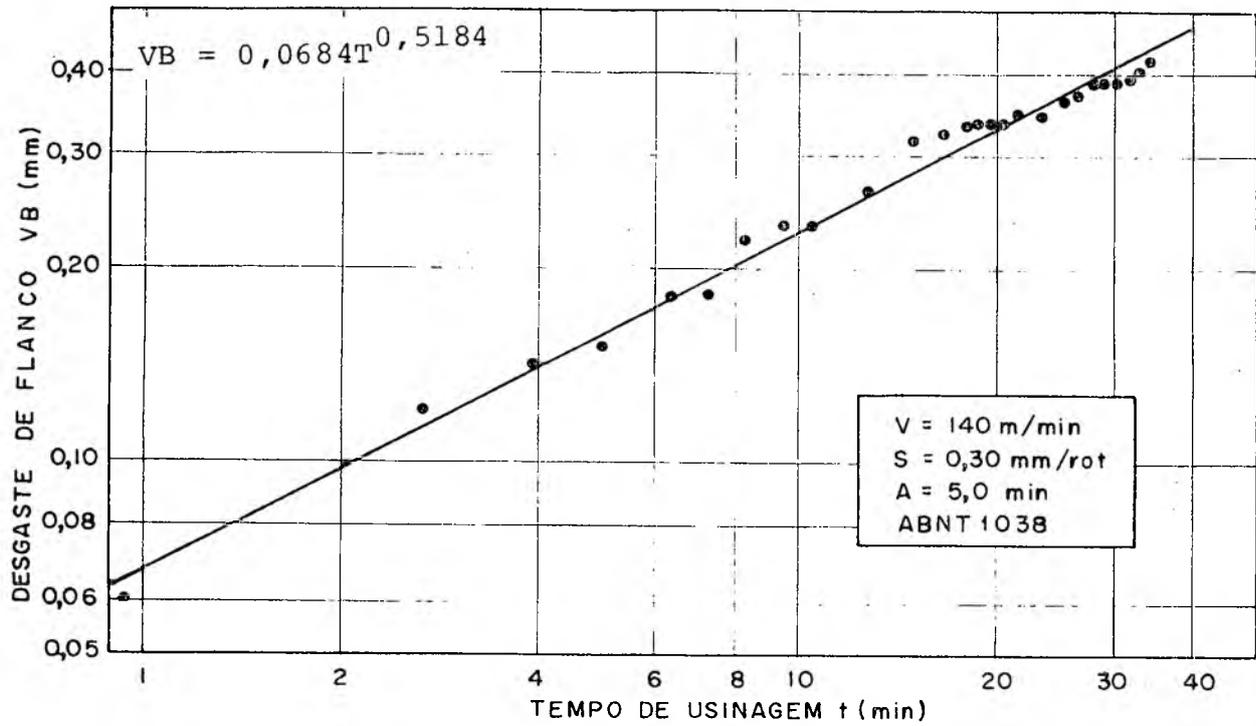


FIG. 26 - Condição de teste 07 do aço ABNT 1038

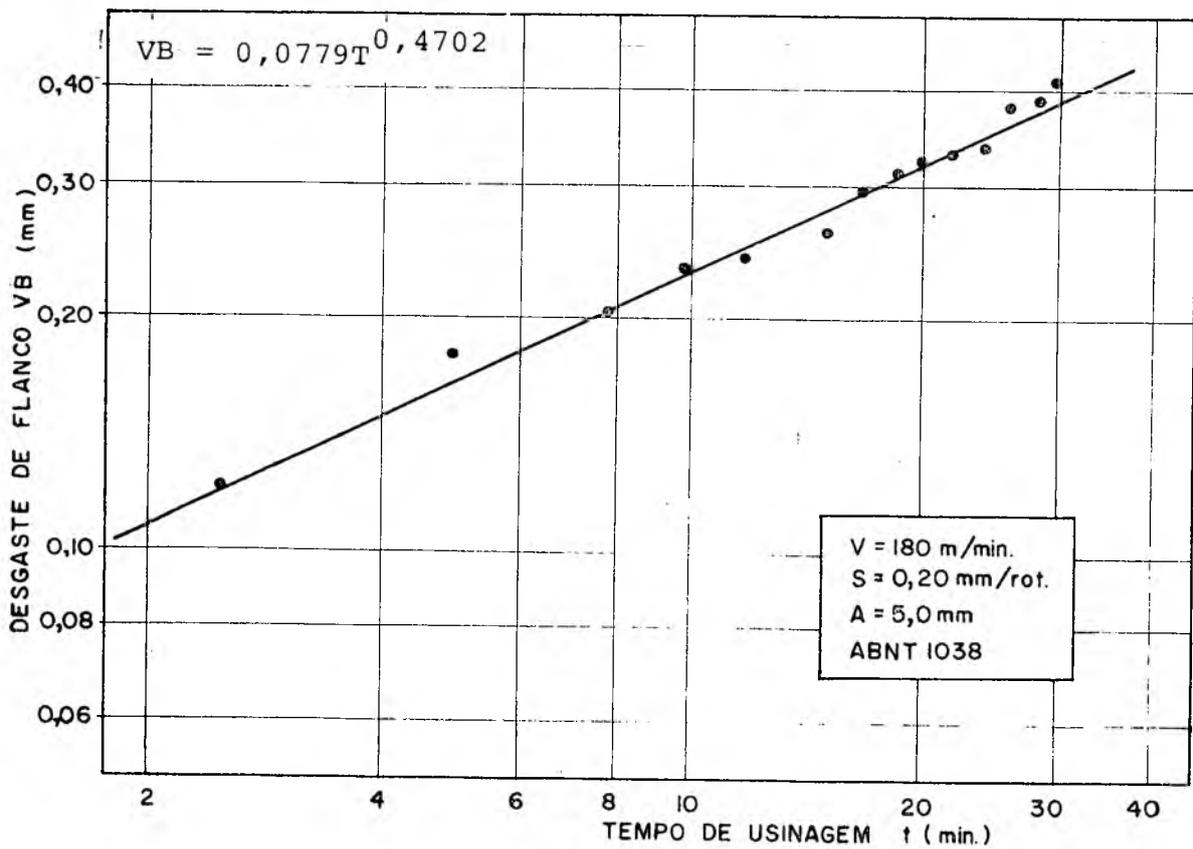


FIG. 27 - Condição de teste 08 do aço ABNT 1038

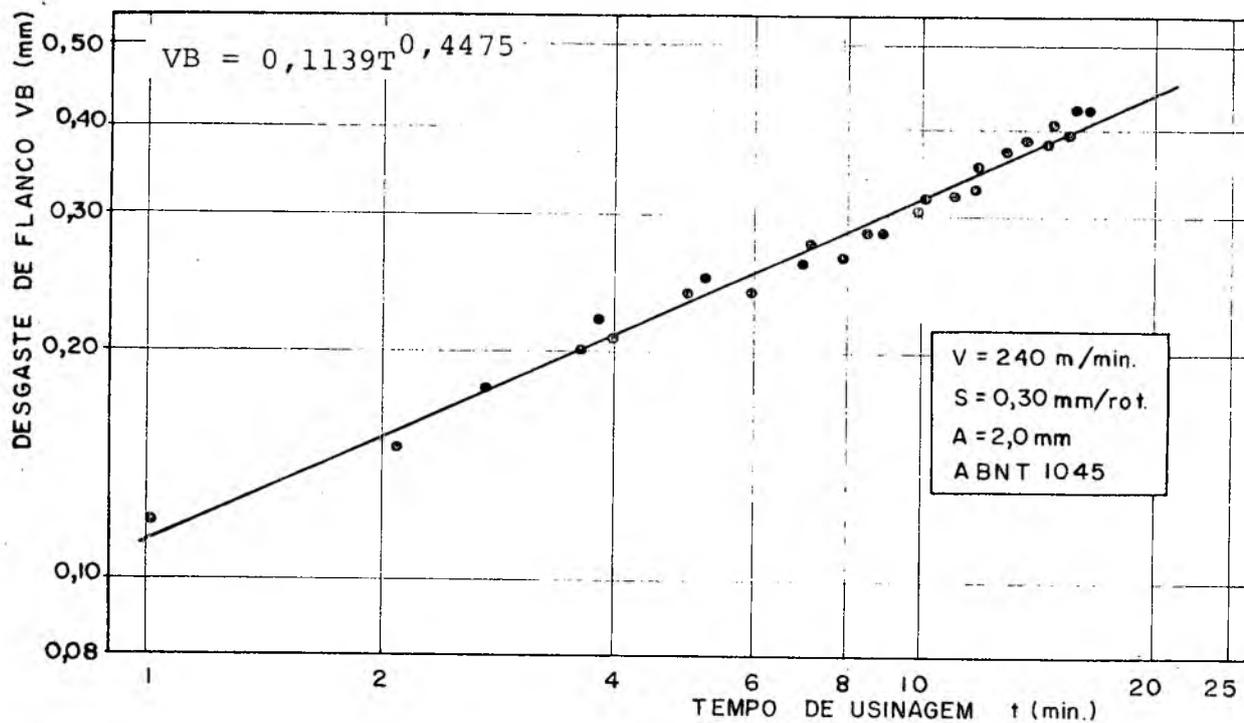


FIG. 28 - Condição de teste 01 do aço ABNT 1045

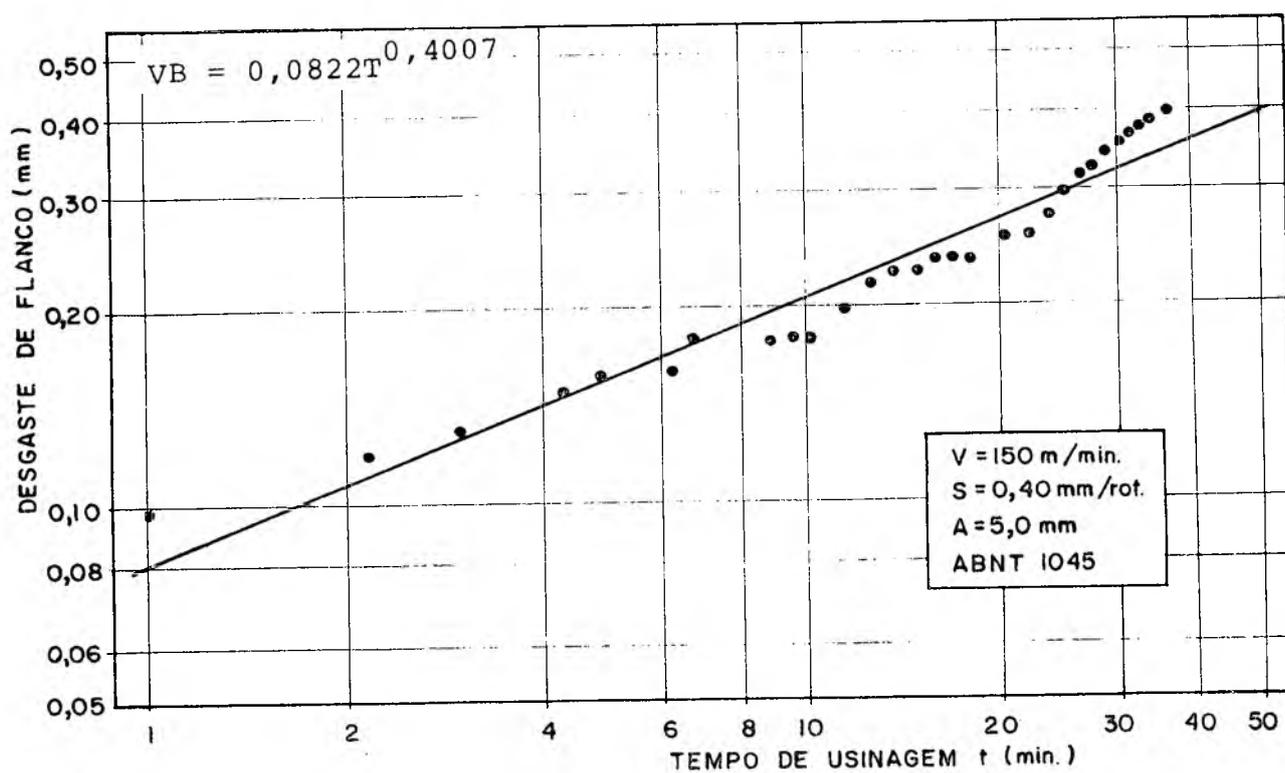


FIG. 29 - Condição de teste 02 do aço ABNT 1045

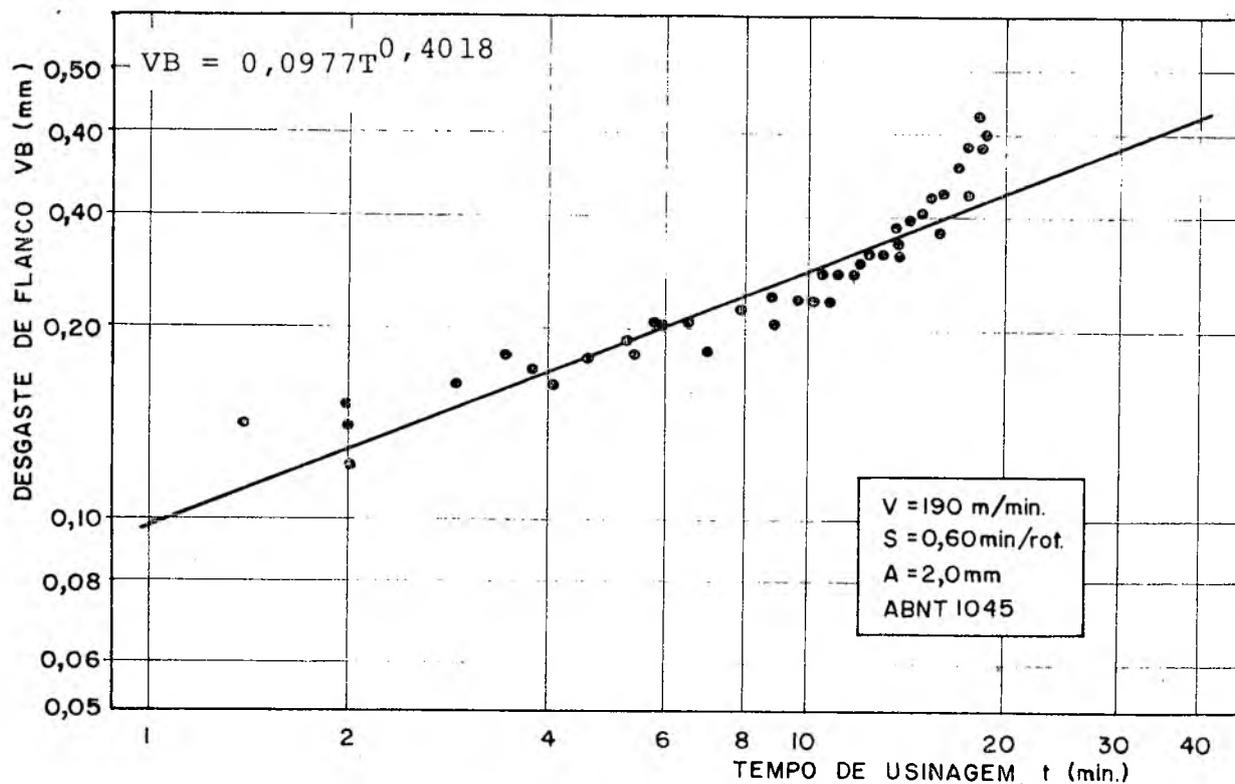


FIG. 30 - Condição de teste 03 do aço ABNT 1045

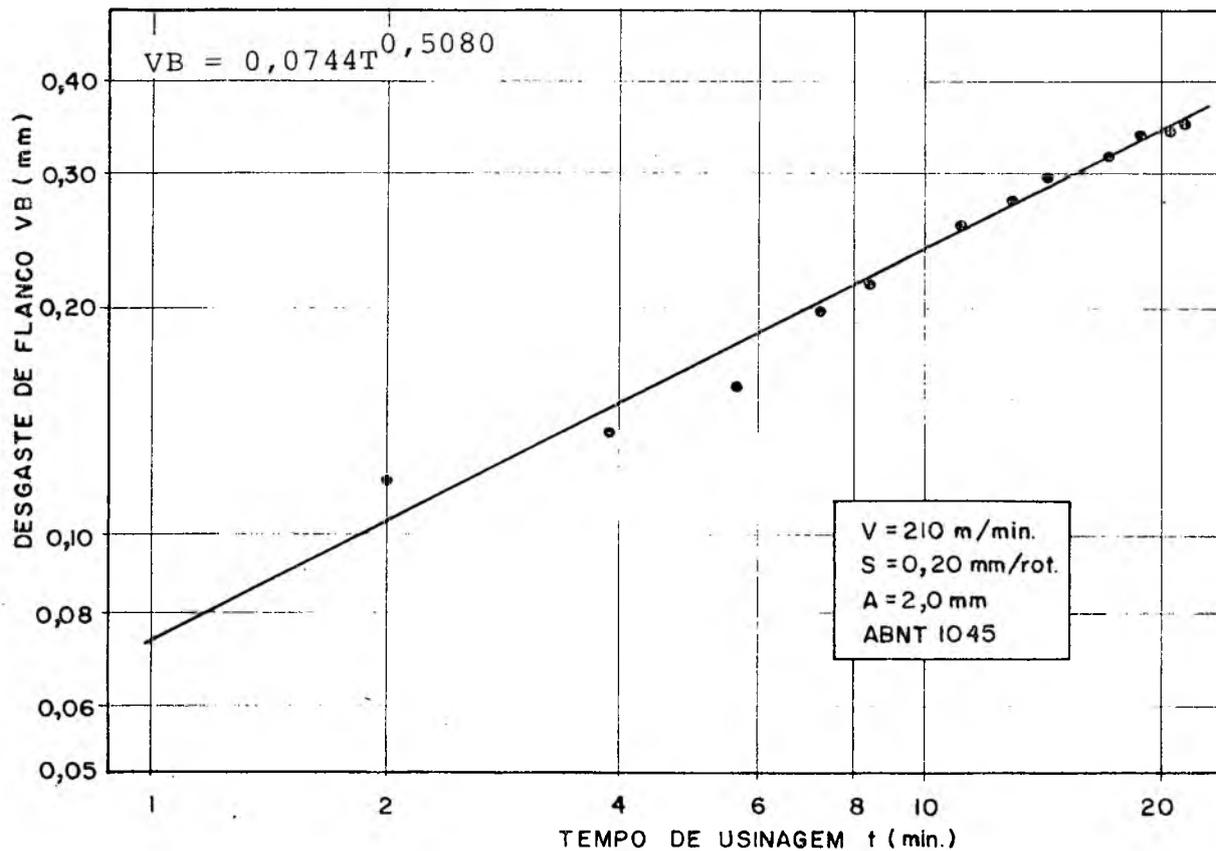


FIG. 31 - Condição de teste 04 do aço ABNT 1045

são apresentados nas tabelas 13 e 14. Entrando-se com estas variáveis no programa TRALE (apêndice II) foram obtidos os parâmetros da fórmula expandida de Taylor, além de serem fornecidos o coeficiente de determinação,  $R^2$ , o desvio padrão, S, e a estatística F. A tabela 15 apresenta as soluções dos sistemas de equações, um do aço ABNT 1038 e outro do aço ABNT 1045, da fórmula expandida de Taylor.

