

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

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA RELAÇÃO FERRITA / PERLITA
NA USINABILIDADE DOS AÇOS ABNT 1020 E ABNT 8620

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

ÁLISSON ROCHA MACHADO

FLORIANÓPOLIS, AGOSTO DE 1982

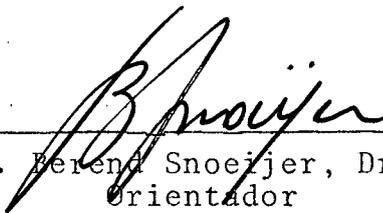
INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA RELAÇÃO FERRITA / PERLITA
NA USINABILIDADE DOS AÇOS ABNT 1020 E ABNT 8620

ÁLISSON ROCHA MACHADO

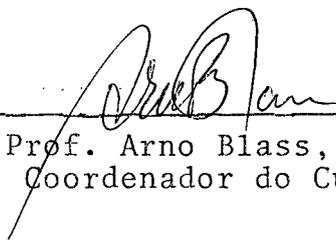
Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título
de

"MESTRE EM ENGENHARIA"

Especialidade: Engenharia Mecânica - Área de concentração: Fabri-
cação e aprovada em sua forma final pelo Curso de Pós-Graduação.

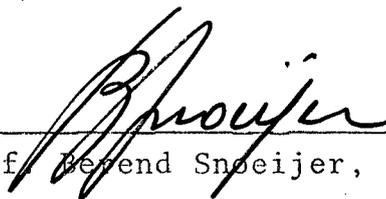


Prof. Berend Snoeijer, Dr.-Ing.
Orientador

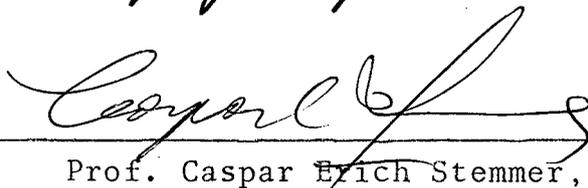


Prof. Arno Blass, Ph.D.
Coordenador do Curso

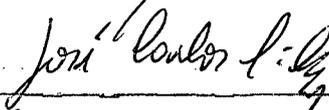
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Berend Snoeijer, Dr.-Ing.



Prof. Caspar Erich Stemmer, Esp.



Prof. José Carlos Ribeiro da Silva, M.Sc.



Prof. Lourival Boehs, M.Sc.

À minha mãe e
ao meu pai

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Berend Snoeijer, pela orientação.
- Ao Departamento de Engenharia Mecânica e à Coordenadoria do Curso de Pós-Graduação da UFSC, nas pessoas do Prof. Arno Bollmann e Prof. Arno Blass, respectivamente, pela oportunidade da realização deste trabalho.
- Aos integrantes da Banca Examinadora, pela contribuição e enriquecimento do trabalho.
- Ao Prof. Lourival Boehs, pela disposição e atenção nas soluções de dúvidas.
- Aos camaradas Américo Scotti, Luiz Airton Consalter e Alexandre Dias da Silva, pelo coleguismo.
- Aos amigos Waldyr Ristow Júnior, Anildo Corrêa Agostinho e Júlio F. Baumgartner, todos integrantes do Laboratório de Ciência dos Materiais da UFSC, e à todo o pessoal integrante do Laboratório de Máquinas Operatrizes, pelo empenho na realização dos ensaios.
- À todos os demais professores integrantes do Departamento de Engenharia Mecânica, com os quais tive oportunidade de estudar e aprender.
- À Srta. Maike Buttendorf, pelo excelente trabalho de datilografia.
- À Srta. Tânia Ramos, pela revisão na pontuação.
- À Brassinter S/A., pela doação das ferramentas de corte.

- À Aços Finos Piratini S/A., Villares e Companhia Siderúrgica Nacional, pela doação dos materiais ensaiados.
- À Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), nas pessoas dos Srs. Carlos Mendes e Francisco Borato, pelo apoio na realização dos ensaios metalográficos quantitativos.
- À CNEN, pelo apoio financeiro.
- À todos, que de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Da Teoria da Usinagem

2.1.1. Definição

2.1.2. Generalidades

- a) Teoria da formação do cavaco
- b) Forças de corte, Avanço, Profundidade de corte e Velocidade
- c) Formas de desgaste da ferramenta de corte
- d) Mecanismos de desgaste
- e) Vida da ferramenta e Critério de fim de vida
- f) A equação de Taylor

2.2. Influência da Microestrutura e Outros Fatores na Usinabilidade do Aço

2.3. Ensaio de Usinabilidade (British Standard)

3. EQUIPAMENTOS USADOS NOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE USINABILIDADE E SUAS AFERIÇÕES

3.1. Equipamentos

3.2. Aferições

4. MATERIAIS USADOS NOS ENSAIOS DE USINABILIDADE E SUAS CARACTERIZAÇÕES
 - 4.1. Corpos de Prova
 - 4.2. Propriedades Mecânicas e Físicas
 - 4.3. Composição Química, Tratamento Térmico, Análise Metalográfica e Análise Metalográfica Quantitativa
5. ENSAIOS DE USINABILIDADE
 - 5.1. Procedimentos dos Ensaios e Parâmetros Utilizados
 - 5.2. Apresentação e Análise dos Resultados Experimentais
6. CONCLUSÕES
7. BIBLIOGRAFIA
8. APÊNDICES

SIMBOLOGIA

- a - Profundidade de corte (mm)
- C - Constante de medição do taco-gerador $|\frac{\text{volts}}{\text{rpm}}|$
- D - Diâmetro do corpo de prova (mm)
- Fr - Força de recuo (kgf)
- Fs - Força de corte (kgf)
- Fu - Força de usinagem (kgf)
- Fv - Força de avanço (kgf)
- h - Espessura de corte (mm)
- K - Constante de Taylor
- KB - Largura da cratera (mm)
- KM - Distância do centro da cratera à aresta de corte (mm)
- KT - Profundidade da cratera (mm)
- L - Comprimento do registro das forças no papel fotográfico durante um passe (mm)
- m - Número de passes
- n - Rotação (rpm)
- N - Média de número de pulsos magnéticos
- R² - Coeficiente de determinação

- r_e - Raio da ponta da ferramenta (mm)
- s - Avanço (mm/rotação)
- T - Vida da ferramenta de corte (min)
- T_u - Tempo total de usinagem (min)
- t - Tempo de usinagem por passe (min)
- V - Velocidade de corte (m/min)
- V_a - Velocidade de avanço (m/min)
- VB - Desgaste de flanco (mm)
- VB_N - Notch wear (mm)
- V_p - Velocidade de saída do papel fotográfico (mm/min)
- ϕ - Ângulo de cisalhamento
- α - Ângulo de incidência
- γ - Ângulo de saída
- χ - Ângulo de posição
- ϵ - Ângulo de ponta

RESUMO

É apresentado um estudo sobre a influência da variação da relação Ferrita / Perlita nas características de usinabilidade dos aços ABNT 1020 e ABNT 8620.

As diferentes relações Ferrita / Perlita foram obtidas através de várias velocidades de resfriamento nos tratamentos térmicos a que os dois tipos de aços foram submetidos.

Os resultados foram analisados com o auxílio da equação de Taylor simples, usando três condições de corte distintas, garantindo-se dentro de um tempo razoável, um desgaste VB da ferramenta de 0,3 mm.

No aço ABNT 1020, uma menor relação Ferrita / Perlita proporcionou maior usinabilidade. No aço ABNT 8620 foi obtida maior usinabilidade no estado em que se tinha maior Ferrita / Perlita.

ABSTRACT

A study is presented on the influence of the percentual ferrite / perlite ratio on the machinability of ABNT 1020 and ABNT 8620 steels.

Different ferrite / perlite ratios were obtained through different cooling velocities on the thermal treatments to which the two steels were submitted.

Results were analysed via the simple Taylor equation, using three different machining situations, the VB wear of the tool being guaranteed at 0,3 mm within a reasonable machining time.

For ABNT 1020 steel a smaller ferrite / perlite ratio produced higher machinability. For the ABNT 8620 steel, a higher machinability was obtained when a higher ferrite / perlite ratio was present.

1. INTRODUÇÃO

Os processos de fabricação por usinagem, devido a sua versatilidade, tem uma grande importância econômica. Por esta razão, aliada à complexidade do assunto, vem sendo realizadas em todo o mundo grandes quantidades de pesquisas nesta área com o objetivo de obter a otimização dos processos.

A complexidade dos processos de usinagem se deve ao grande número de fatores que nela influem. A microestrutura é apenas um deles.

Do ponto de vista experimental torna-se difícil destacar um determinado fator e indicar quantitativamente sua influência na usinabilidade.

O presente trabalho foi realizado seguindo uma linha de pesquisa, cujo objetivo é a tentativa de encontrar respostas sobre a influência de fatores isolados.

Os ensaios restringem-se aos aços ABNT 1020 e ABNT 8620, cujas microestruturas foram variadas mudando-se as velocidades de resfriamento nos tratamentos térmicos.

Estes materiais foram usinados (torneamento cilíndrico), utilizando-se como critério de fim de vida da ferramenta o limite de 0,3 mm para o desgaste de flanco VB. Os dados obtidos foram relacionados através da equação de Taylor simples.

Procurou-se correlacionar a quantidade de ferrita e perlita existente em cada material com a sua usinabilidade

A realização de trabalhos desta natureza torna-se difícil, pois os fatores como já citados, estão relacionados entre si de tal maneira, que às vezes a otimização de um leva ao prejuízo de outro. Desta forma, a otimização dos processos somente

poderá ocorrer mediante a realização de uma série sistemática de ensaios, procurando esclarecer a influência dos diversos parâmetros que entram no conceito de usinabilidade.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. DA TEORIA DA USINAGEM

2.1.1. Definição

De um modo geral, pode-se dizer que usinagem é a operação na qual as dimensões e/ou formas originais da peça são mudadas, com remoção de cavaco. A ferramenta de corte é pressionada contra o material da peça, originando um sistema de forças. O material sob ação de movimento simultâneo da peça e ferramenta flui, ao longo da superfície de saída desta última, sob um estado complexo de tensões. Entre a peça e a ferramenta, na zona de contato, tem-se a presença de atrito, que no processo tem uma influência significativa [1].

Neste sentido, a operação de remoção de material de uma peça por ação de uma ferramenta cortante é conhecido por usinagem. O comportamento de um material na usinagem é definida por "usinabilidade". Esta propriedade, para as mesmas condições de corte, é melhor quando [2]:

- o tempo de usinagem para remoção de um determinado volume de material diminui;
- a qualidade da superfície melhora;
- a energia necessária diminui;
- a forma dos cavacos é adequada;
- a vida da ferramenta aumenta.

2.1.2. Generalidades

a) Teoria da formação do cavaco

Em geral a formação de cavaco nas condições normais de

usinagem com ferramenta de metal duro se processa da seguinte forma |3|:

- I) Durante a usinagem, devido a penetração da ferramenta na peça, uma pequena porção de material (ainda solidário à peça) é recalcada contra a superfície de saída da ferramenta.
- II) Devido ao movimento relativo entre a peça e a ferramenta, inicia-se um escorregamento da porção de material deformada e cisalhada (cavaco) sobre a superfície de saída da ferramenta.
- III) O material recalcado sofre uma deformação plástica, a qual aumenta progressivamente, até que as tensões de cisalhamento se tornem suficientemente grandes de modo a iniciar um deslizamento entre a porção do material recalcado e a peça. Este deslizamento se realiza segundo os planos de cisalhamento dos cristais da porção de material recalcado |4|. Durante a usinagem, estes planos instantâneos irão definir uma certa região entre a peça e o cavaco, dita região de cisalhamento. Para melhor compreensão pode-se comparar esta região a um plano dito plano de cisalhamento, o qual é definido pelo ângulo ϕ de cisalhamento. Ver figura 1.
- IV) Na continuidade do processo, haverá uma ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento, dependendo das condições de usinagem e da ductilidade do material.

Este fenômeno se repete enquanto não se parar o processo. Há outras teorias, como a analogia com o baralho, de Piispänen |5|.

Assim, qualquer que seja a teoria, deve-se admitir uma região de deformação plástica e, como anteriormente citado, esta região pode ser reduzida a um plano que é caracterizado pelo ângulo ϕ . Na determinação deste ângulo, vários pesquisadores |3| e |6| desenvolveram trabalhos, dos quais podem ser citados, entre outros, a "Teoria de Ernest e Merchant" |7| que estuda as relações de forças sobre o cavaco, sem considerar a distribuição de tensão; a "Teoria de Lee e Shafer" |8|, que se baseia no campo de linhas de escorregamento |6|; a "Teoria de Shaw, Cook e Finnie" |9|, que dá atenção especial à interrelação entre o atrito cava

co-ferramenta e o processo de cisalhamento desenvolvido na formação do cavaco; a "Teoria de Hucks" [10], que se fundamenta no estado duplo de tensões e no processo da envoltória de Mohr.

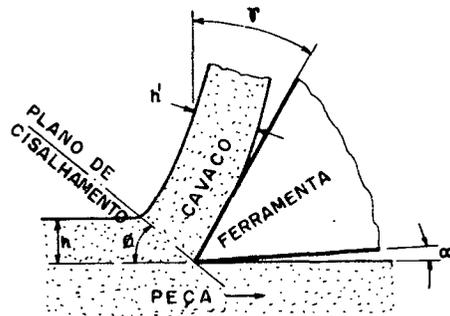


FIGURA 1 - Plano de cisalhamento.

O tipo e a forma são fatores importantes no processo de remoção de material.

Quanto ao tipo, para materiais dúcteis, tem-se a formação de um cavaco contínuo ou de cisalhamento, e para materiais frágeis um cavaco de cisalhamento ou de ruptura. Ver figura 2.

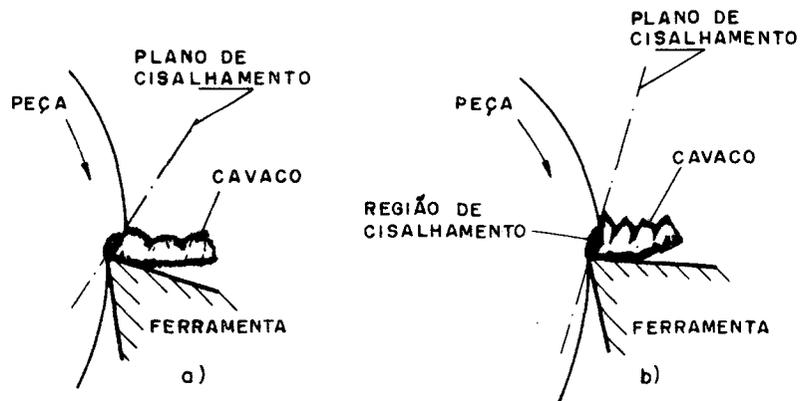


FIGURA 2 - Formação do cavaco (a) contínuo (b) cisalhamento.

Quanto a forma, os cavacos podem ser classificados em [11]:

- cavaco em fita;
- cavaco helicoidal;
- cavaco espiral;
- cavaco em fragmentos; (ver figura 3).

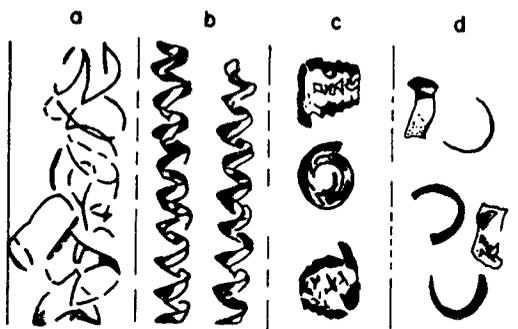


FIGURA 3 - Formas de cavaco - a) cavaco em fita; b) cavaco helicoidal; c) cavaco espiral; d) cavaco em fragmentos.

Estas formas de cavaco podem sofrer mudanças quando:

- são alteradas as condições de usinagem;
- a superfície de saída da ferramenta tem uma forma especial;
- são usados quebra-cavacos.

Para materiais não demasiadamente tenazes, consegue-se uma mais fácil quebra do cavaco com a diminuição do ângulo de saída da ferramenta, com a diminuição do ângulo de inclinação da aresta de corte, com o emprego de ambos com valores negativos, com o aumento da espessura h de corte, com a diminuição da velocidade de corte, já que estas situações levam a uma maior deformação plástica e conseqüente encruamento. Certas formas de cavaco prejudicam a operação de usinagem e o acabamento superficial da peça. Entre elas, a menos desejável é o cavaco em fita, que pode provocar acidentes, pois ocupa muito espaço e é de difícil transporte.

b) Forças de Corte, Avanço, Profundidade de Corte e Velocidade

Durante um processo de torneamento tem-se um sistema

de forças de usinagem de três componentes ortogonais que, compostas, dão origem à força resultante F_u , como mostra a figura abaixo.

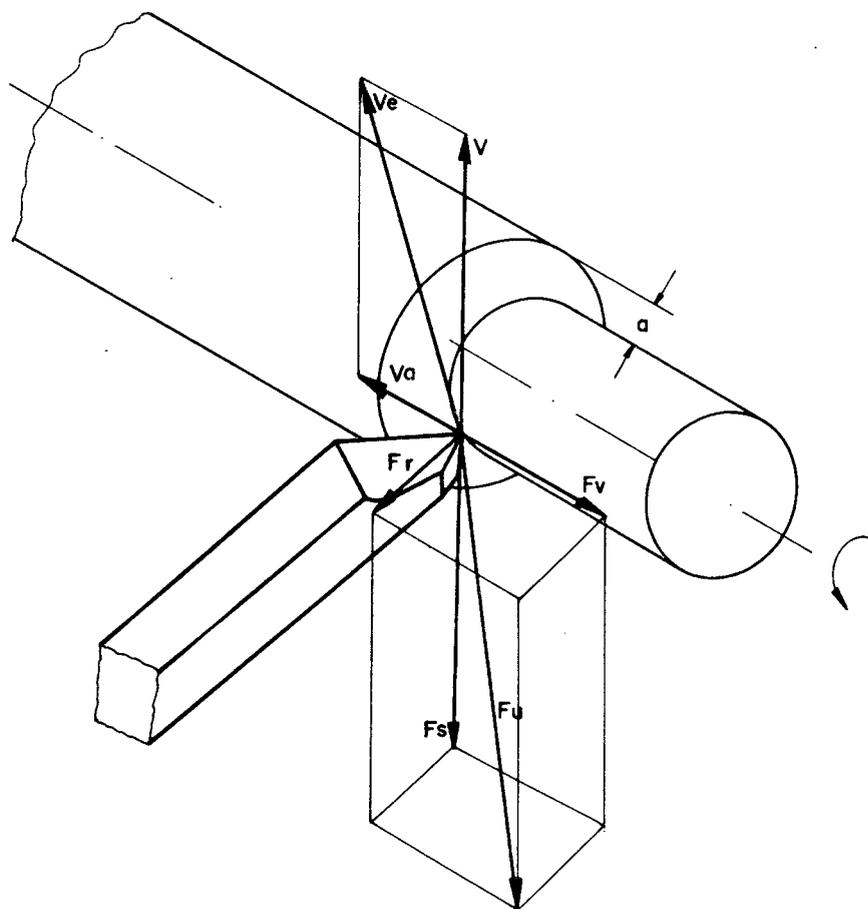


FIGURA 4 - Componentes da força resultante F_u .

- F_s - É a componente de F_u segundo a direção de corte, que é dada pela velocidade de corte V .
- F_v - É a componente de F_u segundo a direção de avanço, dado pela velocidade de avanço.
- 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 de avanço e passa por um ponto genérico na aresta de corte.

A força de usinagem F_u depende de uma série de fatores como [3]:

- material da peça a usinar;
- área da seção de corte;
- espessura de corte h ;
- geometria da ferramenta e ângulo de posição;
- estado de afiação da ferramenta;
- material da ferramenta;
- lubrificação;
- velocidade de corte.

No torneamento, o avanço é definido como sendo o percurso da ferramenta realizado em cada volta da peça, e é dado em mm/rotação.

A profundidade de corte "a" é definida como a penetração da ferramenta de corte, medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho, e pode ser visto na figura 4.

Também na figura 4 pode-se distinguir a velocidade de corte "V", que é a velocidade tangencial da peça em relação a um ponto genérico na aresta de corte.

c) Formas de Desgaste da Ferramenta de Corte

Devido às condições de alto atrito, altas temperaturas e exigências de grandes produções, as ferramentas de corte sofrem desgastes que limitam sua vida a curtos espaços de tempo. Os mecanismos que levam a ferramenta de corte a atingir um certo valor crítico de desgaste serão expostos no próximo sub-ítem. A forma destes desgastes poderão ser vistos na figura 5.

Na figura 5 distingue-se duas formas básicas de desgaste, que são:

- desgaste de flanco, e
- desgaste de cratera.

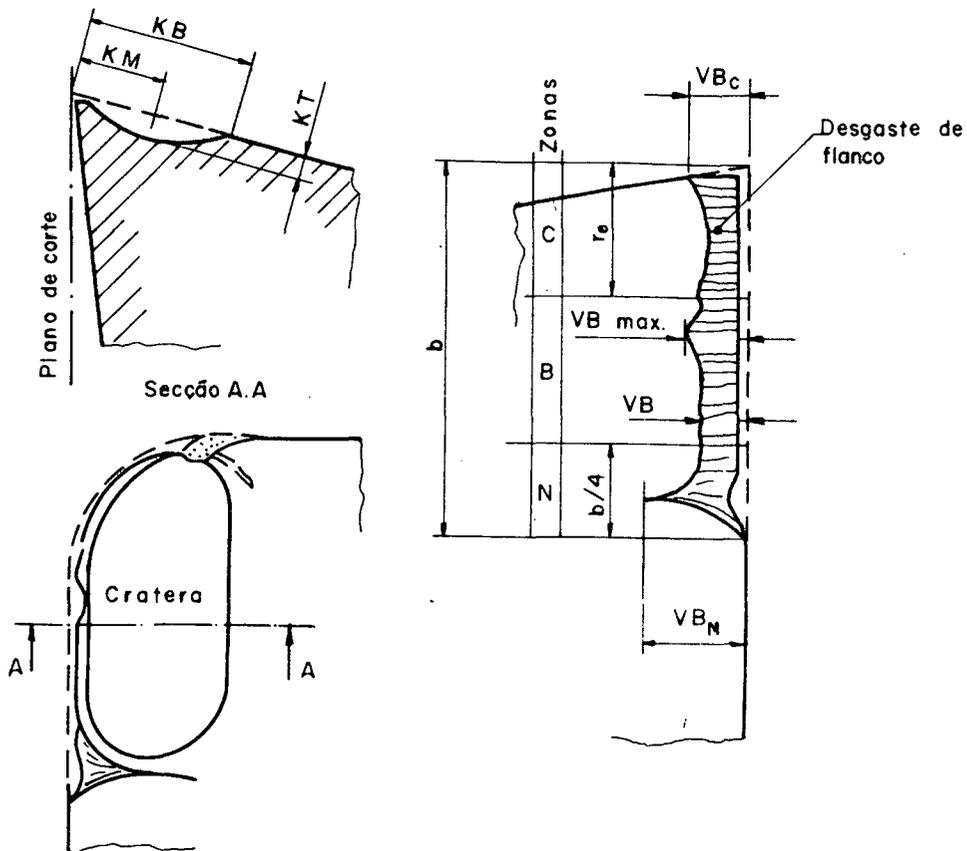


FIGURA 5 - Formas de desgaste de uma ferramenta de corte.

De acordo com a British Standards Institution (BSI), no desgaste de flanco distinguem-se três zonas. A zona "C" representa a parte curva do raio da ponta da ferramenta de corte. A zona "N" é definida como sendo a quarta parte do comprimento de desgaste " b ", medido do lado oposto do raio da ponta da ferramenta de corte. A zona "B" é a zona compreendida entre as zonas "C" e "N".

O desgaste médio de flanco VB e o desgaste VB_{max} deverão ser medidos dentro da zona "B". Quando o desgaste é uniforme não ocorre VB_{max} .

Usualmente ocorre ainda uma marca de desgaste mais profunda VB_N (notch wear) na região "N", próxima ao ponto de contato entre a aresta de corte e superfície externa da peça.

No desgaste de cratera distingue-se as grandezas KM , que é a distância do centro da cratera à aresta de corte; KT profundidade da cratera; e KB , largura da cratera.

d) Mecanismos de Desgaste

O comportamento de uma ferramenta de corte quando em operação de usinagem, depende de vários fatores que irão influenciar no seu processo de desgaste. Durante o desgaste ocorrem vários fenômenos, com a predominância de um ou outro, dependendo da natureza do material usinado e das condições de corte. A representação gráfica abaixo, relativa à usinagem do aço ABNT 1060, segundo G. Vieregge [13], mostra a variação do desgaste VB e KT em função da velocidade de corte e do avanço para um tempo de usinagem de 10 min., $a = 2,0$ mm, ferramenta de metal duro P30.

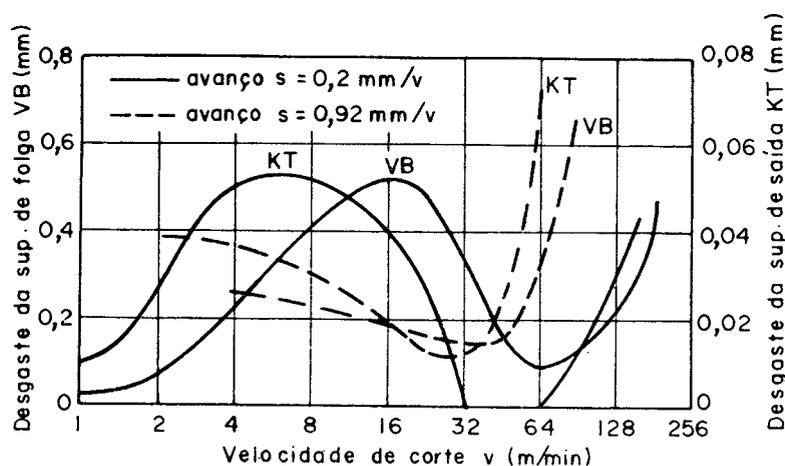


FIGURA 6 - Curvas desgaste x velocidade de corte.

No fenômeno de desgaste pode ocorrer a superposição dos seguintes mecanismos:

- deformação da aresta cortante;
- desgaste adesivo;
- desgaste por abrasão;
- desgaste por oxidação;
- desgaste por difusão, como mostra a figura 7.

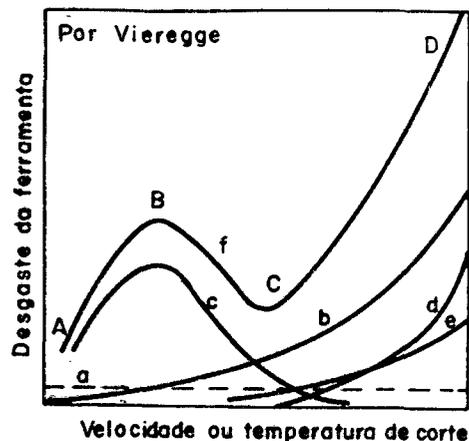


FIGURA 7 - Participação dos diferentes mecanismos no desgaste total da ferramenta; a = deformação da aresta cortante; b = abrasão mecânica; c = adesão; d = difusão; e = oxidação; f = resultante.

A predominância de um ou de outro mecanismo de desgaste num processo de usinagem, vai depender fundamentalmente dos fatores: velocidade de corte, avanço, propriedades do material da peça e material da ferramenta de corte. A figura 7 mostra a distribuição aproximada destes mecanismos, com a variação das condições de corte [14].

O desgaste abrasivo é consequência, principalmente da presença de constituintes de alta dureza como, por exemplo, fragmentos da aresta postiça de corte, que são arrastados sobre a superfície de saída da ferramenta [15].

O desgaste adesivo ocorre na superfície de saída da ferramenta, em face da presença de condições de temperatura e pressão específica apropriadas, bem como superfície de material recém cortada, portanto, isenta de película de óxido. A resistência das ligações que ocorrem é tão grande que, com o desenvolvimento do processo de usinagem a separação não se dá ao longo da interface cavaco/ferramenta, mas em pontos no interior da ferramenta. A quantidade de material removido é aparentemente proporcional à área real de contato [15]. Com o aumento da temperatura, isto é, velocidade de corte ou avanço, a resistência ao cisa

lhamento diminui e, conseqüentemente, perde-se a estabilidade das ligações metálicas (gume postiço), diminuindo assim o desgaste.

O desgaste por oxidação nas pastilhas de metal duro é explicado pela formação de uma película de óxido, fenômeno que é acelerado pelo aquecimento da ferramenta na usinagem. O oxigênio forma um óxido complexo de W-Ti-Co-Fe, que geralmente é o responsável pela deterioração da aresta lateral de corte, reduzindo a vida da ferramenta e o acabamento superficial das peças usinadas. A figura 8 mostra as zonas oxidadas em uma ferramenta de metal duro.

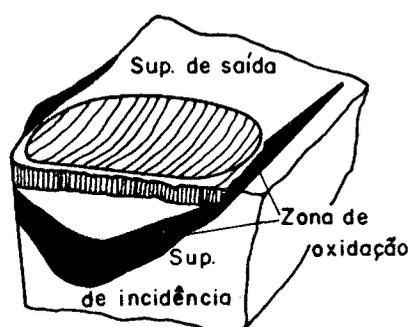


FIGURA 8 - Zonas de oxidação em uma ferramenta de metal duro.

A oxidação dos metais duros de inicia sob temperaturas da ordem de 700 a 800°C, sendo mais acentuada nas ferramentas à base de WC-Co que nas de WC + TiC + TaC e Co [3].

A difusão no estado sólido é o mecanismo através do qual átomos de um cristal metálico mudam de um ponto da rede para outro, causando a transferência do elemento na direção da menor concentração. A difusão depende do tempo e, principalmente, da temperatura, responsável pelo nível de agitação atômica, além da afinidade química de ligação do par. No processo de usinagem a difusão é conseqüência das reações termoquímicas, função das altas temperaturas desenvolvidas, grande grau e altas taxas de

deformações e do contato metal-metal quase contínuo. A existência das reações termo-químicas é evidenciada pela distribuição de microdurezas nas vizinhanças das zonas de contato, segundo Loladze [16], Zlatin e Merchant [17].

E. Schaller [18] estabeleceu relações quantitativas da difusão entre o aço e metal duro com temperaturas variando entre 1200°C e 1500°C. A difusão ocorreu entre os elementos:

- difusão do ferro na fase cobalto;
- difusão do cobalto no aço, havendo formação de uma camada maciça de cristais mistos;
- dissolução do carboneto de tungstênio com conseqüente formação de carbonetos mistos e duplos do tipo $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$, $(\text{FeW})_6\text{C}$ e $(\text{FeW})_{23}\text{C}_6$, verificando-se uma liberação do carbono que difunde em direção ao aço. A figura 9 representa, de forma esquemática, as variações das concentrações dos diferentes componentes, a uma temperatura de, aproximadamente, 900°C.

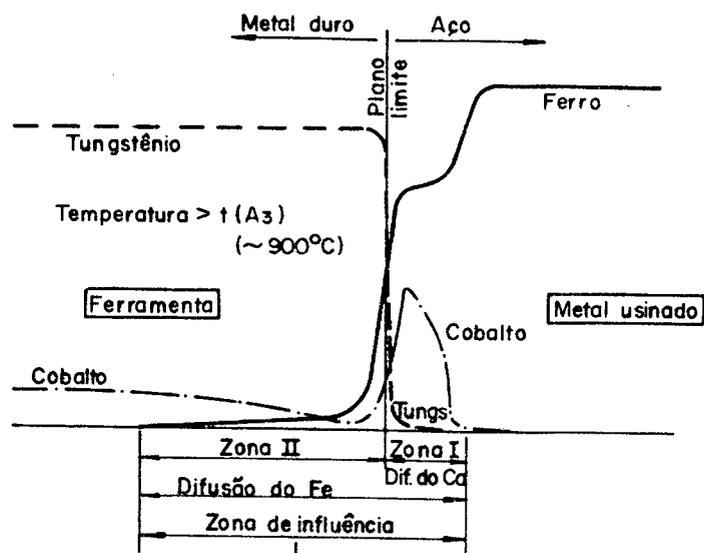


FIGURA 9 - Representação esquemática das variações das concentrações do ferro, do cobalto e do tungstênio numa reação de difusão entre o metal duro e o aço [18].

Devido à redução do volume de cobalto livre, que toma parte das reações, a difusão do ferro no cobalto, e do cobalto

no ferro, diminuem com o aumento dos teores de TiC e TaC no metal duro. Esta redução do cobalto livre faz com que a continuidade da rede de cobalto se rompa, dificultando a difusão do ferro no cobalto. Outra razão é que com o aumento do teor de TiC e TaC, reduz-se também o teor de WC, que é ativador das reações de difusão do ferro no cobalto e do cobalto no ferro [11], [13], [18].

A partir destas reações de difusão descritas, tiram-se conclusões relativas ao desgaste da ferramenta com base em dois mecanismos:

- 1 - Desgaste progressivo devido à transferência do material da ferramenta ao cavaco, em consequência das reações de difusão.
- 2 - Desgaste da ferramenta devido ao enfraquecimento da estrutura do metal duro, em consequência das reações de difusão, seguido de uma abrasão mecânica.

A aresta postiça de corte é um fenômeno que ocorre em determinadas condições de corte, sendo constituída de partículas de material usinado, que se acumulam na superfície de saída da ferramenta. A figura 10 mostra uma aresta postiça de corte.

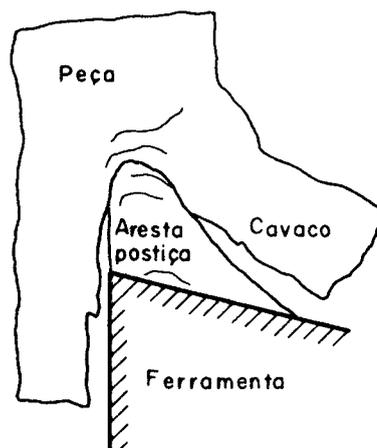


FIGURA 10 - Forma característica de uma aresta postiça de corte.

Vários pesquisadores já estudaram o comportamento da aresta postiça de corte e entre eles J.E. Williams e E.C. Rollason [19]. Estes pesquisadores fizeram ensaios práticos em vários materiais, sobre várias condições, e concluíram que:

- a aresta postiça de corte não se forma na usinagem de materiais puros;
- é necessário uma segunda fase para haver sua formação;
- a formação da aresta postiça de corte independe da dureza da matriz e segunda fase;
- quanto maior a quantidade da segunda fase, maior a altura e mais aguda é a aresta postiça de corte;
- até uma determinada velocidade há um crescimento da aresta postiça de corte, com o aumento da velocidade (ou da temperatura de corte), a partir da qual este efeito se inverte, ou seja, com o aumento da velocidade ter-se-á uma redução na sua altura;
- o aumento no avanço causa a eliminação da aresta postiça de corte;
- com exceção dos aços resulfurados, nenhum efeito na formação da aresta postiça de corte foi encontrado com a mudança do material da ferramenta.

A aresta postiça de corte aparece em velocidades relativamente baixas, porém, quando presente, tem influência marcante no desgaste da ferramenta.

e) Vida da Ferramenta e Critério de Fim de Vida

A vida da ferramenta pode ser definida como sendo o tempo em que ela trabalha efetivamente, até perder sua capacidade de corte, dentro de critérios previamente estabelecidos.

A perda da capacidade de corte é geralmente avaliada através de um determinado grau de desgaste.

Os fatores que determinam a fixação deste determinado grau de desgaste, são:

- o desgaste da superfície de saída da ferramenta atinge proporções tão elevadas, que se receia a quebra do gume cortante;
- os desgastes chegam a valores tais, provocando uma elevação da temperatura, aproximando-se do valor para a qual a ferramenta perde rapidamente o fio de corte;
- o desgaste da superfície de incidência da ferramenta dificulta manter as tolerâncias exigidas na peça;
- o acabamento superficial da peça não é mais satisfatório;
- o aumento das forças de usinagem passam a interferir no funcionamento normal da máquina.

Além do tempo efetivo de corte, a vida da ferramenta pode ainda ser expressa em:

- tempo total de trabalho (caso de cortes interrompidos ou fresamentos);
- percurso de corte;
- volume de material removido;
- número de peças produzidas;
- velocidade de corte para um determinado tempo de vida.

Neste sentido as principais variáveis que afetam a vida da ferramenta são (ver Apêndice I):

- condições de usinagem (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte);
- geometria da ferramenta;
- material da peça;
- material da ferramenta;
- o uso ou não de fluidos de corte.

O desgaste de cratera, como critério de fim de vida, é recomendado quando a ferramenta é usada em condições severas de avanço e velocidade de corte, ou na usinagem de materiais muito tenazes, como o aço inoxidável austenítico ^[20]. No entanto, a medição deste desgaste limita o uso do critério.

De acordo com a BSI ^[12], os critérios de fim de vida a serem utilizados são (ver figura 5):

$$\begin{aligned}VB &= 0,3 \text{ mm} \\VB_{\max} &= 0,6 \text{ mm} \\VB_N &= 1,0 \text{ mm}\end{aligned}$$

Assim, em um ensaio de usinabilidade, qualquer dos três desgastes acima que primeiro atingir os valores citados será considerado como critério de fim de vida.

f) A Equação de Taylor

A expressão:

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

ou ainda:

$$\text{Log } T = \text{Log } K - x \cdot \text{Log } V$$

foi apresentada por Taylor.

T representa a vida da ferramenta em min. V representa a velocidade de corte em m/min. O expoente x é o coeficiente angular da reta $T \times V$, no diagrama dilogarítmico. A constante K pode ser interpretada como sendo a vida da ferramenta para uma velocidade de corte de 1 m/min.

A vida da ferramenta é representada esquematicamente na figura 11.

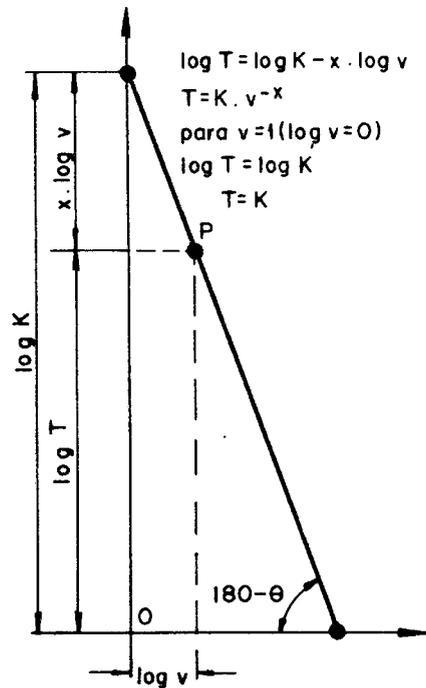


FIGURA 11 - Representação em escalas logarítmicas da curva de vida da ferramenta.

2.2. INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA E DE OUTROS FATORES NA USINABILIDADE DO AÇO

Como regra geral, a usinabilidade envolve, ou está relacionada com a vida da ferramenta, acabamento superficial da peça, velocidade de corte, avanço ou profundidade de corte, geometria da ferramenta de corte, fluido de corte, e também da qualidade, composição, dureza e microestrutura do aço. A divisão pode ser feita da seguinte maneira |21|:

Material da peça

- composição química;
- tamanho de grão;
- fusão e processo de fundição;
- fabricação:
 - fundido
 - forjado
 - trefilado
 - laminado

- tratamento térmico:
 - recozimento
 - normalização
 - têmpera e revenimento
 - outros
- propriedades:
 - resistência à tração
 - ductilidade
 - dureza
 - encruabilidade
- dimensões e forma
- microestrutura

Ferramenta de corte

- composição
- tratamento térmico
- dureza e resistência
- geometria
- tenacidade

Fluido de corte

- propriedades refrigerantes
- propriedades lubrificantes
- forma de aplicação

Máquina operatriz

- tipo da máquina
- rigidez
- avanço
- velocidade de corte
- profundidade de corte.

Numa abordagem sobre os mais importantes fatores, segue:

Composição química

Torna-se extremamente difícil determinar a influência de cada elemento sobre a usinabilidade, mas, como regra geral, os elementos formadores de carbonetos diminuem a usinabilidade pelo aumento da dureza. De forma idêntica atuam os elementos que for

mam soluções sólidas na ferrita, já que estes também levam a uma maior dureza e menor ductilidade desta fase. Os elementos que aparecem como inclusões atuam desfavoravelmente se duros e abrasivos, e favoravelmente, se pouco duros ou com eventual característica lubrificante. Os elementos que melhoram a usinabilidade são os que levam, ao mesmo tempo, o aço a níveis de dureza e ductilidade convenientes [22].

O efeito do carbono na usinabilidade pode ser sumariado como segue:

- à temperatura ambiente, o ferro pode manter em solução sólida 0,008% C, que é a estrutura α homogênea, macia e ductil. Quando o teor de carbono excede aos 0,008%, este excesso aparece na forma de cementita (Fe_3C) e não mais em solução sólida, mas como um constituinte separado, geralmente na forma de perlita, que aumenta a resistência e a dureza da matriz, reduzindo a ductilidade. A figura 12 mostra a variação do índice de usinabilidade com o teor de carbono.

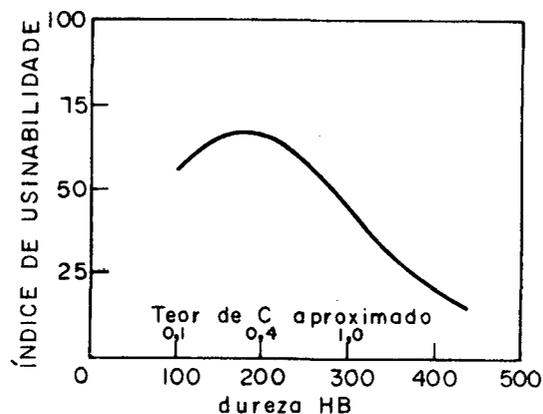


FIGURA 12 - Efeito do teor de carbono na usinabilidade [23].

No princípio da curva o aumento da usinabilidade advém da redução da ductilidade, mesmo que o aumento do teor de carbono implique no aumento da dureza. A curva cresce até um máximo, em torno de 0,4% C (200 HB) e a partir daí, o aumento no teor de carbono implica na redução da usinabilidade, ou seja, os efeitos

citados acima se invertem |23|.

A quantidade de inclusões de sulfetos de manganês no material a usinar tem grande influência na sua usinabilidade |24|, |25|. Os sulfetos de manganês são responsáveis pela ruptura do cavaco em pequenos fragmentos. Eles agem, também, como lubrificante, reduzindo o atrito e, conseqüentemente, a temperatura de corte. Erickson e Hardy |26|, atribuíram também aos sulfetos de manganês a formação de uma barreira anti-difusiva entre o cobalto da ferramenta e o ferro da peça na interface, resultando, assim, no aumento do índice de usinabilidade do material.

Outro elemento que causa o aumento da usinabilidade é o chumbo. Cerca de 0,3% Pb, distribuídos na matriz dos aços na forma de glóbulos, agem como lubrificante sólido, aumentando assim a usinabilidade do material.

O selênio é outro elemento que tem uma ação idêntica a do enxôfre. Forma com o manganês o MnSe e, estas inclusões não metálicas, provocam distorsões na rede cristalina do cavaco, tornando-o mais quebradiço e diminuindo o atrito na interface da ferramenta |23|.

A adição de 0,1% de fósforo nos aços doces aumenta a usinabilidade. O fósforo forma uma solução sólida com a ferrita causando uma certa fragilidade nesta, tendendo a uma melhor quebra do cavaco durante o processo de usinagem |23|.

A presença de óxidos nos aços também tem influência na usinabilidade. Shaumann |27|, através de experiências, constatou que materiais com mesma especificação DIN, submetidos aos mesmos tratamentos térmicos, quando provenientes de siderúrgicas, ou mesmo de corridas diversas, podem originar graus de usinabilidade diferentes. Shaumann atribui este fato a possíveis inclusões de óxidos na peça, que, ao saírem juntamente com o cavaco, se soldariam na superfície de saída e de incidência da ferramenta, formando uma camada protetora, originando, assim, menor des

gaste na ferramenta, veja figura 13.

Adições especiais de níquel, molibdênio, vanádio e cromo diminuem a usinabilidade, sendo que a ação do níquel é a mais forte [22].

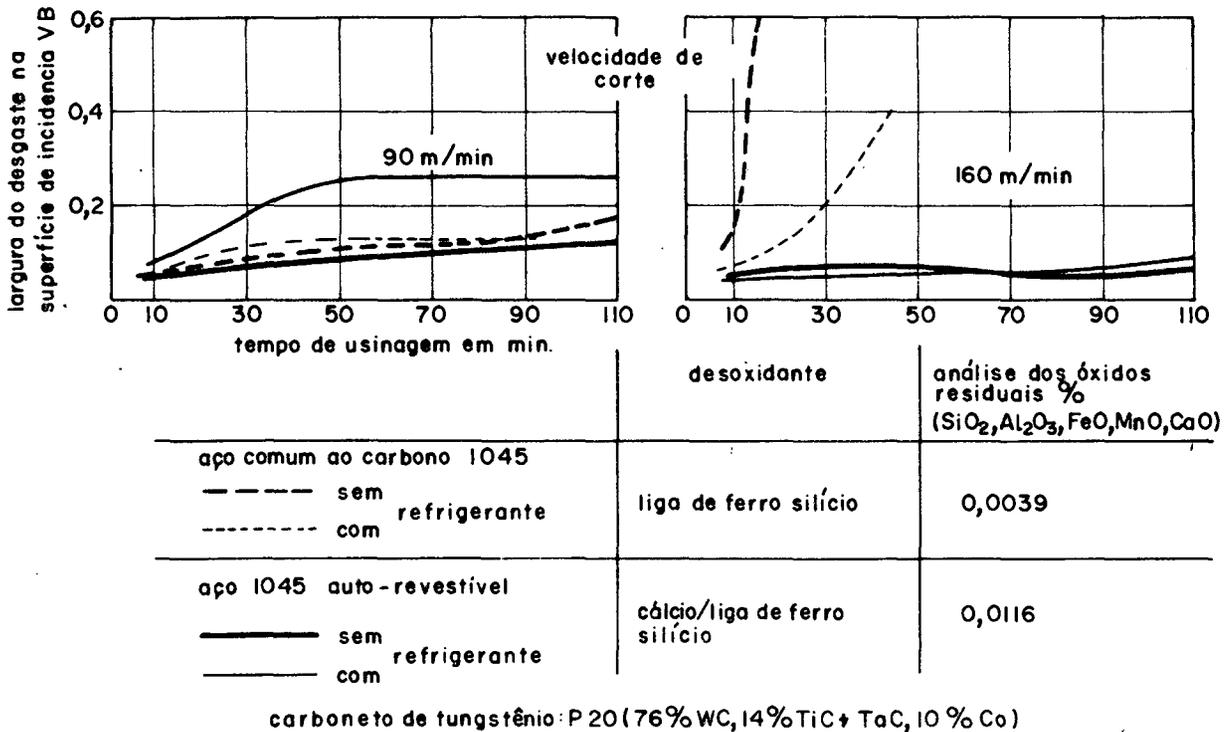


FIGURA 13 - Influência de resíduos de óxidos na usinabilidade.

Tamanho de grão

Sabe-se que na usinagem dos aços existem duas faixas de comportamento, dependendo da dureza ou teor de carbono (ver figura 12). Na primeira faixa, encontra-se um material com baixo teor de carbono, dútil e de baixa dureza. Neste caso a granulação fina aumenta a usinabilidade, pois tem-se uma redução na ductilidade. Na segunda faixa, ou seja, aços de médio carbono, que possuem uma dureza relativamente mais elevada e menor ductilidade, a granulação fina produzirá maior quantidade de calor na aresta cortante e favorecerá o desenvolvimento dos mecanismos de

desgaste, diminuindo, assim, a vida da ferramenta. Para estes tipos de aços, a granulação mais grossa é a que melhor resultado apresenta quanto a usinabilidade [21], [28]. Também neste último caso tem-se um limite, pois o tamanho de grão maior que o ideal levará à menor vida da ferramenta, quando ocorre a necessidade de corte de largas áreas de perlita com 0,8% a 0,85% de carbono, envoltas por finas dispersões de ferrita.

Estruturas zonadas

Aços laminados e recozidos, e em particular quando contém fósforo acima do teor máximo permitido e resfriados lentamente, revelam uma estrutura zonada, alternadas de ferrita e perlita [29], [30], [31], [32].

De acordo com experiências industriais, este fenômeno dificulta consideravelmente a usinagem, quando a aresta cortante se desloca na direção paralela a das zonas de ferrita e perlita, não apresentando inconveniente maior quando se desloca perpendicularmente [22], [33].

Tratamento térmico

Sabe-se que este é um fator de influência significativa na usinabilidade e, conseqüentemente, na vida da ferramenta, uma vez que o mesmo determina o tamanho de grão e a microestrutura do material. Ambos atuam na ductilidade e dureza do material.

A otimização da microestrutura, tamanho de grão, dureza e ductilidade, significam a necessidade de um controle no aquecimento (velocidade e temperatura), no tempo de permanência à temperatura de aquecimento, no resfriamento e na atmosfera do forno durante a realização do tratamento térmico. A modificação de um destes parâmetros pode representar uma alteração indesejada da propriedade de usinabilidade do material.

Dureza e ductilidade

Aceita-se que a dureza de um material é um bom índice de usinabilidade, isto é, para maiores durezas, menor usinabilidade |34|. Para os aços, isto é apenas parcialmente verdadeiro, pois sabe-se que outros fatores, como por exemplo a microestrutura, afetam quantitativamente a usinabilidade.

Em geral, nos aços com dureza maior que 250 HB, a usinabilidade varia quase que inversamente proporcional à dureza, e abaixo desta não segue mais esta regra. A dureza mais satisfatória para usinagem está em torno de 180 HB. Abaixo desta os aços são considerados de alta ductilidade, permitindo grande deformação do metal com grande tendência a desenvolver a aresta postiça de corte. O limite máximo de dureza para usinabilidade ainda aceitável é frequentemente considerado em torno de 350 HB. Os aços com dureza superior são usinados com velocidades reduzidas, resultando em maiores custos (ver figura 12).

Quanto a ductilidade, pode-se dizer que a usinabilidade diminui com o aumento desta propriedade, veja figura 14.

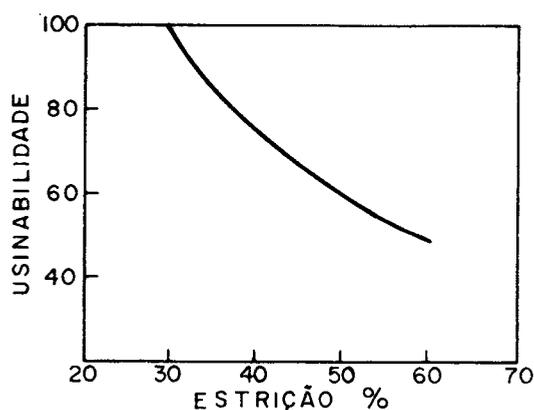


FIGURA 14 - Decréscimo da usinabilidade com o aumento da estrição (ductilidade) |23|.

Janistzky |35| mostrou que não considerando a composição química, o índice de usinabilidade de aços de mesma resistên

cia mecânica seria a mesma, se suas respectivas tensões de escoamento também o forem, o que significa pressupor uma microestrutura idêntica.

Microestrutura

Os microconstituintes podem ser analisados separadamente da seguinte maneira ^[22]:

A ferrita é um constituinte de pouca dureza (100 a 150 HB), maleável, corte fácil e provocando reduzido desgaste na ferramenta. Porém tem a tendência de formar aresta postiça de corte e, conseqüentemente, resultando num acabamento pouco satisfatório da peça.

A perlita no estado lamelar é um constituinte duro e pouco maleável, resultando num mecanismo de corte mais complexo, que deve ser analisado como uma sucessão de cisalhamentos da ferrita e de rupturas das lamelas frágeis de cementita do agregado. Quando a perlita está no estado globular, a fase da cementita está coalescida em partículas pequenas e esféricas, dispersas de modo mais ou menos homogêneo dentro da ferrita. Durante o corte acontece o cisalhamento da ferrita, seguindo um percurso que evita os glóbulos de cementita.

A bainita é uma estrutura de baixa usinabilidade.

Witteman ^[36] desenvolveu um trabalho, e classificou os aços carbono em função do teor de carbono e do tipo de estrutura, quanto a usinabilidade. Este trabalho foi feito também por Lane, Stam e Wolfe ^[23]:

- aços de muito baixo carbono (< 0,15% C) têm melhor usinabilidade na condição de normalizados ou deformados a frio. O grão de ferrita pequeno e maior dureza tende a melhorar a usinabilidade;
- aços entre 0,15% a 0,45% de carbono mostram a máxima usinabilidade quando estão no estado normalizados ou totalmente recozidos. Estes tratamentos produzem uma estrutura perlítica lamelar

lar. A estrutura esferoidizada da perlita dá uma usinabilidade inferior;

- aços com 0,45% a 0,8% de carbono deverão ter uma estrutura perlítica grosseira é esferoidizada para desbaste, e perlita lamelar para operação de acabamento;
- aços de alto carbono ($> 0,8\%$) tem ótima usinabilidade quando a cementita apresenta-se sob a forma esferoidal, tanto para desbaste como para acabamento.

Nos ferros fundidos, Field e Stansbury mostraram que o aumento da proporção de ferrita, por exemplo pelo recozimento, facilita de maneira muito sensível a usinagem [37]. O mesmo ocorre para os aços com teor de carbono superior à 0,4% (dureza superior a 180 HB), quando através de tratamento térmico adequado, se consegue uma proporção de ferrita maior.

De acordo com o raciocínio de Opitz, Ostermann e Gappish [38], o desgaste da ferramenta se processa em decorrência da transformação alfa/gama causadas pelas elevadas temperaturas. No decorrer do processo, verifica-se a microsoldagem desta estrutura com o material da ferramenta. A resistência destas microsoldagens é função do teor de carbono. A resistência destas microsoldas de austenita advinda da perlita é maior que a advinda da ferrita, e é tão resistente que a ruptura não se dá na interface, e sim no material da ferramenta. Conclui-se, então, que os cristais de austenita ricos em carbono provocam a destruição da estrutura do metal duro, enquanto os pobres em carbono não atacam a superfície (figura 15) por este mecanismo.

Esta microsoldagem ocorre tanto na superfície de saída como na superfície de incidência, só que devido às diferenças de temperaturas locais, as mudanças de fases nas diferentes superfícies ocorrerão para velocidades de corte distintas.

Quanto à influência das variáveis relativas à ferramenta de corte, fluidos de corte e máquinas ferramentas, não serão aqui tratados, visto que o objetivo deste trabalho está ligado as variáveis do material da peça.

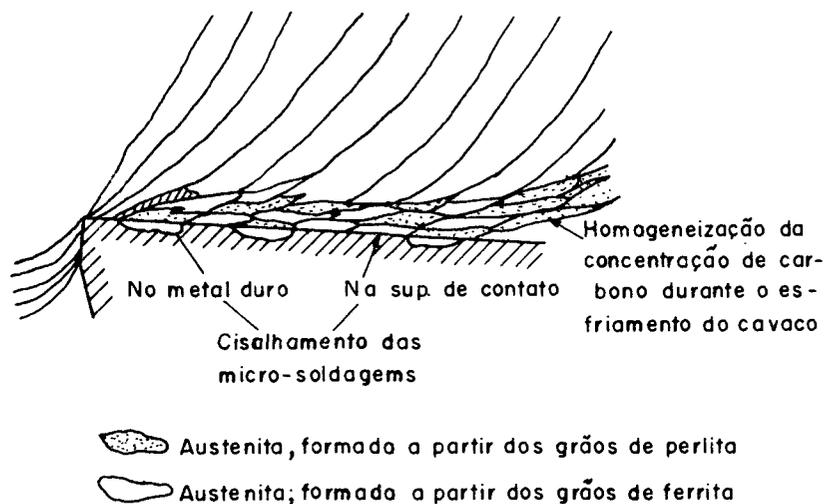


FIGURA 15 - Representação esquemática da ação dos cristais de austenita no desgaste da ferramenta.

2.3. ENSAIO DE USINABILIDADE

Os testes de vida da ferramenta têm aumentado consideravelmente, dada a variedade de condições de corte e métodos. Algumas instituições procuraram padronizá-los, como é o caso da British Standards Institution - BSI [12]. Neste trabalho, procurou-se seguir estas recomendações. Quando isto não for possível se fará menção explícita.

Existem dois tipos básicos de ensaios de usinabilidade: os de longa e os de curta duração. O usado neste trabalho pertence ao primeiro tipo, e consiste na obtenção do desgaste, ou destruição da aresta de corte da ferramenta, trabalhando em condições usuais de usinagem. Nestes ensaios o tempo é longo e a quantidade de material consumido é elevada. Nos ensaios de curta duração, o consumo de material e o tempo de ensaios são relativamente pequenos [3].

Nos ensaios de usinabilidade a norma BS 5623 faz uma série de recomendações, a saber:

- o material da peça deverá estar isento de carepa resultante de processo de fabricação anterior, isto é, em todo corpo de prova, antes do ensaio, deverá ser feito um torneamento para remover toda a camada, caso este efeito não for uma variável em teste;
- a relação comprimento/diâmetro do corpo de prova maior que 10 não é recomendado, em função de possíveis vibrações;
- recomenda furo de centro de 6,3 mm de diâmetro, com chanfro de proteção de 120° para montagem do corpo de prova na máquina;
- quanto à ferramenta, quando esta não for objeto de teste, é recomendado a classe ISO P10 ou P30 para aços, e K10 ou K20 para ferros fundidos;
- é permitido o uso de quebra-cavacos para pastilhas de material cerâmico e metal duro, principalmente quando este for um fator de segurança;
- é recomendado o procedimento de teste sem fluido de corte para pastilhas de materiais cerâmicos e metal duro.

Quando o avanço, profundidade de corte e raio da ponta da ferramenta não são variáveis de teste, recomenda seguir a tabela abaixo:

TABELA 1 - Condições de corte padrão segundo a norma BS 5623 |12|.

CONDIÇÕES DE CORTE	A	B	C	D
Avanço (mm/volta)	0,1	0,25	0,4	0,63
Profundidade de corte (mm)	1,0	2,5	2,5	2,5
Raio da ponta da ferramenta (mm)	0,4	0,8	0,8	1,2

No presente trabalho foi escolhida a condição B.

Quanto à escolha das velocidades, recomenda que sejam selecionadas 4 velocidades distintas para cada condição de tes-

te. A escolha deverá ser feita de tal maneira que a vida da ferramenta com a maior velocidade de corte não seja inferior a 5 min.. Quando se trata de materiais de elevado preço, este tempo poderá ser reduzido, mas não poderá ser menor que 2 min.. Na escolha das velocidades de corte é recomendado o uso de séries geométricas de números normalizados da ISO ^[39], para assim haver espaçamento adequado entre as velocidades sucessivas. No caso foi usado a série R40.

3. EQUIPAMENTOS USADOS NOS ENSAIOS DE USINABILIDADE E SUAS AFERIÇÕES

A preparação dos corpos de prova, os ensaios de usinabilidade, bem como a medição dos desgastes, foram realizados no Laboratório de Máquinas Ferramentas e Laboratório de Ciência dos Materiais, do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC.

3.1. EQUIPAMENTOS

a) Máquina Operatriz

- Torno Imor MVN - V - Nacional, especialmente adaptado para proporcionar uma variação contínua na velocidade de corte.

Fabricante: Indústria Romi S/A. -

Santa Bárbara d'Oeste - SP

Distância entre pontos: 1.000 mm

Diâmetro máximo sobre o barramento: 430 mm

Gama de velocidades da árvore: 0 a 2.000 rpm

- Potência de acionamento: 22 KW a 1.800 rpm.