PONTOS	V	S	A	T	VB	PONTOS	V	S	A	T	VB
1	100	0,30	3,0	3,50	0,14	29	180	0,40	3,0	18,00	0,42
2	100	0,30	3,0	7,00	0,17	30	180	0,40	3,0	20,00	0,43
3	100	0,30	3,0	10,50	0,19	31	220	0,30	5,0	1,50	0,18
4	100	0,30	3,0	14,00	0,21	32	220	0,30	5,0	3,00	0,22
5	100	0,30	3,0	17,50	0,22	33	220	0,30	5,0	4,50	0,26
6	100	0,30	3,0	21,00	0,23	34	220	0,30	5,0	6,00	0,29
7	100	0,30	3,0	24,50	0,24	35	220	0,30	5,0	7,50	0,31
8	100	0,30	3,0	28,00	0,26	36	220	0,30	5,0	9,00	0,33
9	100	0,30	3,0	31,50	0,26	37	220	0,30	5,0	10,50	0,35
10	100	0,30	3,0	35,00	0,27	38	220	0,30	5,0	12,00	0,37
11	140	0,60	5,0	1,20	0,08	39	220	0,30	5,0	13,50	0,38
12	140	0,60	5,0	2,40	0,12	40	220	0,30	5,0	15,00	0,40
13	140	0,60	5,0	3,60	0,16	41	140	0,50	1,5	4,00	0,18
14	140	0,60	5,0	4,80	0,20	42	140	0,50	1,5	8,00	0,23
15	140	0,60	5,0	6,00	0,23	43	140	0,50	1,5	12,00	0,27
16	140	0,60	5,0	7,20	0,26	44	140	0,50	1,5	16,00	0,29
17	140	0,60	5,0	8,40	0,29	45	140	0,50	1,5	20,00	0,32
18	140	0,60	5,0	9,60	0,32	46	140	0,50	1,5	24,00	0,34
19	140	0,60	5,0	10,80	0,34	47	140	0,50	1,5	28,00	0,36
20	140	0,60	5,0	12,00	0,37	48	140	0,50	1,5	32,00	0,37
21	180	0,40	3,0	2,00	0,18	49	140	0,50	1,5	36,00	0,39
22	180	0,40	3,0	4,00	0,24	50	140	0,50	1,5	40,00	0,40
23	180	0,40	3,0	6,00	0,28	51	100	0,60	5,0	2,00	0,13
24	180	0,40	3,0	8,00	0,31	52	100	0,60	5,0	4,00	0,16
25	180	0,40	3,0	10,00	0,33	53	100	0,60	5,0	6,00	0,17
26	180	0,40	3,0	12,00	0,36	54	100	0,60	5,0	8,00	0,19
27	180	0,40	3,0	14,00	0,38	55	100	0,60	5,0	10,00	0,20
28	180	0,40	3,0	16,00	0,40	56	100	0,60	5,0	12,00	0,21

PONTOS	V	S	A	T	VB	PONTOS	V	S	A	T	VB
57	100	0,60	5,0	14,00	0,22	69	140	0,30	5,0	31,50	0,41
58	100	0,60	5,0	16,00	0,23	70	140	0,30	5,0	35,00	0,43
59	100	0,60	5,0	18,00	0,24	71	180	0,20	5,0	3,00	0,13
60	100	0,60	5,0	20,00	0,25	72	180	0,20	5,0	6,00	0,18
61	140	0,30	5,0	3,50	0,13	73	180	0,20	5,0	9,00	0,22
62	140	0,30	5,0	7,00	0,19	74	180	0,20	5,0	12,00	0,25
63	140	0,30	5,0	10,50	0,23	75	180	0,20	5,0	15,00	0,28
64	140	0,30	5,0	14,00	0,27	76	180	0,20	5,0	18,00	0,30
65	140	0,30	5,0	17,50	0,30	77	180	0,20	5,0	21,00	0,33
66	140	0,30	5,0	21,00	0,33	78	180	0,20	5,0	24,00	0,35
67	140	0,30	5,0	24,50	0,36	79	180	0,20	5,0	27,00	0,37
68	140	0,30	5,0	28,00	0,38	80	180	0,20	5,0	30,00	0,38

Tabela 13 - Valores das variáveis do sistema de equações da fórmula expandida de Taylor do aço ABNT 1038

PONTOS	V	S	A	T	VB	PONTOS	V	S	A	T	VB
1	240	0,30	2,0	1,50	0,14	19	150	0,40	5,0	21,00	0,28
2	240	0,30	2,0	3,00	0,19	20	150	0,40	5,0	24,00	0,29
3	240	0,30	2,0	4,50	0,22	21	150	0,40	5,0	27,00	0,31
4	240	0,30	2,0	6,00	0,25	22	150	0,40	5,0	30,00	0,32
5	240	0,30	2,0	7,50	0,28	23	150	0,40	5,0	33,00	0,33
6	240	0,30	2,0	9,00	0,30	24	150	0,40	5,0	36,00	0,34
7	240	0,30	2,0	10,50	0,33	25	190	0,60	2,0	1,50	0,11
8	240	0,30	2,0	12,00	0,35	26	190	0,60	2,0	3,00	0,15
9	240	0,30	2,0	13,50	0,36	27	190	0,60	2,0	4,50	0,18
10	240	0,30	2,0	15,00	0,38	28	190	0,60	2,0	6,00	0,20
11	240	0,30	2,0	16,50	0,40	29	190	0,60	2,0	7,50	0,22
12	240	0,30	2,0	18,00	0,42	30	190	0,60	2,0	9,00	0,24
13	150	0,40	5,0	3,00	0,13	31	190	0,60	2,0	10,50	0,25
14	150	0,40	5,0	6,00	0,17	32	190	0,60	2,0	12,00	0,26
15	150	0,40	5,0	9,00	0,20	33	190	0,60	2,0	13,50	0,28
16	150	0,40	5,0	12,00	0,22	34	190	0,60	2,0	15,00	0,29
17	150	0,40	5,0	15,00	0,24	35	190	0,60	2,0	16,50	0,30
18	150	0,40	5,0	18,00	0,26	36	190	0,60	2,0	18,00	0,31

PONTOS	V	S	A	T	VB	PONTOS	V	S	A	T	VB
37	210	0,20	2,0	1,80	0,10	43	210	0,20	2,0	12,60	0,27
38	210	0,20	2,0	3,60	0,14	44	210	0,20	2,0	14,40	0,29
39	210	0,20	2,0	5,40	0,18	45	210	0,20	2,0	16,20	0,31
40	210	0,20	2,0	7,20	0,20	46	210	0,20	2,0	18,00	0,32
41	210	0,20	2,0	9,00	0,23	47	210	0,20	2,0	19,80	0,34
42	210	0,20	2,0	10,80	0,25	48	210	0,20	2,0	21,60	0,35

Tabela 14 - Valores das variáveis do sistema de equações da fórmula expandida de Taylor do aço ABNT 1045

MATERIAL	C	E	F	G	H	R <sup>2</sup>	S	F
ABNT1038	910,64	-0,3297	-0,0366	-0,3808	0,8936	0,837	0,109	96,58
ABNT1045	799,90	-0,1108	-0,1885	-0,2480	0,5646	0,986	0,021	765,32

Tabela 15 - Parâmetros da fórmula expandida de Taylor

A fórmula expandida de Taylor pode então ser escrita da seguinte maneira:

- para o aço ABNT 1038

$$V = 910,64 S^{-0,3297} A^{-0,0366} T^{-0,3808} VB^{0,8936} \quad (46)$$

- e para o aço ABNT 1045

$$V = 799,90 S^{-0,1108} A^{-0,1885} T^{-0,2480} VB^{0,5646} \quad (47)$$

#### 4.3 - Cálculo da Pressão Específica de Corte

Nos experimentos para o cálculo da pressão específica de corte conservou-se a velocidade de corte e a profundidade de corte constantes, variou-se o avanço e mediu-se a força principal de corte. A espessura de corte,  $h$ , variou com a variação de  $S$ , conforme a equação (05).

Da equação (07) tem-se,

$$\frac{F_C}{b} = K_{s11} h^{1-Z} \quad (48)$$

que é uma expressão do tipo,

$$y = p x^q \quad (49)$$

onde:

$$y = \frac{F_C}{b} \quad (50)$$

$$p = K_{s11} \quad (51)$$

$$x = h \quad (52)$$

$$q = 1 - Z \quad (53)$$

Calculando-se o logaritmo dos dois lados da equação (49) tem-se a equação de uma reta,

$$\ln y = \ln p + q \ln x \quad (54)$$

ou seja:  $\ln\left(\frac{F_C}{b}\right) = \ln K_{s11} + (1 - Z) \ln h \quad (55)$

As tabelas 16 e 17 apresentam os resultados das medições da força principal de corte,  $F_C$ , que varia com  $h$ , e os valores calculados de  $F_C/b$  e de  $K_S$ .

A profundidade de corte usada foi 2,0 mm, então da equação (04) tem-se:

$$b = \frac{2}{\text{sen}75^\circ} = 2,07 \text{ mm} \quad (56)$$

S (mm/rot)	h (mm)	$F_C$ (N)	$F_C/b$ (N/mm)	$K_S$ (N/mm <sup>2</sup> )
0,20	0,193	920	444,4	2300,0
0,30	0,290	1240	599,0	2066,7
0,40	0,386	1600	772,9	2000,0
0,50	0,483	1950	942,0	1950,0
0,60	0,580	2350	1135,3	1958,3
0,20	0,193	920	444,4	2300,0
0,30	0,290	1280	618,4	2133,3
0,40	0,386	1600	772,9	2000,0
0,50	0,483	2050	990,3	2050,0
0,60	0,580	2300	1111,1	1916,7

Tabela 16 - Resultados experimentais para o cálculo da pressão específica de corte do aço ABNT 1038

Aplicando-se o modelo (49) aos resultados das tabelas 16 e 17 tem-se:

- para o aço ABNT 1038

$$p = 1770 \therefore K_{s11} = 1770 \text{ N/mm}^2 \quad (57)$$

$$q = 0,85 \therefore 1 - Z = 0,85 \quad (58)$$

coeficiente de determinação,  $R^2$ , igual a 0,99;

- para o aço ABNT 1045

$$p = 1831 \therefore K_{s11} = 1831 \text{ N/mm}^2 \quad (59)$$

$$q = 0,84 \therefore 1 - Z = 0,84 \quad (60)$$

coeficiente de determinação,  $R^2$ , igual a 0,99.

S (mm/rot)	h (mm)	$F_C$ (N)	$F_C/b$ (N/mm)	$K_S$ (N/mm <sup>2</sup> )
0,20	0,193	960	463,8	2400,0
0,30	0,290	1300	628,0	2166,7
0,40	0,386	1660	801,9	2075,0
0,50	0,483	2100	1014,5	2100,0
0,60	0,580	2400	1159,4	2000,0
0,20	0,193	960	463,8	2400,0
0,30	0,290	1320	637,7	2200,0
0,40	0,386	1660	801,9	2075,0
0,50	0,483	2100	1014,5	2100,0
0,60	0,580	2400	1159,4	2000,0
0,20	0,193	980	473,4	2450,0
0,30	0,290	1300	628,0	2166,7
0,40	0,386	1700	821,2	2125,0
0,50	0,483	2100	1014,5	2100,0
0,60	0,580	2400	1159,4	2000,0

Tabela 17 - Resultados experimentais para o cálculo da pressão específica de corte do aço ABNT 1045

As figuras de 32 a 35 apresentam os gráficos de  $F_C/b$  em função de  $h$ , e  $K_S$  em função de  $h$  para os dois materiais ensaiados.

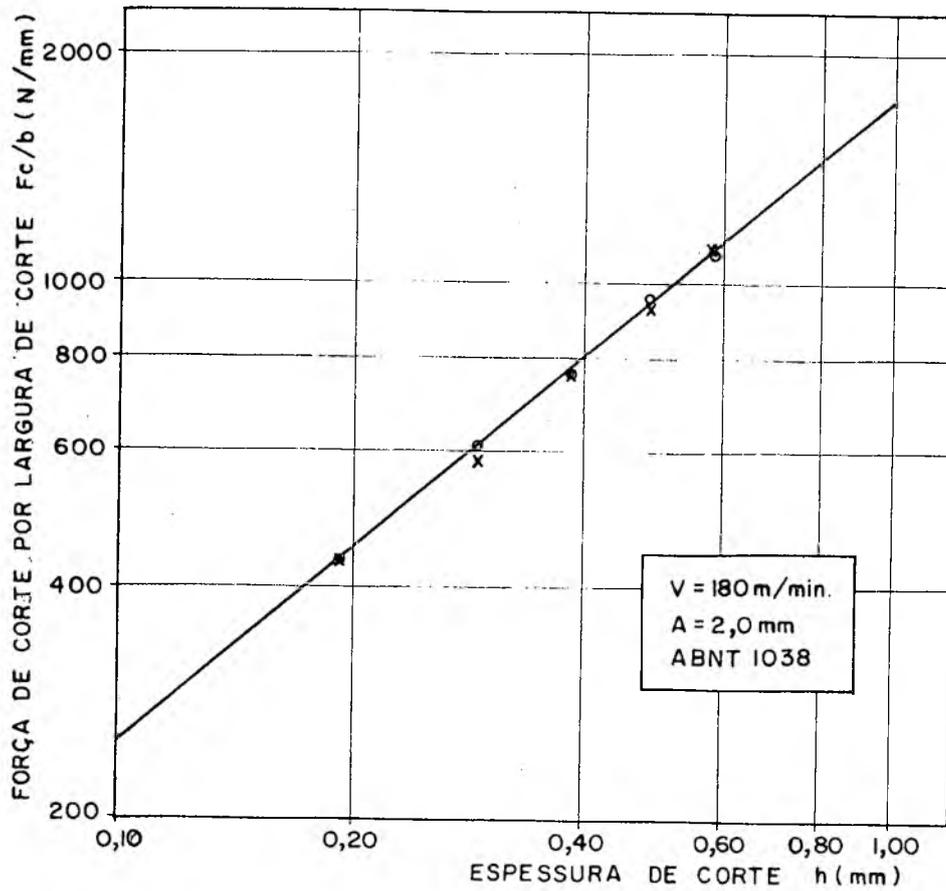


FIG. 32 - Gráfico de  $F_c/b$  versus  $h$  para o aço ABNT 1038

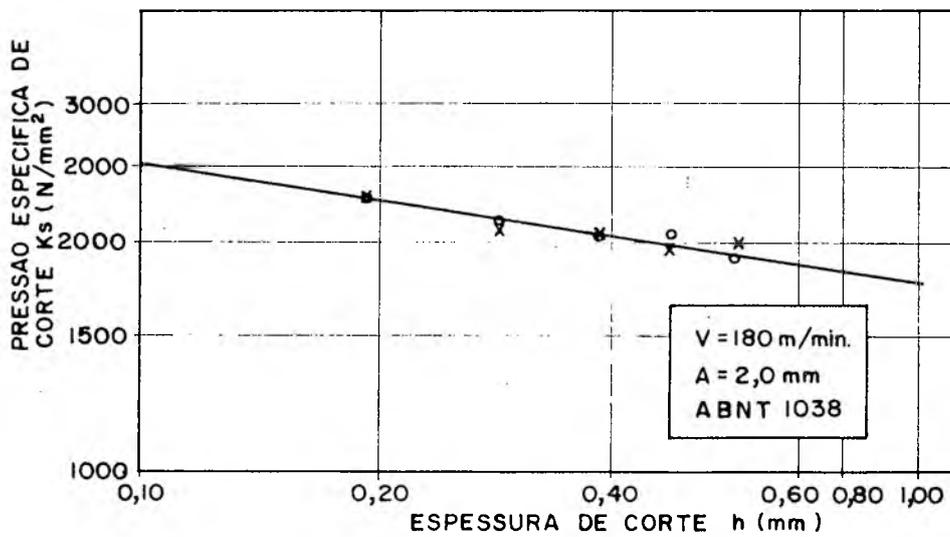


FIG. 33 - Gráfico de  $K_s$  versus  $h$  para o aço ABNT 1038

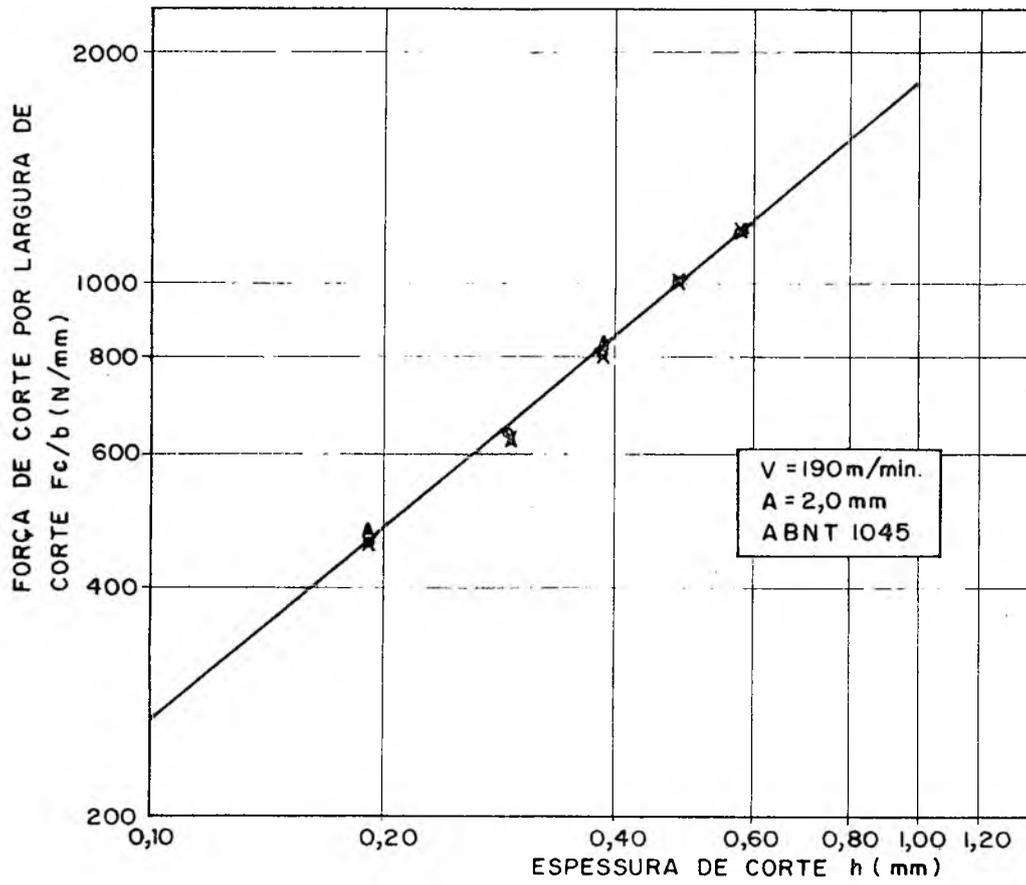


FIG. 34 - Gráfico de  $F_c/b$  versus  $h$  para o aço ABNT 1045

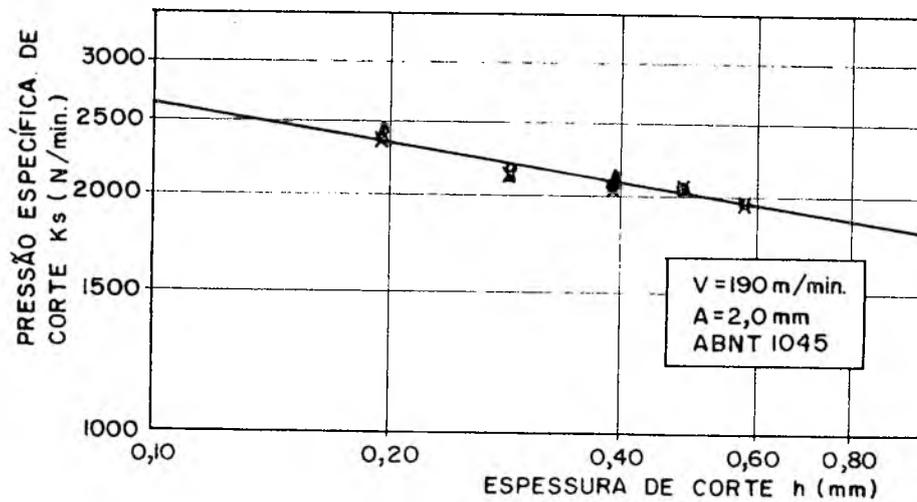


FIG. 35 - Gráfico de  $K_s$  versus  $h$  para o aço ABNT 1045

## 4.4 - Forças de Usinagem

As componentes da força de usinagem:  $F_a$ , força de avanço;