Para a variação contínua da velocidade de corte foram usados:

- Variador de Tensão tipo RT1-8B

Fabricante: Eletro-Máquinas "Anel" S/A. - São Paulo.

- Retificador

Fabricante: Eletro-Máquinas "Anel" S/A. - São Paulo.

- Motor de Corrente Contínua

Fabricante: Eletro-Máquinas "Anel" S/A. - São Paulo.

b) Taco-Gerador e Multímetro Digital

- Taco-Gerador modelo: 9150
 Fabricante: Beckmann - Helipot Div.
 Constante de medição: $C = (7/1.000) \left| \frac{\text{volts}}{\text{rpm}} \right|$
- Multímetro Digital M3513
 Fabricante: Analog - Instrumentos Digitais Ltda.
 Faixa de operação: 0 a 1.000 V
 Resolução: 0,05% do final da escala selecionada
 Precisão: $\pm 1,0\%$ da leitura, ± 2 dígitos
 Para medidas a $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ e 50% UR.

c) Ferramenta e Porta-Ferramenta

Para a especificação da ferramenta e porta-ferramenta, foram realizados uma série de ensaios pilotos. (No Apêndice I estão apresentados os resultados destes ensaios). Com base nelas foram especificados a ferramenta e o porta-ferramenta.

- Insertos Reversíveis de Metal Duro classe ISO P30
 Fabricante: Brassinter S/A. - São Paulo
 Referência: SPUN 120308
 Formato quadrado, 12,70 mm x 12,70 mm, com espessura 3,18 mm, raio da ponta 0,8 mm - ângulo da saída positivo.
- Porta-Ferramenta para Inserto Reversível
 Fabricante: Brassinter S/A. - São Paulo
 Referência: CSBPR - 2525 M12
 Dimensões: 25 mm x 25 mm x 152 mm
 Ângulo de saída $\gamma = +5^{\circ}$
 Ângulo de incidência $\alpha = 5^{\circ}$
 Ângulo de posição $\chi = 75^{\circ}$
 Ângulo de ponta $\epsilon = 90^{\circ}$

A montagem do porta-ferramenta na máquina pode ser vista na figura 16.

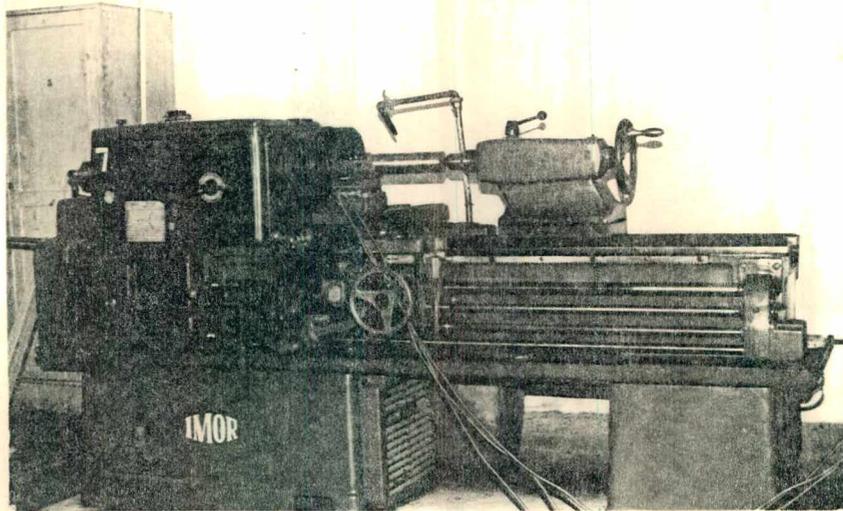


FIGURA 16 - Máquina-Ferramenta.

d) Microscópio de Ferramentaria

Para medição dos desgastes das ferramentas, foi utilizado um microscópio de ferramentaria

Fabricante: Nikon-Kogako K-K78771 - Japão

Modelo: Measurescope

Mesa Micrométrica de 50 mm x 100 mm

Resolução 0,001 mm.

Este microscópio pode ser visto na figura 17.

Para facilitar a medição do desgaste, foi utilizado um suporte especial, que permite ajustar a superfície de saída da ferramenta perpendicular ao feixe luminoso do microscópio.

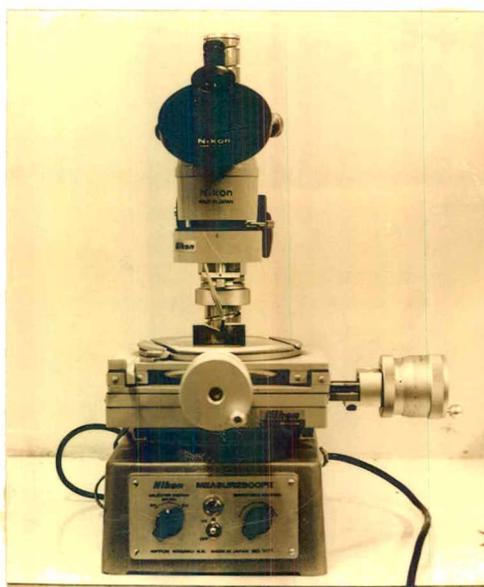


FIGURA 17 - Microscópio de ferramentaria usado na medição do desgaste de flanco.

e) Dinamômetro e Registrador

Para a medição das forças de usinagem utilizou-se uma plataforma dinamométrica de três componentes. Esta plataforma contém três cristais piezoelétricos que emitem sinais, resultantes das componentes de força de usinagem, que amplificados são enviados aos indicadores analógicos. Na saída dos amplificadores, após passarem por um conjunto de filtros RC, os sinais relativos às forças de corte, de avanço e de recuo vão para um oscilógrafo, que permite o registro destas componentes em papel fotográfico.

- Dinamômetro

Sistema de medição: cristais piezoelétricos

Fabricante: Kistler Instruments - Suíça

Modelo: 9257A

Tipo: SN 61370

Força máxima: força de recuo e de avanço - 500 kgf

força de corte - 1.000 kgf

Resolução: 0,01 kgf

Capacidade de sobrecarga: 50%

Linearidade: $\pm 1\%$.

- Amplificadores de carga em três módulos (um para cada componente da força de usinagem)

Fabricante: Kistler Instruments - Suíça

Modelo: 5001

Campo de medição: ± 10 a 500.000 pC em 12 degraus, com capacitor variável de 10 a 50.000 pF e tensão de saída ± 10 V.

- Indicadores analógicos, também em três módulos

Fabricante: Kistler Instruments - Suíça

Modelo: 5501

Campo de medição: 0 a 110 V

Resolução: 0,1 V.

- Oscilógrafo registrador

Fabricante: S.E. Laboratories Engineering Ltda. - Inglaterra

Modelo: S.E. 3006

Velocidade de registro: $1,5 \times 10^6$ mm/s, em 12 canais

Linearidade: $\pm 1\%$

Registro em papel Direct Print Kodak de largura 152 mm.

O amplificador, o indicador e o oscilógrafo podem ser vistos na figura 18 e, na figura 19, tem-se uma representação esquemática da montagem de todo o conjunto.

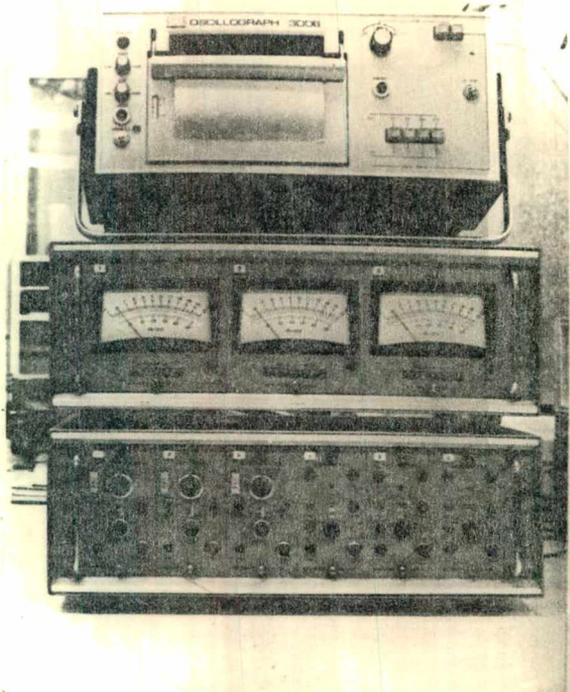


FIGURA 18 - Amplificador - Indicador analógico - Oscilógrafo registrador.

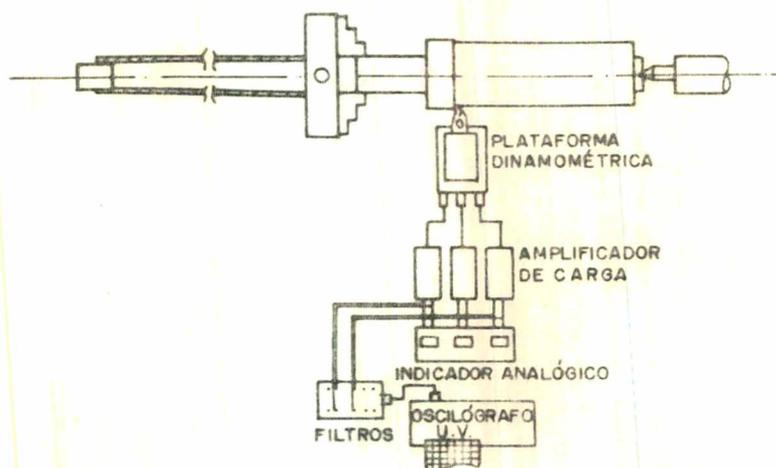


FIGURA 19 - Esquema de medição e registro das componentes das forças de usinagem.

3.2. AFERIÇÕES

Antes de iniciar os ensaios de usinabilidade, foram aferidos a rotação da árvore do torno, o avanço e o sistema de medição das forças.

a) Rotação

A variação da rotação da máquina é função da tensão gerada pelo variador de tensão.

No procedimento de aferição da rotação foram utilizados uma roda dentada ($Z = 15$ dentes), um transdutor magnético e um contador de pulsos digital. A representação esquemática da montagem pode ser vista na figura 20.

A roda dentada foi fixada à placa do torno. O transdutor magnético fixado no carro porta-ferramenta tangencialmente a esta roda, emite um pulso à passagem de cada dente da roda. Estes pulsos, para intervalos ajustáveis de tempo, são contados e registrados pelo contador digital. Na outra extremidade da árvore foi acoplado o taco-gerador, que gera uma tensão proporcional a rotação da árvore, medida pelo multímetro digital.

Com esta montagem foram aferidas várias faixas de rotação e os resultados apresentados na tabela II. Para cada faixa de rotação foram feitas cinco leituras.

Para uma constante de tempo igual a 10 segundos e roda dentada com 15 dentes, tem-se:

$$n = \frac{N \times 60}{10 \times 15} = 0,4 N \quad (2)$$

onde:

- n = velocidade de giro em rpm
- N = média do número de pulsos indicados no contador.

TABELA II - Resultados da aferição do sistema de rotação.

MÉDIA DE 5 LEITURAS DE NÚMEROS DE PULSOS EM 10 SEGUNDOS	DESVIO	VOLTAGEM	ROTAÇÃO
1.772,4	0,55	4,00	708,96
1.881,4	0,89	4,25	752,56
1.991,6	0,89	4,50	796,64
2,104,4	0,55	4,75	841,76
2.213,4	1,14	5,00	885,36
2.323,6	0,89	5,25	929,44
2.434,8	0,45	5,50	973,92
2.542,4	0,89	5,75	1016,96
2.650,6	0,89	6,00	1060,24
2.651,8	1,30	6,00	1060,72
2.762,8	0,45	6,25	1105,12
2.874,4	1,52	6,50	1149,76
2.981,2	0,45	6,75	1192,48
3.099,6	0,55	7,00	1239,84
3.202,4	1,52	7,25	1280,96
3.314,0	1,73	7,50	1325,60
3.424,0	1,87	7,75	1369,60
3.533,2	1,79	8,00	1413,28
3.643,2	1,30	8,25	1457,28
3.759,6	5,13	8,50	1503,84
3.873,8	1,79	8,75	1549,52
3.981,6	2,07	9,00	1592,64
4.083,0	2,12	9,25	1633,20
4.196,0	3,39	9,50	1678,40
4.313,6	0,89	9,75	1725,44
4.418,6	0,55	10,00	1767,44
4.532,4	1,34	10,25	1812,96
4.642,6	0,55	10,50	1857,04

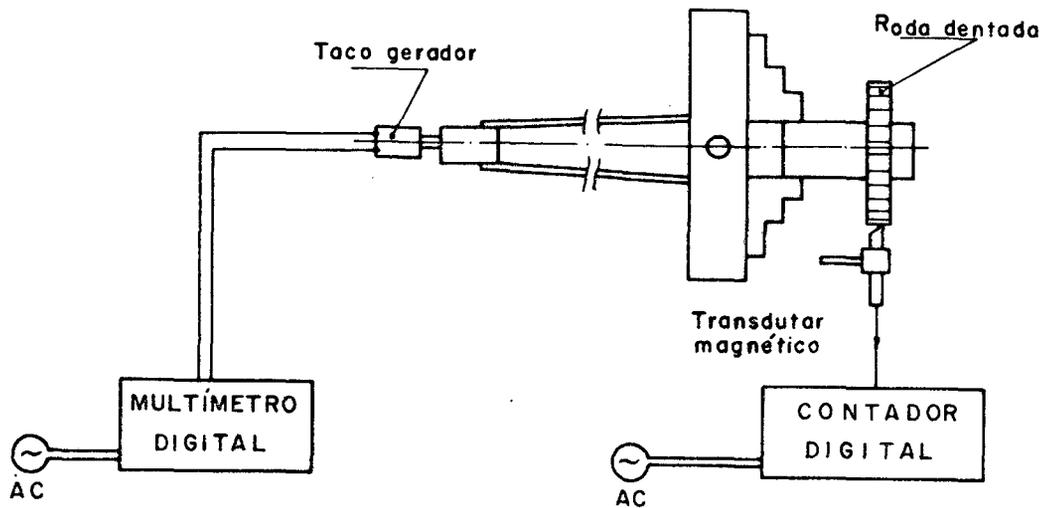


FIGURA 20 - Esquema da aferição do sistema de medição das rotações da árvore.

Através de uma regressão linear dos valores da tabela II, obteve-se a seguinte equação:

$$\text{Volt} = A \times n + B,$$

onde,

$$A = 0,005662 \quad \text{e} \quad B = 0,010175$$

com

$$R^2 = 1,0000$$

logo,

$$\text{Volt} = 0,005662 \times n - 0,010175 \quad (3)$$

sabe-se que:

$$n = \frac{1.000 \times V}{\pi \times D} \quad |\text{rpm}| \quad (4)$$

onde:

V = velocidade de corte em [m/min]

D = diâmetro do corpo de prova em [mm]

e substituindo (4) em (3), fica:

$$\text{Volt} = 1,802271 (V/D) - 0,010175 \quad (5)$$

Através da expressão (5) pode-se determinar diretamente a voltagem que o multímetro deve indicar para uma determinada relação velocidade de corte (V) / diâmetro (D) do corpo de prova.

b) Avanço

O torno proporciona o comando do avanço pela vara e pelo fuso. Utilizou-se o fuso, por oferecer maior precisão.

Na aferição foi utilizado um relógio comparador, que mede o deslocamento do carro para um determinado número de voltas da placa. Para contagem das voltas da placa, foram feitas uma marca na mesma e uma na parte fixa do torno. Após girar a placa de 10 voltas foi feita a leitura do deslocamento no relógio comparador. Foram feitas 4 leituras em cada velocidade de avanço, para diversas posições do carro dentro da faixa de utilização.

A seguir é apresentado, na tabela III, o resultado da aferição do avanço usado neste trabalho (0,25 mm/rotação).

TABELA III - Resultados da aferição do avanço sem carga.

AVANÇO (mm/ro- tação)	RELÓGIO EM 10 VOLTAS (mm)				MÉDIA (1 vta)	DESVIO PADRÃO	ERRO ABSOL.	ERRO RELA- TIVO
	1	2	3	4				
0,25	2,48	2,50	2,47	2,49	0,2485	0,0129	0,0015	0,6%

Como pode ser notado, o erro apresentado no resultado acima é desprezível, não exigindo correção.

Além desta aferição sem carga, foram feitas duas outras com cargas de 50 kgf e 100 kgf, respectivamente. Os resultados obtidos mostraram que também neste caso os erros são desprezíveis, podendo-se assim considerar que não se faz necessária uma correção do valor do avanço mesmo sobre carga.

c) Sistema de Medição de Força

Na aferição do dinamômetro foram utilizados uma balança e pesos aferidos. As aferições para cada componente de força de usinagem foram feitas separadamente.

A plataforma dinamométrica foi carregada e o sinal gerado foi ampliado e indicado no Indicador Analógico. Este equipamento permite que o sinal de saída, em tensão elétrica, seja regulado de maneira a fornecer uma relação 1/1 entre as unidades mecânicas envolvidas. Esta regulagem é feita num ajuste do capacitor variável do amplificador de carga (Trans Sens Range). Com o uso deste capacitor o ajuste das forças é obtido diretamente, sendo suficiente para isso, durante os ensaios, utilizar os mesmos valores obtidos durante a aferição. Os resultados obtidos podem ser vistos na tabela IV.

TABELA IV - Posições do "Trans Sens".

ESCALA	Fs	Fv	Fr
1 x 10 ² kgf	-	9.935	7.660
2 x 10 ² kgf	3.600	-	-

A aferição do Registrador foi feita juntamente com a aferição do dinamômetro.

Os sinais relativos às forças de corte F_s , de avanço F_v e de recuo F_r chegam ao registrador e o registro das componentes em papel fotográfico é procedido conforme esquema da figura 21.

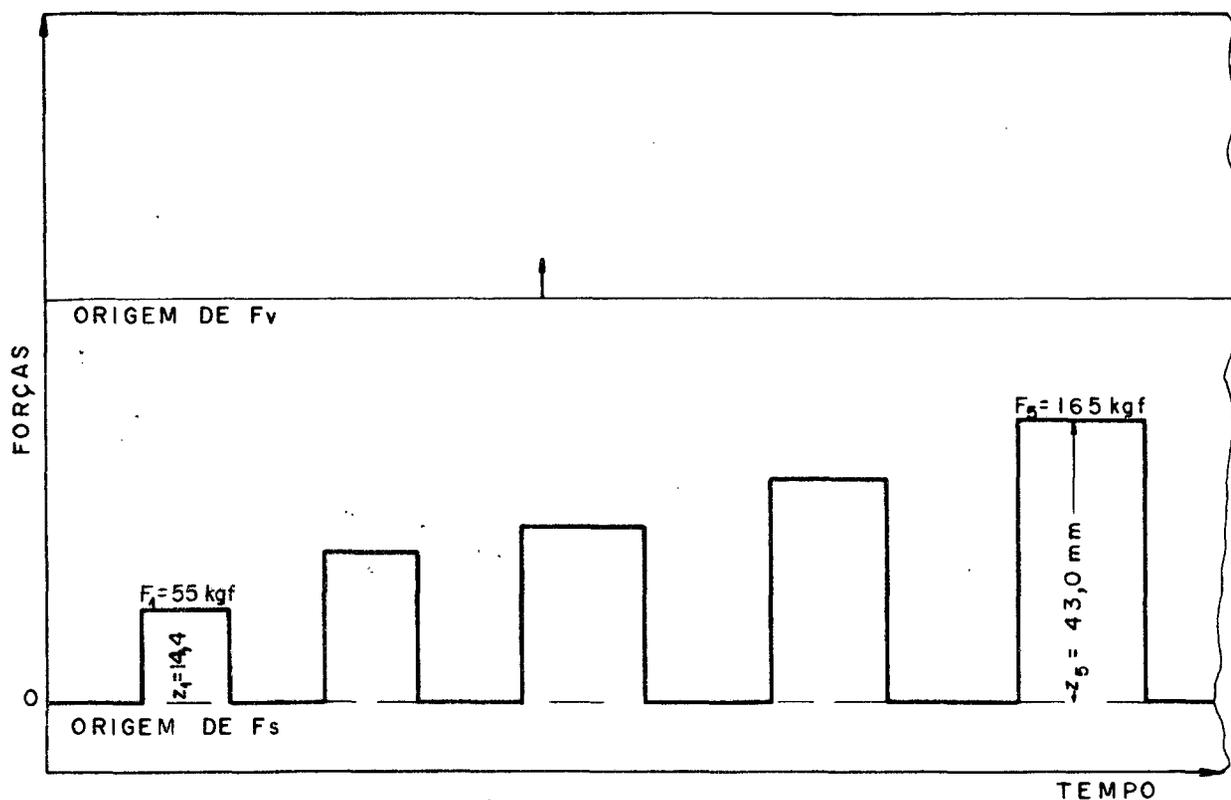


FIGURA 21 - Exemplo do esquema de aferição do Registrador das forças de corte.

Este procedimento foi adotado para F_s (na escala $2 \times 10^2 \text{ kgf}$) e F_v (na escala $1 \times 10^2 \text{ kgf}$) e os carregamentos com respectivas cotas estão apresentados nas tabelas V e VI.

Devido a um defeito no amplificador de sinais, a transferência da força de recuo para o registrador ficou prejudicada.

TABELA V - Apresentação das cotas em função do carregamento para a força de corte F_s - Escala do amplificador 2×10^2 kgf.

OBS.	CARREGAMENTO - F_s (Kgf)	COTA z (mm)
1	55	14,4
2	88	23,1
3	110	28,5
4	132	34,1
5	165	43,0
6	187	48,6
7	198	51,2

TABELA VI - Apresentação das cotas em função do carregamento para a força F_v - Escala do amplificador 1×10^2 kgf.

OBS.	CARREGAMENTO - F_v (Kgf)	COTA y (mm)
1	11	4,0
2	22	8,0
3	33	12,0
4	55	20,0
5	66	24,0
6	77	28,0
7	88	32,0

Com os resultados das tabelas V e VI, pode-se obter a equação que relaciona força aplicada com a cota do registro no papel fotográfico. Para F_s , tem-se:

$$F_s = 3,8733 z - 0,8314 \quad (6)$$

com

$$R^2 = 0,9999.$$

Para F_v , tem-se:

$$F_v = 2,75 y \quad (7)$$

com

$$R^2 = 1,0000.$$

Assim, durante os ensaios tira-se as cotas z e y , e com auxílio das equações (6) e (7) obtem-se as forças F_s e F_v para cada velocidade, durante um determinado tempo. A força F_r foi obtida através da leitura direta no Indicador Analógico, em virtude do defeito já citado, no canal correspondente do amplificador.

O conjunto dos equipamentos citados permite a usinagem com registro das forças e controle da velocidade de corte e do tempo de vida da ferramenta de corte. A montagem do conjunto pode ser vista de forma esquemática na figura 22.

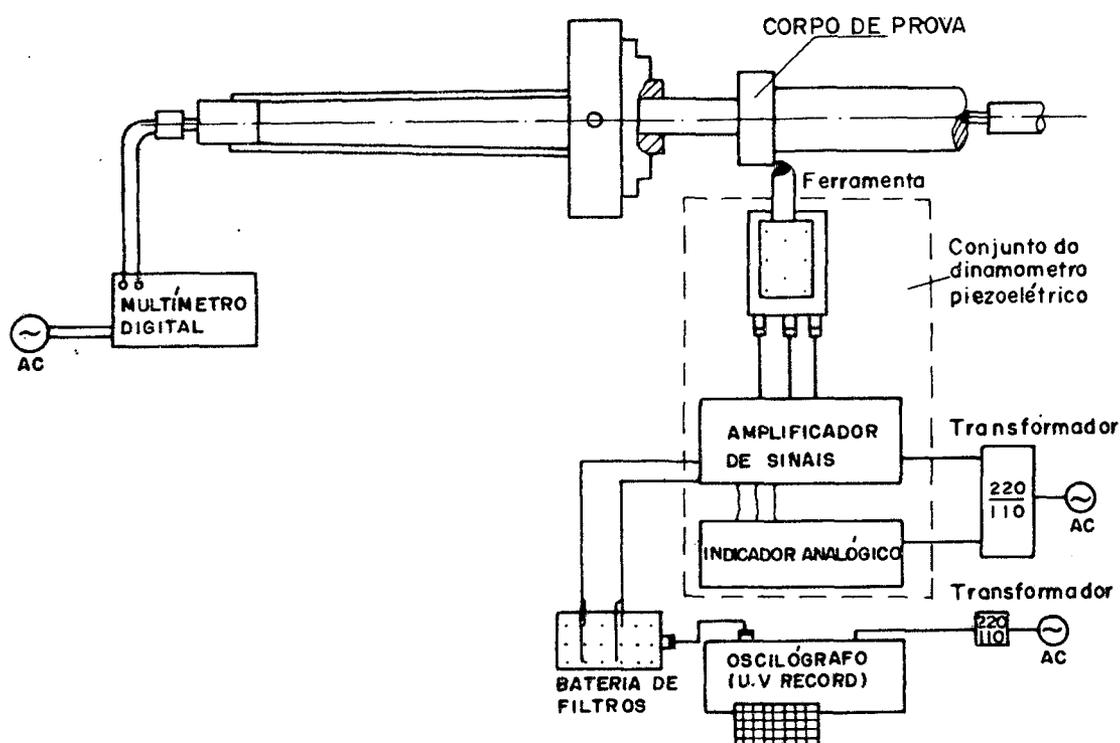


FIGURA 22 - Representação esquemática dos equipamentos usados nos ensaios de usinagem.

4. MATERIAIS USADOS NOS ENSAIOS DE USINABILIDADE E SUA CARACTERIZAÇÃO

Para este trabalho foram utilizados os aços ABNT 1020 e ABNT 8620. A escolha destes materiais tem como objetivo desenvolver estudos na área de usinabilidade de materiais industrialmente mais utilizados.

Para o ensaio de usinabilidade propriamente dito, foram consumidos apenas materiais (ABNT 1020 e 8620) da mesma barra e de um só fabricante. Evita-se, com isto, influências de variações na composição química e microestrutura, que podem ocorrer até mesmo entre materiais de duas corridas diferentes do mesmo fabricante.

O material não usado nos ensaios principais foi utilizado na realização de testes pilotos para ajustagem das condições ideais de corte e na determinação da ferramenta de metal duro mais adequada.

Inicialmente foram feitos vários tratamentos térmicos, para obter a variação da relação ferrita/perlita nos dois aços. Foram tiradas várias amostras do ABNT 1020 e ABNT 8620 e, após a quecimento à temperatura de austenitização, foram resfriados em velocidades distintas.

Através de uma análise das micrografias de cada amostra foram escolhidos dois tipos de estruturas para cada material (ABNT 1020 e 8620). Foi usado, como critério, além da obtenção da variação na porcentagem de ferrita/perlita, a existência de certa homogeneidade no tamanho de grão e na dureza das duas amostras.

As estruturas selecionadas, para os dois aços, foram o estado original de fornecimento e estado recozido após normalização.

Para identificação, os materiais foram codificados da seguinte maneira:

GRUPO A - ABNT 1020 - Estado original de fornecimento

GRUPO B - ABNT 1020 - Normalizado e recozido

GRUPO C - ABNT 8620 - Estado original de fornecimento

GRUPO D - ABNT 8620 - Normalizado e recozido.

4.1. CORPOS DE PROVA

Os materiais usados nos ensaios foram fornecidos sob a forma de barras laminadas, com 76,2 mm (3") de diâmetro por 5.000 mm de comprimento.

No dimensionamento dos corpos de prova, levou-se em consideração o tamanho do forno disponível para tratamentos térmicos, bem como a relação comprimento/diâmetro máxima de 10, como recomenda a norma BS 5623 ^{|12|}, para evitar vibrações durante o corte. Seguindo este critério, os corpos de prova foram cortados no comprimento de 300 mm.

De cada corpo de prova foi removida uma espessura de, aproximadamente, 1,0 a 1,5 mm para corrigir excentricidades e remover a carepa resultante dos tratamentos térmicos ou do próprio processo de fabricação das barras.

A fixação dos corpos de prova na máquina foi feito entre placa e ponta. A figura 23 mostra as dimensões e o sistema de fixação dos corpos de prova.

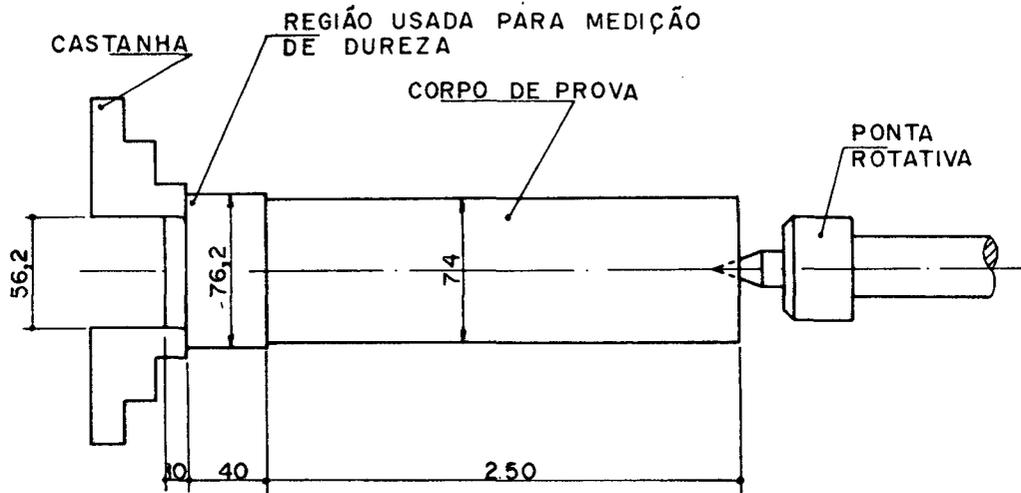


FIGURA 23 - Dimensões e fixação dos corpos de prova para ensaio de usinabilidade.

4.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS

Para caracterização dos materiais foram feitos ensaios de dureza Brinell e tração.

a) Dureza

Para determinação da dureza Brinell foram retirados 3 corpos de prova de cada grupo (A,B,C e D), um de cada barra, após usinagem. Estas barras foram selecionadas aleatoriamente. As amostras foram retiradas da parte do corpo de prova onde o diâmetro mede 76,2 mm (ver figura 23).

Em cada amostra foram feitas 30 impressões numeradas e distribuídas conforme figura 24. Entre uma impressão e outra sempre foi mantida uma distância maior que 5 vezes o diâmetro da impressão, assim como a espessura da amostra foi maior que 10 vezes este diâmetro. As impressões foram feitas aplicando uma carga de 187,5 kgf, durante um tempo de aproximadamente 30 segundos, com esfera de 2,5 mm de diâmetro. Os valores dos diâmetros das impressões foram tomados como média de duas leituras feitas a 90° uma da outra |40|.

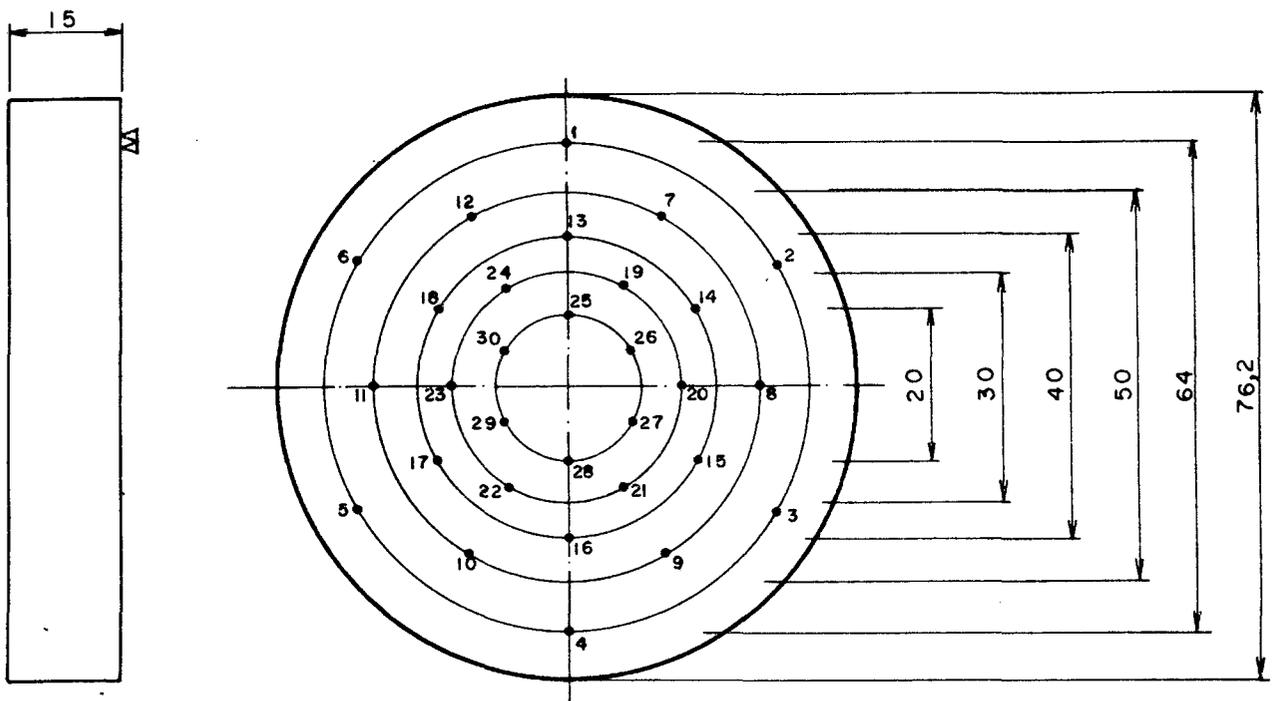


FIGURA 24 - Amostra para ensaio de dureza.

Os valores das durezas de cada impressão são apresentados nas tabelas VII, VIII, IX e X, e os resultados médios de cada grupo de material podem ser vistos na tabela XI.

Nestes ensaios de dureza utilizou-se os seguintes equipamentos:

- Durômetro
 Marca: Testor Wolpert
 Tipo: HT 1a
 Fabricação brasileira
- Microscópio
 Marca: Nikon - Kogako K.K 78771 - Japão
 Modelo: Measurescope
 Resolução: 0,001 mm.

TABELA VII - Teste de Dureza. Material ABNT 1020 original.

Nº DA MEDIDA	DUREZA BRINELL		
	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3
1	143	148	153
2	143	150	153
3	150	145	150
4	140	150	153
5	150	150	156
6	148	148	150
7	150	145	148
8	148	148	150
9	148	145	150
10	145	148	145
11	145	148	148
12	145	150	148
13	148	150	150
14	148	145	145
15	145	148	153
16	145	143	150
17	145	150	148
18	148	148	148
19	148	148	150
20	148	148	150
21	145	143	153
22	143	143	150
23	145	145	150
24	143	140	148
25	150	140	148
26	143	148	145
27	143	145	145
28	148	148	148
29	148	145	148
30	143	150	145

TABELA VIII - Teste de Dureza. Material ABNT 1020 normalizado e recozido.

Nº DA MEDIDA	DUREZA BRINELL		
	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3
1	129	125	125
2	127	127	127
3	127	129	129
4	125	129	125
5	123	125	127
6	125	123	129
7	129	127	129
8	127	131	131
9	129	131	127
10	127	127	129
11	127	129	129
12	129	131	127
13	129	131	131
14	129	129	129
15	133	127	129
16	131	127	129
17	129	127	129
18	131	131	129
19	131	135	127
20	131	133	129
21	133	131	131
22	129	131	131
23	131	131	129
24	133	129	129
25	131	127	127
26	131	129	131
27	131	129	129
28	131	131	133
29	133	131	129
30	131	131	127

TABELA IX - Teste de Dureza. Material ABNT 8620 original.

Nº DA MEDIDA	DUREZA BRINELL		
	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3
1	174	177	174
2	167	170	174
3	174	170	170
4	174	174	177
5	174	174	170
6	177	177	174
7	180	177	174
8	174	180	167
9	180	174	170
10	174	177	174
11	167	174	177
12	174	174	174
13	180	170	177
14	180	170	170
15	177	170	170
16	184	170	174
17	184	174	177
18	184	177	177
19	180	177	180
20	174	177	177
21	180	177	177
22	187	174	184
23	184	177	180
24	184	180	177
25	177	180	177
26	184	184	174
27	187	184	180
28	187	180	184
29	170	177	174
30	180	180	184

TABELA X - Teste de Dureza. Material ABNT 8620 normalizado e recozido.

Nº DA MEDIDA	DUREZA BRINELL		
	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3
1	158	161	158
2	161	161	158
3	158	158	158
4	158	158	161
5	150	161	158
6	148	161	158
7	158	161	164
8	158	158	158
9	164	158	161
10	158	158	167
11	158	164	161
12	161	161	164
13	156	161	161
14	161	164	161
15	161	164	161
16	156	164	161
17	158	167	164
18	161	167	161
19	158	161	167
20	158	156	161
21	161	161	170
22	164	170	164
23	167	164	167
24	167	161	161
25	158	161	158
26	156	158	161
27	167	158	167
28	161	161	161
29	164	164	161
30	158	170	167

TABELA XI - Dureza média dos grupos de materiais.

GRUPO	DUREZA MÉDIA HB	DESVIO PADRÃO
A	147	3,10
B	129	2,32
C	177	4,82
D	161	3,83

b) Tração

Os corpos de prova para ensaio de tração foram extraídos dos núcleos das barras após usinados. De cada grupo de material foram selecionados aleatoriamente 5 barras.

Os formatos dos corpos de prova e suas dimensões podem ser vistos na figura 25. Estes corpos de prova foram dimensionados segundo a norma MB-4 da ABNT, tipo A-8 [41].

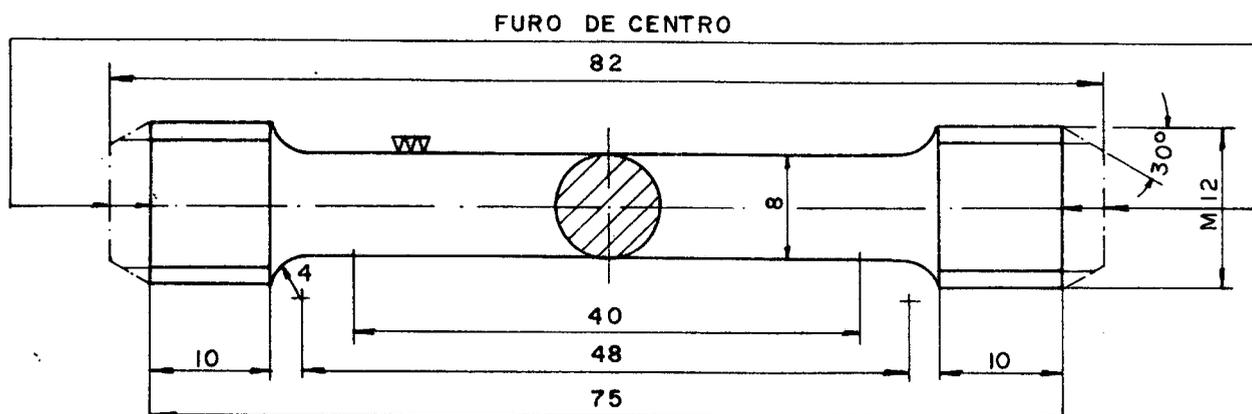


FIGURA 25 - Corpo de prova para ensaio de tração.

A tabela XII apresenta os resultados dos testes de tração.

TABELA XII - Resultados dos testes de tração.

CORPO DE PROVA	σ_{esc} N/mm ²	σ_{rup} N/mm ²	ALONGAMENTO %	ESTRÍCÇÃO %
A1	253,7	448,4	39,8	60,94
A2	258,6	451,8	39,8	63,59
A3	263,6	452,4	39,3	57,75
A4	258,6	447,6	40,0	63,59
A5	248,7	450,8	42,0	63,59
MÉDIA	256,6	450,2	40,2	61,89
DESVIO PADRÃO	5,65	2,10	1,05	2,58
B1	253,7	428,1	35,0	63,59
B2	253,7	424,1	40,5	60,94
B3	283,5	430,7	41,0	63,59
B4	258,6	431,9	37,8	63,59
B5	263,6	427,9	37,0	57,75
MÉDIA	262,6	428,5	38,3	61,89
DESVIO PADRÃO	12,37	3,01	2,50	2,58
C1	328,3	574,9	30,3	57,75
C2	333,2	580,1	31,8	57,75
C3	328,3	571,8	33,8	56,11
C4	328,3	584,9	31,0	56,11
C5	323,3	578,9	30,5	54,44
MÉDIA	328,3	578,1	31,5	56,43
DESVIO PADRÃO	3,50	5,02	1,42	1,38
D1	338,2	531,2	35,0	63,59
D2	348,2	542,3	32,0	57,75
D3	333,2	531,2	31,5	60,94
D4	334,2	538,7	34,8	60,94
D5	323,3	533,2	35,0	57,75
MÉDIA	335,4	535,3	33,66	60,19
DESVIO PADRÃO	9,01	4,96	1,75	2,48

Os ensaios de tração foram realizados na máquina Universal de Tração, marca Wolpert, modelo Testatron 100 KN.

4.3. COMPOSIÇÃO QUÍMICA, TRATAMENTO TÉRMICO, ANÁLISE METALOGRAFICA E ANÁLISE METALOGRAFICA QUANTITATIVA

a) Composição Química

A análise química dos aços usados no ensaio de usinabilidade, propriamente dito, foi fornecido pelo fabricante, veja tabela XIII.

TABELA XIII - Composição química dos materiais usados nos ensaios de usinabilidade.

ELEMENTO	MATERIAL	
	ABNT 1020	ABNT 8620
Carbono	0,22%	0,19%
Silício	0,16%	0,24%
Manganês	0,45%	0,79%
Fósforo	0,025%	0,020%
Enxôfre	0,040%	0,024%
Cromo	-	0,49%
Níquel	-	0,44%
Molibdênio	-	0,18%

b) Tratamento Térmico

A variação da relação ferrita/perlita dos materiais (ABNT 1020 e 8620), foi obtida através do tratamento térmico de normalização, seguido de um recozimento.

Os tratamentos foram realizados em um forno cujas dimensões permite acomodação para apenas um corpo de prova por vez.

Para o tratamento de normalização o forno foi aquecido a 850°C e, após estabilização, o corpo de prova foi colocado no seu interior permanecendo nesta temperatura por 45 minutos. Após este tempo o corpo de prova foi retirado do forno e resfriado ao ar.

Para o tratamento de recozimento, o forno foi aquecido também a 850°C e, após estabilização, o corpo de prova introduzido em seu interior. O tempo de permanência nesta temperatura foi de 2 horas. Após este tempo, desligado o forno, o corpo de prova era resfriado em seu interior (porta fechada).

Antes da realização destes tratamentos, o forno foi devidamente aferido (com termopar Platina-Rodíum), e os resultados apresentaram erros desprezíveis. Este forno tem como fabricante a Brasimet, modelo KS 25/15/35, tensão 380 V, potência 14KW, temperatura máxima 1350°C , de fabricação nacional.

c) Análise Metalográfica

De cada corpo de prova usinado tirou-se uma amostra para análise metalográfica. As amostras foram retiradas de posições tais que fossem representativas das microestruturas das regiões usinadas.

O aço ABNT 1020 no estado original de fornecimento apresentou uma estrutura composta de ferrita e perlita lamelar, com grãos na forma colunar, indicando que o material possivelmente sofreu uma normalização após laminação. Os tamanhos dos grãos são 6 e 7 ASTM. A figura 26 apresenta a micrografia deste material.

O aço ABNT 1020 no estado normalizado e recozido, apresentou uma estrutura composta de ferrita e perlita lamelar,

com grãos na forma equiaxial, característica de um material totalmente recristalizado. Os tamanhos dos grãos são 6,7 e 8 ASTM. A figura 27 apresenta a micrografia deste material. Nota-se a forma levemente estriada da ferrita e da perlita, consequência da laminação e resfriamento lento no tratamento térmico.

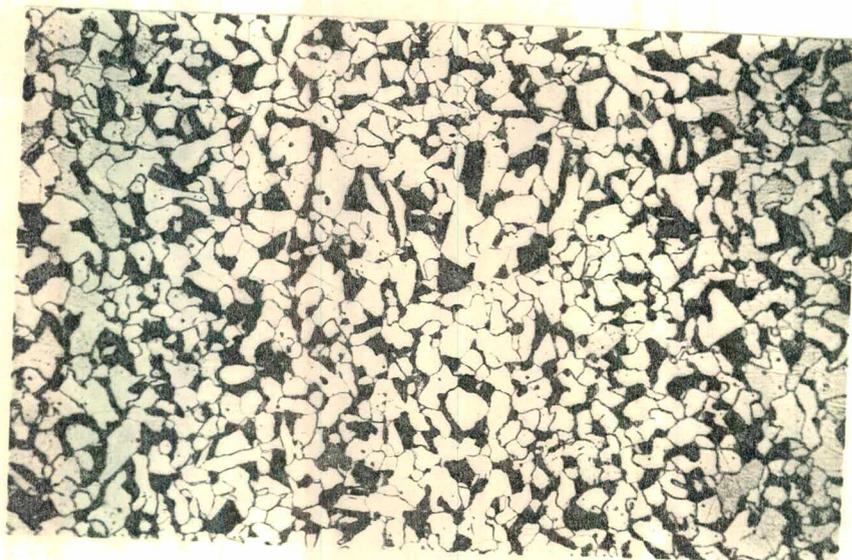


FIGURA 26 - Micrografia do aço ABNT 1020 - estado original de fornecimento. Ataque de Nital 2%. Aumento 100 X.

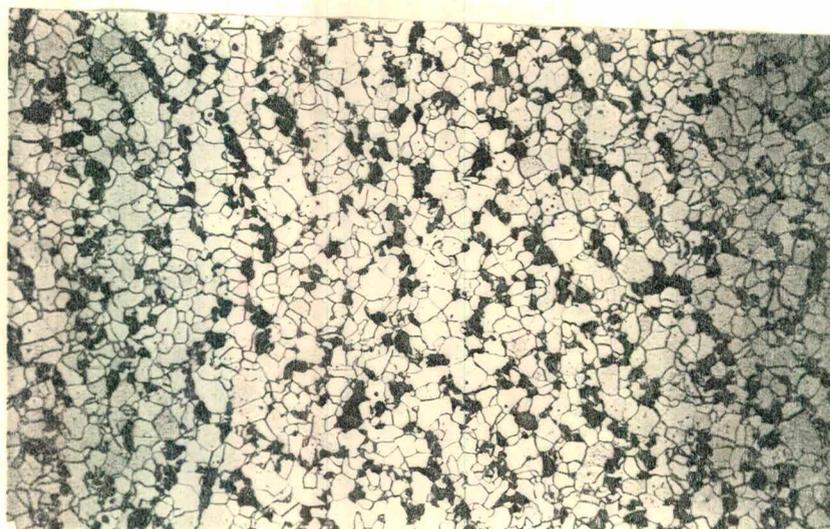


FIGURA 27 - Micrografia do aço ABNT 1020 - estado normalizado e recozido. Ataque de Nital 2%. Aumento 100 X.

O aço ABNT 8620, no estado original de fornecimento, apresentou uma estrutura composta de ferrita e perlita lamelar, com o formato dos grãos levemente colunar, indicando que o material possivelmente sofreu um recozimento após laminação. Os tamanhos dos grãos são 7 e 8 ASTM. A figura 28 apresenta a micrografia deste material.



FIGURA 28 - Micrografia do aço ABNT 8620 - estado original de fornecimento. Ataque de Nital 2%. Aumento 100 X.

Sob maiores aumentos foi verificado a presença de pequena quantidade de bainita no interior da perlita.

O aço ABNT 8620, no estado normalizado e recozido, apresentou uma estrutura composta de ferrita e perlita lamelar, com os grãos na forma equiaxial, característica dos materiais totalmente recristalizados. Os tamanhos dos grãos são 8 e 9 ASTM. A figura 29 apresenta a micrografia deste material. Nota-se, também, a forma estriada da ferrita e perlita, consequência da laminação e resfriamento lento no tratamento térmico.

Sob grandes aumentos, foi verificado a presença, neste estado, de pequena quantidade de bainita no interior da perlita.

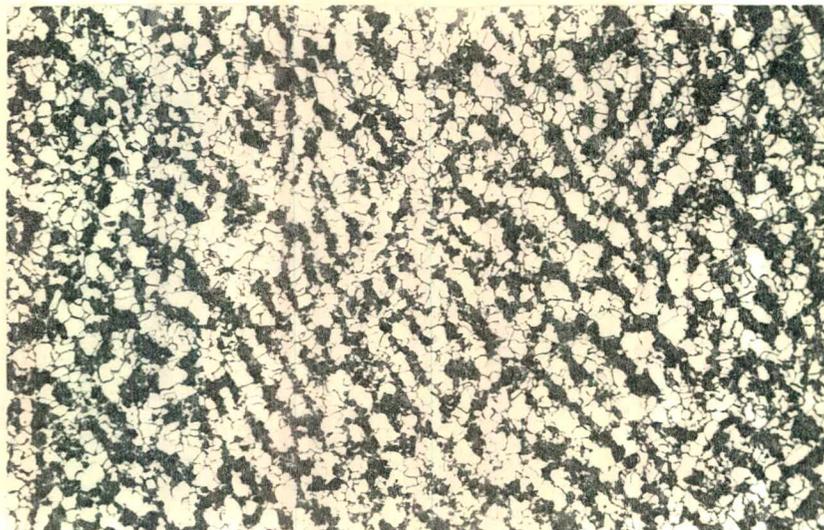


FIGURA 29 - Micrografia do aço ABNT 8620 - estado normalizado e recozido. Ataque de Nital 2%. Aumento 100 X.

d) Análise Metalográfica Quantitativa

Os corpos de prova para análise metalográfica quantitativa foram retirados das barras após usinadas, conforme esquema representado no figura 31.

Foram escolhidos aleatoriamente 3 amostras de cada grupo de material. Cada amostra foi analisada em 3 regiões distintas, distribuídas longitudinalmente. Cada região foi analisada em 50 campos quadrados ($\lambda = 180 \mu\text{m}$) distintos, espaçados $150 \mu\text{m}$, formando uma distribuição de campos 5×10 .

O equipamento usado nesta análise foi o TAS - Textur Analyse System, da Leitz Wetzlar - R.F.A..

A tabela XIV apresenta os resultados dos ensaios. Estes resultados são as médias dos percentuais de ferrita e perlita dos 450 campos (50 campos em cada região; 3 regiões em cada amostra; 3 amostras em cada grupo) de cada grupo de material.

Neste ensaio, o percentual de ferrita somado ao percen

rado só ocorreu para o aço ABNT 1020.

Uma análise dos resultados da tabela XIV, permite concluir que o aço ABNT 1020 (A) no estado original de fornecimento deve ter sofrido um resfriamento com uma velocidade maior do que no estado normalizado e recozido (B), visto que a quantidade de perlita no primeiro é maior. No aço ABNT 8620 deve ter ocorrido o contrário, isto é, a velocidade de resfriamento no estado original de fornecimento (C) foi menor que no estado normalizado e recozido (D), já que a quantidade de perlita neste caso é maior.

TABELA XIV - Resultados da análise metalográfica quantitativa

Grupo A- ABNT 1020 original

Grupo B- ABNT 1020 normalizado e recozido

Grupo C- ABNT 8620 original

Grupo D- ABNT 8620 normalizado e recozido

GRUPO	% FERRITA	D. PADRÃO	% PERLITA	D. PADRÃO	FERRITA/ PERLITA
A	65,57	2,67	32,88	2,56	1,99
B	72,59	4,01	25,62	3,78	2,83
C	60,73	1,73	37,69	1,70	1,61
D	55,94	3,80	41,90	3,72	1,34

Para mostrar que a variação ao longo da seção transversal foi insignificante, a tabela XV apresenta os resultados dos ensaios metalográficos quantitativos de uma amostra do aço ABNT 8620 no estado normalizado e recozido, veja figura 31.

Verifica-se que ao longo da seção transversal do material usinado, a relação ferrita/perlita é homogênea, o mesmo se verificando para as demais amostras.

TABELA XV - Resultados da análise metalográfica quantitativa de uma amostra do aço ABNT 8620 no estado normalizado e recozido.

REGIÃO	% FERRITA	D.PADRÃO	% PERLITA	D.PADRÃO	% FERRITA/ % PERLITA
1	50,75	1,05	47,00	1,05	1,08
2	51,92	1,17	45,83	1,17	1,13
3	52,88	1,57	45,15	1,54	1,17

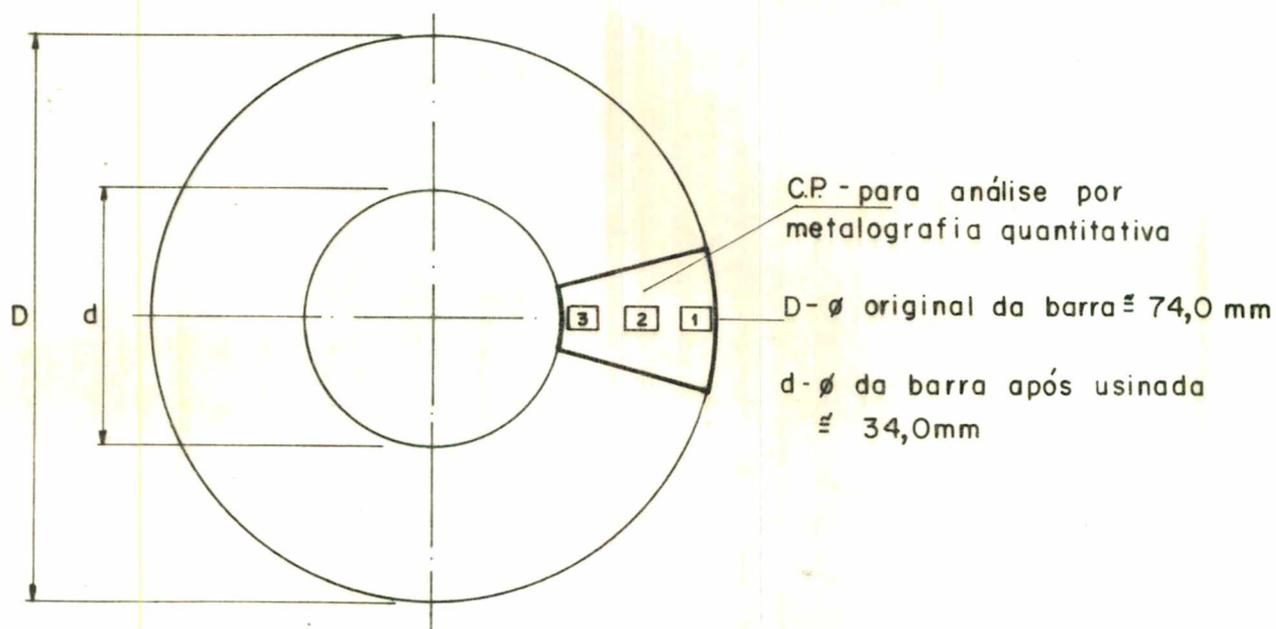


FIGURA 31 - Localização das regiões analisadas por metalografia quantitativa.

5. ENSAIOS DE USINABILIDADE

5.1. PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS E PARÂMETROS UTILIZADOS

Este trabalho foi realizado usando-se a equação de Taylor simples na determinação da usinabilidade dos aços citados.

Com base nesta equação simples de Taylor variou-se a velocidade de corte, mantendo-se constante o avanço e a profundidade.

Na escolha da profundidade e avanço usou-se a norma BS 5623, fixando-se os valores da condição B da referida norma, (vide tabela I, página 28) ou seja:

avanço $s = 0,25$ mm/rotação

profundidade $a = 2,5$ mm

raio de ponta da ferramenta $r_e = 0,8$ mm.

Conforme Apêndice I (pré-ensaios), as velocidades de corte escolhidas para cada grupo foram:

- Condição 1: $V_1 = 236$ m/min
- Condição 2: $V_2 = 265$ m/min
- Condição 3: $V_3 = 300$ m/min.

Além do critério sugerido pelo Apêndice I, na determinação das velocidades de corte, o escalonamento seguiu a série R40 de números normalizados da ISO [39].

A escolha de apenas 3 condições de velocidades de corte, foi função da quantidade de material disponível para realização dos ensaios.

A cada passe, o diâmetro do corpo de prova foi reduzido em 5 mm (2 vezes a profundidade de corte) e para manter a ve

locidade de corte, a rotação foi aumentada. Quando esta aproximava 2000 rpm, passava-se para a condição de corte inferior.

Durante a realização dos ensaios, de acordo com a norma BS 5623, se observou que a relação comprimento/diâmetro do corpo de prova fosse menor que 10.

As forças de usinagem, durante o corte de todo o passe, foram medidas e registradas conforme descrito no ítem 3.1. No caso da força de recuo, foram feitas 2 leituras para cada passe, e considerada a média entre elas.

O tempo de usinagem em cada passe foi obtido com auxílio do papel registrador. Este tempo foi tirado da seguinte equação:

$$t = L / V_p \quad (8)$$

onde,

t = tempo de usinagem por passe (min);

L = comprimento do registro das forças no papel fotográfico durante um passe (mm);

V_p = velocidade de saída do papel fotográfico (mm/min).

Neste trabalho foi usada uma velocidade de saída do papel fotográfico de 250 mm/min, e a equação (8) fica:

$$t = L / 250 \quad (8')$$

O tempo total de usinagem em cada condição é dado, então, por:

$$T_u = \sum_{1}^m t$$

onde,

Tu = tempo total de usinagem da ferramenta (min);
m = número de passes por condição de usinagem.

Cada pastilha de metal duro possui 4 arestas de corte, porém, foram usadas apenas 2, opostas diagonalmente. Este procedimento visa diminuir o risco de perda de material, caso venham ocorrer acidentes (quebra da ferramenta), impedindo a continuidade dos ensaios com as demais arestas da mesma ferramenta. Cada aresta de corte foi usada em uma condição de usinagem, de um determinado grupo de material.

Após cada passe era feita a medida da largura VB da marca de desgaste, na superfície de incidência da ferramenta.

A rotação desejada, mantida constante durante todo o passe, foi regulada manualmente através de um variador de tensão. Esta rotação foi medida no multímetro digital, pela tensão proporcional gerada pelo taco-gerador, conforme equação de aferição (3), (página 38).

A figura 32 apresenta um detalhe do corpo de prova preparado para receber o corte em um passe.

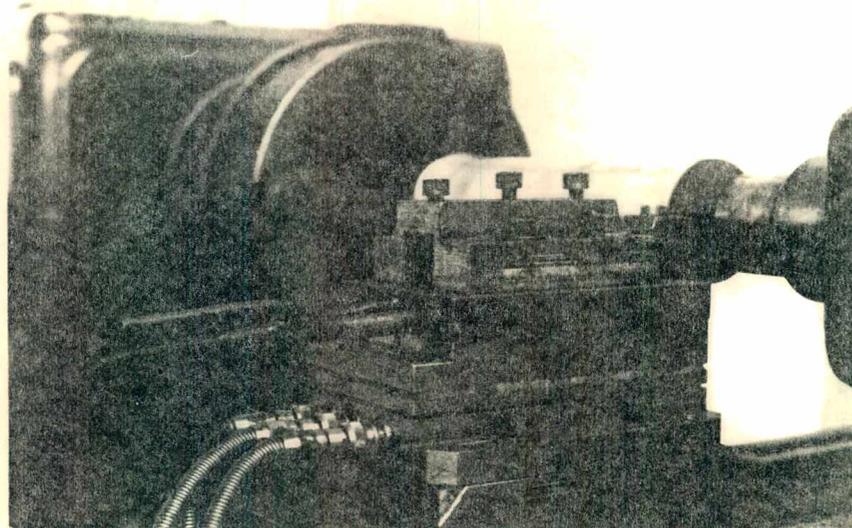


FIGURA 32 - Detalhe do corpo de prova preparado para receber um passe.