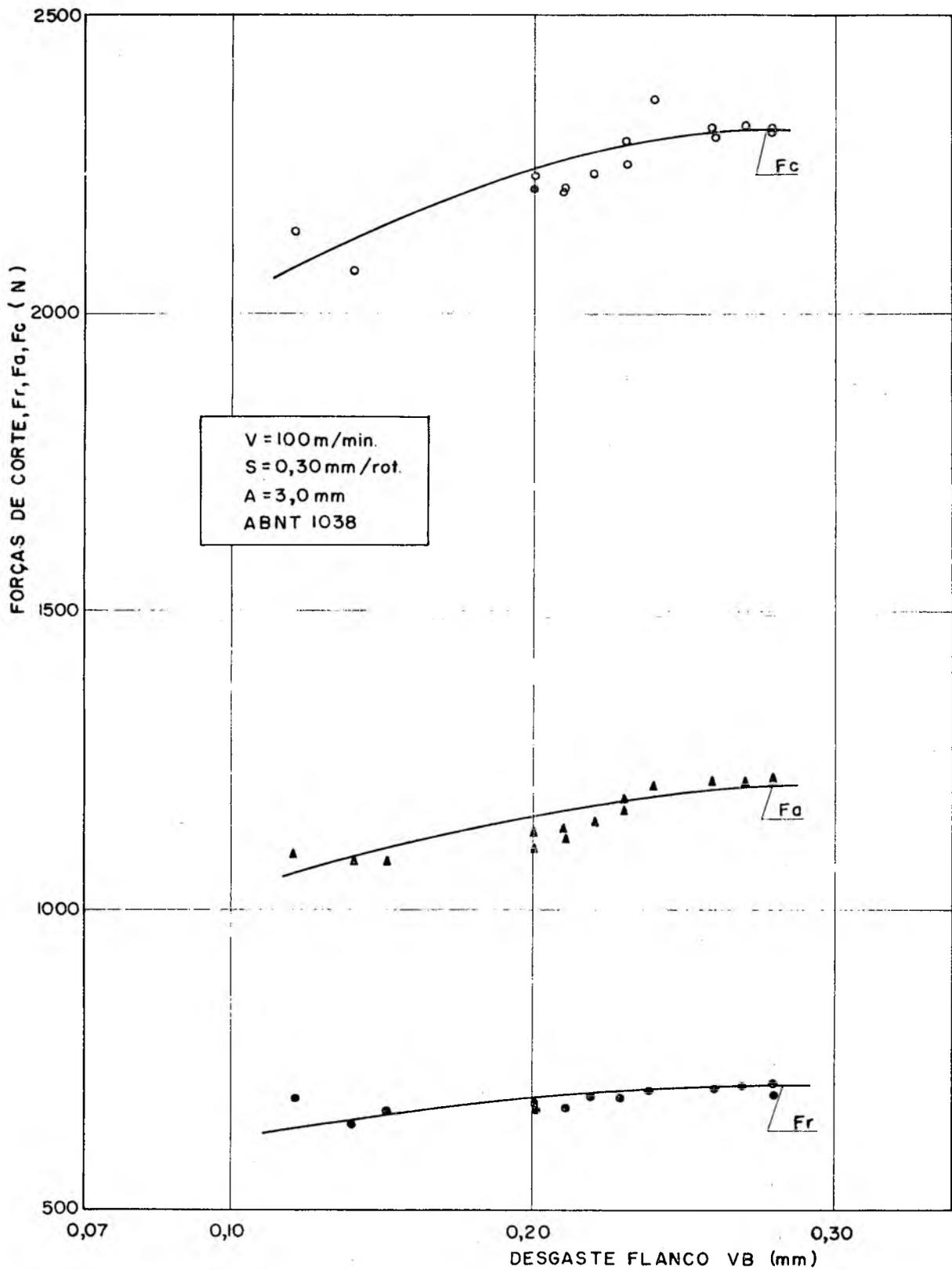


FIG. 36 - Condição de corte 01 do aço ABNT 1038

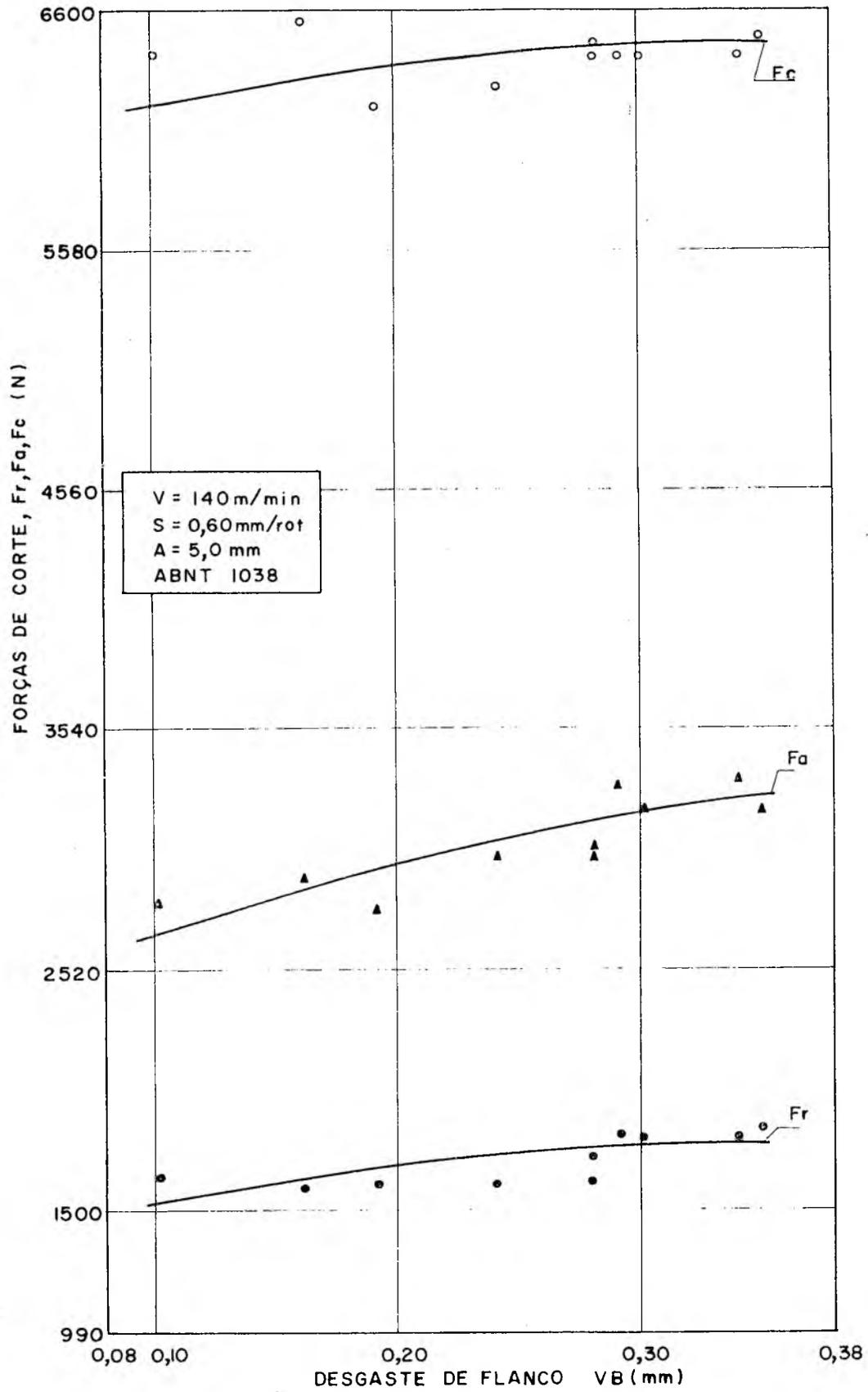


FIG. 37 - Condição de corte 02 do aço ABNT 1038

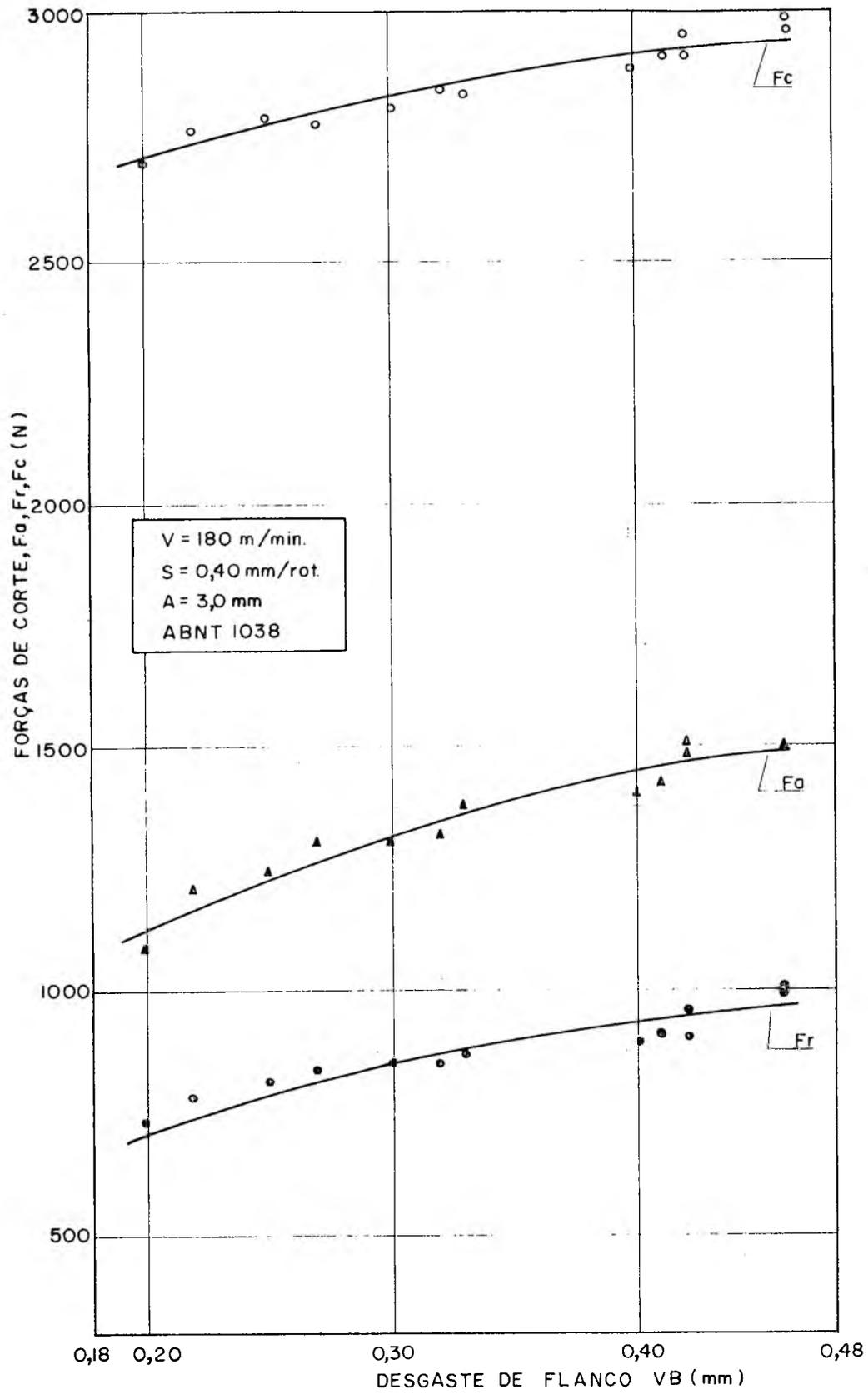


FIG. 38 - Condição de corte 03 do aço ABNT 1038

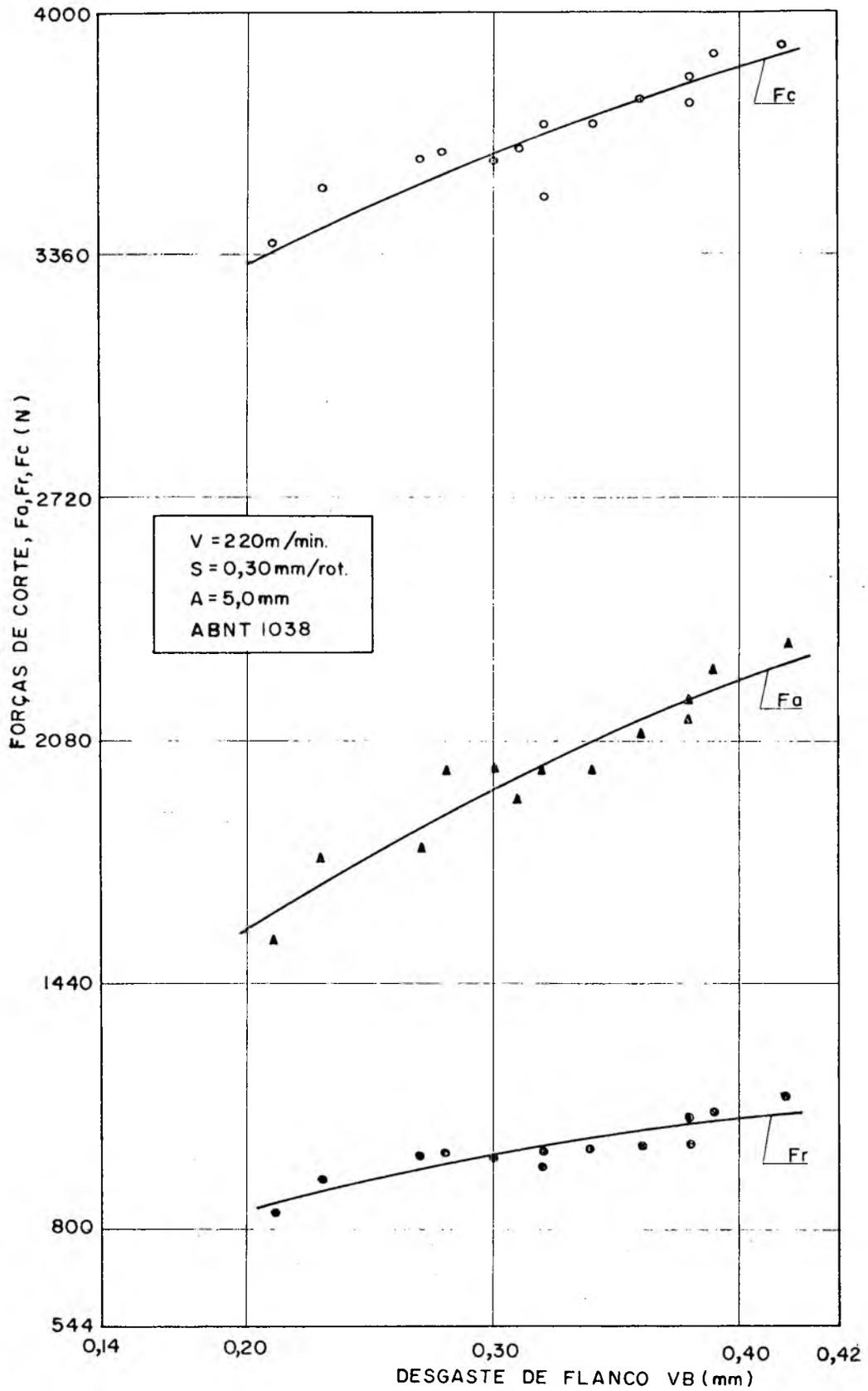


FIG. 39 - Condição de corte 04 do aço ABNT 1038

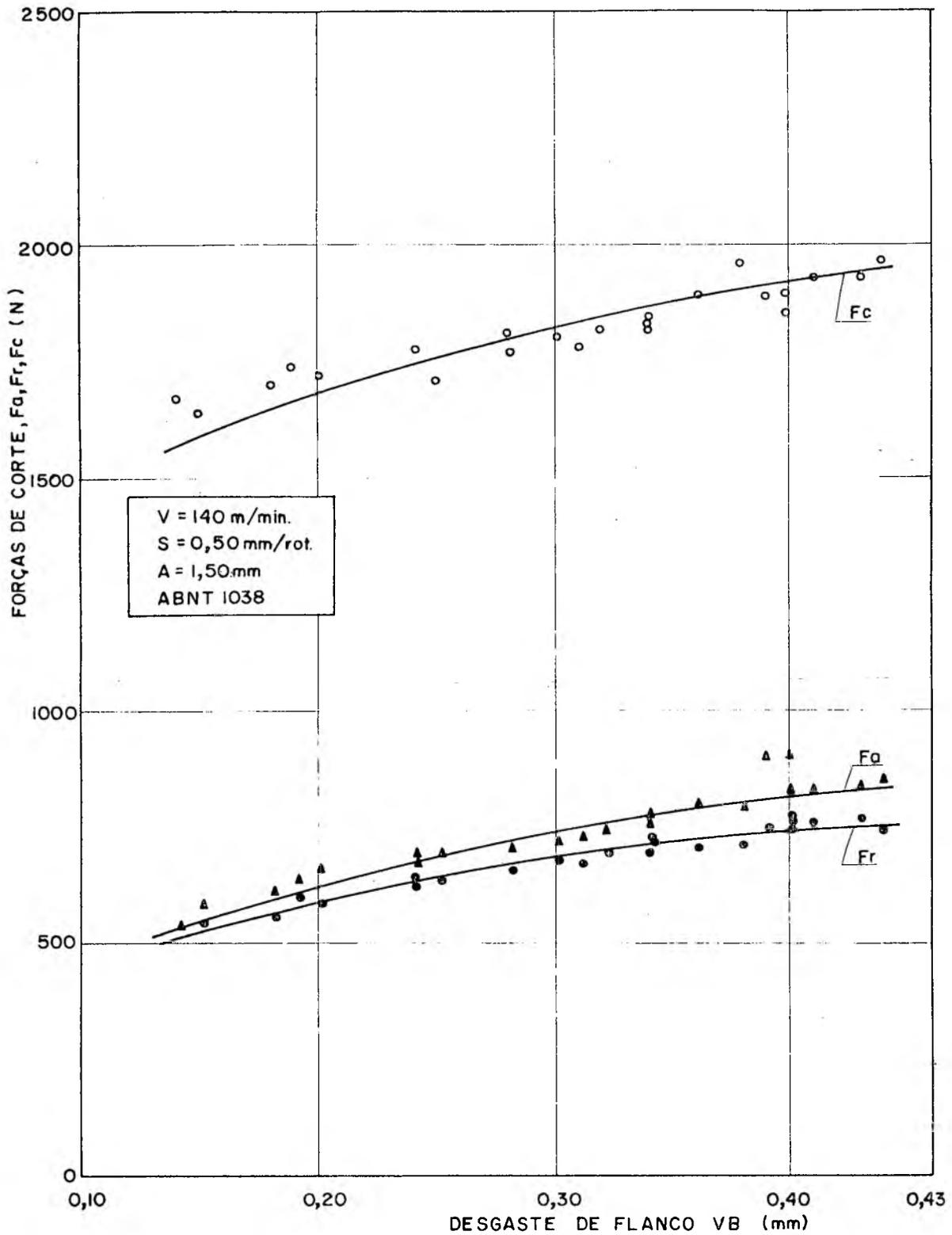


FIG. 40 - Condição de corte 05 do aço ABNT 1038

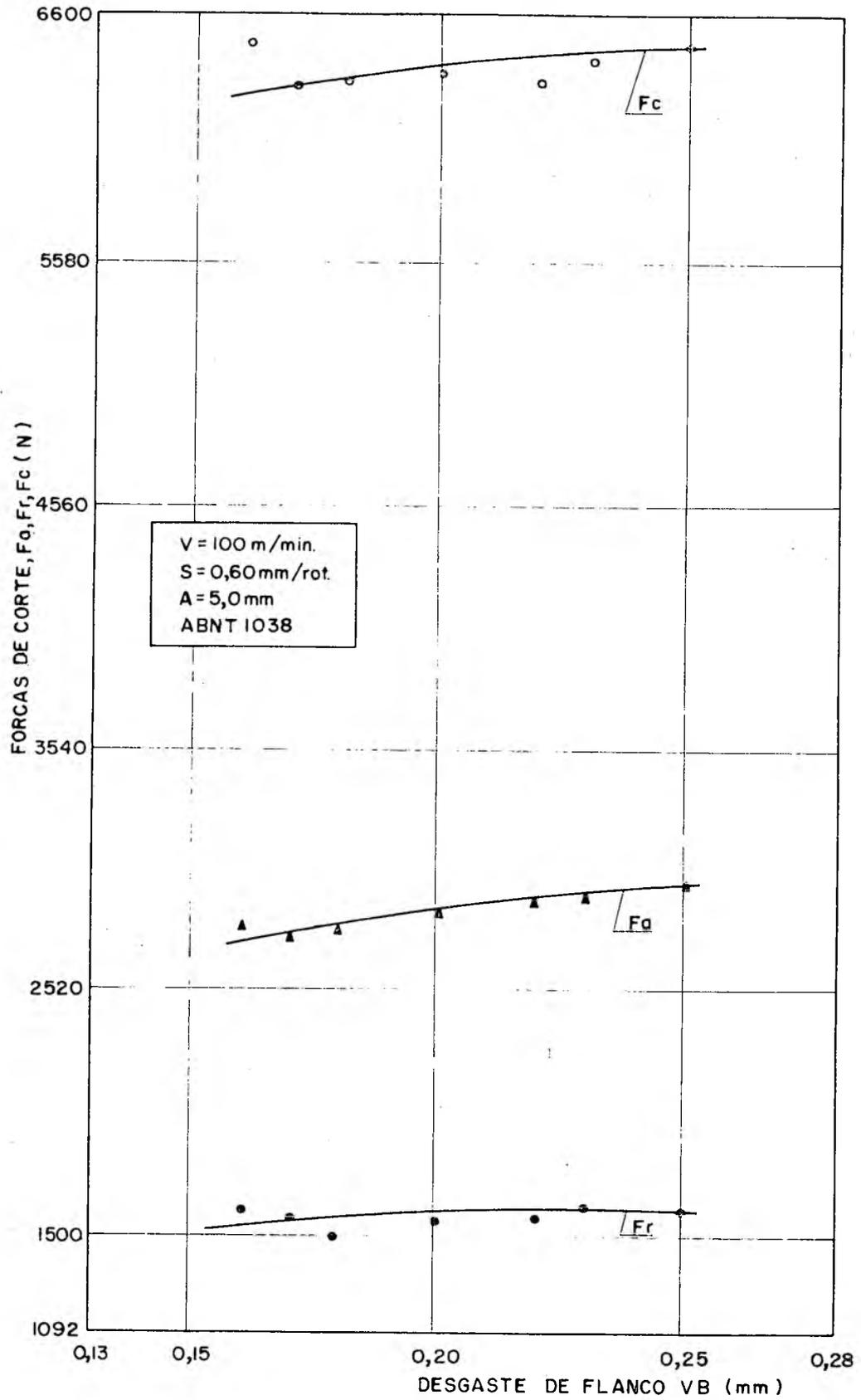


FIG. 41 - Condição de corte 06 do aço ABNT 1038

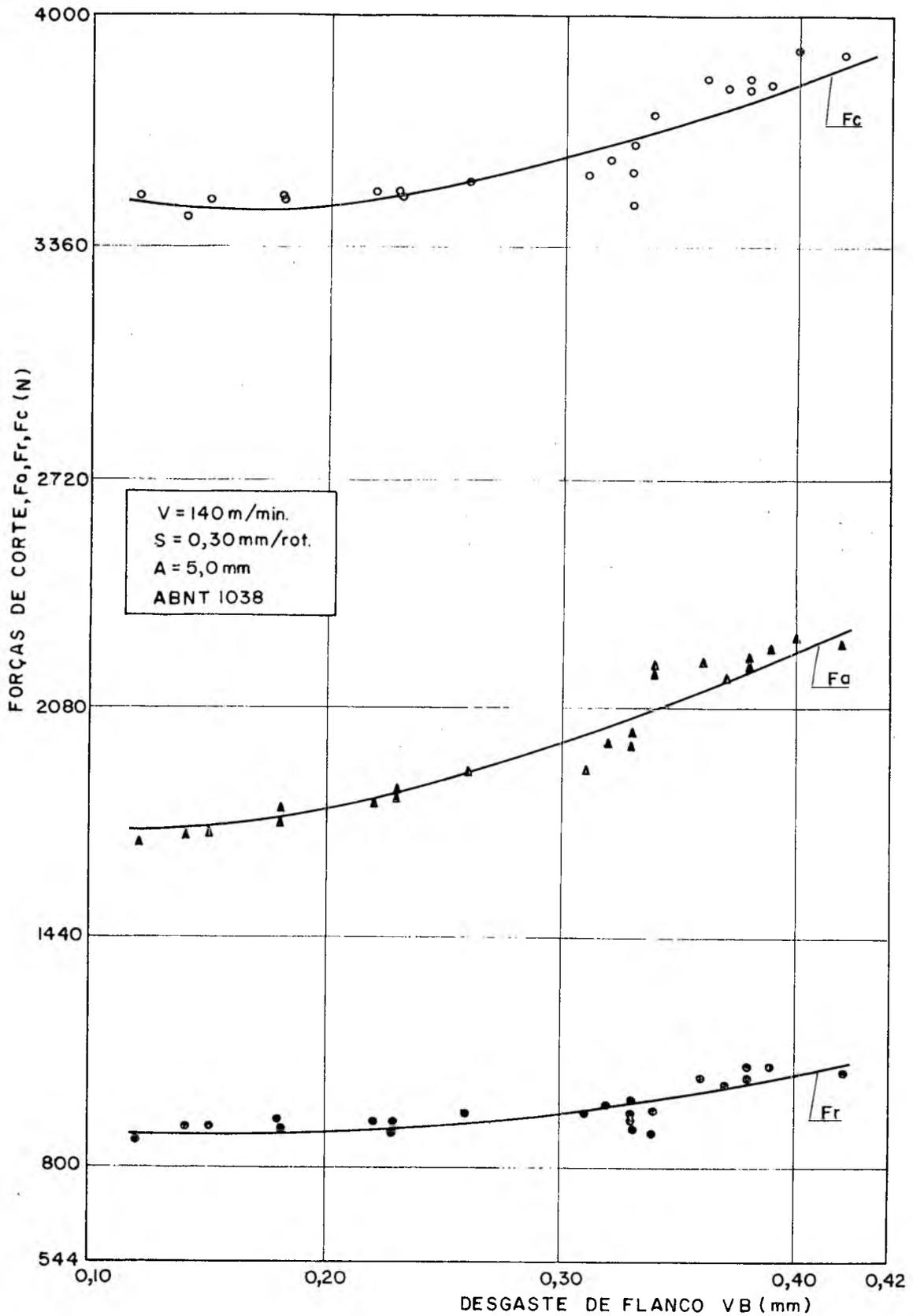


FIG. 42 - Condição de corte 07 do aço ABNT 1038

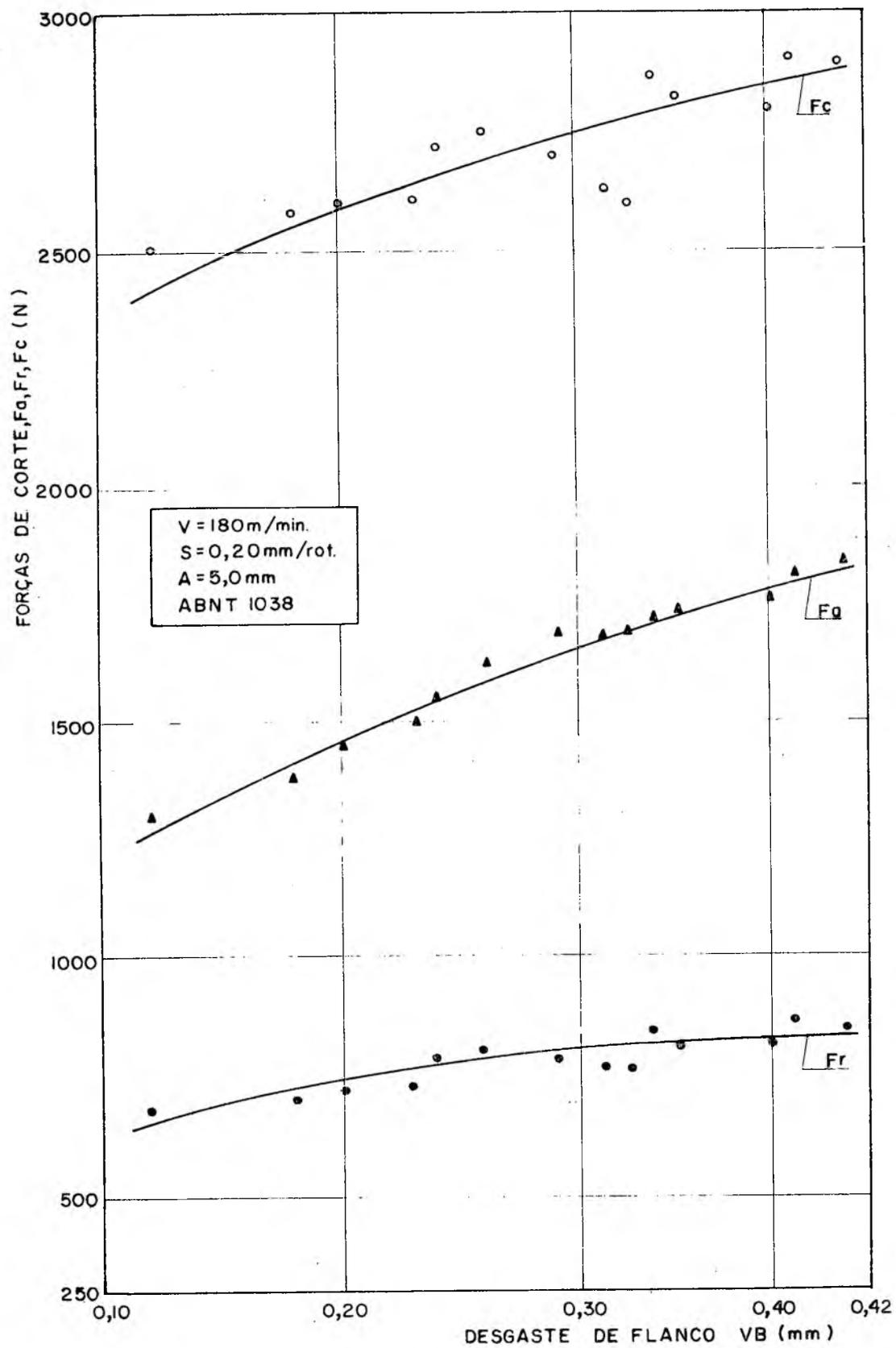


FIG. 43 - Condição de corte 08 do aço ABNT 1038

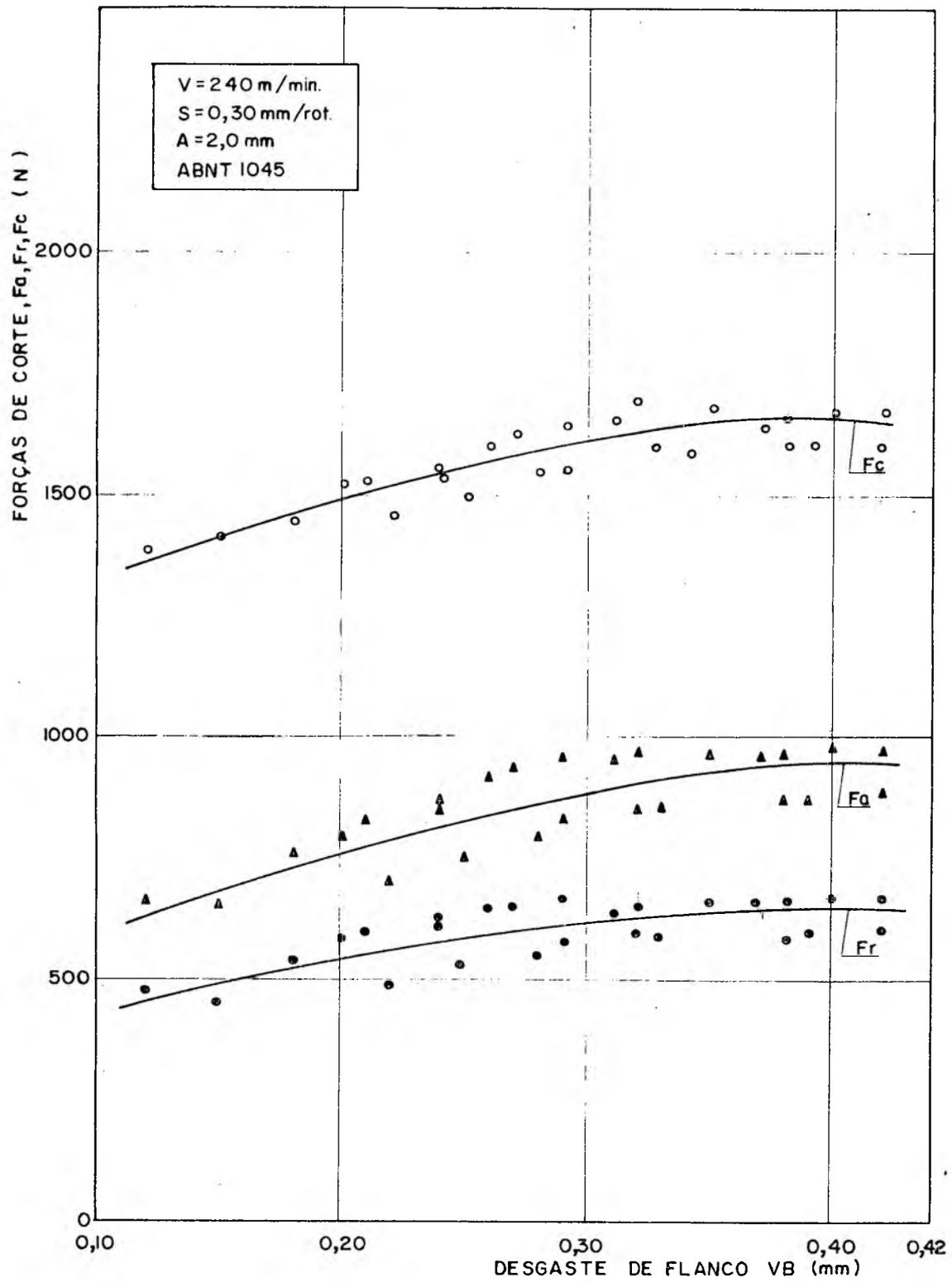


FIG. 44 - Condição de corte 01 do aço ABNT 1045

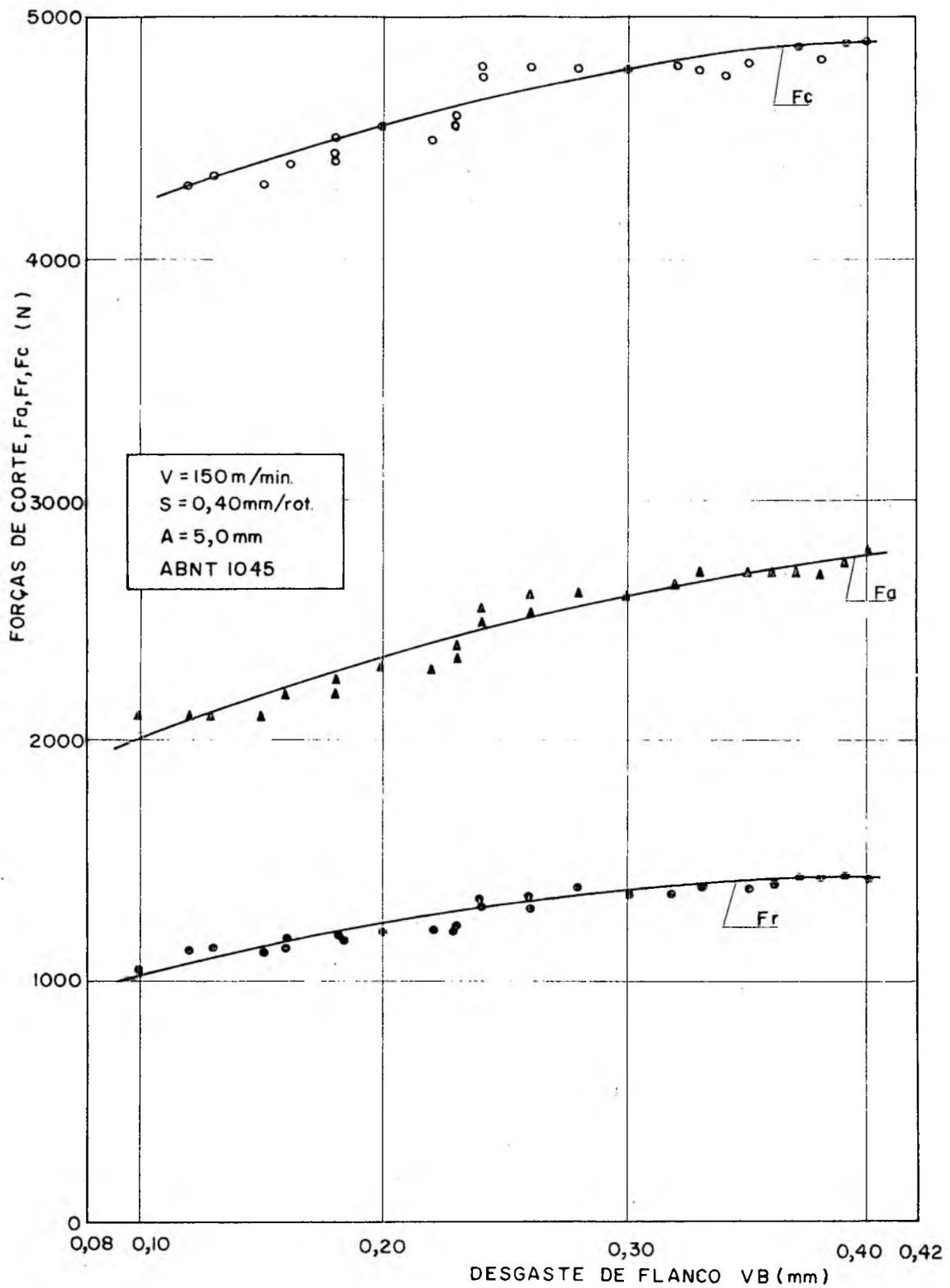


FIG. 45 - Condição de corte 02 do aço ABNT 1045

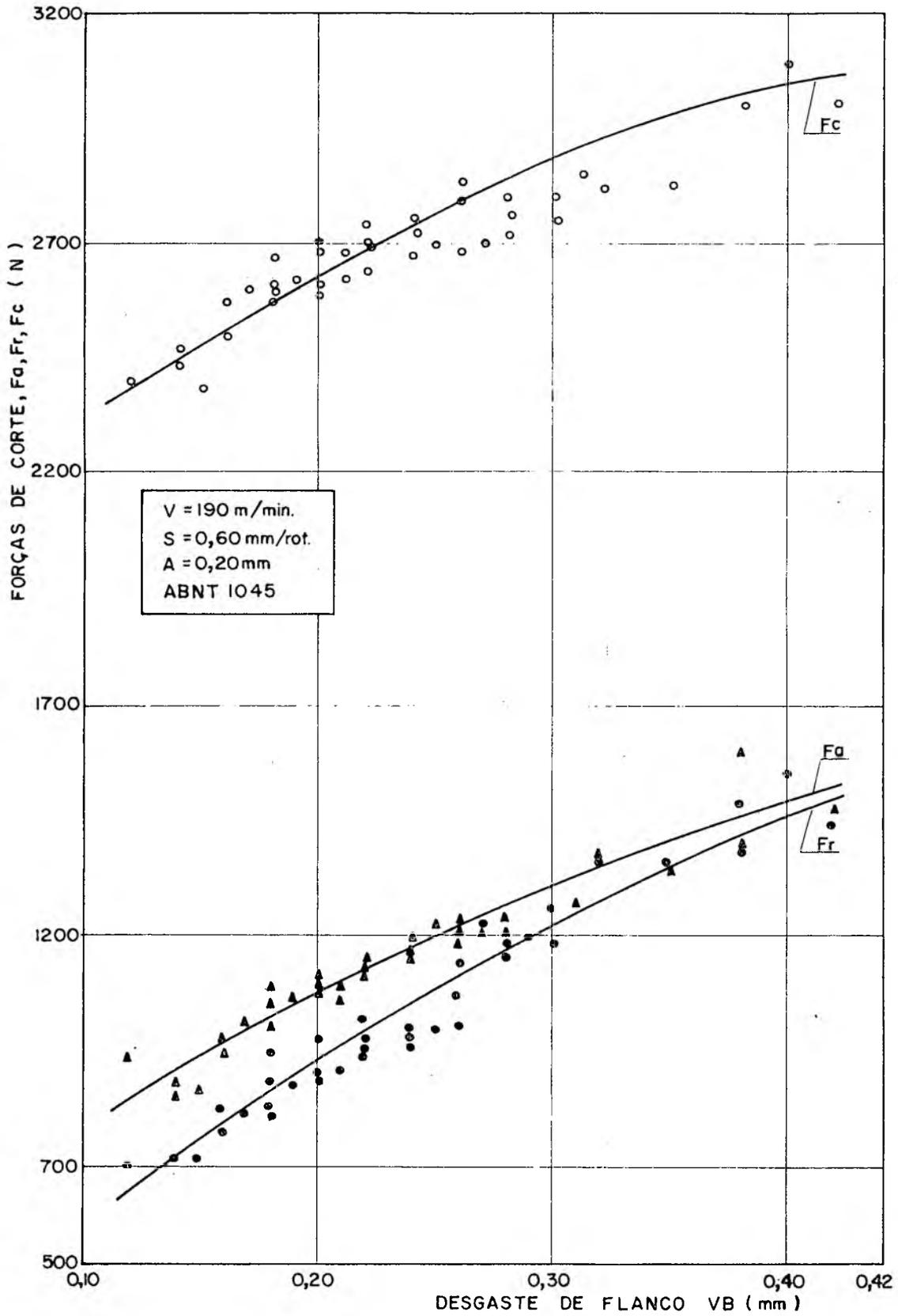


FIG. 46 - Condição de corte 03 do aço ABNT 1045

$F_R$ , força de recuo; e  $F_C$ , força principal de corte; medidas durante os ensaios de usinagem são apresentadas em gráficos nas figuras 36 a 47 e em forma de tabelas no apêndice III.

Através destes gráficos e tabelas pode-se notar que as forças de corte aumentam com o desgaste de flanco da ferramenta e que a força principal de corte é a maior e a força de recuo a menor das três.

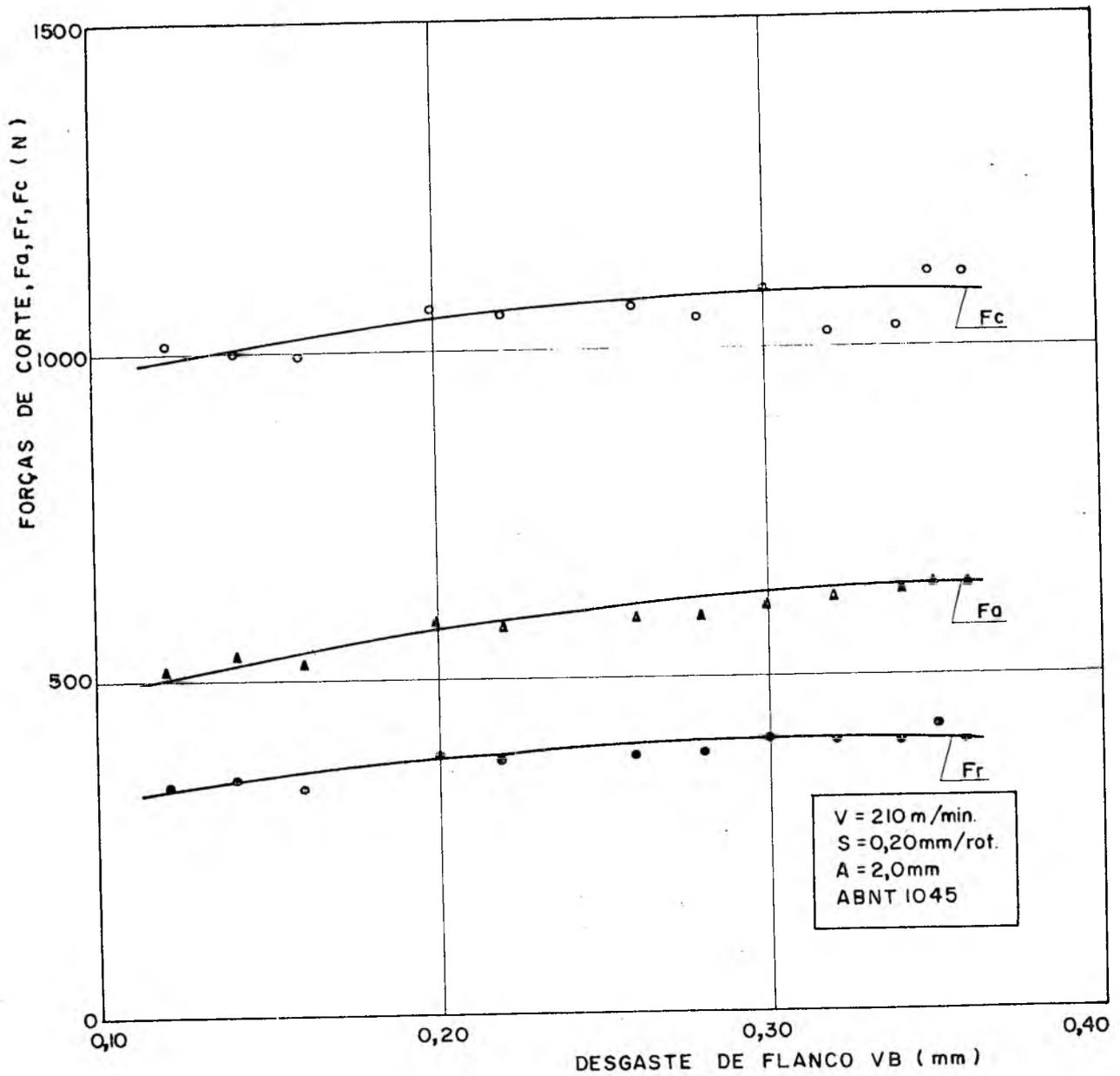


FIG. 47 - Condição de corte 04 do aço ABNT 1045

Neste trabalho não foi levado em consideração o efeito da força de gume e nem os efeitos dos trabalhos tais como o de atrito entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta e o de atrito entre a peça usinada e a superfície de incidência da ferramenta.

## 5 - DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS

### 5.1 - Condição Econômica de Usinagem e a Fórmula Expandida de Taylor

Quando se usa a fórmula expandida de Taylor, o estudo das condições econômicas de usinagem deve levar em consideração três principais variáveis, a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte, uma vez que o desgaste geralmente é fixado de acordo com a condição de trabalho.

Brewer (07) mostrou que quando possível, é mais econômico remover todo o material necessário em um só passe de usinagem. Crookall e Venkataraman (12) indicaram que nem sempre a remoção do material em um só passe de usinagem leva à condição mais econômica. Barrow (03) diz que o estudo de múltiplos passes de usinagem é extremamente complexo, muito duvidoso e faz o estudo considerando a profundidade de corte constante, variando apenas a velocidade de corte e o avanço. Barrow deduz uma expressão para o custo e outra para o tempo de fabricação em função da velocidade de corte e do avanço e prova que estas duas expressões apresentam pontos de mínimos distintos em relação a  $V$  e  $S$ . E ele afirma que sendo a vida da ferramenta mais sensível às variações da velocidade de corte do que às variações do avanço, a melhor condição é geralmente obtida utilizando-se o maior avanço possível.

Baseando-se no estudo destes pesquisadores e através de consultas a outras fontes (16, 01) conclui-se que:

- a fórmula expandida de Taylor não apresenta um único ponto de mínimo em relação às variáveis  $V$ ,  $S$ ,  $A$  e  $VB$ , para o tempo total de fabricação nem para os custos de fabricação;
- sendo a velocidade de corte o fator preponderante na vida da ferramenta deve-se otimizar as condições de corte em relação a ela, mantendo-se os outros fatores constantes;