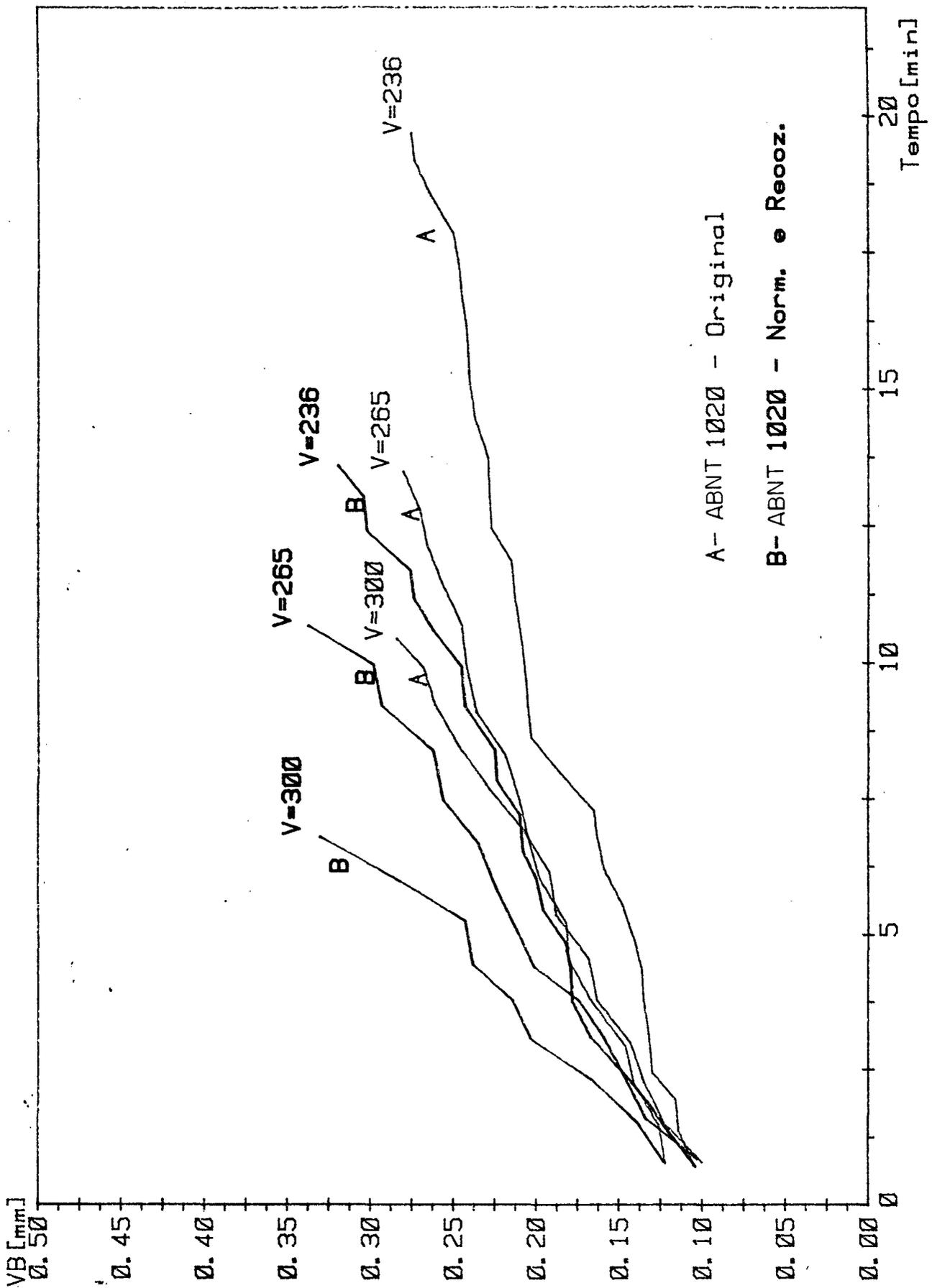
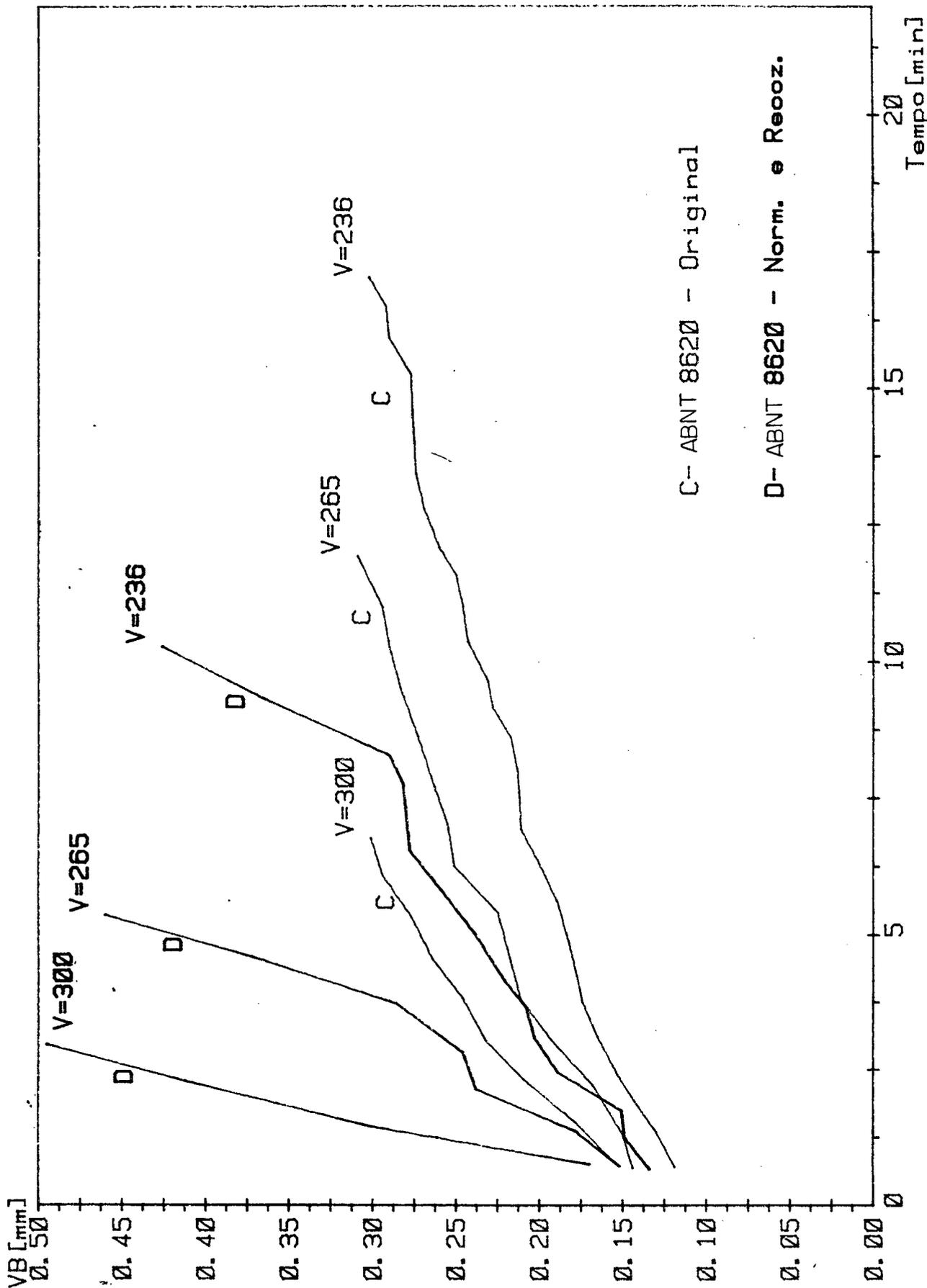


FIGURA 33 - Variação do desgaste de flanco VB com o tempo de corte T para o aço ABNT 1020.



C- ABNT 8620 - Original

D- ABNT 8620 - Norm. e Reoz.

FIGURA 34 - Variação do desgaste de flanco VB com o tempo de corte T para o aço ABNT 8620.

Todo o ensaio foi realizado sem uso de fluido de corte, por recomendação da norma BS 5623.

Em todas as condições de corte foi usado um único tipo de quebra-cavacos.

O ensaio foi considerado completo quando o desgaste de flanco atingia uma dimensão superior a 0,3 mm para cada condição de cada grupo. Em alguns casos não foi possível atingir o desgaste de 0,3 mm por falta de material, porém, tendo-se chegado a valores bem próximos, extrapolou-se os mesmos até $VB = 0,3$ mm, mesmo contrariando a norma BS 5623.

5.2. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados dos ensaios experimentais de usinabilidade (tempo de corte T, desgaste de flanco VB, forças de usinagem F_s , F_v e F_r) dos 4 grupos de materiais, para as 3 condições de corte, são apresentados no Apêndice II. As figuras 33 e 34 apresentam graficamente estes resultados para os aços ABNT 1020 e ABNT 8620, respectivamente.

O modelo matemático mais representativo da variação do desgaste de flanco VB, em função do tempo de usinagem T, é ^[42]:

$$VB = a \cdot T^b \quad (10)$$

Usou-se este modelo para os resultados apresentados no Apêndice II (ver figura 33 e 34) e através de regressões lineares, foram determinados os valores de "a" e "b", para cada condição de corte e grupo. A tabela XVI apresenta estes valores.

O tempo de vida da ferramenta T (1,51 min) para $VB = 0,3$ mm, na condição de velocidade de corte $V = 300$ m/min, na usinagem do material do grupo D foi inferior ao mínimo recomendado

pela norma BS 5623 (2,0 min em casos especiais). Considerando que o objetivo deste trabalho não é estabelecer um índice de usabilidade para este grupo de material, e sim comparar os resultados deste com outros, a utilização dos mesmos pode ser aceita.

TABELA XVI - Equação $VB = a \cdot T^b$ para as condições de corte de cada grupo.

GRUPO	CONDIÇÃO V(m/min)	$VB = a \cdot T^b$	R^2 *	T (min) para VB = 0,3 mm
A	236	$VB = 0,09444 \cdot T^{0,333751}$	0,9365	31,92
	265	$VB = 0,11357 \cdot T^{0,321791}$	0,9538	20,46
	300	$VB = 0,09970 \cdot T^{0,403964}$	0,9549	15,29
B	236	$VB = 0,10711 \cdot T^{0,376284}$	0,9683	15,44
	265	$VB = 0,10354 \cdot T^{0,450520}$	0,9737	10,61
	300	$VB = 0,12340 \cdot T^{0,447807}$	0,9485	7,27
C	236	$VB = 0,11737 \cdot T^{0,310762}$	0,9744	20,49
	265	$VB = 0,14390 \cdot T^{0,292638}$	0,9684	12,31
	300	$VB = 0,16167 \cdot T^{0,321761}$	0,9922	6,83
D	236	$VB = 0,13480 \cdot T^{0,390462}$	0,9112	7,76
	265	$VB = 0,16221 \cdot T^{0,519839}$	0,9168	3,26
	300	$VB = 0,21740 \cdot T^{0,779277}$	0,9960	1,51

(*) R^2 - coeficiente de determinação.

Para $VB = 0,3$ mm e em iguais condições de corte e tratamentos térmicos semelhantes, nota-se pela tabela XVI que o aço ABNT 1020 apresentou maior vida (T) da ferramenta que o aço ABNT 8620. A justificativa deste resultado deve levar em consideração uma série de fatores, tais como:

- composição química dos aços;

- propriedades mecânicas;
- microestrutura, etc.

Assim sendo, considerando estes fatores, pode-se dizer:

- o aço ABNT 8620 possui maior percentagem de manganês e menor de enxôfre que o aço ABNT 1020, conseqüentemente terá menor quantidade de possíveis inclusões de MnS, que como se sabe são altamente benéficos em termos de usinabilidade. O manganês em excesso, que não se combinou com o enxôfre, estará sob a forma de carbonetos ou dissolvido na ferrita (mais provável) e em ambas as formas agindo negativamente na usinabilidade. O aço ABNT 8620 possui, ainda, adições especiais de cromo, níquel e molibdênio, onde principalmente o cromo e o molibdênio, sob a forma de carbonetos, reduzirão a usinabilidade do material;
- o aço ABNT 8620 é um aço com maior dureza e menor ductilidade (ver tabelas VII, VIII, IX, X, XI e XII), e possui maior percentagem de perlita que o aço ABNT 1020 (ver tabela XIV), fatores estes que, em geral, levam também a uma redução da usinabilidade.

Com dados da tabela XVI, foram construídos os gráficos das figuras 35 a 40, representativos da equação $VB = a \cdot T^b$, de maneira que se possa comparar a usinabilidade no estado original de fornecimento com o estado normalizado e recozido dos dois tipos de aços em estudo.

Os gráficos acima citados mostram que os materiais (ABNT 1020 e ABNT 8620) no estado normalizado e recozido, apresentam menor usinabilidade que os materiais no estado original de fornecimento, para todas as condições de velocidade de corte testadas. O desgaste de flanco VB foi sempre menor nos aços em seu estado original de fornecimento, para um mesmo tempo de usinagem T_u .

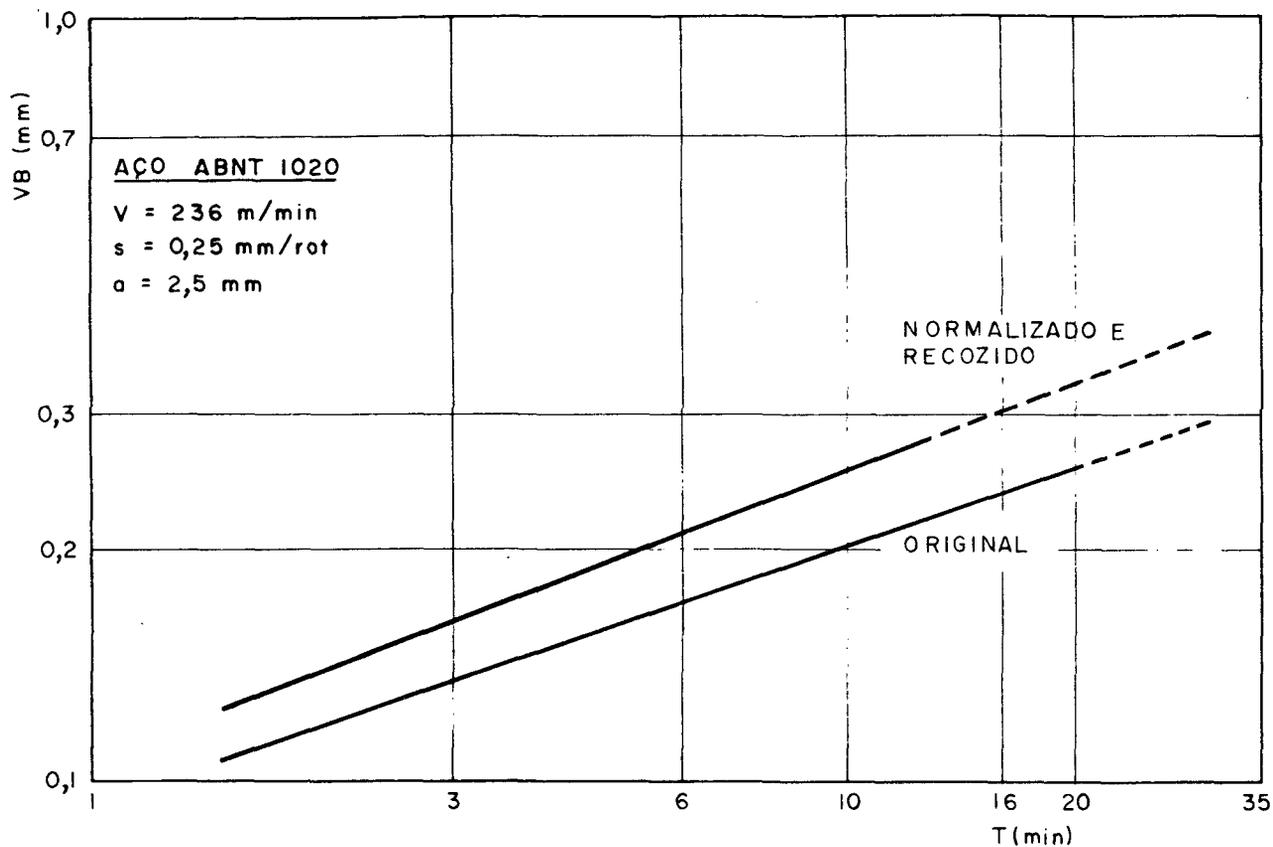


FIGURA 35 - Representação das curvas $VB = a \cdot T^b$ em escala logarítmica de materiais do grupo A (ABNT 1020 - original) e B (ABNT 1020 - normalizado e recozido), para a condição de velocidade $V = 236 \text{ m/min}$.

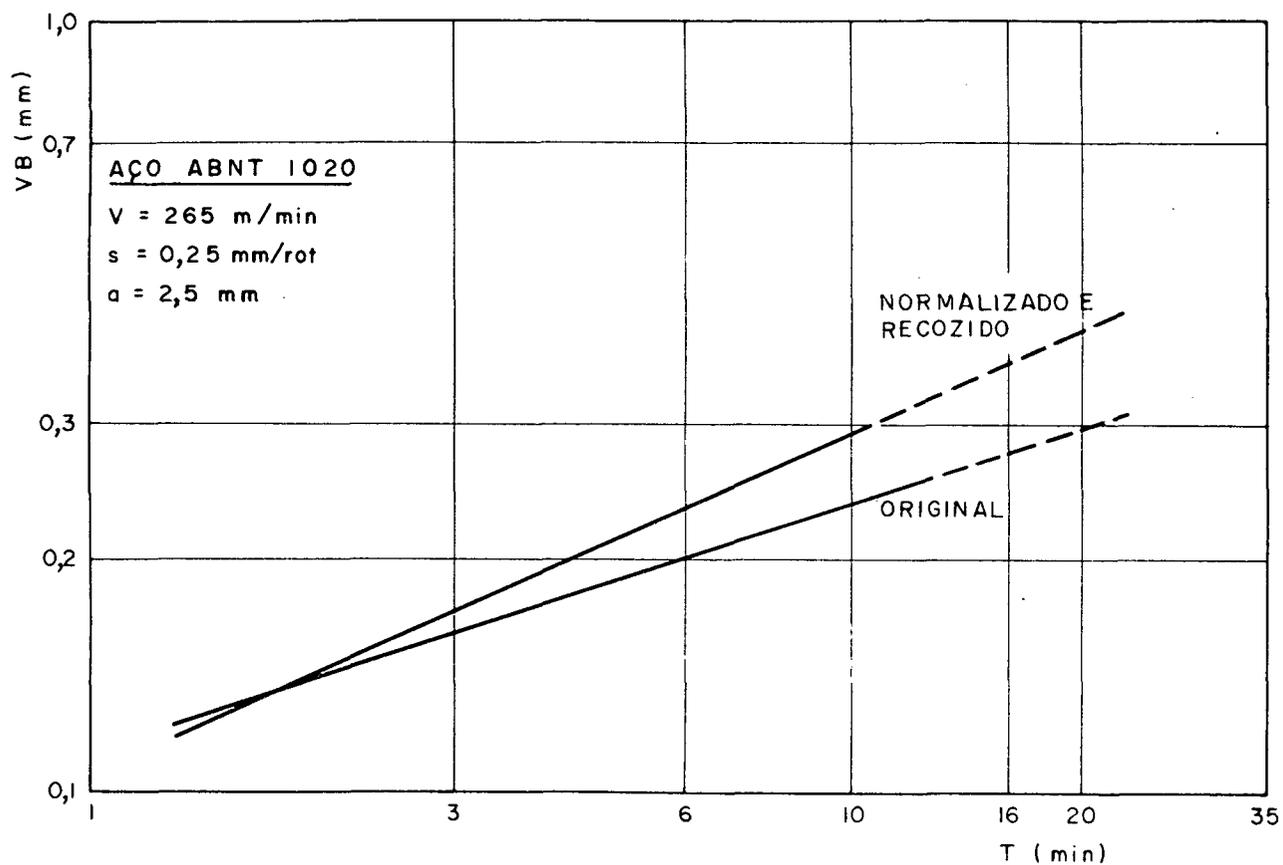


FIGURA 36 - Representação das curvas $VB = a \cdot T^b$ em escala logarítmica de materiais do grupo A (ABNT 1020 - original) e B (ABNT 1020 - normalizado e recozido), para a condição de velocidade $V = 265$ m/min.

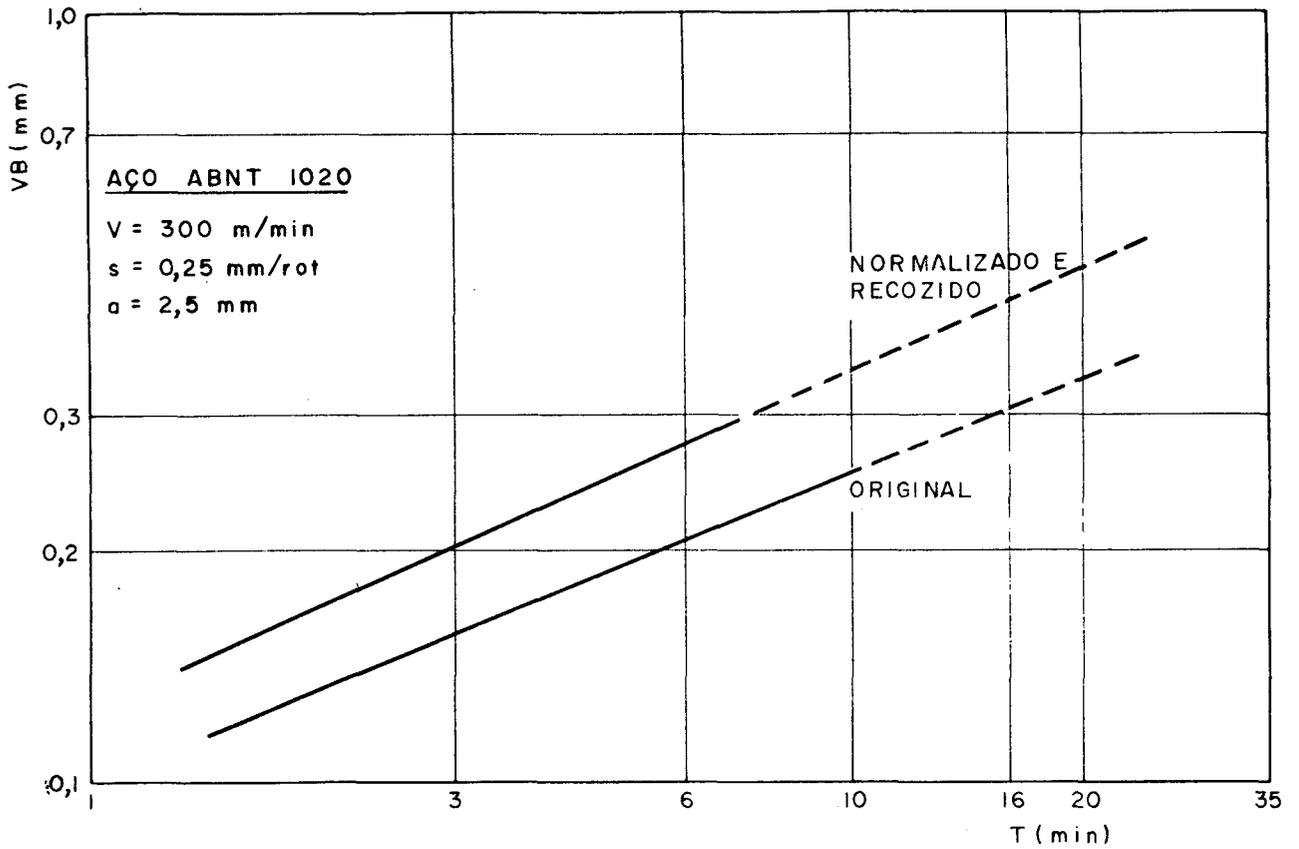


FIGURA 37 - Representação das curvas $VB = a \cdot T^b$ em escala logarítmica de materiais do grupo A (ABNT 1020 - original) e B (ABNT 1020 - normalizado e recozido), para a condição de velocidade $V = 300 \text{ m/min}$.

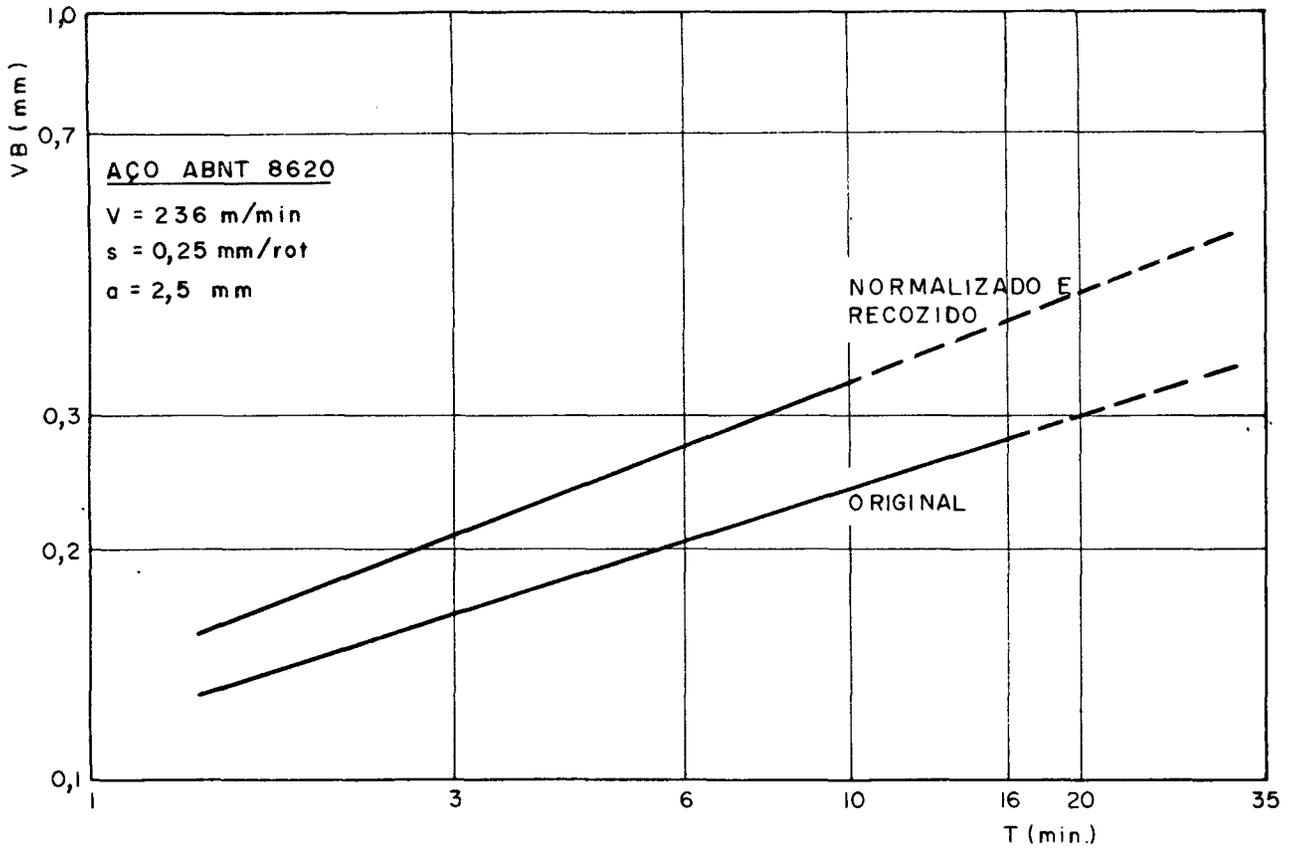


FIGURA 38 - Representação das curvas $VB = a \cdot T^b$ em escala logarítmica de materiais do grupo C (ABNT 8620 - original) e D (ABNT 8620 - normalizado e recozido), para a condição de velocidade $V = 236 \text{ m/min}$.

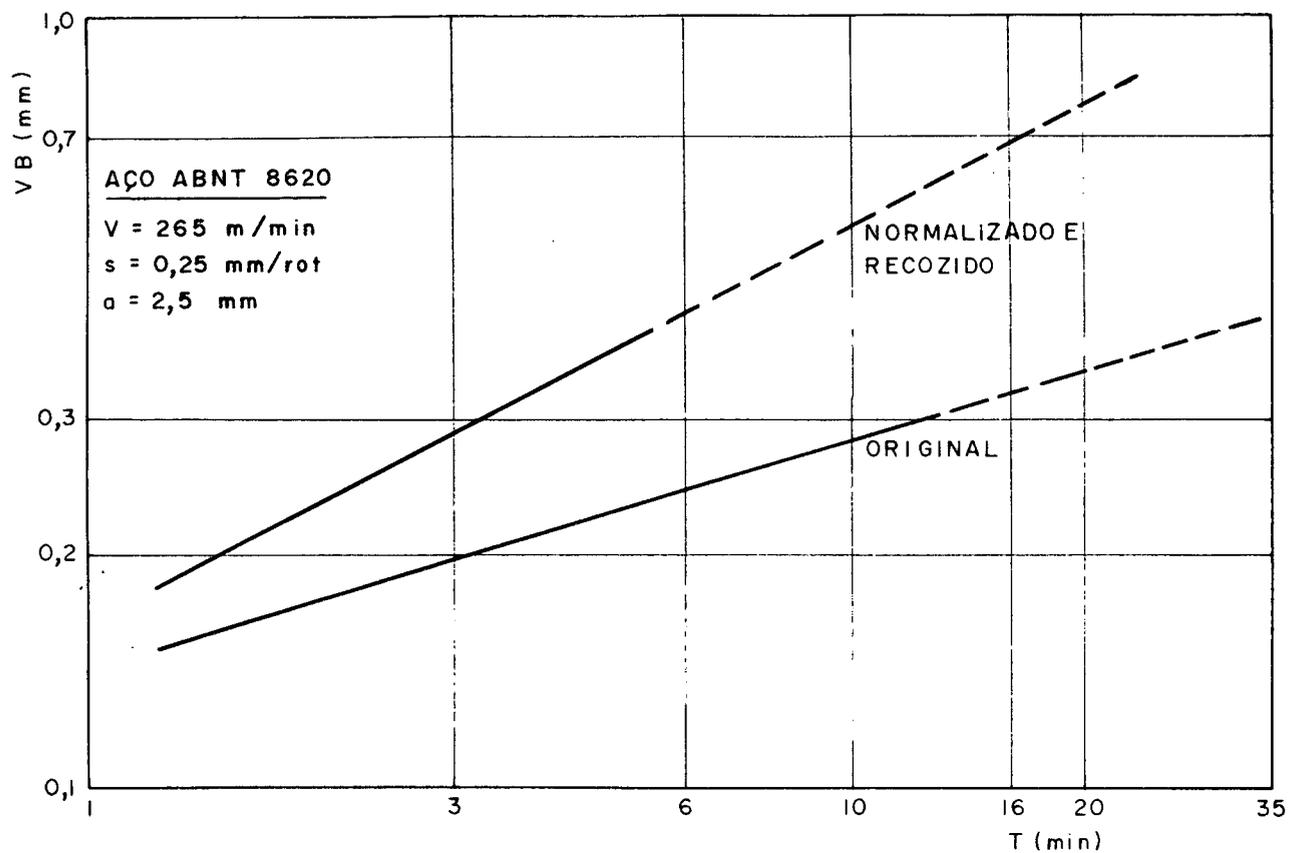


FIGURA 39 - Representação das curvas $VB = a \cdot T^b$ em escala logarítmica de materiais do grupo C (ABNT 8620 - original) e D (ABNT 8620 - normalizado e recozido), para a condição de velocidade $V = 265$ m/min.