- o desgaste da ferramenta,  $VB$ , deve ser fixado em relação ao grau de precisão desejado nas dimensões da peça.  $VB$  pode variar de 0,20 mm nas usinagens de acabamento ou de alta precisão até 1,20 mm nas operações de desbaste pesado;
- a profundidade de corte e o avanço, segundo alguns pesquisadores (16), apresentam uma relação  $A/S$ , definida como grau de esbeltez, que varia com mais frequência entre 4 e 10. Na escolha

de A e S deve-se levar em conta, nas operações de desbaste pesado, o torque máximo permitido pela máquina e procurar manter o grau de esbeltez dentro dos valores citados.

Fixados os valores de S, A e VB a equação (09) apresenta-se da seguinte forma:

$$V = C^* T^G \quad (61)$$

onde,

$$C^* = C S^E A^F VB^H \quad (62)$$

Da equação de Taylor,

$$T V^x = K \quad (63)$$

tem-se:

$$V = K^{1/x} T^{-1/x} \quad (64)$$

Sendo as equações (61) e (64) válidas para qualquer velocidade e tempo, dentro de certa faixa de desgaste, pode-se supor,

$$G = - \frac{1}{x} \quad (65)$$

donde:

$$x = - \frac{1}{G} \quad (66)$$

Alguns pesquisadores (19) deduziram para a equação (63) as expressões:

$$T_{mp} = (x - 1) t_{ft} \quad (67)$$

$$T_{mc} = \frac{60(x - 1) C_2}{C_1} \quad (68)$$

onde,

x - é o expoente da equação de Taylor

$T_{mp}$  - é o tempo de vida da ferramenta para a máxima produção

$T_{mc}$  - é o tempo de vida da ferramenta para o mínimo custo

$t_{ft}$  - é o tempo de troca da ferramenta

$C_2$  - são os custos com a ferramenta durante uma vida T e mais os custos de troca, em cruzeiros.

$C_1$  - são os custos de mão de obra e salário máquina, em cruzeiros/hora.

Substituindo-se (66) em (67) e (68) obtêm-se:

$$T_{mp} = \left( -\frac{1}{G} - 1 \right) t_{ft} \quad (69)$$

$$T_{mc} = \frac{60 \left( -\frac{1}{G} - 1 \right) C_2}{C_1} \quad (70)$$

Calculados os tempos para a máxima produção e o mínimo custo, calcula-se as velocidades de máxima produção,  $V_{mp}$ , e de mínimo custo,  $V_o$ , com a equação (61), obtendo-se assim o "intervalo de máxima eficiência".

Os parâmetros  $x$  e  $K$  da equação de Taylor (63) são determinados para um VB, um S e um A fixados. Se uma dessas três variáveis assumir outro valor,  $x$  e  $K$  devem ser novamente determinados experimentalmente. Enquanto que na equação (61),  $G$  é sempre constante,  $C^*$ , uma vez determinados os parâmetros da Taylor expandida, pode sempre ser calculado pela equação (62), qualquer que sejam os valores de S, A e VB, sem que se faça novos experimentos.

## 5.2 - Distribuição do Desgaste de Flanco

Com os dados levantados nos ensaios de usinagem aplicou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov (06), usando-se o mesmo procedimento do item 3.2.1. As tabelas 18 e 19 apresentam os valores calculados da estatística de Kolmogorov-Smirnov.

Para o aço ABNT 1038 tem-se,

$$D_n = 0,0978 \quad (71)$$

$$d_{\alpha,n} = 0,150 \quad (72)$$

sendo:

$$\alpha = 5\% \quad (73)$$

$$n = 80 \quad (74)$$

Para o aço ABNT 1045 tem-se,

$$D_n = 0,0867 \quad (75)$$

$$d_{\alpha,n} = 0,192 \quad (76)$$

sendo:

CLASSES	$f_i$	$F_n(VB)$	$F_o(VB)$	$ F_n(VB) - F_o(VB) $
$0,05 \leq VB \leq 0,10$	$\frac{1}{80} = 0,0125$	$\Phi\left(\frac{0,10 - 0,27}{0,08}\right) = 0,0170$	$ 0,0125 - 0,0170  = 0,0045$	
$0,11 \leq VB \leq 0,16$	$\frac{8}{80} = 0,1000$	$\Phi\left(\frac{0,16 - 0,27}{0,08}\right) = 0,0853$	$ 0,1000 - 0,0853  = 0,0147$	
$0,17 \leq VB \leq 0,22$	$\frac{25}{80} = 0,3125$	$\Phi\left(\frac{0,22 - 0,27}{0,08}\right) = 0,2676$	$ 0,3125 - 0,2676  = 0,0449$	