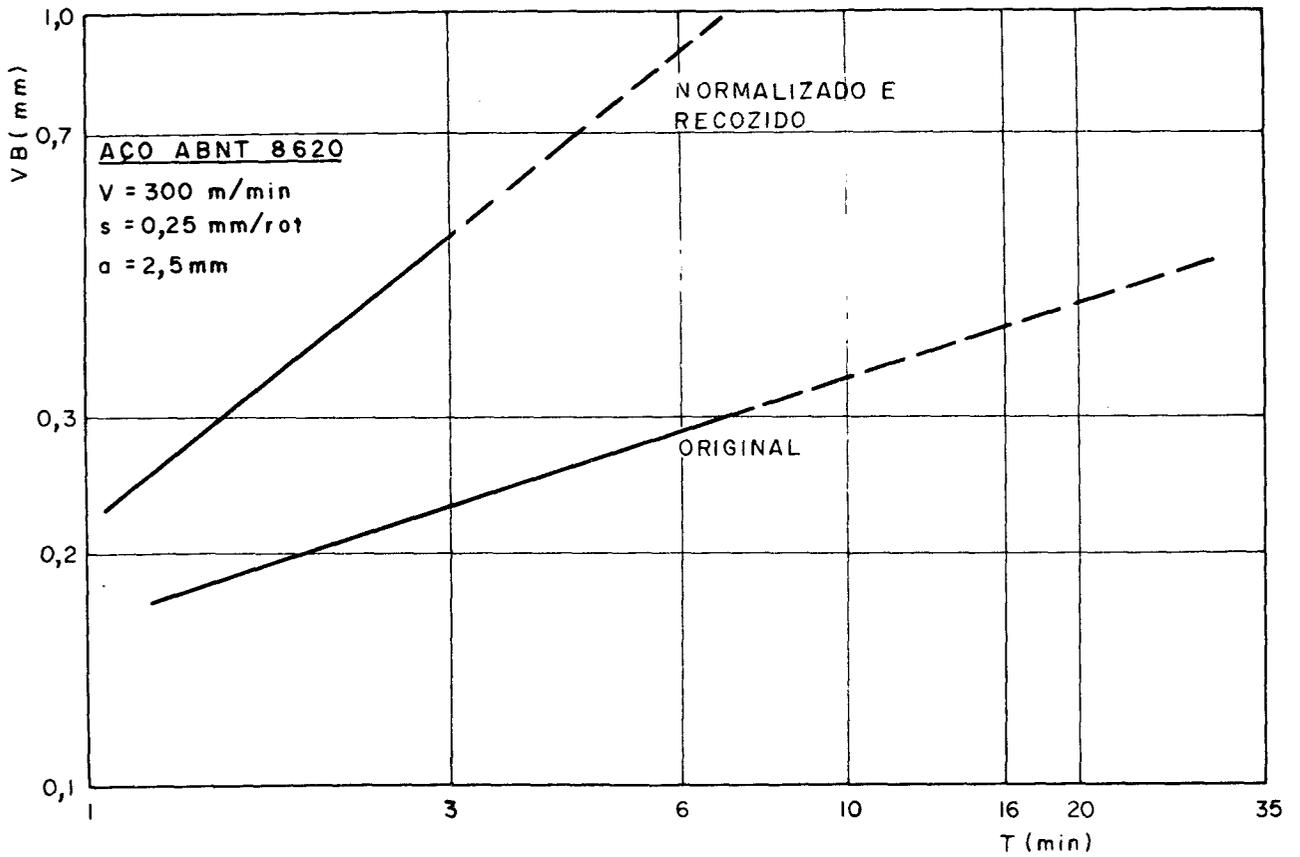


FIGURA 40 - Representação das curvas $VB = a \cdot T^b$ em escala logarítmica de materiais do grupo C (ABNT 8620 - original) e D (ABNT 8620 - normalizado e recozido), para a condição de velocidade $V = 300 \text{ m/min}$.

Para aplicação direta da equação de Taylor simples, tomou-se, para todas as condições de velocidade de corte em cada grupo de material, os valores dos tempos de vida T, interpolados para um desgaste de flanco $VB = 0,3$ mm. A tabela XVII apresenta os coeficientes de Taylor para estes grupos.

TABELA XVII - Coeficientes de Taylor.

GRUPO	$T = K \cdot V^{-x}$	R^2 *
A	$T = 5,0061184 \times 10^8 V^{-3,0384207}$	0,9737
B	$T = 3,8063616 \times 10^8 V^{-3,1163149}$	0,9922
C	$T = 1,3629517 \times 10^{12} V^{-4,5599995}$	0,9927
D	$T = 8,4997609 \times 10^{16} V^{-6,7652626}$	0,9904

(*) R^2 - coeficiente de determinação.

A representação gráfica das expressões da tabela XVII se encontra nas figuras 41 e 42.

As três condições de velocidade de corte usadas neste trabalho estão em uma faixa tal que, o mecanismo de desgaste a desivo pode ser considerado desprezível em relação aos demais. Isto se explica pela ausência da aresta postiza de corte nesta faixa de velocidade. As altas velocidades de corte usadas resultaram em altas temperaturas desenvolvidas durante o processo, podendo-se admitir que o mecanismo de desgaste predominante é o difusivo. O mecanismo de desgaste abrasivo também é grande nestas faixas de velocidades de corte. A figura 7 contribui para o acompanhamento desta análise

Antes de analisar diretamente a influência da variação da microestrutura na usinabilidade, seguem rápidos comentários sobre a influência de outras propriedades relacionadas com o material da peça.

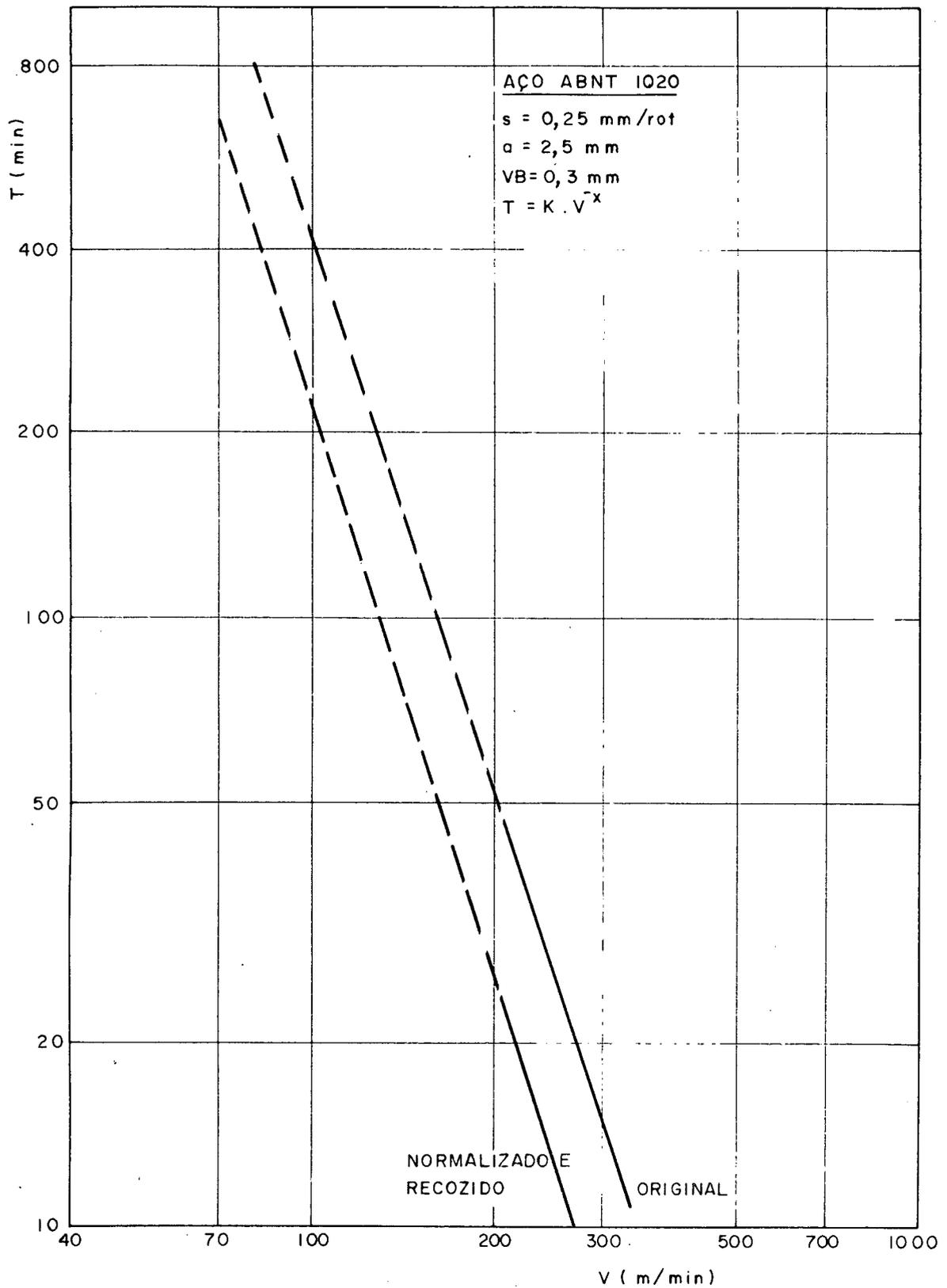


FIGURA 41 - Representação gráfica da fórmula de Taylor para o aço ABNT 1020 no estado original de fornecimento e no estado normalizado e recozido.

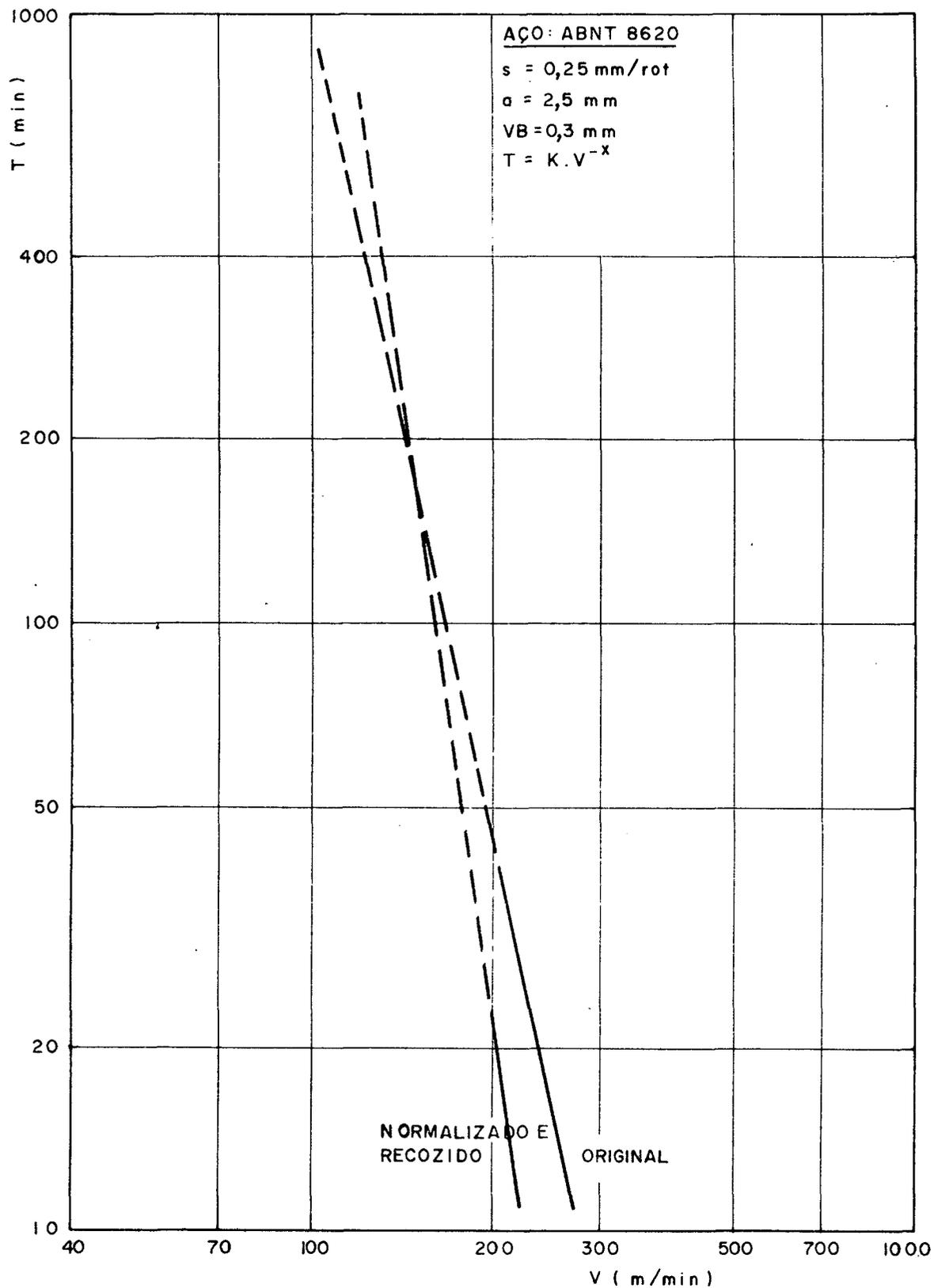


FIGURA 42 - Representação gráfica da fórmula de Taylor para o aço ABNT 8620 no estado original de fornecimento e no estado normalizado e recozido.

Para facilitar a análise dos resultados foi construída a tabela XVIII, que mostra o conjunto das propriedades dos quatro grupos (A, B, C e D) de materiais.

TABELA XVIII - Propriedades dos materiais.

Grupo	Tamanho de Grão ASTM	%Ferrita	%Perlita	Ferr./Perlita	σ_{esc} N/mm ²	σ_{rup} N/mm ²	Alongam. %	Estricção %	Dureza HB
A	6 e 7	65,57	32,88	1,99	256,6	450,2	40,2	61,89	147
B	6,7 e 8	72,59	25,62	2,83	262,6	428,5	38,3	61,89	129
C	7 e 8	60,73	37,69	1,61	328,3	578,1	31,5	56,44	177
D	8 e 9	55,94	41,90	1,34	335,4	535,3	33,7	60,19	161

Os resultados dos testes de dureza para o aço ABNT 1020 foram coerentes com o percentual de ferrita e perlita, isto é, o material do grupo A (ABNT 1020 - original), possui maior dureza que o material do grupo B (ABNT 1020 - normalizado e recozido), pois apresenta maior percentagem de perlita.

No aço ABNT 8620, o material do grupo C (ABNT 8620 - original) possui maior dureza (177 HB) que o material do grupo D (ABNT 8620 - normalizado e recozido) (161 HB) porém, apresenta menor percentagem de perlita, o que a princípio parece uma incoerência. Na tentativa de se esclarecer esta incoerência, partiu-se, então, para uma análise das demais variáveis que poderiam provocar variações na dureza. A composição química, por ser a mesma nos dois grupos (C e D), fica sem efeito. O material do grupo D (ABNT 8620 - normalizado e recozido) ainda apresenta uma granulação ligeiramente inferior ao material do grupo C (ABNT 8620 - original), contrariando ainda mais o resultado de dureza medido. Um estudo mais profundo em termos da distribuição dos elementos de liga (maneira de distribuição na matriz, formação e distribuição de carbonetos) implicaria na necessidade de um microscópio eletrônico de transmissão, não disponível.

No entanto, as figuras 28 e 29 que mostram a estrutura

metalográfica do grupo C e D, respectivamente, revelam uma diferença quanto à distribuição da ferrita e perlita. Para o aço ABNT 8620 no estado normalizado e recozido (figura 29) (grupo D), nota-se uma distribuição da ferrita sob a forma de uma rede contínua. Já o aço ABNT 8620, no estado original de fornecimento, (figura 28) (grupo C) a distribuição da ferrita é mais uniforme. Esta diferença pode ser uma das principais causas que resultaram na menor dureza do aço do grupo D.

Quanto ao tamanho de grão, pode-se dizer que a sua influência é praticamente nula, visto que a diferença entre os materiais em estudo (A com B, e C com D) é mínima. Por outro lado, a granulação mais fina, se considerada, contribuirá para uma melhor usinabilidade. Seguindo este raciocínio, a influência do tamanho de grão na usinabilidade favorece os materiais no estado B e D.

A forma levemente estriada da ferrita e da perlita, não atua diretamente na variação da usinabilidade, visto que o corte foi perpendicular à estas estrias.

O aço ABNT 1020, não apresentou variação a ser considerada entre os dois estados A e B, quanto a ductilidade. O aço ABNT 8620 apresentou uma variação bastante reduzida, e, se levada em consideração, possivelmente favorecerá o material no estado original (C), visto que possui ductilidade ligeiramente menor, dando, assim, uma característica mais quebradiça ao cavaco, aumentando sua usinabilidade (ver figura 14).

Na análise da dureza, pode-se dizer que a variação entre os materiais A e B, e C e D, é relativamente pequena. Porém, como a dureza é um forte indicador de usinabilidade, terá alguma influência, e possivelmente favorecerá os materiais nos estados A e C, visto que para estes materiais a maior dureza levará à maior usinabilidade, como mostra a figura 12.

A principal variável em estudo no presente trabalho, como já citado anteriormente, é a relação ferrita/perlita. No

entanto, sua influência na usinabilidade ficou um tanto prejudicada. De um lado, pela obtenção de uma diferença não tão significativa para os dois estados, de outro, pela inversão obtida na quantidade de perlita do aço ABNT 8620 após o tratamento de normalização e recozimento (grupo D). Além do mais, como já analisado, outros fatores não permitem uma análise isolada deste parâmetro. Mesmo assim os resultados obtidos permitem tirar algumas conclusões em relação à influência da relação ferrita/perlita, relativos aos aços de seus estados estudados.

Da tabela XVII tem-se que a relação ferrita/perlita do aço ABNT 1020 é maior que o grupo B, enquanto que no aço ABNT 8620 ela é maior para o grupo D.

De acordo com estes resultados, pode-se concluir que a menor usinabilidade do material do grupo B, para as velocidades de corte usadas se deve ao maior desenvolvimento do mecanismo de difusão, visto que o carbono e o cobalto da ferramenta de corte se difundem mais facilmente em materiais que possuem maior quantidade de fase ferrítica.

No caso do aço ABNT 8620 a menor usinabilidade do material do grupo D (normalizado e recozido), se deve a que, além do mecanismo de desgaste por difusão, se tenha também a participação maior do desgaste por abrasão, visto que a quantidade de perlita presente neste estado é maior.

Como consequência desta análise, não considerando os demais fatores, a relação ferrita/perlita menor, leva a um aumento da usinabilidade do aço ABNT 1020. Já no aço ABNT 8620, nas mesmas condições, leva a uma diminuição da usinabilidade.

A tabela XIX permite uma melhor visualização do acima comentado.

TABELA XIX - Influência das propriedades dos materiais na usinabilidade.

PROPRIEDADES	GRUPO DE MATERIAIS			
	A	B	C	D
TAMANHO DE GRÃO ASTM	6 e 7	6, 7 e 8	7 e 8	8 e 9
		↑		↑
ESTRUTURA ZONADA	não apresentou	apresentou	não apresentou	apresentou
		—		—
DUTILIDADE (EXTRICÃO %)	61,89	61,89	56,44	60,19
			↑	
DUREZA HB	147	129	177	161
	↑		↑	
RELAÇÃO FERRITA/PERLITA	1,99	2,83	1,61	1,34
	↑		↑	

↑ - Contribui favoravelmente na usinabilidade.

— - Sua presença não alterou a usinabilidade.

Além da relação ferrita/perlita, inevitavelmente o processo sofre influência de outros fatores que possivelmente contribuem para gerar o resultado final. Somando-se aos já citados, pode-se, ainda, destacar a influência do fator de forma dos grãos dos microconstituintes.

As figuras 41 e 42, representações gráficas das curvas de Taylor, mostram o comportamento dos dois materiais quanto à sua usinabilidade.

A figura 41 mostra que o aço ABNT 1020, no estado original de fornecimento (grupo A), para qualquer velocidade de corte, apresenta maior vida da ferramenta, quando comparado com o estado normalizado e recozido (grupo B), e esta diferença é apro

ximadamente constante para qualquer velocidade de corte.

A figura 42 mostra para o aço ABNT 8620 que, para velocidades baixas, até aproximadamente 150 m/min, a vida da ferramenta será maior no estado normalizado e recozido (grupo D), e a diferença é tanto maior quanto menor a velocidade de corte. Para velocidades de corte superiores a 150 m/min, ocorre uma inversão, isto é, a vida da ferramenta será maior no estado original de fornecimento (grupo C), e a diferença é tanto maior quanto maior a velocidade de corte. Este comportamento, pode ser causado por uma possível inversão nos mecanismos de desgaste, porém para a confirmação desta ocorrência faz-se necessário uma série de ensaios naquela faixa de velocidades. Neste intervalo de velocidades a vida da ferramenta é muito grande, razão pela qual torna-se difícil tal confirmação, em função da não disponibilidade de material.

Assim, com base numa extrapolação para uma faixa de velocidades um tanto distante das em que os materiais foram ensaiados, fica difícil tirar conclusões terminais precisas sobre os reais mecanismos de desgaste ali atuantes.

O comportamento das forças de usinagem F_s , F_v e F_r , em função do desgaste de flanco VB , são apresentados nas figuras 43 a 54.

Para todas as condições de velocidade de corte e todos os estados dos materiais (ABNT 1020 e ABNT 8620), as forças de usinagem (força de corte F_s , força de avanço F_v e força de recuo F_r) aumentaram com o aumento do desgaste de flanco (VB), exigindo maior potência da máquina, à medida que se processava o ensaio. Nota-se, também, que a força de corte F_s é a de maior valor e a força de recuo F_r , a de menor.

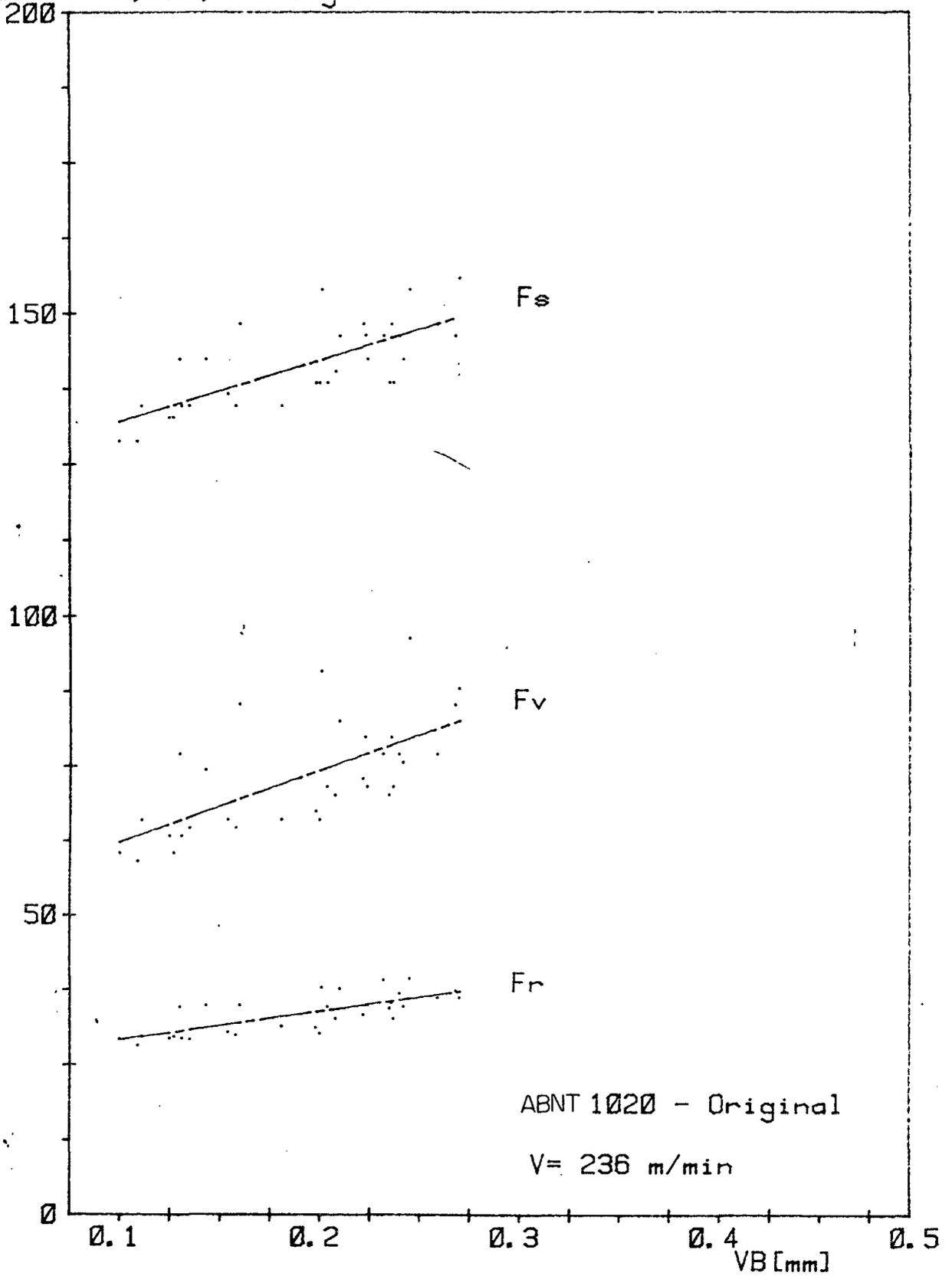
Forças F_s , F_v , F_r [Kgf]

FIGURA 43 - Variação das forças de usinagem com o desgaste de flanco - Aço ABNT 1020 - original
 $V = 236$ m/min.

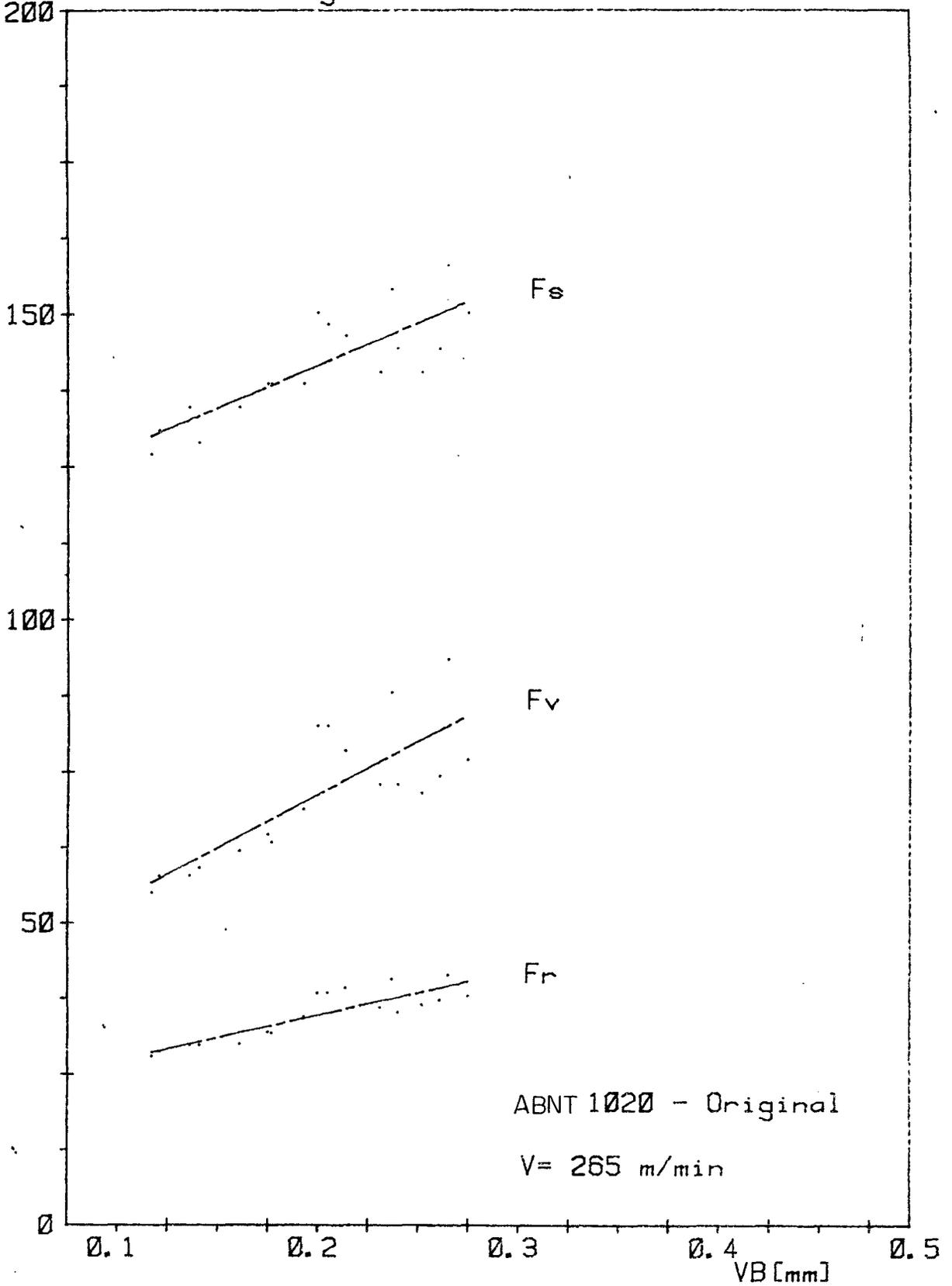
Forças F_s , F_v , F_r [Kgf]

FIGURA 44 - Variação das forças de usinagem com o desgaste de flanco - Aço ABNT 1020 - original
V = 265 m/min.