$0,23 \leq VB \leq 0,28$	$\frac{44}{80} = 0,5500$	$\Phi\left(\frac{0,28 - 0,27}{0,08}\right) = 0,4522$	$ 0,5500 - 0,4522  = 0,0978$	
$0,29 \leq VB \leq 0,34$	$\frac{59}{80} = 0,7375$	$\Phi\left(\frac{0,34 - 0,27}{0,08}\right) = 0,8106$	$ 0,7375 - 0,8106  = 0,0731$	
$0,35 \leq VB \leq 0,40$	$\frac{76}{80} = 0,9500$	$\Phi\left(\frac{0,40 - 0,27}{0,08}\right) = 0,9474$	$ 0,9500 - 0,9474  = 0,0026$	
$0,41 \leq VB \leq 0,46$	$\frac{80}{80} = 1,0000$	$\Phi\left(\frac{0,46 - 0,27}{0,08}\right) = 0,9913$	$ 1,0000 - 0,9913  = 0,0087$	

Tabela 18 - Teste de Kolmogorov-Smirnov para o aço ABNT 1038

CLASSES	$f_i$	$F_n$ (VB)	$F_o$ (VB)	$ F_n(VB) - F_o(VB) $
$0,10 \leq VB \leq 0,146$	5	$\frac{5}{48} = 0,1042$	$\Phi\left(\frac{0,146 - 0,253}{0,077}\right) = 0,0823$	$ 0,1042 - 0,0823  = 0,0219$
$0,147 \leq VB \leq 0,193$	5	$\frac{10}{48} = 0,2083$	$\Phi\left(\frac{0,193 - 0,253}{0,077}\right) = 0,2177$	$ 0,2083 - 0,2177  = 0,0094$
$0,194 \leq VB \leq 0,240$	9	$\frac{19}{48} = 0,3958$	$\Phi\left(\frac{0,240 - 0,253}{0,077}\right) = 0,4325$	$ 0,3958 - 0,4325  = 0,0367$
$0,241 \leq VB \leq 0,287$	9	$\frac{28}{48} = 0,5833$	$\Phi\left(\frac{0,287 - 0,253}{0,077}\right) = 0,6700$	$ 0,5833 - 0,6700  = 0,0867$
$0,288 \leq VB \leq 0,334$	12	$\frac{40}{48} = 0,8333$	$\Phi\left(\frac{0,334 - 0,253}{0,077}\right) = 0,8531$	$ 0,8333 - 0,8531  = 0,0198$
$0,335 \leq VB \leq 0,381$	6	$\frac{46}{48} = 0,9583$	$\Phi\left(\frac{0,381 - 0,253}{0,077}\right) = 0,9515$	$ 0,9583 - 0,9515  = 0,0068$
$0,382 \leq VB \leq 0,428$	2	$\frac{48}{48} = 1,0000$	$\Phi\left(\frac{0,428 - 0,253}{0,077}\right) = 0,9884$	$ 1,0000 - 0,9884  = 0,0116$

Tabela 19 - Teste de Kolmogorov-Smirnov para o aço ABNT 1045

$$\alpha = 5\%$$

$$n = 48$$

Em ambos os casos  $D_n$  é menor que  $d_{\alpha,n}$  e portanto o desgaste de flanco da ferramenta, VB, tem uma distribuição normal, como havia-se suposto a partir do estudo feito sobre o tipo de distribuição de VB com os dados experimentais do apêndice I. Assim sendo o erro cometido, ao usar a expressão (34) para o cálculo do tamanho da amostra, foi mantido dentro dos limites admissíveis.

### 5.3 - Comparações com Materiais Alemães

De acordo com a bibliografia consultada, não encontrou-se, para os dois materiais utilizados nos ensaios de usinagem e caracterizados no item 3.3, materiais correspondentes nas normas alemãs, (24, 29).

Porém o aço ABNT 1038 pode ser classificado dentro de uma faixa inferior do DIN 11191 e o ABNT 1045 numa faixa superior deste mesmo material segundo suas composições químicas.

A tabela 20 apresenta os valores dos parâmetros da fórmula expandida de Taylor e os valores dos parâmetros da fórmula de Kienzle para o DIN 11191 bem como dos dois materiais nacionais, (30). As tensões de ruptura, tensões de escoamento e alongamento dos três materiais também são apresentados na tabela 20.

Supõe-se que estes parâmetros diferem pelo fato destes materiais apresentarem diferentes propriedades mecânicas.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	MATERIAIS		
	ABNT 1038	ABNT 1045	DIN 11191
$\sigma_{rup}$ (N/mm <sup>2</sup> )			
$\sigma_{esc}$ (N/mm <sup>2</sup> )	608	663	600 a 720
$\delta$ (%)	302	338	320 a 340
	25	21	16 a 18
PARÂMETROS DE KIENZLE			
$K_{S11}$ (N/mm <sup>2</sup> )	1770	1831	1480
$l - z$	0,85	0,84	0,72
PARÂMETROS DE TAYLOR			
C	910,64	799,90	463
E	-0,3297	-0,1108	-0,30
F	-0,0366	-0,1885	-0,07
G	-0,3808	-0,2480	-0,22
H	0,8936	0,5646	0,56

Tabela 20 - Parâmetros e propriedades dos materiais ensaiados e um correspondente material alemão.

## 5.4 - Testes Comparativos e Valores Estatísticos

Após a obtenção dos parâmetros da fórmula expandida de Taylor foi feito mais um teste com cada um dos materiais usinados, para verificar as expressões (46) e (47). As condições destes testes, que foram diferentes das condições das tabelas 07 e 08, foram as seguintes:

- para o aço ABNT 1038,

$$V = 180 \text{ m/min}$$

$$S = 0,30 \text{ mm/rot}$$

$$A = 3,0 \text{ mm}$$

- para o aço ABNT 1045,

$$V = 190 \text{ m/min}$$

$$S = 0,30 \text{ mm/rot}$$

$$A = 4,0 \text{ mm}$$

Substituindo-se estes valores de V, S e A nas expressões (46) e (47) respectivamente, obtêm-se as seguintes equações:

- para o ABNT 1038

$$VB = 0,10993 T^{0,4261} \quad (79)$$

- para o ABNT 1045

$$VB = 0,0983 T^{0,4392} \quad (80)$$

As tabelas 21 e 22 apresentam os valores dos desgastes medidos nos diversos tempos cronometrados nestes testes.

T(min)	VB(mm)
3,65	0,16
6,23	0,21
8,63	0,25
10,00	0,26
15,93	0,29
17,51	0,30
19,01	0,32
20,88	0,34
22,50	0,36
24,43	0,38
26,41	0,40

Tabela 21-Teste final do ABNT 1038

T(min)	VB(mm)
2,00	0,14
4,00	0,16
6,00	0,19
8,13	0,22
10,43	0,26
11,97	0,28
13,97	0,30
15,77	0,32
18,00	0,33
20,00	0,35
22,00	0,37
23,63	0,39
25,33	0,40

Tabela 22-Teste final do ABNT 1045

Aplicando-se os modelos (42), (43), (44) e (45), do item 4.2, aos pontos das tabelas 21 e 22 comprovou-se ser o modelo (45) o mais representativo para equacionar o desgaste de flanco em função do tempo de usinagem.

As equações então obtidas foram as seguintes:

- para o aço ABNT 1038

$$VB = 0,0948 T^{0,4249} \quad (81)$$

com um coeficiente de determinação,  $R^2$ , igual a 0,98;

- para o aço ABNT 1045

$$VB = 0,0919 T^{0,4462} \quad (82)$$

com um coeficiente de determinação,  $R^2$ , igual a 0,98.

As equações (81) e (82) são dessa forma as equações das curvas que melhor se ajustam aos pontos das tabelas 21 e 22. As equações (79) e (80) foram calculadas a partir das fórmulas expandidas de Taylor (46) e (47). Convém lembrar que as expressões (46) e (47) foram obtidas variando-se  $V$ ,  $S$  e  $A$ , daí a razão das equações (79) e (80) não se ajustarem tão bem, quanto as equações (81) e (82), aos pontos das tabelas 21 e 22, respectivamente.

As figuras 48 e 49 mostram os gráficos de  $VB$  versus  $T$  em escalas bilogarítmicas, onde as linhas tracejadas representam as equações do modelo (45), do item 4.2, e as linhas cheias as equações obtidas a partir das fórmulas de Taylor expandida.

Obtidos os parâmetros da fórmula expandida de Taylor foram estimadas as velocidades,  $V_i$ , com  $i = 1, \dots, 80$  para o aço ABNT 1038 e  $i = 1, \dots, 48$  para o ABNT 1045. O apêndice IV apresenta as variações percentuais entre as velocidades verdadeiras (experimentais) e as estimadas a partir da fórmula expandida de Taylor. As figuras 50 e 51 apresentam os gráficos destas velocidades, onde as áreas hachuradas representam as dispersões das velocidades calculadas.

O valor da estatística  $F$  fornecida pelo programa TRALE (ver apêndice II) e apresentado na tabela 15 foi:

- para o aço ABNT 1038,  $F = 96,59$  (83);

- para o aço ABNT 1045,  $F = 765,32$  (84).

Para um nível de significância de 5% o valor tabelado de  $F$  é igual a 2,51 para o ABNT 1038, que teve 80 observações, e pa-

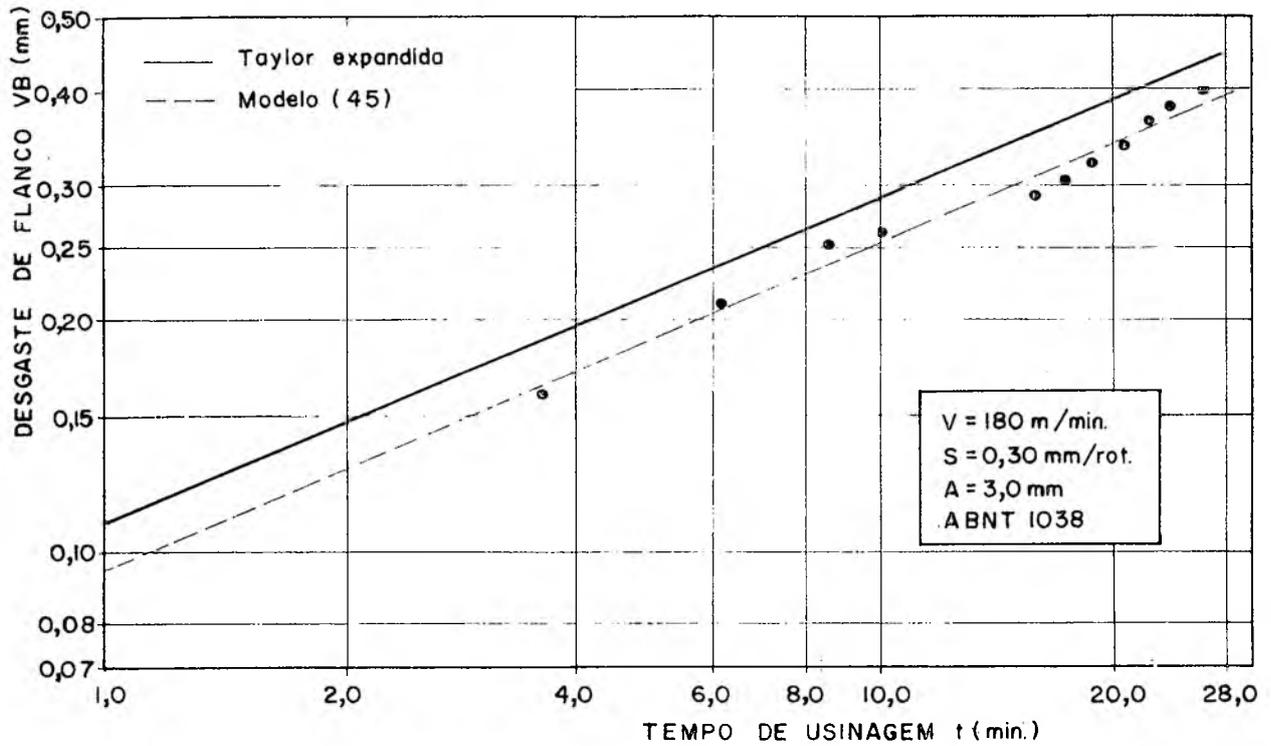


FIG. 48 - Teste final do ABNT 1038

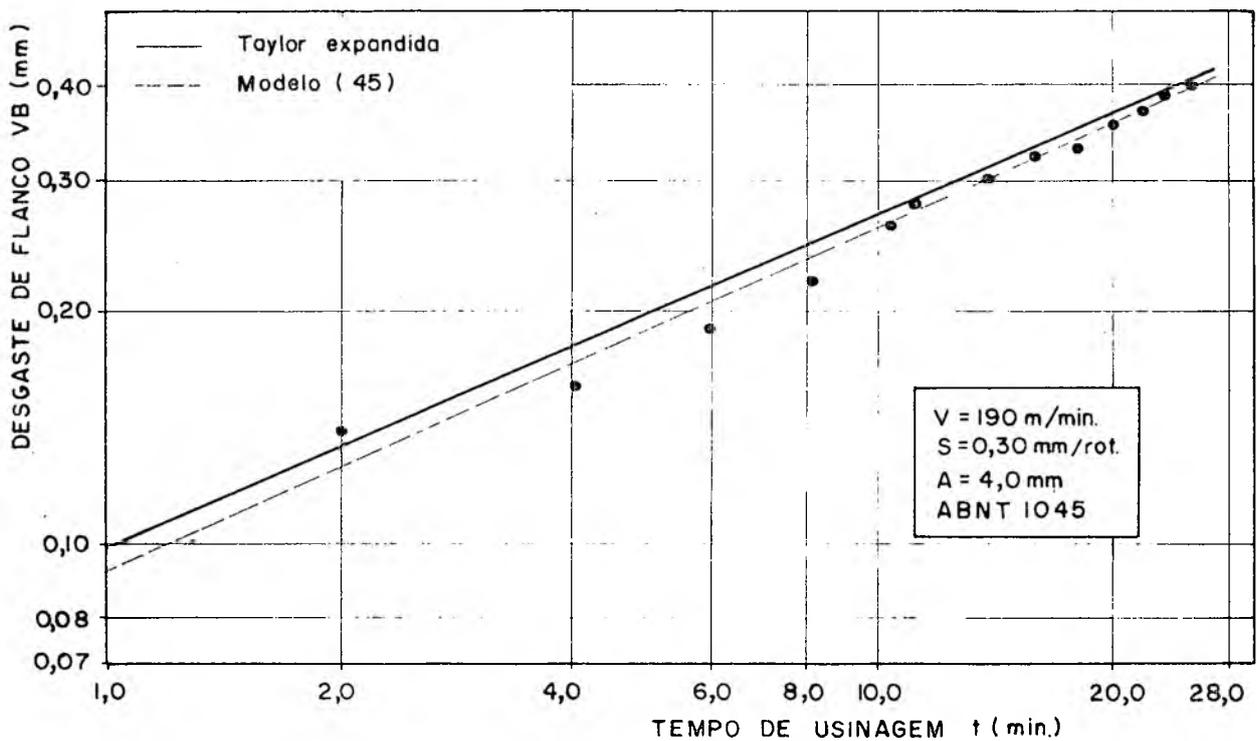


FIG. 49 - Teste final do ABNT 1045

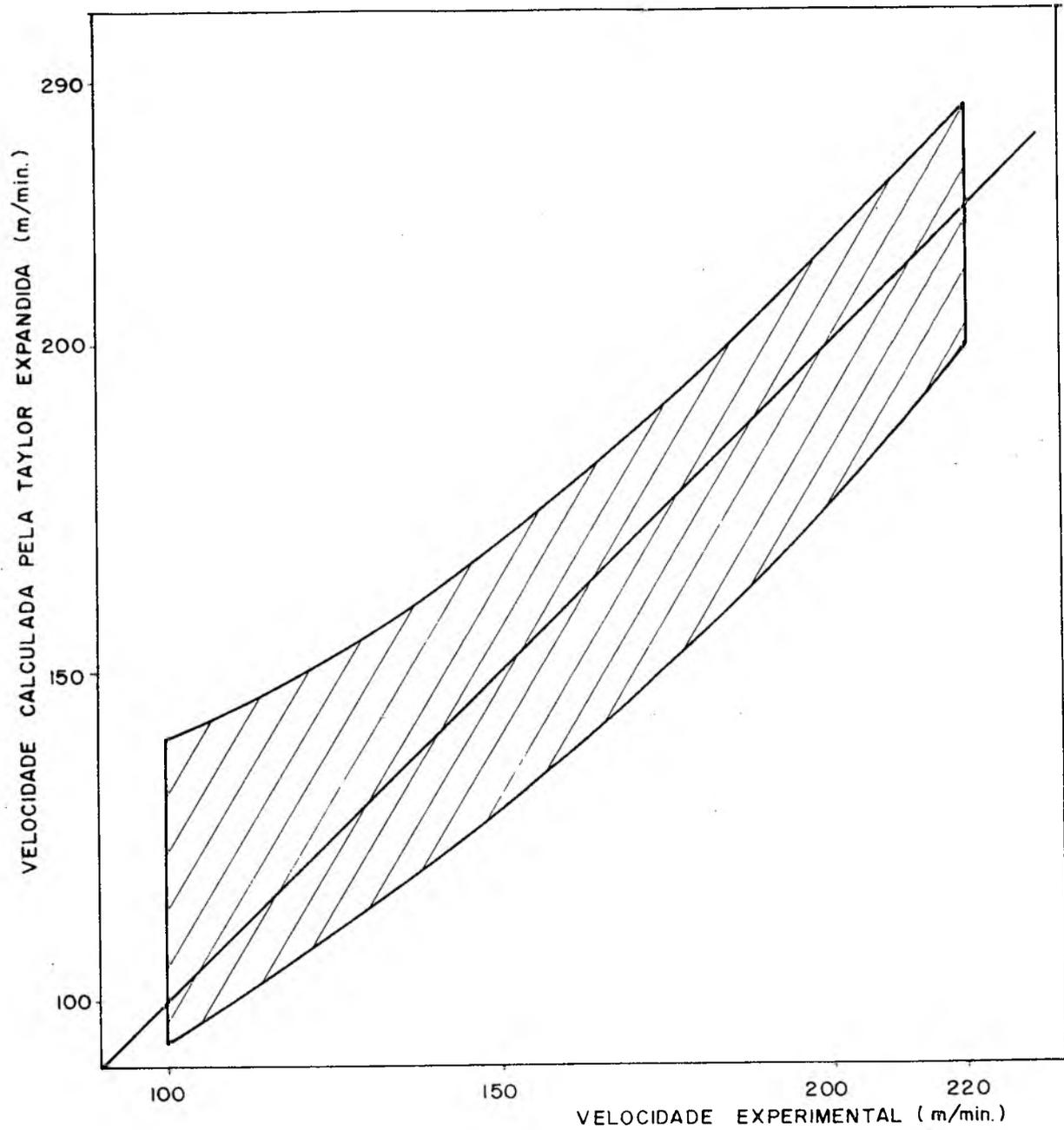


FIG. 50 - Gráfico das velocidades experimentais versus velocidades calculadas pela fórmula de Taylor expandida, aço ABNT 1038.

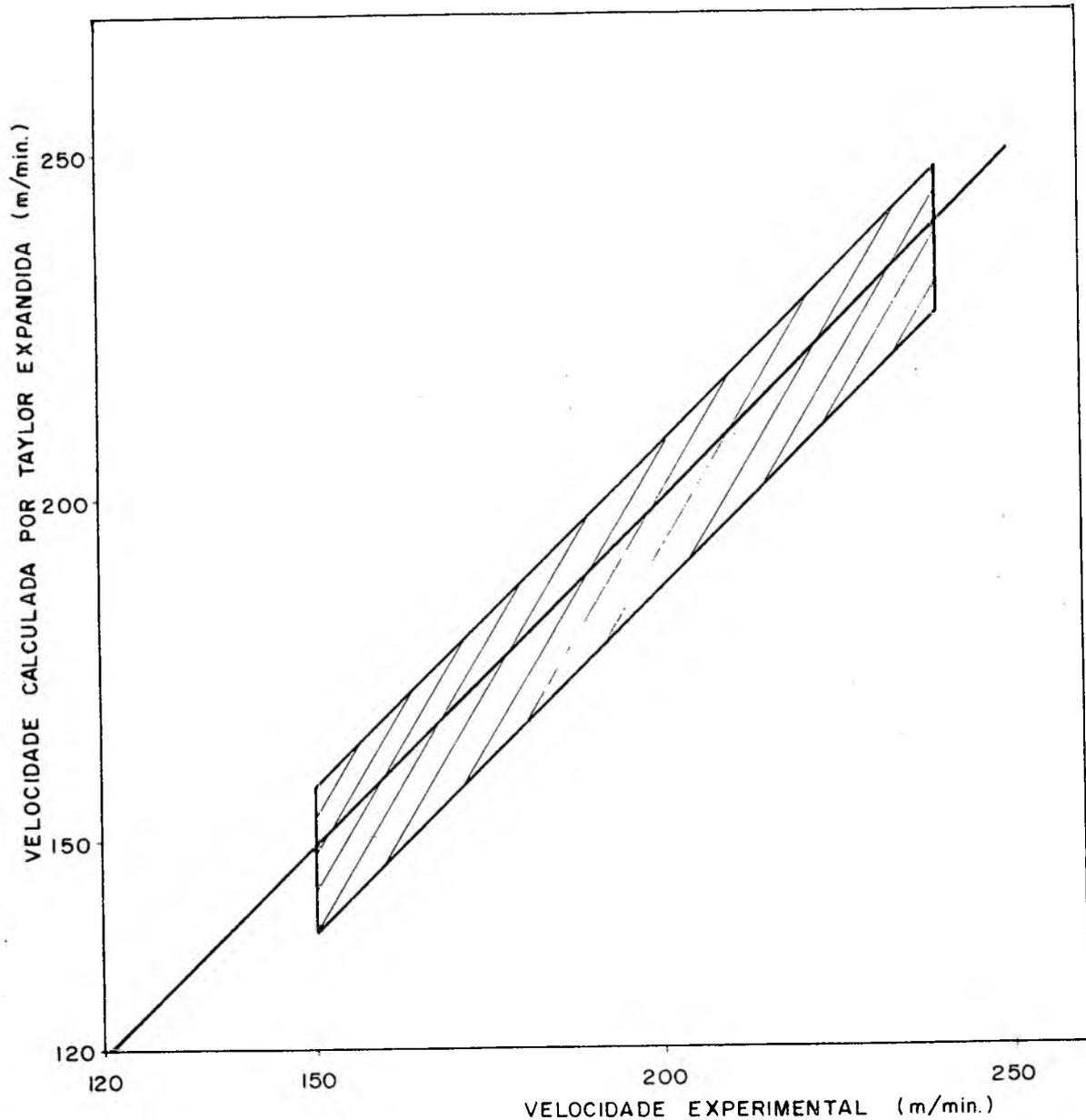


FIG. 51 - Gráfico das velocidades experimentais versus velocidades calculadas pela fórmula de Taylor expandida, aço ABNT 1045

ra o ABNT 1045, que teve 48 observações, o valor tabelado de  $F$  é 2,598, (20). Em ambos os casos o valor de  $F$  tabelado é menor que o  $F$  calculado, isto mostra que a expressão (09) se ajusta aos pontos levantados experimentalmente.

A partir dos valores do coeficiente de determinação,  $R^2$ , iguais a 0,837 e 0,986 para os aços ABNT 1038 e 1045 respectiva-

mente, calcula-se os valores do coeficiente de correlação, R:

- para o aço ABNT 1038

$$R = \sqrt{0,837} \quad \therefore \quad R = 0,91 \quad (85);$$

- para o aço ABNT 1045

$$R = \sqrt{0,986} \quad \therefore \quad R = 0,99 \quad (86).$$

Alguns autores (11) classificam de "fortíssima" a correlação entre os pontos de observações, cujo coeficiente de correlação está entre 0,90 e 1,00.

Contrariamente ao que poderia se esperar o aço ABNT 1045 provocou menor desgaste nas ferramentas do que o 1038. Embora uma análise mais cuidadosa deveria ter sido feita, este resultado pode ter sido causado pela maior quantidade de sulfeto de manganês presente no aço ABNT 1045, (08), como foi mostrado no item 3.3.2.

Quando calculados os parâmetros da Taylor Expandida e traçados os gráficos de VB versus T, em papel dilogarítmico, para o modelo (45) e para as diversas equações do mesmo tipo obtidas através da Taylor Expandida, foi observado que:

- os desvios entre as retas do modelo (45) e as obtidas a partir da Taylor Expandida eram grandes quando os parâmetros da mesma eram calculados com 4 testes tendo-se dois testes com velocidades de corte iguais;
- estes desvios diminuíram quando calculou-se os parâmetros da Taylor Expandida com 4 testes todos com velocidades de corte diferentes;
- estes desvios foram menores ainda quando, além das velocidades de corte diferentes, os avanços adotados também foram diferentes.

Estas observações foram feitas quando calculou-se os parâmetros da Taylor expandida para as diferentes combinações de testes apresentadas na tabela 23.