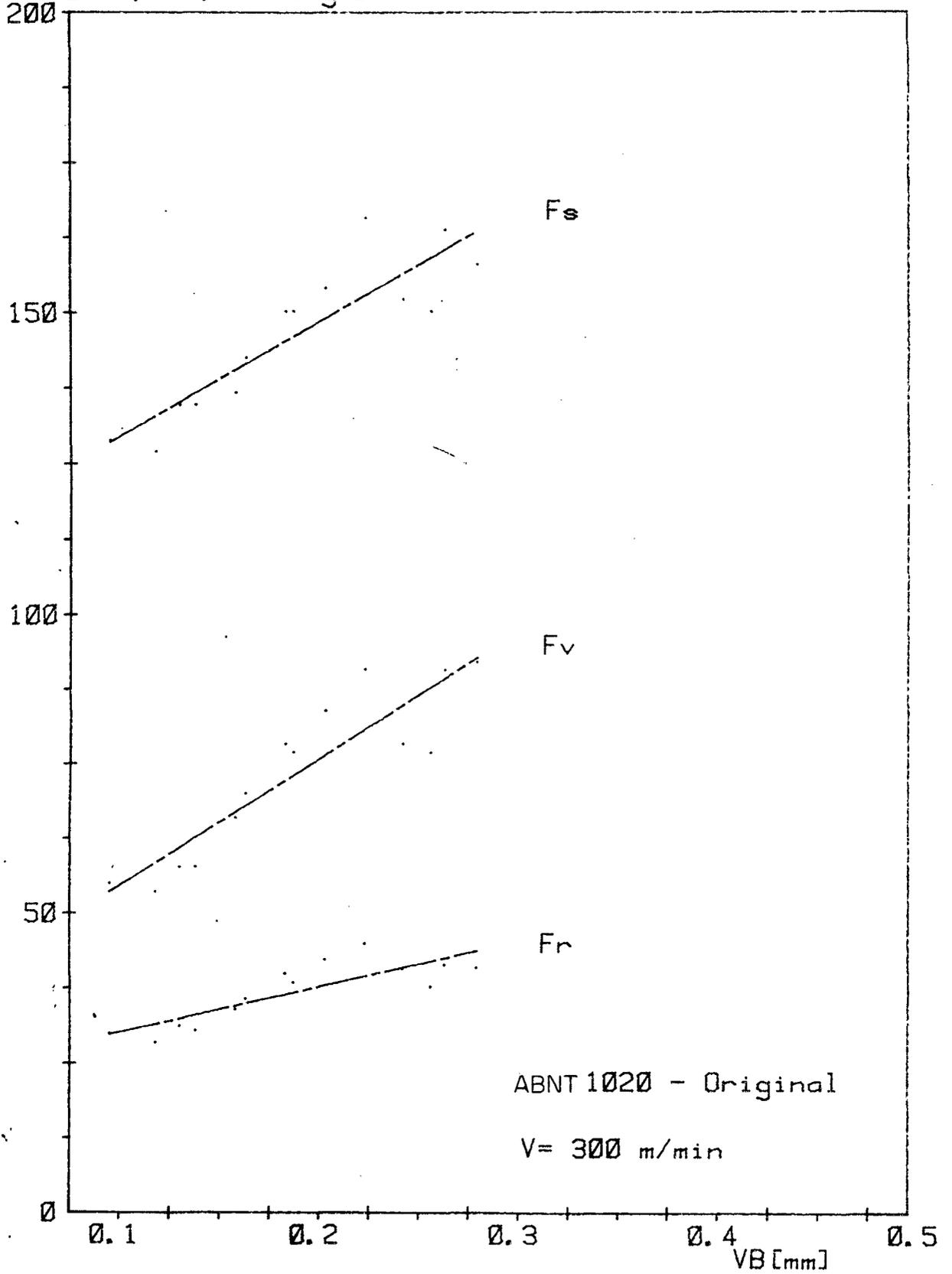
Forças F_s , F_v , F_r [Kgf]

FIGURA 45 - Variação das forças de usinagem com o desgaste de flanco - Aço ABNT 1020 - original
V = 300 m/min.

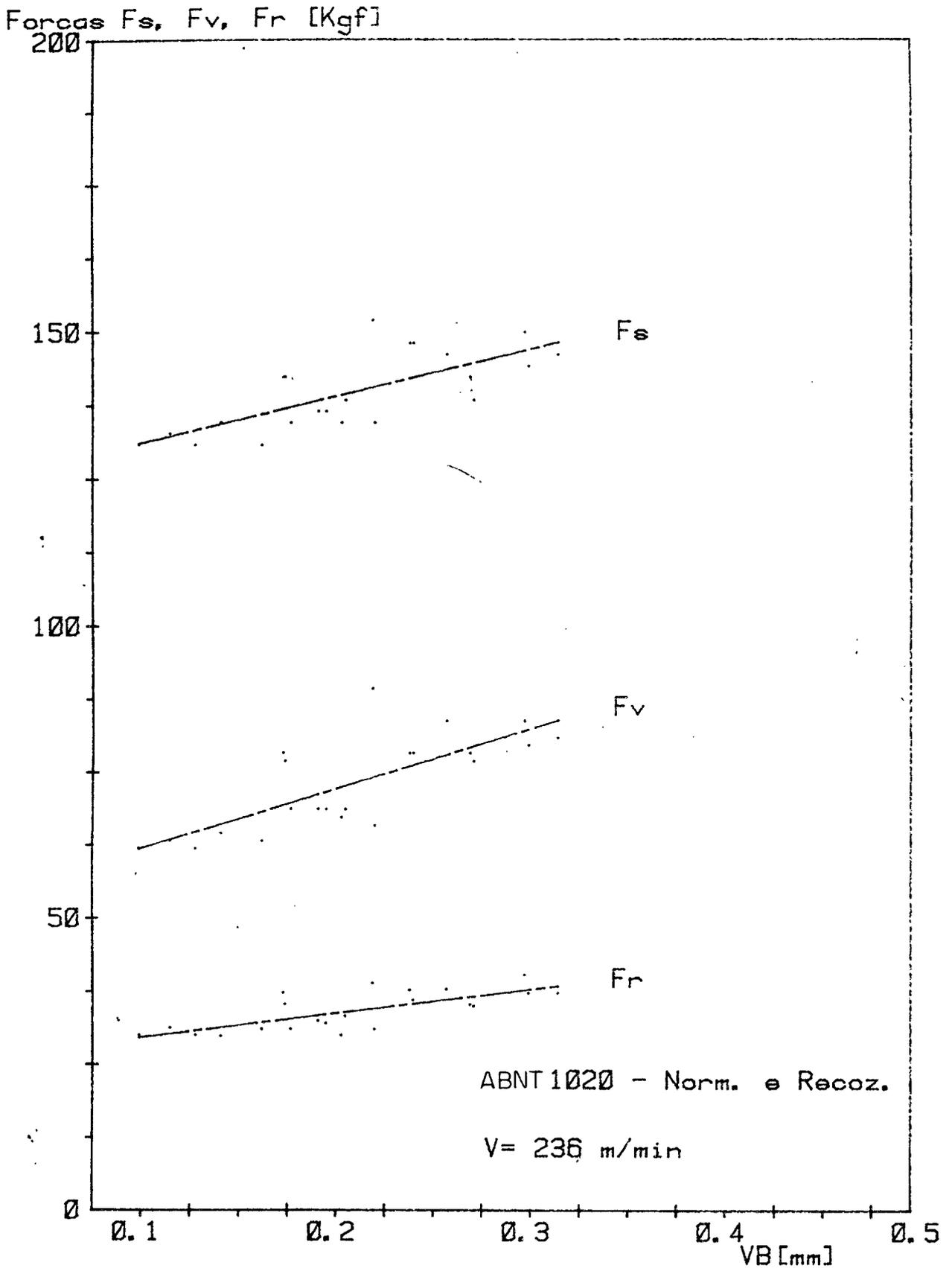


FIGURA 46 - Variação das forças de usinagem com o desgaste de flanco. Aço ABNT 1020 - normalizado e recozido. $V = 236$ m/min.

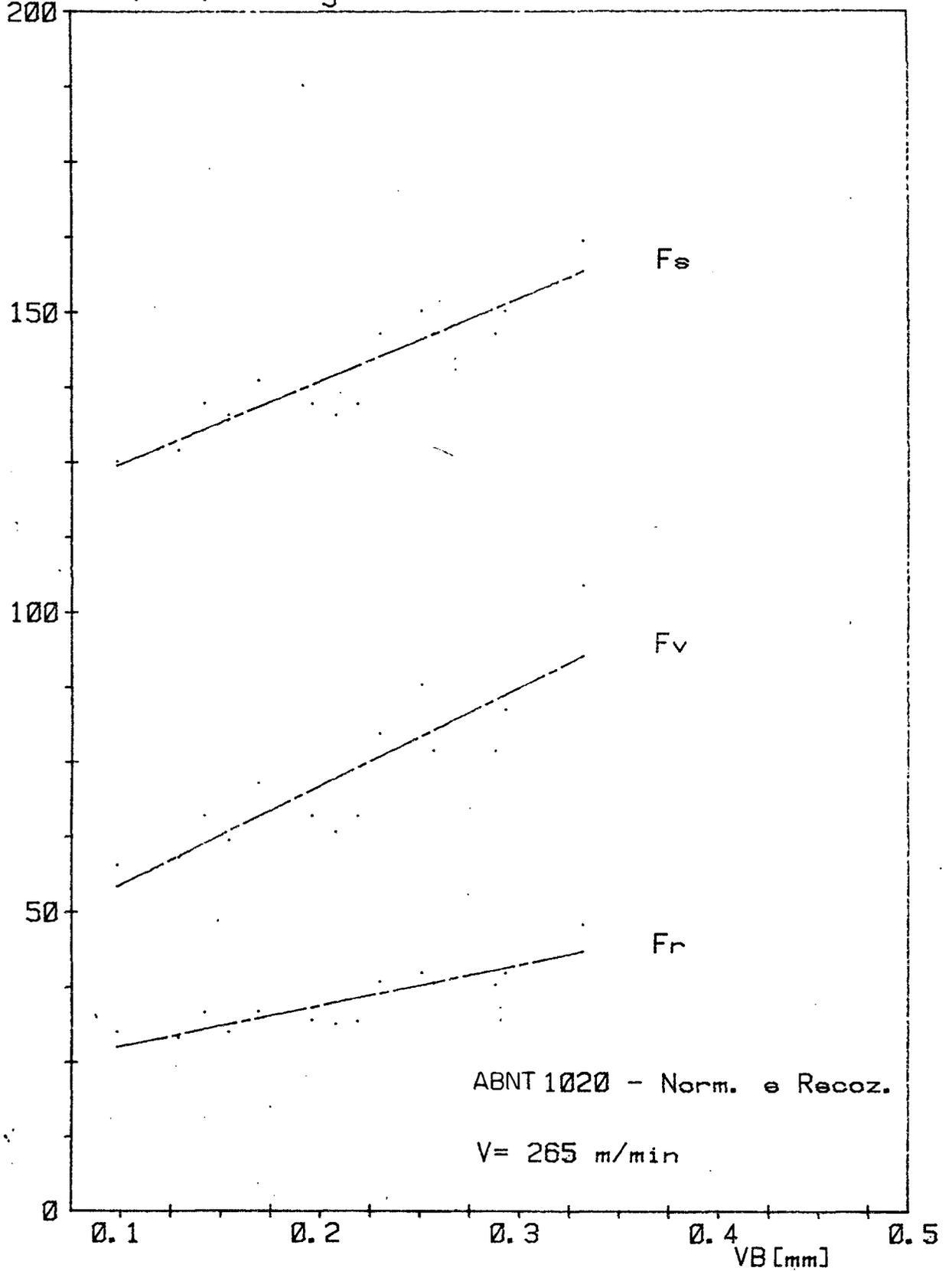
Forças F_s , F_v , F_r [Kgf]

FIGURA 47 - Variação das forças de usinagem com o desgaste de flanco. Aço ABNT 1020 - normalizado e recozido. $V = 265$ m/min.

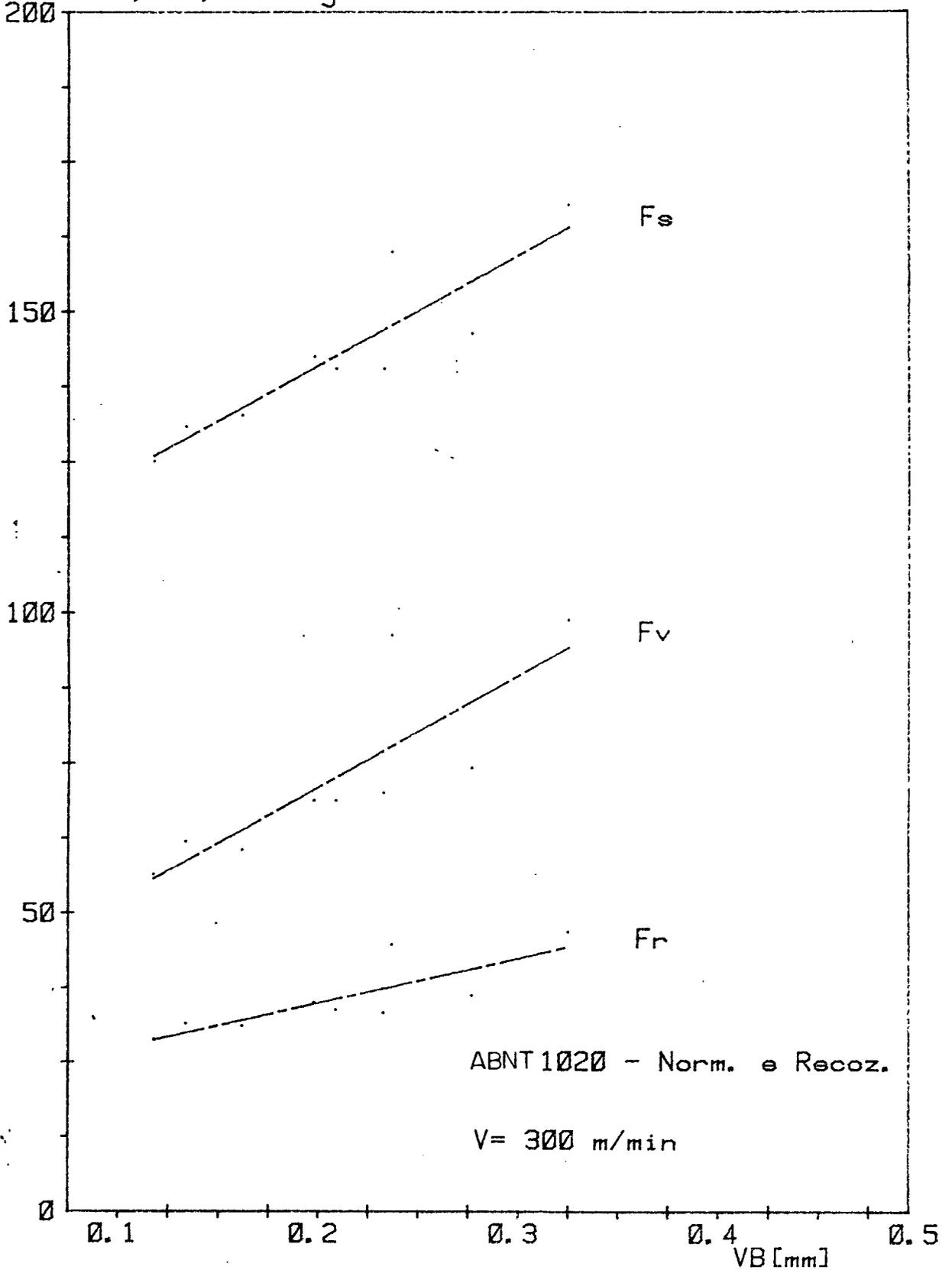
Forças F_s , F_v , F_r [kgf]

FIGURA 48 - Variação das forças de usinagem com o desgaste de flanco. Aço ABNT 1020 - normalizado e recozido. V = 300 m/min.

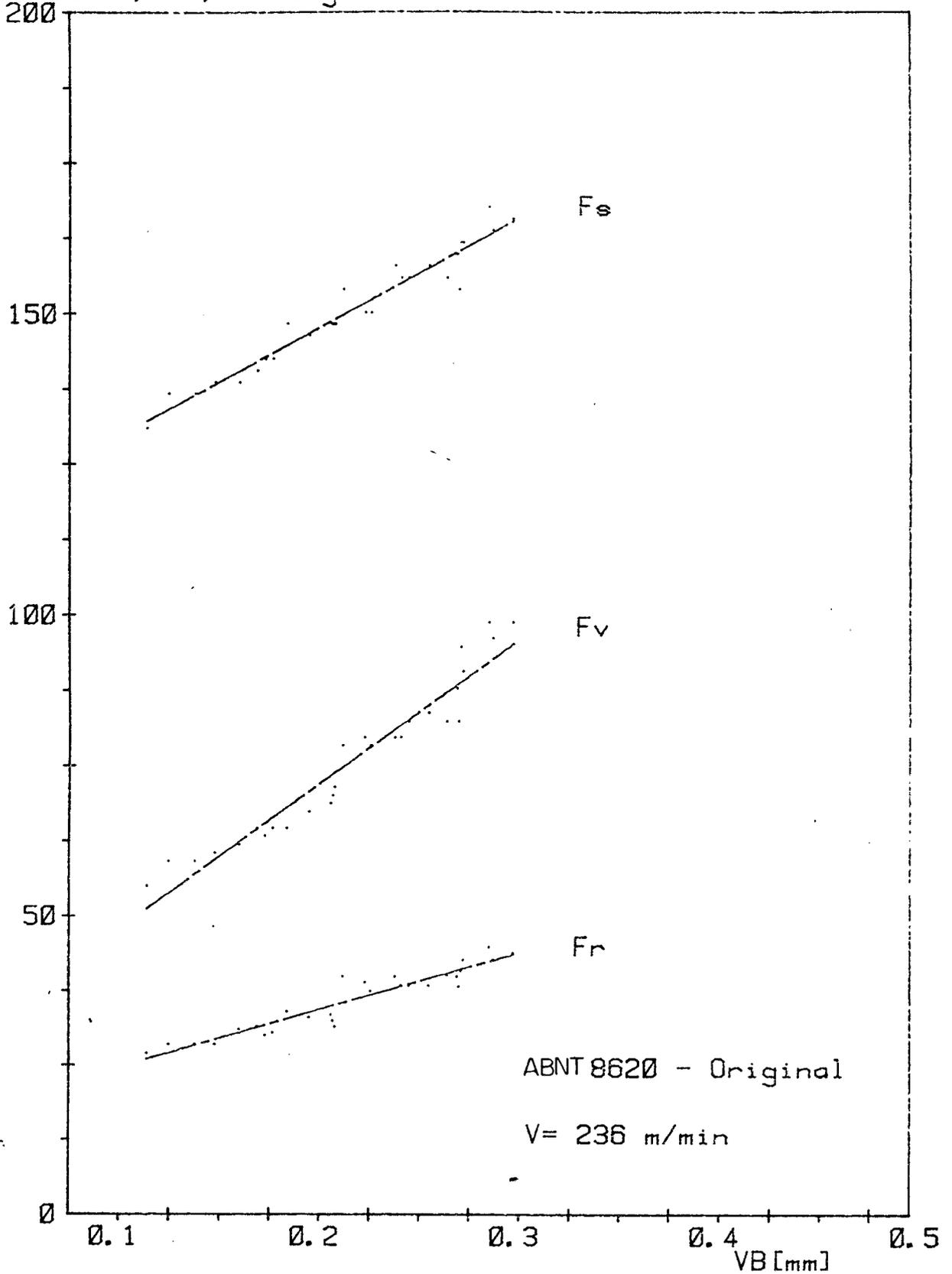
Forças F_s , F_v , F_r [Kgf]

FIGURA 49 - Variação das forças de usinagem com o desgaste de flanco. Aço ABNT 8620 - original. V = 236 m/min.

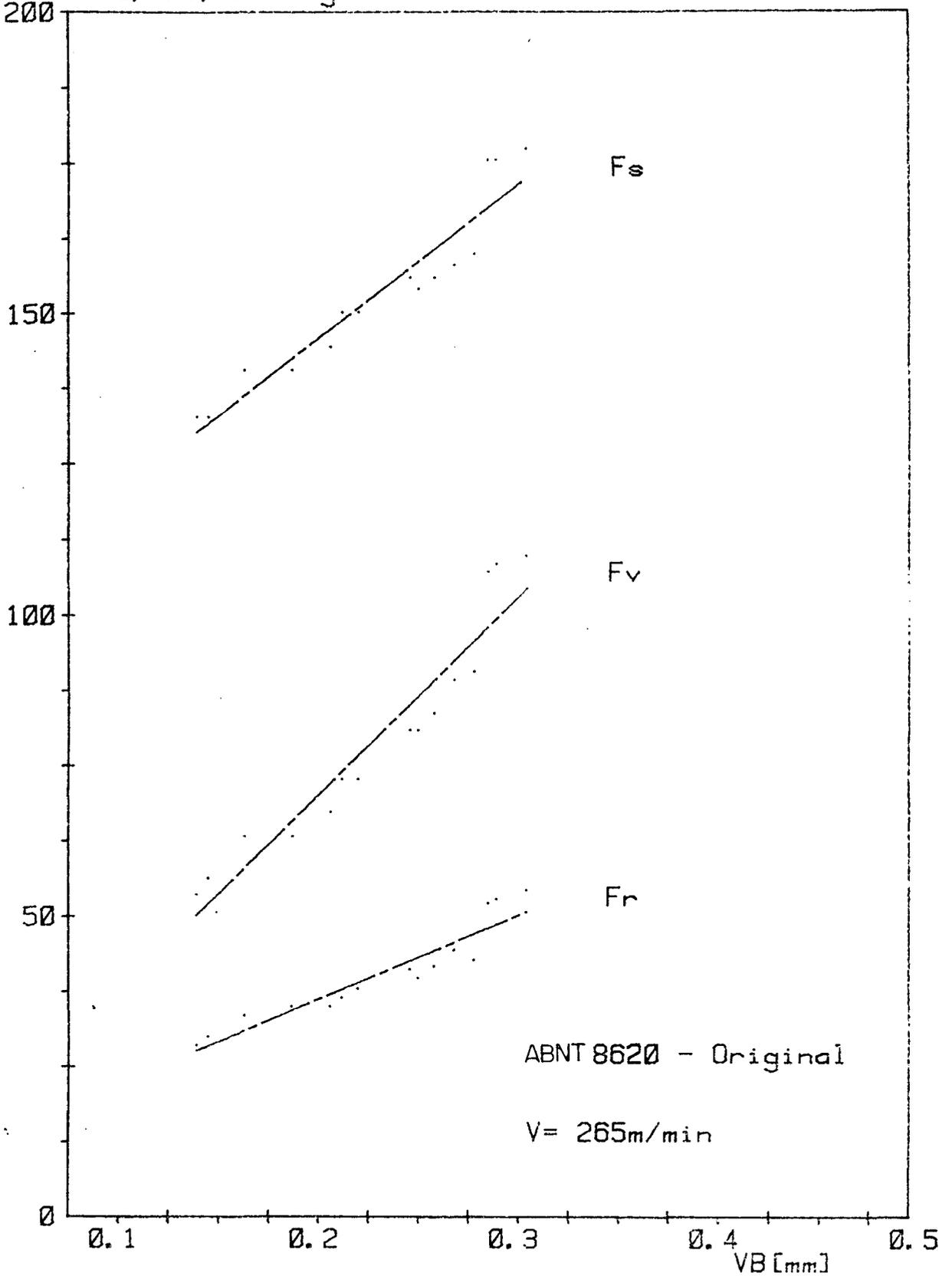
Forças F_s , F_v , F_r [Kgf]

FIGURA 50 - Variação das forças de usinagem com o desgaste de flanco. Aço ABNT 8620 - original.
V = 265 m/min.

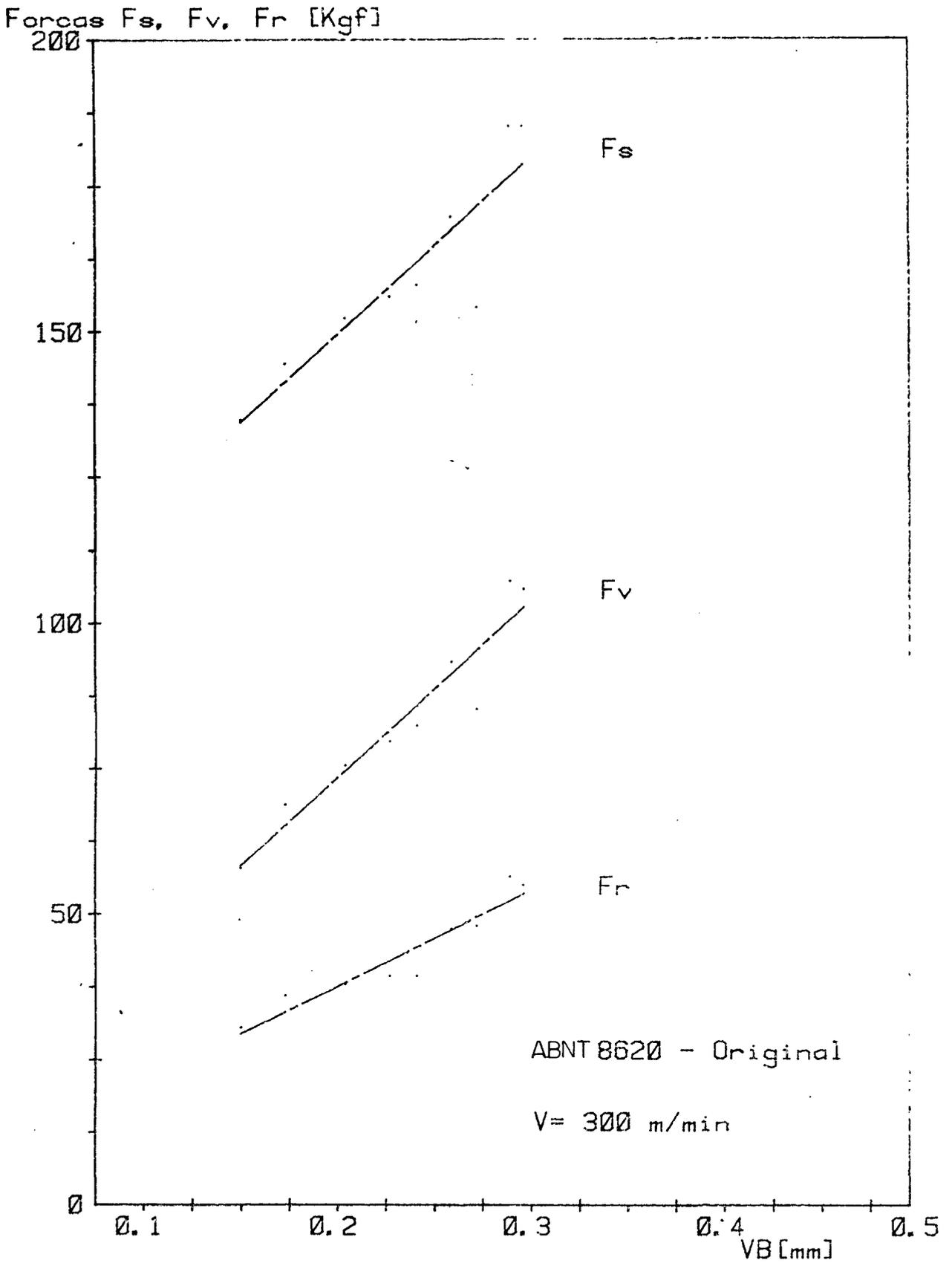


FIGURA 51 - Variação das forças de usinagem com o desgaste de flanco. Aço ABNT 8620 - original.
 $V = 300$ m/min.