COMBINAÇÕES DE TESTES	V (m/min)	S (min/rot)	A (mm)
I	190	0,40	3,0
	240	0,30	2,0
	150	0,40	5,0
	190	0,60	2,0
II	190	0,40	3,0
	240	0,30	2,0
	150	0,40	5,0
	210	0,20	2,0
III	240	0,30	2,0
	150	0,40	5,0
	190	0,60	2,0
	210	0,20	2,0
IV	190	0,40	3,0
	240	0,30	2,0
	150	0,40	5,0
	190	0,60	2,0
	210	0,20	2,0

Tabela 23 - Combinações de testes do  
aço ABNT 1045

## 6. CONCLUSÕES:

- 19) a fórmula expandida de Taylor, uma vez determinados os seus parâmetros, permite o cálculo das condições econômicas de corte para quaisquer valores assumidos pelo avanço, pela profundidade de corte, pelo desgaste da ferramenta;
- 29) o desgaste de flanco da ferramenta tem uma distribuição normal em relação às variáveis V, S, A e T;
- 39) nos testes onde são mantidos fixos os valores de V, S, e A a equação que melhor representa o desgaste da ferramenta em função do tempo de usinagem é do tipo  $VB = a T^b$ . Substituindo-se estes valores de V, S e A na fórmula expandida de Taylor obtém-se uma equação do tipo  $VB = f T^g$ , onde "f" e "g" têm valores aproximados de "a" e "b" respectivamente;
- 49) contrariamente ao que poderia se esperar o aço ABNT 1045 provocou um menor desgaste nas ferramentas do que o 1038. Embora uma análise mais cuidadosa deva ser feita este resultado pode ter sido causado pela maior quantidade de sulfeto de manganês presente no 1045.

Sugere-se para trabalhos futuros:

- com base na primeira e terceira conclusão, calcular os parâmetros da fórmula de Taylor expandida para os diversos materiais nacionais;
- fazer um só programa de computação que calcule os parâmetros da Taylor expandida e otimize as condições de corte (acoplar parte do programa TRALE ao programa TURN, que é um programa que otimiza as condições de corte tendo-se os parâmetros da Taylor expandida);
- calcular os parâmetros da Taylor expandida e da Taylor simples para um determinado material e verificar experimentalmente qual o relacionamento que existe entre x e G.

## BIBLIOGRAFIA

- 01) Abendroth, A & Menzel, G.  
Grundlagen der Zerspanungslehre  
Leipzig, Fachbuchverlag Leipzig, 1960, 1 v.
- 02) Alves, Domingos Boechat  
Apostila de Métodos Numéricos - UFSC  
Pag. 72-75.
- 03) Barrow, G.  
Tool-Life Equations and Machining Economics, Proceedings of  
the Twelfth International Machine Tool Design and Research  
Conference held in Manchester.  
15-17 September 1971  
Edited by F. Koenigsberger and S.A. Tobias  
Pag. 481-493  
Mcmillan 1972.
- 04) Bejamim, J.R. - Cornell, C.A.  
Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers  
Pags. 466-467, 667  
McGraw-Hill Book Company - New York 1970
- 05) Boothroyd, G.  
Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools - pag. 69.  
International Student Edition  
McGraw - Hill Kogakusha, Ltd., 1975.
- 06) Bowker, Albert H. - Lieberman, Gerald J.  
Engineering Statistics - pag. 454-458  
2a. edição - 1972. Prentice-Hall, Inc.  
Englewood Cliffs, New Jersey.
- 07) Brewer, R.C.  
On the Economics of the Basic Turning Operation - Trans  
A.S.M.E., 80 (1958).
- 08) Chiaverini, Vicente  
Aços e Ferros Fundidos  
4a. edição. Associação Brasileira de Metais  
1977 - São Paulo - pag. 243
- 09) Classificação por Composição Química de Aços para Construção

Mecânica - P-NB-82 da ABNT 1969.

- 10) Colpaert, Hubertus  
Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns - 3a. edição  
Pags. 197-210, 222  
Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo - 1974.
- 11) Costa, José Gomes  
Aplicação da Estatística na Economia e Educação Física,  
Pag. 278 - Editora Rio - Rio de Janeiro
- 12) Crookall, J.R., e Venkataramani, V.  
When it Pays to Machine in More than One Pass  
Metalworking Production - jan 1971.
- 13) Ensaio de Tração de Materiais Metálicos  
Método Brasileiro, MB4, 1953 ABNT.
- 14) Erickson, P.S. - Hardy, J.M.  
Effect of Maganese Sulfide Inclusions in Cast Gray Iron on  
Tool Life  
Technicall Center Deere & Company  
Moline, Illinois  
AFS Transactions
- 15) Eversheim, W. - Pfau, D.  
Schnittwertermittlung bei Simultaner Mehrwerkzeugbearbeitung  
Pag. 479-484  
Annals of the Cirp. Vol. 24 - jan 1975.
- 16) Ferraresi, Dino  
Fundamentos de Usinagem dos Metais  
Vol. 1. Editora Edgard Blücher Ltda 1970.
- 17) Kienzle, O.  
Die Bestimmung von Kräften und Leistungen an spanenden  
Werkzeugen und Werkzeugmaschinen. VDI. Hannover, 94:299-305  
abril 1952
- 18) Pacitti, Tércio - Atkinson, Cyril P.  
Programação e Métodos Computacionais  
vol. 2. pag. 519. Número de Classes  
Livros Técnicos e Científicos Editora S/A  
Rio de Janeiro, 1977

- 19) Pallerosi, C.A. e Ferraresi, D.  
Qual a Melhor Velocidade de Corte  
Máquinas e Metais - julho de 1968  
Pag. 38-43
- 20) Pearson, E.S. - Hartley, H.O.  
Biometrika Tables for Statatisticians  
Cambridge Un. Press, 1956.
- 21) Souza, Sêrgio Augusto  
Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos  
Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo. 1974
- 22) Specification for Tool-Life Testing With Single-Point Turning  
Tools  
ISO-3685 - British Standards Institution-Gr 8 - 1977
- 23) Spiegel, Murray R.  
Estatística - pags. 44, 311-312  
Ao Livro Técnico S/A. Rio de Janeiro 1967.
- 24) Stahl und Eisen Guternormen  
Herausgeber: Din Deutsches Institut für Normung e. V.  
Beuth Verlag GMBH. Berlin Köln 1977.
- 25) Stahl - Eisen Prüfblatt 1162. Dezember 1969.
- 26) Viana, Y. e Filho, S.  
Tradutor da Linguagem Estatística  
Publicação nº 4.68 da COPPE, abril 1968 R.J.
- 27) Walpole, Ronald E.  
Introduction to Statistics pag. 309  
Collier Macmillan International Editions.
- 28) Walpole, Ronald E. - Myers, Raymond H.  
Probability and Statistics Engineers and Scientist, pag. 190  
The Macmillan Company, New York  
Collier - Macmillan Limited, London.
- 29) Wellinger, K. - Gimmel, P. - Bodenstern, M.  
Werkstoff - Tabellen Der Metalle  
Bezeichnung, Festgkeitwerte, Verwengung, Lieferwerke,  
Werksmarken  
Alfred Kröner Verlag Stuttgart

30) Werkzeugmaschinenlabor der RWTH

Pfau, Dieter

Entwicklung und Einsatz

von Schnittwertmodellen für die spanende Fertigung

Dissertation, RWTH Aachen, Okt.1974

## A P Ê N D I C E I

PONTOS	V m/min	S mm/rot	A mm	T min	VB mm	PONTOS	V m/min	S mm/rot	A mm	T min	VB mm
1	44	0,39	10,0	1,40	0,13	35	45	0,72	10,5	1,20	0,45
2	44	0,39	10,0	2,80	0,16	36	45	0,72	10,5	2,40	0,50
3	44	0,39	10,0	4,20	0,17	37	45	0,72	10,5	3,60	0,60
4	44	0,39	10,0	7,00	0,28	38	45	0,72	10,5	4,80	0,80
5	44	0,39	10,0	9,80	0,41	39	52	0,40	13,0	1,78	0,65
6	44	0,39	10,0	12,60	0,52	40	52	0,40	13,0	3,57	0,70
7	44	0,39	10,0	15,40	0,52	41	52	0,40	13,0	5,35	0,71
8	44	0,39	10,0	18,20	0,54	42	52	0,40	13,0	0,89	0,56
9	54	0,39	10,0	2,38	0,17	43	52	0,40	13,0	1,78	0,67
10	54	0,39	10,0	4,60	0,33	44	52	0,40	13,0	2,68	0,72
11	54	0,39	10,0	6,99	0,42	45	52	0,40	13,0	3,57	0,72
12	54	0,39	10,0	9,30	0,48	46	52	0,40	13,0	5,35	0,75
13	54	0,39	10,0	11,60	0,52	47	45	1,00	5,0	1,00	0,23
14	85	0,39	10,0	1,39	0,33	48	45	1,00	5,0	2,00	0,29
15	85	0,39	10,0	2,78	0,54	49	45	1,00	5,0	2,98	0,32
16	85	0,39	10,0	4,20	0,73	50	45	1,00	5,0	4,68	0,45
17	54	0,50	10,0	1,70	0,20	51	48	1,00	8,0	1,00	0,33
18	54	0,50	10,0	3,40	0,44	52	48	1,00	8,0	1,45	0,35
19	54	0,50	10,0	5,10	0,56	54	48	1,00	8,0	2,00	0,38
20	54	0,50	10,0	6,80	0,65	54	48	1,00	8,0	2,93	0,49
21	54	0,61	10,0	1,40	0,24	55	48	1,00	8,0	4,00	0,53
22	54	0,61	10,0	2,80	0,39	56	45	1,00	5,0	1,00	0,22
23	54	0,61	10,0	4,20	0,70	57	45	1,00	5,0	2,00	0,25
24	54	0,61	10,0	5,60	0,77	58	45	1,00	5,0	3,00	0,28
25	58	0,61	10,5	1,16	0,33	59	45	1,00	5,0	4,20	0,30
26	58	0,61	10,5	2,33	0,40	60	45	1,00	5,0	5,30	0,37
27	58	0,61	10,5	3,49	0,46	61	45	1,00	5,0	6,40	0,40
28	58	0,61	10,5	3,70	0,48	62	45	1,00	5,0	7,50	0,42
29	58	0,30	10,5	2,37	0,33	63	45	1,00	5,0	8,60	0,44
30	58	0,30	10,5	4,74	0,38	64	54	0,39	10,0	1,40	0,35
31	58	0,30	10,5	7,10	0,39	65	54	0,39	10,0	2,80	0,56
32	58	0,30	10,5	9,48	0,42	66	54	0,39	10,0	4,20	0,56
33	58	0,30	10,5	11,80	0,42	67	54	0,39	10,0	5,60	0,60
34	58	0,30	10,5	14,20	0,47	68	54	0,30	10,0	7,00	0,62

Tabela 24 - Dados experimentais de um trabalho desenvolvido na Universidade de Aachen na Alemanha

## A P Ê N D I C E I I

OUT-PUT DO TRALE PARA O AÇO ABNT 1038:

REGRESSÃO MULTIPLA

VAR. INDEPENDENTE- 2, 3, 4, 5,  
VAR. DEPENDENTE- 1

R QUADRADO= 0.8374184E 00 ERRO PADRÃO EST.= 0.1089039E 00 VALOR DE F= 0.9657664E 02

COEFICIENTES DA REGRESSÃO	ERRO PADRÃO	VALOR DE T
B ( 1, 1 )= 0.6814148E 01		
B ( 1, 2 )= -0.3296643E 00	0.3553189E-01	-0.9277984E 01
B ( 1, 3 )= -0.3660695E-01	0.3221217E-01	-0.1136432E 01
B ( 1, 4 )= -0.3807998E 00	0.2413226E-01	-0.1577970E 02
B ( 1, 5 )= 0.8935773E 00	0.5398670E-01	0.1655180E 02

Obs.	VERDADEIRO	ESTIMADO	DESVIO
1	0.4605170E 01	0.4636913E 01	-0.3317432E 00
2	0.4605170E 01	0.4846457E 01	-0.2412863E 00
3	0.4605170E 01	0.4791445E 01	-0.1362745E 00
4	0.4605170E 01	0.4771329E 01	-0.1061557E 00
5	0.4605170E 01	0.4727923E 01	-0.1227531E 00
6	0.4605170E 01	0.4698214E 01	-0.9304619E-01
7	0.4605170E 01	0.4677547E 01	-0.7237625E-01
8	0.4605170E 01	0.4698222E 01	-0.9505191E-01
9	0.4605170E 01	0.4653370E 01	-0.4819965E-01
10	0.4605170E 01	0.4646697E 01	-0.4150336E-01
11	0.4941643E 01	0.4597272E 01	-0.3445708E-01
12	0.4941643E 01	0.4693636E 01	0.2460070E 00
13	0.4941643E 01	0.4798301E 01	0.1433420E 00
14	0.4941643E 01	0.4888147E 01	0.5349954E-01
15	0.4941643E 01	0.4928062E 01	0.1358303E-01
16	0.4941643E 01	0.4955139E 01	-0.2655464E-01
17	0.4941643E 01	0.5007068E 01	-0.6542492E-01
18	0.4941643E 01	0.5044182E 01	-0.1025391E 00
19	0.4941643E 01	0.5053502E 01	-0.1135993E 00
20	0.5192957E 01	0.5088949E 01	-0.1472366E-01
21	0.5192957E 01	0.5279745E 01	-0.8673913E-01
22	0.5192957E 01	0.5272851E 01	-0.7990045E-01
23	0.5192957E 01	0.5256207E 01	-0.6324959E-01
24	0.5192957E 01	0.5237607E 01	-0.4465008E-01
25	0.5192957E 01	0.5203501E 01	-0.1554394E-01
26	0.5192957E 01	0.5216824E 01	-0.2386665E-01
27	0.5192957E 01	0.5206437E 01	-0.1348801E-01
28	0.5192957E 01	0.5201423E 01	-0.8465767E-02
29	0.5192957E 01	0.5200169E 01	-0.7211688E-02
30	0.5192957E 01	0.5181073E 01	0.1188374E-01
31	0.5393627E 01	0.5465434E 01	0.7180669E-01
32	0.5393627E 01	0.5380797E 01	-0.1282978E-01
33	0.5393627E 01	0.5375672E 01	-0.1795483E-01
34	0.5393627E 01	0.5363702E 01	-0.2992553E-01
35	0.5393627E 01	0.5338322E 01	-0.5530548E-01
36	0.5393627E 01	0.5324760E 01	-0.6388667E-01
37	0.5393627E 01	0.5318638E 01	-0.7498932E-01
38	0.5393627E 01	0.5317445E 01	-0.7618141E-01
39	0.5393627E 01	0.5296424E 01	-0.9148979E-01
40	0.5393627E 01	0.5302137E 01	-0.9148979E-01
41	0.4941643E 01	0.4967607E 01	0.2596378E-01
42	0.4941643E 01	0.4922692E 01	0.1895046E-01
43	0.4941643E 01	0.4911570E 01	0.3007317E-01
44	0.4941643E 01	0.4865875E 01	0.7576752E-01
45	0.4941643E 01	0.4858865E 01	0.7277775E-01
46	0.4941643E 01	0.4853610E 01	0.8903272E-01
47	0.4941643E 01	0.4845985E 01	0.9565735E-01
48	0.4941643E 01	0.4819619E 01	0.1220236E 00
49	0.4941643E 01	0.4821808E 01	0.1198349E 00
50	0.4941643E 01	0.4804311E 01	0.1373320E 00
51	0.4605170E 01	0.4836588E 01	0.2314177E 00
52	0.4605170E 01	0.4759179E 01	-0.1530085E-01
53	0.4605170E 01	0.4657951E 01	-0.5278111E-01
54	0.4605170E 01	0.4647792E 01	-0.4262161E-01
55	0.4605170E 01	0.4608652E 01	-0.3481865E-01
56	0.4605170E 01	0.4592823E 01	-0.2234745E-01
57	0.4605170E 01	0.4565691E 01	-0.3947926E-01
58	0.4605170E 01	0.4544564E 01	-0.5060673E-01
59	0.4605170E 01	0.4547742E 01	-0.5742836E-01
60	0.4605170E 01	0.4544098E 01	-0.6107235E-01
61	0.4941643E 01	0.4851993E 01	0.8965015E-01
62	0.4941643E 01	0.4927146E 01	0.1449680E-01
63	0.4941643E 01	0.4943466E 01	0.1823425E-02
64	0.4941643E 01	0.4977198E 01	0.3555489E-01
65	0.4941643E 01	0.4936372E 01	-0.4472923E-01
66	0.4941643E 01	0.5002110E 01	0.6046677E-01
67	0.4941643E 01	0.5021160E 01	0.7951736E-01
68	0.4941643E 01	0.5018625E 01	0.7698250E-01
69	0.4941643E 01	0.5041673E 01	0.1000299E 00
70	0.4941643E 01	0.5044111E 01	0.1024685E 00
71	0.5192957E 01	0.5044360E 01	0.1485968E 00
72	0.5192957E 01	0.5071200E 01	0.1217566E 00
73	0.5192957E 01	0.5096113E 01	0.9684372E-01
74	0.5192957E 01	0.5100793E 01	0.9216404E-01
75	0.5192957E 01	0.5117089E 01	0.7586765E-01
76	0.5192957E 01	0.5109311E 01	0.8364582E-01
77	0.5192957E 01	0.5135777E 01	0.5718040E-01
78	0.5192957E 01	0.5137507E 01	0.5544949E-01
79	0.5192957E 01	0.5142311E 01	0.5064583E-01
80	0.5192957E 01	0.5126020E 01	0.6693649E-01

OUT-PUT DO TRALE PARA O AÇO ABNT 1045:

REGRESSÃO MULTIPLA

VAR. INDEPENDENTES- 2, 3, 4, 5,  
VAR. DEPENDENTE - 1

R QUADRADO= 0.9861482E 00 ERRO PADRÃO EST.= 0.2136688E-01 VALOR DE F = 0.7653176E=03

COEFICIENTE DA REGRESSÃO	ERRO PADRÃO	VALOR DE T
B ( 1, 1 )= 0.6684490E 01		
B ( 1, 2 )= -0.1108187E 00	0.7884249E-02	-0.1405571E 02
B ( 1, 3 )= -0.1885455E 00	0.1441814E-01	-0.1651279E 02
B ( 1, 4 )= -0.2479532E 00	0.1213681E-01	-0.2042984E 02
B ( 1, 5 )= 0.5645512E 00	0.2653167E-01	0.2127838E 02

OBS.	VERDADEIRO	ESTIMADO	DESVIO
1	0.5480639E 01	0.5476717E 01	0.3921339E-02
2	0.5480639E 01	0.5477252E 01	0.3330457E-02
3	0.5480639E 01	0.5459430E 01	0.2115322E-01
4	0.5480639E 01	0.5460317E 01	0.2032163E-01
5	0.5480639E 01	0.5486967E 01	0.1157167E-01
6	0.5480639E 01	0.5452710E 01	0.1792312E-01
7	0.5480639E 01	0.5478293E 01	0.2322244E-02
8	0.5480639E 01	0.5475405E 01	0.2233333E-02
9	0.5480639E 01	0.5465104E 01	0.1333344E-01
10	0.5480639E 01	0.5469303E 01	0.1113311E-01
11	0.5480639E 01	0.5474525E 01	0.3309704E-02
12	0.5480639E 01	0.5480799E 01	0.1600217E-01
13	0.5480639E 01	0.5486363E 01	0.4773233E-01
14	0.5480639E 01	0.5487949E 01	0.2731323E-01
15	0.5480639E 01	0.5482916E 01	0.1332003E-01
16	0.5480639E 01	0.5481163E 01	0.1002312E-02
17	0.5480639E 01	0.5485431E 01	0.5204201E-02
18	0.5480639E 01	0.5485412E 01	0.5223274E-02
19	0.5480639E 01	0.5480902E 01	0.1607893E-02
20	0.5480639E 01	0.4995726E 01	0.1493038E-01
21	0.5480639E 01	0.5484173E 01	0.6480180E-02
22	0.5480639E 01	0.4995975E 01	0.1468084E-01
23	0.5480639E 01	0.4993714E 01	0.2092171E-01
24	0.5480639E 01	0.4994493E 01	0.2364240E-01
25	0.5247025E 01	0.5263735E 01	0.1572333E-01
26	0.5247025E 01	0.5266986E 01	0.1998138E-01
27	0.5247025E 01	0.5269378E 01	0.2233317E-01
28	0.5247025E 01	0.5257527E 01	0.1330282E-01
29	0.5247025E 01	0.5256606E 01	0.6781703E-02
30	0.5247025E 01	0.5259921E 01	0.1239054E-01
31	0.5247025E 01	0.5244745E 01	0.2279282E-02
32	0.5247025E 01	0.5233778E 01	0.1324034E-01
33	0.5247025E 01	0.5246410E 01	0.8141003E-03
34	0.5247025E 01	0.5240097E 01	0.6927490E-02
35	0.5247025E 01	0.5235603E 01	0.1142120E-01
36	0.5247025E 01	0.5232541E 01	0.1435343E-01
37	0.5347103E 01	0.5286487E 01	0.8082123E-01
38	0.5347103E 01	0.5304573E 01	0.4232322E-01
39	0.5347103E 01	0.5345918E 01	0.1190188E-02
40	0.5347103E 01	0.5334067E 01	0.1304034E-01
41	0.5347103E 01	0.5357640E 01	0.1033236E-01
42	0.5347103E 01	0.5359507E 01	0.1239372E-01
43	0.5347103E 01	0.5364734E 01	0.1782381E-01
44	0.5347103E 01	0.5371966E 01	0.2480347E-01
45	0.5347103E 01	0.5380412E 01	0.3330421E-01
46	0.5347103E 01	0.5372211E 01	0.2310397E-01
47	0.5347103E 01	0.5382805E 01	0.3339090E-01
48	0.5347103E 01	0.5377595E 01	0.3048700E-01

## A P Ê N D I C E   I I I

Variações das forças de corte em função do aumento do desgaste de flanco.

VB (mm)	F <sub>a</sub> (N)	F <sub>r</sub> (N)	F <sub>c</sub> (N)
0,12	1093	680	2133
0,14	1076	640	2070
0,15	1075	657	1960
0,20	1103	665	2200
0,20	1124	670	2225
0,21	1128	667	2208
0,21	1120	667	2202
0,21	1117	662	2198
0,22	1146	684	2228
0,23	1162	685	2242
0,23	1183	687	2292
0,24	1203	698	2358
0,26	1208	698	2307
0,26	1204	696	2293
0,27	1202	702	2308
0,28	1213	750	2308
0,28	1217	690	2300

Tabela 25 - Condição de  
corte 01,  
ABNT 1038

VB (mm)	F <sub>a</sub> (N)	F <sub>r</sub> (N)	F <sub>c</sub> (N)
0,10	2800	1625	6400
0,16	2900	1575	6550
0,19	2786	1600	6200
0,24	3000	1600	6250
0,28	3000	1600	6400
0,28	3025	1725	6450
0,29	3300	1800	6400
0,30	3200	1800	6400
0,34	3325	1800	6400
0,35	3200	1847	6533

Tabela 26 - Condições de  
corte 02,  
ABNT 1038

VB (mm)	F <sub>a</sub> (N)	F <sub>r</sub> (N)	F <sub>c</sub> (N)
0,20	1083	718	2692
0,22	1200	775	2762
0,25	1238	801	2781
0,27	1300	821	2764
0,30	1300	837	2800
0,32	1319	844	2838
0,33	1375	860	2825
0,40	1400	881	2883
0,41	1420	894	2900
0,42	1483	890	2900
0,42	1500	945	2950
0,46	1500	993	2967
0,46	1500	1000	2993

Tabela 27 - Condição de  
corte 03,  
ABNT 1038

VB (mm)	F <sub>a</sub> (N)	F <sub>r</sub> (N)	F <sub>c</sub> (N)
0,21	1553	830	3383
0,23	1767	917	3525
0,27	1800	987	3600
0,28	2000	993	3633
0,30	2000	980	3600
0,31	1925	1250	3638
0,32	2000	1000	3700
0,32	2000	960	3500
0,34	2000	1000	3700
0,34	2000	1000	3700
0,36	2100	1005	3775
0,38	2200	1005	3750
0,38	2140	1080	3820
0,39	2267	1093	3883
0,42	2333	1133	3917

Tabela 28 - Condição de  
corte 04,  
ABNT 1038

VB (mm)	F <sub>a</sub> (N)	F <sub>r</sub> (N)	F <sub>c</sub> (N)
0,16	2800	1600	6500
0,17	2750	1567	6317
0,18	2783	1500	6333
0,20	2850	1554	6379
0,22	2900	1562	6312
0,23	2907	1600	6417
0,25	2971	1600	6486

Tabela 30 - Condição de  
corte 06,  
ABNT 1038

VB (mm)	F <sub>a</sub> (N)	F <sub>r</sub> (N)	F <sub>c</sub> (N)
0,14	530	535	1670
0,15	575	542	1640
0,18	606	548	1706
0,19	632	590	1740
0,20	657	583	1723
0,24	667	623	1780
0,24	678	636	1780
0,25	683	632	1713
0,28	700	650	1814
0,28	697	648	1770
0,30	710	670	1803
0,31	720	663	1797
0,32	734	693	1814
0,34	735	700	1825
0,34	760	715	1837
0,34	768	720	1851
0,36	793	705	1890
0,38	793	707	1957
0,39	800	742	1888
0,40	803	750	1893
0,40	800	738	1856
0,40	820	765	1890
0,41	823	748	1933
0,43	828	754	1928
0,44	848	746	1972

Tabela 29 - Condição  
de corte  
05, ABNT  
1038

VB (mm)	F <sub>a</sub> (N)	F <sub>r</sub> (N)	F <sub>c</sub> (N)
0,12	1700	870	3500
0,14	1720	908	3450
0,15	1730	916	3490
0,18	1762	910	3488
0,18	1800	925	3500
0,22	1812	920	3512
0,23	1838	915	3512
0,23	1850	905	3500
0,26	1900	955	3542
0,31	1900	948	3567
0,32	1983	960	3600
0,33	1980	936	3570
0,33	2000	980	3650
0,33	2000	930	3600
0,33	2000	887	3600
0,34	2200	955	3725
0,34	2180	884	3730
0,36	2200	1050	3825
0,37	2158	1025	3800
0,38	2200	1060	3828
0,38	2200	1056	3800
0,38	2208	1077	3800
0,39	2250	1080	3800
0,40	2275	1100	3900
0,42	2260	1060	3900

Tabela 31 - Condição de  
corte 07,  
ABNT 1038

VB (mm)	F <sub>a</sub> (N)	F <sub>r</sub> (N)	F <sub>c</sub> (N)
0,12	1300	678	2500
0,18	1377	690	2575
0,20	1448	708	2600
0,23	1496	720	2600
0,24	1547	780	2717
0,26	1626	800	2750
0,29	1688	780	2700
0,31	1683	766	2628
0,32	1690	760	2600
0,33	1720	840	2871
0,34	1737	810	2833
0,38	1763	817	2800
0,39	1814	863	2900
0,41	1840	850	2900

Tabela 32 - Condição de  
corte 08,  
ABNT 1038

VB (mm)	F <sub>a</sub> (N)	F <sub>r</sub> (N)	F <sub>c</sub> (N)
0,12	660	480	1380
0,18	754	536	1444
0,20	790	580	1513
0,21	825	595	1520
0,24	846	606	1552
0,24	865	620	1535
0,26	910	638	1604
0,27	932	647	1620
0,29	957	660	1640
0,31	950	635	1657
0,32	967	652	1695
0,35	964	654	1676
0,37	960	660	1640
0,38	960	660	1650
0,40	980	665	1665
0,42	967	670	1675
0,15	643	445	1410
0,22	698	484	1448
0,25	743	522	1490
0,28	792	544	1536
0,29	820	575	1550
0,32	846	590	1582
0,33	852	584	1592
0,38	870	583	1596
0,39	870	590	1598
0,42	880	602	1600

Tabela 33 - Condição de  
corte 01, ABNT  
1045

VB (mm)	F <sub>a</sub> (N)	F <sub>r</sub> (N)	F <sub>c</sub> (N)
0,10	2100	1040	
0,12	2100	1120	4317
0,13	2100	1120	4350
0,15	2100	1120	4312
0,16	2200	1140	4400
0,16	2200	1167	4400
0,18	2200	1180	4500
0,18	2212	1200	4450
0,18	2250	1200	4500
0,18	2250	1200	4433
0,20	2300	1205	4562
0,22	2300	1205	4500
0,23	2350	1210	4550
0,23	2400	1232	4600
0,24	2500	1315	4762
0,24	2550	1340	4800
0,26	2538	1302	4806
0,26	2617	1347	4808
0,28	2610	1380	4790
0,30	2600	1356	4770
0,32	2650	1360	4800
0,33	2700	1376	4790
0,35	2700	1376	4770
0,36	2700	1397	4817
0,37	2708	1420	4892
0,38	2700	1432	4840
0,39	2750	1440	4900
0,40	2800	1435	4919

Tabela 34 - Condição de  
corte 02,  
ABNT 1045

VB (mm)	F <sub>a</sub> (N)	F <sub>r</sub> (N)	F <sub>c</sub> (N)
0,14	880	715	2475
0,15	860	720	2388
0,16	940	778	2500
0,17	1015	820	2600
0,18	1005	832	2600
0,19	1065	878	2625
0,20	1095	905	2700
0,20	1087	893	2617
0,21	1091	918	2621
0,22	1143	962	2692
0,22	1127	955	2642
0,24	1163	973	2683
0,24	1195	985	2725
0,25	1227	1000	2700
0,26	1204	1004	2680
0,28	1240	1180	2800
0,29	1247	1207	2717
0,30	1260	1180	2750
0,31	1270	1270	2850
0,32	1380	1370	2825
0,35	1352	1368	2830
0,38	1400	1390	3000
0,42	1480	1447	3000
0,12	840	705	2400
0,16	979	826	2575
0,18	1051	887	2607
0,18	1087	947	2675
0,20	1107	977	2683
0,22	1154	1020	2700
0,26	1186	1143	2793
0,27	1207	1227	2700
0,30	1280	1265	2800
0,14	850	720	2435
0,18	960	817	2575
0,20	1030	860	2588
0,21	1066	917	2686

VB (mm)	F <sub>a</sub> (N)	F <sub>r</sub> (N)	F <sub>c</sub> (N)
0,22	1142	980	2745
0,24	1165	996	2756
0,26	1232	1065	2838
0,28	1212	1155	2762
0,38	1600	1490	3225
0,40	1400	1560	3100

Tabela 35 - Condição de  
corte 03,  
ABNT 1045

VB (mm)	F <sub>a</sub> (N)	F <sub>r</sub> (N)	F <sub>c</sub> (N)
0,12	520	338	1008
0,14	536	350	1000
0,16	524	331	900
0,20	586	380	1068
0,22	582	377	1054
0,26	587	381	1062
0,28	591	387	1049
0,30	606	406	1095
0,32	614	399	1026
0,34	633	405	1035
0,35	646	427	1123
0,36	640	404	1116

Tabela 36 - Condição de  
corte 04,  
ABNT 1045

A P Ê N D I C E I V

## PROGRAMA PARA O CÁLCULO DA VARIAÇÃO PERCENTUAL DAS VELOCIDADES:

```

0001      DIMENSION V(100),S(100),A(100),T(100),VK(100),VP(100),VEST(100),
0002      10(100)
0003      READ(1,100)N,B1,B,F,G,H
0004      100  FORMAT(12,F14.7,4F7.4)
0005      DO 7 I=1,N
0006      7    READ(1,101)V(I),S(I),A(I),T(I),VK(I),VEST(I)
0007      101  FORMAT(5F7.3,5I+.7)
0008      DO 17 I=1,N
0009      17    VEST(I)=EXP(VEST(I))
0010      17    D(I)=V(I)-VEST(I)
0011      17    VP(I)=D(I)*100/V(I)
0012      102  WRITE(3,102)
0013      102  FORMAT(77,3X,'DBS.',5X,'V-V-VERDADEIRA',5X,'V-ESTIMADA',5X,'DESVIO',
0014      15X,'VARIAÇÃO PERCENTUAL',7)
0015      DO 27 I=1,N
0016      27  WRITE(3,103)I,V(I),VEST(I),D(I),VP(I)
0017      103  FORMAT(10,=F14.3,F17.3,=F12.3,F10.3)
0018      C=EXP(B1)
0019      WRITE(3,104)C,F,G,H
0020      104  FORMAT(77,3X,'FORMULA EXPANDIDA DE TAYLOR',77,5X,'V=',F8.2,'S**',
0021      1F7.4,'*F**',F7.4,'*T**',F7.4,'*V0**',F7.4)
0022      STOP
0023      END

```

## OUT-PUT PARA O AÇO ABNT 1045:

DBS.	V-VERDADEIRA	V-ESTIMADA	DESVIO	VARIAÇÃO PERCENTUAL
1	240.000	235.061	0.939	0.391
2	240.000	237.183	0.512	0.338
3	240.000	234.975	0.525	2.094
4	240.000	235.172	+0.225	2.012
5	240.000	237.215	2.705	1.160
6	240.000	235.735	+0.205	1.777
7	240.000	235.435	0.565	0.234
8	240.000	237.404	0.536	0.223
9	240.000	235.300	0.700	1.542
10	240.000	237.342	2.055	1.107
11	240.000	233.010	1.330	0.577
12	240.000	243.035	-0.505	-0.016
13	150.000	157.333	-7.333	-4.889
14	150.000	154.153	+0.153	-2.769
15	150.000	152.305	-2.005	-1.370
16	150.000	150.150	-0.150	-0.100
17	150.000	149.221	0.779	0.519
18	150.000	149.215	0.785	0.521
19	150.000	149.757	0.243	0.151
20	150.000	147.763	2.237	1.480
21	150.000	149.034	0.966	0.644
22	150.000	147.817	2.183	1.455
23	150.000	145.694	0.100	2.070
24	150.000	145.203	0.797	2.532
25	190.000	193.203	-3.203	-1.687
26	190.000	193.831	-3.831	-2.016
27	190.000	194.295	-4.295	-2.261
28	190.000	192.005	-2.005	-1.056
29	190.000	191.714	-1.714	-0.902
30	190.000	192.408	-2.408	-1.243
31	190.000	189.567	0.433	0.223
32	190.000	187.500	2.500	1.316
33	190.000	189.583	0.417	0.081
34	190.000	185.633	1.312	0.690
35	190.000	187.342	2.155	1.136
36	190.000	187.263	2.732	1.438
37	210.000	197.645	12.352	5.882
38	210.000	201.255	0.745	4.164
39	210.000	205.750	0.250	0.119
40	210.000	207.275	2.725	1.296
41	210.000	212.223	-2.223	-1.059
42	210.000	212.020	-2.020	-1.243
43	210.000	213.734	-3.734	-1.770
44	210.000	215.285	-5.285	-2.517
45	210.000	217.112	-7.112	-3.386
46	210.000	215.335	-5.335	-2.542
47	210.000	217.052	-7.052	-3.334
48	210.000	215.501	-6.501	-3.096

## FORMULA EXPANDIDA DE TAYLOR

$$V = 799.905 * A - 0.1108 * A^2 - 0.1885 * T - 0.2430 * V B + 0.5646$$

OUT-PUT PARA O AÇO ABNT 1038:

JBS.	V-VERDADEIRA	V-ESTIMADA	DESVIO	VARIACAO PERCENTUAL
1	100.000	135.539	-35.539	-35.539
2	100.000	127.209	-27.209	-27.209
3	100.000	120.475	-20.475	-20.475
4	100.000	115.075	-15.075	-15.075
5	100.000	115.060	-15.060	-15.060
6	100.000	107.751	-7.751	-7.751
7	100.000	107.500	-7.500	-7.500
8	100.000	107.752	-7.752	-7.752
9	100.000	104.935	-4.935	-4.935
10	100.000	104.205	-4.205	-4.205
11	140.000	99.213	40.787	29.133
12	140.000	107.463	30.562	21.806
13	140.000	121.304	15.695	13.354
14	140.000	132.707	7.293	5.204
15	140.000	135.112	1.085	1.545
16	140.000	143.765	3.765	-2.690
17	140.000	149.465	9.465	-6.761
18	140.000	155.117	15.117	-10.793
19	140.000	155.570	15.570	-11.835
20	140.000	162.215	22.215	-15.670
21	180.000	195.320	15.320	-9.507
22	180.000	154.573	-14.573	-8.315
23	180.000	191.753	11.753	-6.529
24	180.000	183.219	3.219	-4.566
25	180.000	162.820	-2.820	-1.567
26	180.000	184.343	4.343	-2.415
27	180.000	182.443	-2.443	-1.357
28	180.000	181.530	-1.530	-0.850
29	180.000	181.303	-1.303	-0.724
30	180.000	177.673	2.127	1.101
31	220.000	235.378	15.378	-7.445
32	220.000	217.195	2.305	1.275
33	220.000	215.065	3.915	1.780
34	220.000	213.514	6.486	2.545
35	220.000	203.163	11.837	5.380
36	220.000	205.357	17.041	6.855
37	220.000	204.105	15.095	7.225
38	220.000	203.665	16.135	7.335
39	220.000	199.622	20.378	7.263
40	220.000	200.765	17.235	6.743
41	140.000	145.683	-5.683	-2.030
42	140.000	137.372	2.628	1.377
43	140.000	135.852	4.148	2.953
44	140.000	125.784	10.216	7.257
45	140.000	130.175	9.825	7.014
46	140.000	123.202	11.798	8.427
47	140.000	127.225	12.772	9.123
48	140.000	123.515	16.485	11.487
49	140.000	124.189	15.811	11.293
50	140.000	122.035	17.965	12.632
51	100.000	120.039	-20.039	-20.039
52	100.000	115.533	-15.533	-15.533
53	100.000	105.420	-5.420	-5.420
54	100.000	104.354	-4.354	-4.354
55	100.000	100.349	-3.349	-3.349
56	100.000	97.790	2.210	2.210
57	100.000	95.125	4.875	5.371
58	100.000	95.065	4.935	4.935
59	100.000	94.419	5.581	5.581
60	100.000	94.076	5.924	5.924
61	140.000	127.595	12.005	3.575
62	140.000	137.985	2.015	1.439
63	140.000	140.255	-0.255	-0.182
64	140.000	145.067	-5.067	-3.619
65	140.000	145.404	-5.404	-4.574
66	140.000	143.727	-3.727	-6.233
67	140.000	151.587	-11.587	-8.276
68	140.000	151.203	-11.203	-8.002
69	140.000	154.729	-14.729	-10.520
70	140.000	155.105	-15.105	-10.790
71	180.000	155.145	24.855	13.808
72	180.000	159.365	20.635	11.464
73	180.000	163.385	15.615	9.230
74	180.000	164.152	15.045	8.804
75	180.000	166.849	15.151	7.306
76	180.000	165.555	14.444	8.024
77	180.000	167.996	10.004	5.558
78	180.000	170.291	9.709	5.394
79	180.000	171.111	6.889	4.939
80	180.000	163.346	11.654	6.475

FORMULA EXPANDIDA DE TAYLOR

$$V = 910.645 * A - 0.3297 * A^2 - 0.0366 * T^2 - 0.3803 * VR + 0.8936$$