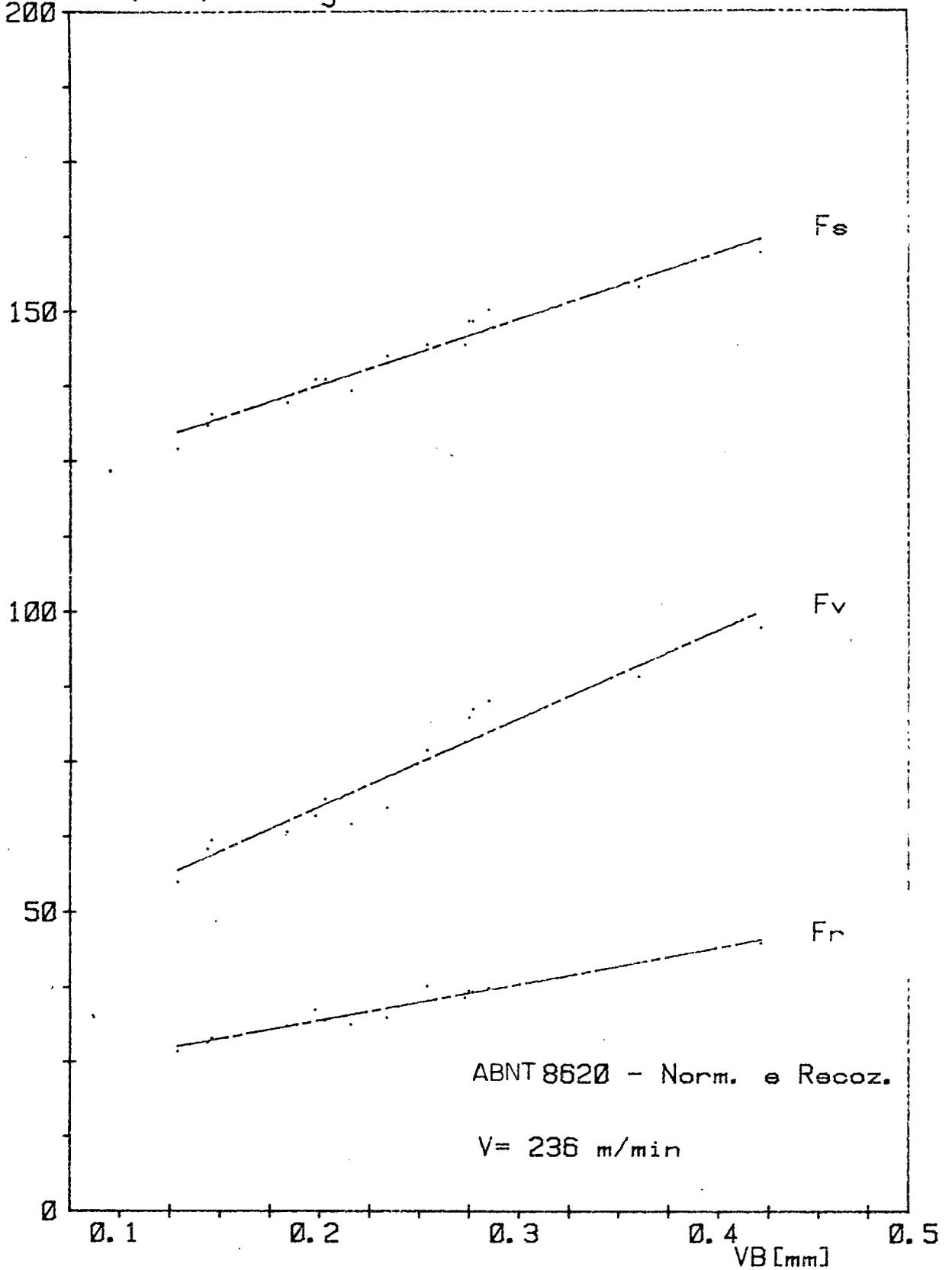
Forças F_s , F_v , F_r [Kgf]

FIGURA 52 - Variação das forças de usinagem com o desgaste de flanco. Aço ABNT 8620 - normalizado e recozido. $V = 236$ m/min.

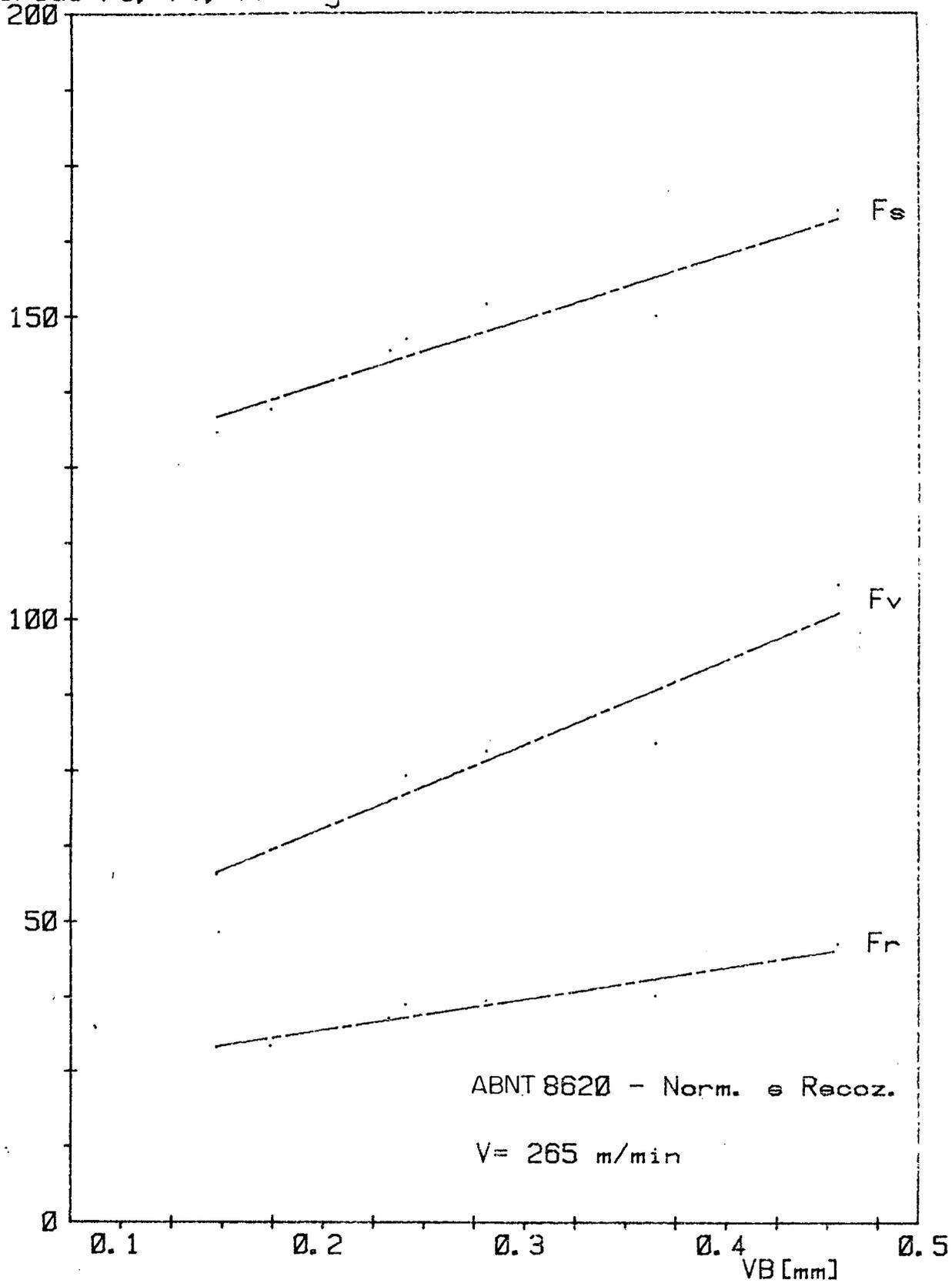
Forças F_s , F_v , F_r [Kgf]

FIGURA 53 - Variação das forças de usinagem com o desgaste de flanco. Aço ABNT 8620 - normalizado e recozido. $V = 265$ m/min.

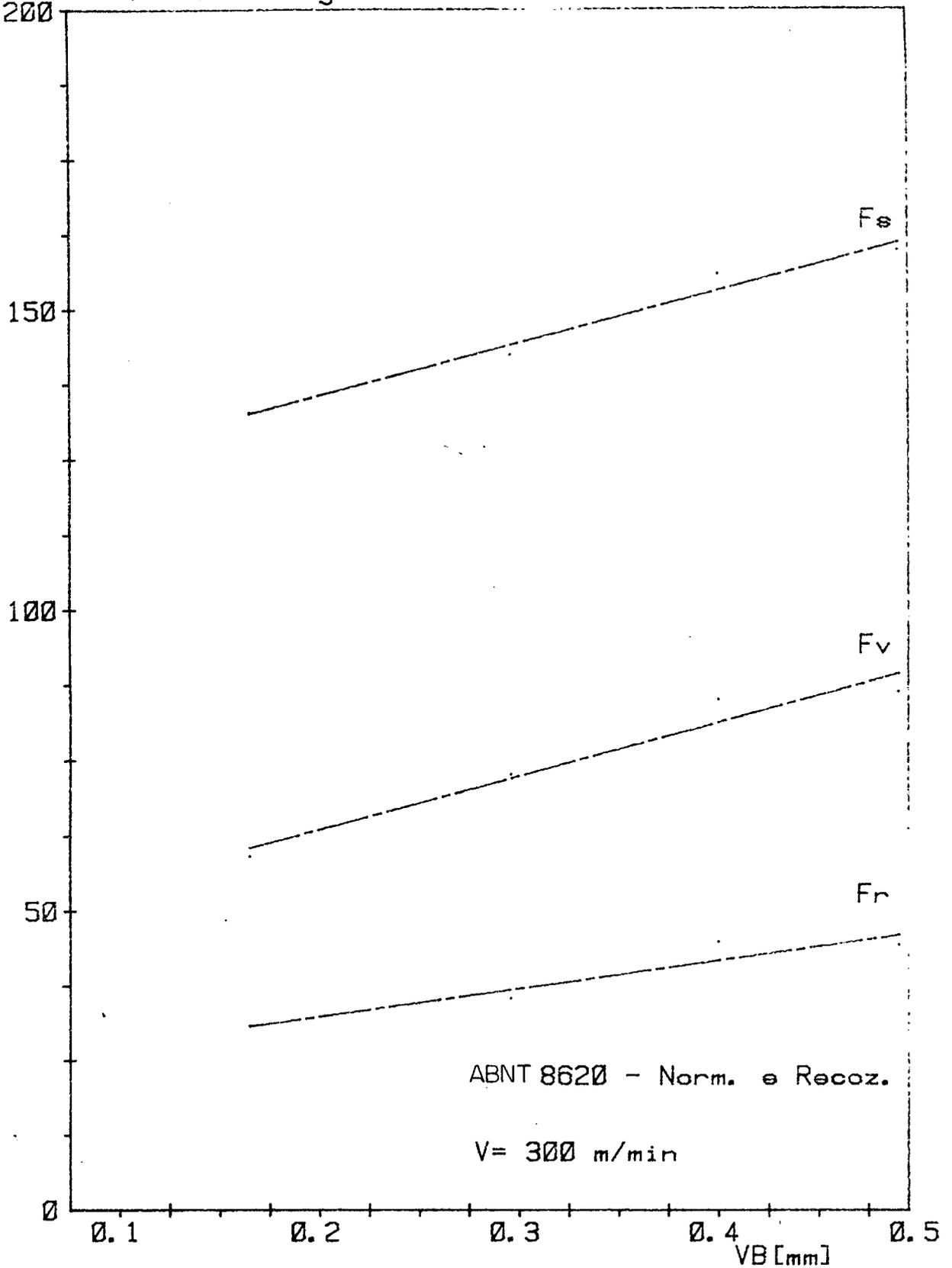
Forças F_s , F_v , F_r [Kgf]

FIGURA 54 - Variação das forças de usinagem com o desgaste de flanco. Aço ABNT 8620 - normalizado e recozido. $V = 300$ m/min.

6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no presente trabalho pode-se concluir que:

- Para os aços usados em função dos tratamentos térmicos aplicados, tornou-se difícil uma caracterização isolada da influência da relação perlita/ferrita na sua usinabilidade, isto porque houve influência de outros parâmetros e a diferença entre os teores de ferrita/perlita no estado de fornecimento e tratado não foi tão significativa.
- No aço ABNT 1020, a maior quantidade de perlita no material no estado original de fornecimento aumenta a usinabilidade. Isto pode ser provocado pela diminuição do mecanismo de difusão do carbono e do cobalto da ferramenta para a peça, função da maior quantidade de perlita.
- No aço ABNT 8620, a maior quantidade de perlita no material no estado normalizado e recozido reduz a usinabilidade. Isto pode ser provocado pelo aumento do mecanismo de desgaste por abrasão, devido à maior quantidade de partículas com maior dureza.
- O maior percentual de perlita e o tamanho de grão um pouco menor nem sempre são fatores preponderantes para que o material tenha maior dureza e menor ductilidade, isto porque a forma e distribuição das fases, possivelmente exercem uma influência nestas propriedades, como ocorreu com o aço ABNT 8620.
- As forças de usinagem aumentam com o aumento do desgaste.

Os resultados obtidos levaram a uma série de dúvidas que dificultaram a formulação de conclusões terminais precisas. Estas dúvidas estão especialmente no fato de que não foi possível excluir do processo uma série de fatores, tais como: fator de forma e tamanho dos grãos, distribuição da pelita e ferrita e a influência específica de cada um dos mecanismos de desgaste. Neste sentido sugere-se, para o futuro, um estudo da contribuição quantitativa no desgaste total de cada mecanismo de desgaste, para várias velocidades de corte.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] - SVAHN, Olov; "Plasticity in Cutting", Proc. of the seminar on Metal Cutting, Part II, Sept. 1966, pp 79-97.
- [2] - "Stahl Eisen Prüfblatt - 1160 - 69 - Dez. 1969.
- [3] - FERRARESI, Dino; "Fundamentos da Usinagem dos Metais", Vol. I, Editora Edgar Blücher Ltda., São Paulo - 1970.
- [4] - BLACK, Paul H.; "Theory of Metal Cutting", New Yourk, McGraw-Hill Boock Co. Inc. - 1961.
- [5] - PIISPANEN, V.; "Theory of Formation of Metal Chips", J. Appl Physics, USA, 10-876 - 81 - Outubro 1948.
- [6] - JOHNSON, W. e MELLOR, P. B.; "Plasticity for Mechanical Engineers", D. Van Nostrand Company Ltd., London - 1962.
- [7] - ERNEST, H. e MERCHANT, M. E.; "Chip Formation, Friction and High Quality Machined Surfaces", Surface Treatment of Metals (Trans. American Soc. Metals), USA - 29: 299-378, 1941.
- [8] - LEE, E. H. e SHAFFER, B.W.; "The Theory of Plasticity Applied to a Problem of Machining", J. Appl Mech., Trans. A.S.M.E., USA, 73: 405-413, 1951.
- [9] - SHAW, COOK e FINNIE; "The Shear Angle Relationship in Metal Cutting", Trans. A.S.M.E., USA, 75: 273-288, 1953.
- [10] - HUCKS, H.; "Plastizitäts Mecanische Theorie der Spanbildung", Werkstatt una Betrieb, Darmstadt, 1 (85); 1-6; janeiro, 1952.

- [11] - VIEREGGE, G.; "Zerspanung der Eisenwerkstoffe",
Düsseldorf Verlag Stahleisen, M.B.H., 1959.
- [12] - British Standards Institution; "Specification for Tool-
Life Testing with Single Point Turning Tools",
BS 5623, 1979.
- [13] - VIEREGGE, G.; "Der Werkzeugverschleiss bei der
Spanabhebenden Bearbeitung im Spiegel der Verschleiss
- Schnittgeschwindigkeits Kurven", Stahl und Eisen,
Düsseldorf (18): 1.233-37, 1957.
- [14] - OPITZ, H. e KÖNIG, W.; "On the Wear of Cutting Tools",
Advances in Machine Tools Design and Research";
Proceedings of the 8th International M.T.D.R. Confe-
rence - University of Manchester, September 1967.
Part I, pp 173-190.
- [15] - BHATTACHARYYA, A. e GHOSH, A. T.; "Diffusion Wear of
Cutting Tools". Advances in Machine Tools Design and
Research - Proceedings of the 5th International
M.T.D.R. Conference of Birmingham, September, 1964.
pp 225-242.
- [16] - LOLADZE, T. N.; "Adhesion and Diffusion Wear in Metal
Cutting". Journal of the Institution of Engineers
(India) XLIII, n° 3, Part ME2, November, 1962.
- [17] - ZLATIN, N. e MERCHANT, M. E.; "The Distribution of
Hardness in Chips and Machined Surface". Trans. A.S.
M.E., 1947.
- [18] - SCHALLER, E.; "Einfluss der Diffusion auf den Verschleiss
von Hartmetallwerkzeugen bei der Zerspauung von Stahl".
Industrie Anzeiger, Essen, 87 (9): 9-14, janeiro 1965.

- [19] - WILLIAMS, J. E. e ROLLASON, E. C.; "Metallurgical and Practical Machining Parameters Affecting Built-up-Edge Formation in Metal Cutting". Journal of the Institute of Metals, Vol. 98, pp 144-153; 1970.
- [20] - QUEIROZ, A. A.; "Usinabilidade do Ferro Fundido Cinzento e Avaliação da Temperatura e Força de Corte como Sensores do Desgaste". Tese de Mestrado - UFSC, 1976.
- [21] - "Structures in Machining Steel" - Manual on Cutting of Metals, 2ª Edição - ASME, pp 107-123; 1952.
- [22] - BASTIEN, P.; "Les Facteurs Métallurgiques de L'Usinabilité des Aciers". Revue de Metallurgie, pp 981-990; Nov. 1961.
- [23] - LANE, I. D.; STAM, J. W. e WOLFE, J. B.; "General Introductory Review of the Relationship Between Metallurgy and Machinability" - Machinability - ISI (Iron and Steel Institute), London - Special Report - 94; 1967.
- [24] - Landolt - Börnstein - Zahlenwerte und Funktionen, 6º auflage, 2º Band; 1963.
- [25] - BOEHS, L.; "Influência dos Sulfetos de Manganês na Usinabilidade do Ferro Fundido Maleável Preto Ferrítico". Tese de Mestrado - UFSC; 1979.
- [26] - ERICKSON, P. S. e HARDY, J. M.; "Effect of Manganese Sulfide Inclusions in Cast Gray Iron on Tool-Life". A.F.S. Transactions, Vol. 84; 1976.
- [27] - SHAUMANN, R.; "Streuwertuntersuchungen der Zerspanbarkeit von Stahlwerkstoffen". Der Maschinenmarkt, Würzburg. 43 (62), maio 1956.

- [28] - AMARAL, R.; "Determinação dos Coeficientes da Fórmula de Taylor Expandida para Diferentes Tamanhos de Grãos de um Aço Estrutural de Alta Resistência". Tese de Mestrado - UFSC, 1981.
- [29] - STEAD, J.; J. Iron Steel Inst., nº 1 (1915) 140.
- [30] - HOWE, H.; "The Metallography of Steel and Cast Iron". (1916), New York.
- [31] - SAUVEUR, A.; "Métallographie du Fer et de l'Acier". 1937, Paris (Gauthier-Villars).
- [32] - WHITELEY, J.; J. Iron Steel Inst., nº 1 (1926) 213.
- [33] - POMEY, J.; "L'Usinabilité des Aciers en Relation avec la Structure Obtenue par Recuit". Revue de Métallurgie, pags. 255-259, Mar., 1962.
- [34] - WOLDMAN, N. E. e GIBBONS, R. C.; "Machinability and Machining Metals". McGraw-Hill, 1951.
- [35] - JANITZKY, E. J.; "Machinability of Plain-Carbon, Alloy and Austenitic (Nonmagnetic) Steels, and its Relation to Yield-Stress Ratios when Tensile Strengths are Similar". Trans. A.S.M.E., pp. 649, Nov., 1944.
- [36] - WITTEMAN, G. P.; "Studies on the Machinability of Carbon and Alloy Steel". Mechanical Engineering, pp. 575, Ste., 1945.
- [37] - ANGUS, H. T.; "Influence de la Microstructure sur l'Usinabilité". B.D.T. nº 30, Usinabilité des Fontes, pag. 25, Octobre, 1963.

- [38] - OPITZ, H. et Allii; "Untersuchung der Ursachen des Werkzeugverschleisses". Forschungsbericht, Westdeutscher Verlag, Köln/Opladen, 1961.
- [39] - ISO - 3, Preferred Numbers - Series of Preferred Numbers.
- [40] - SOUZA, S. A.; "Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos". Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1974.
- [41] - ABNT - Ensaio de Tração de Materiais Metálicos. Método Brasileiro, MB-4, 1953.
- [42] - TONSHOFF, H. K.; "Über die Zerspanbarkeit von Stahl und Gusseisen". VDI - Z 120 (1978), Nr. 7, April, pp. 311-318.

A P Ê N D I C E S

A P Ê N D I C E I

ENSAIOS PILOTOS

I. ENSAIOS PILOTOS PARA DETERMINAÇÃO DAS VELOCIDADES DE CORTE

Para realizar os ensaios de usinabilidade em condições normais, deve-se sempre usar materiais da mesma corrida, garantindo assim propriedades idênticas.

Para este trabalho, cujo objetivo é estudar o efeito da variação da microestrutura na usinabilidade, esta condição tornou-se mais crítica, visto que inclusões e/ou qualquer diferença na composição química podem provocar mudanças apreciáveis da usinabilidade.

Tinha-se disponíveis quantidades razoáveis de materiais ABNT 1020 e ABNT 8620, porém divididas em barras de fabricantes diferentes. Desta maneira realizou-se ensaios pilotos, com o objetivo de determinar as velocidades de corte adequadas para se chegar a um desgaste razoável da ferramenta ($VB = 0,3$ mm, recomendado pela norma BS 5623) com o material disponível de um só fabricante.

Outro objetivo deste teste piloto foi determinar as dimensões adequadas do quebra-cavaco para a obtenção de cavacos em forma de fragmentos em todas condições de ensaios, para os dois materiais, aumentando assim a segurança e a homogeneidade dos resultados, além de não prejudicar o acabamento superficial e não influir no desgaste da ferramenta. A figura 55 mostra a forma dos cavacos obtidos em todas as condições.

Foi em função dos testes pilotos e da quantidade de material disponível que se definiu também o porta-ferramenta e geometria da ferramenta de corte adequada.

Foram selecionados materiais de um fabricante para os ensaios reais e os demais ficaram disponíveis para a realização dos testes pilotos. Para os ensaios reais, tinha-se 8 corpos de

prova de 76,2 mm de diâmetro por 300 mm de comprimento de cada grupo de material (de uma mesma corrida, de um só fabricante).

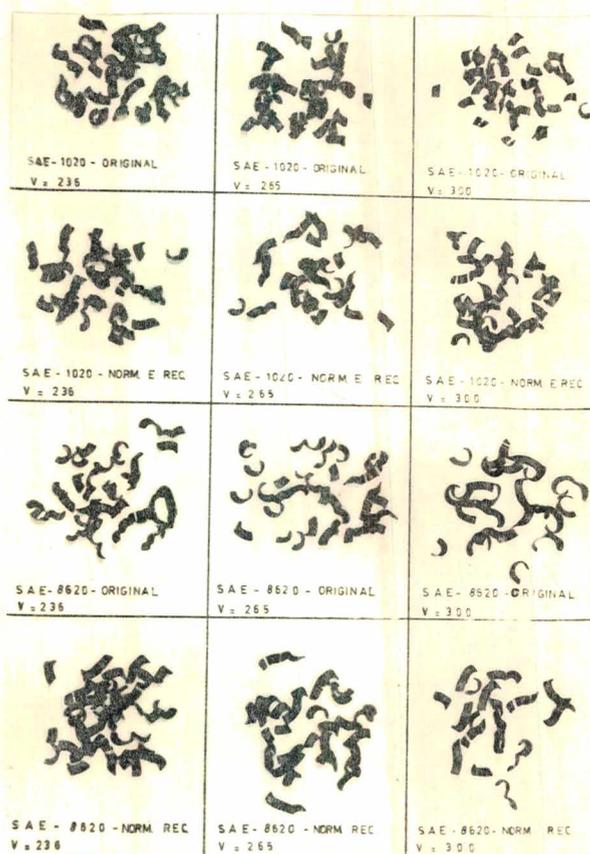


FIGURA 55 - Formas dos cavacos.

Devido à menor dureza, o aço ABNT 1020 foi utilizado nestes testes, visto que o desgaste esperado para o aço ABNT 8620 é sempre maior, e assim consumindo menor quantidade de material.

Foram selecionadas, em princípio, as velocidades de 180 m/min, 200 m/min e 240 m/min. A ferramenta foi a SNUN 120408 da Brassinter e o porta-ferramenta, também da Brassinter:

Especificação: SBTR - 16 M

Dimensões: 25 x 25 x 150 mm

Ângulo de saída $\gamma = -6^\circ$

Ângulo de incidência $\alpha = 6^\circ$

Ângulo de posição $\chi = 75^\circ$

Ângulo de ponta $\epsilon = 90^\circ$.

Para o teste piloto, usou-se a velocidade de corte da qual esperava-se maior consumo de material por tempo de vida da ferramenta, isto é, $V = 180$ m/min, para depois estimar o consumo de material nas demais velocidades.

O ensaio foi iniciado após acertar a dimensão do quebra-cavaco com o objetivo de se obter um cavaco em forma de fragmento.

Após um tempo de usinagem de 38,35 min, o desgaste VB atingido foi 0,218 mm e o consumo de material foi de 5 corpos de prova.

Com base nestes resultados, procurou-se obter menor consumo de material ou maior desgaste na ferramenta, aumentando-se a velocidade de corte. Agindo desta maneira fez-se um ensaio piloto com a velocidade de corte de 250 m/min.

Como resultado, após 26,19 min, o desgaste VB atingido foi de 0,203 mm, e o consumo de material foi de 5 corpos de prova.

Em função dos resultados acima, apresentou-se duas alternativas, isto é, mudar a classe da ferramenta ou as características da mesma. Optou-se em realizar um teste piloto com uma ferramenta de ângulo de saída positivo. A ferramenta escolhida foi a SPUN 120308, da Brassinter e o porta-ferramenta também da Brassinter, CSBPR 2525 MR:

Dimensões: 25 x 25 x 150 mm

Ângulo de saída $\gamma = +5^\circ$

Ângulo de incidência $\alpha = 5^\circ$

Ângulo de posição $\chi = 75^\circ$

Ângulo de ponta $\epsilon = 90^\circ$.

Usando-se uma velocidade de corte de 250 m/min e a ferramenta acima, realizou-se um 3º ensaio piloto, obtendo-se como resultados:

- após 16,07 min, atingiu-se um desgaste de 0,295 mm, consumindo-se 3 corpos de prova de material.

A figura 56 mostra, de maneira clara, os desgastes obtidos em duas ferramentas com uma velocidade de corte comum de 250 m/min.

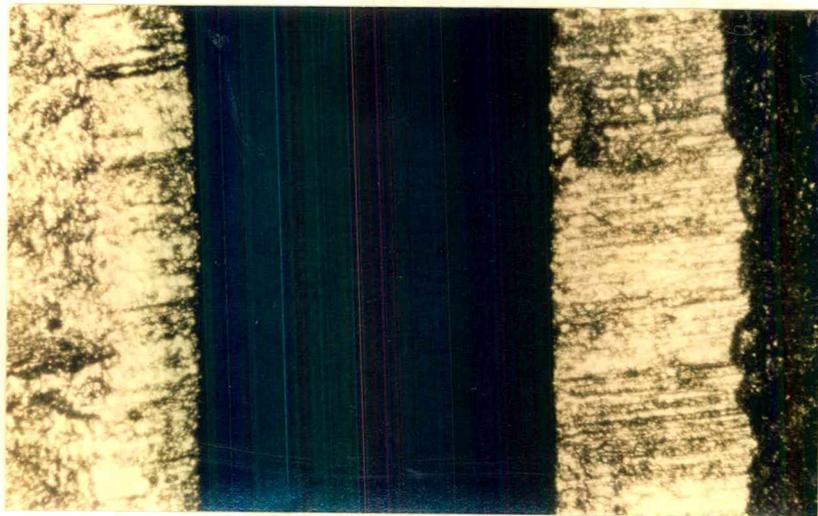


FIGURA 56 - Desgaste de flanco em duas ferramentas distintas, com a mesma velocidade de 250 m/min.

O desgaste da ferramenta que aparece à esquerda da foto, é de uma ferramenta com ângulo de saída $\gamma = -6^\circ$ e um tempo de usinagem de 26,19 min, com $VB = 0,203$ mm.

O desgaste da ferramenta que aparece à direita da foto, é de uma ferramenta com ângulo de saída $\gamma = +5^\circ$ e um tempo de usinagem de 16,07 min, com $VB = 0,295$ mm.

Com base nos resultados obtidos pode-se ver a influência marcante do ângulo de saída da ferramenta no desgaste da mesma.

Realizou-se, ainda, um 4º ensaio piloto, com a ferramenta de ângulo de saída positivo, com velocidade de corte $V = 280$ m/min, e para um tempo de usinagem de 10,01 min, obteve-se um desgaste $VB = 0,305$ mm, com consumo de 2,5 corpos de prova.

Após estes ensaios e com o auxílio da série R40 de números normalizados da ISO, determinou-se as condições de velocidades:

$$V_1 = 236 \text{ m/min}$$

$$V_2 = 265 \text{ m/min}$$

$$V_3 = 300 \text{ m/min.}$$

Ao mesmo tempo se definiu o uso da ferramenta de corte com ângulo da saída positivo, bem como a geometria ideal do quebra-cavaco.

A P Ê N D I C E I I

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE USINABILIDADE

TESTE N° 1 - Material ABNT 1020 original. Grupo A.
V = 236 m/min.

OBS.	TEMPO DE CORTE (min)	DESGASTE VB (mm)	F _s (kgf)	F _v (kgf)	F _r (kgf)
1	0,73	0,105	128,9	60,5	29,3
2	1,37	0,114	128,9	59,1	28,3
3	1,94	0,116	134,7	66,0	29,8
4	2,44	0,130	132,8	63,3	29,5
5	3,15	0,132	132,8	60,5	29,8
6	3,78	0,135	142,5	77,0	34,8
7	4,35	0,136	134,7	63,3	29,5
8	4,84	0,140	134,7	64,6	29,3
9	5,56	0,148	142,5	74,3	35,0
10	6,21	0,159	136,7	66,0	30,5
11	6,79	0,163	134,7	64,6	30,0
12	7,29	0,165	148,3	85,3	35,0
13	7,99	0,186	134,7	66,0	31,5
14	8,62	0,203	138,6	67,4	31,3
15	9,18	0,205	138,6	66,0	30,3
16	9,66	0,206	154,1	90,8	38,0
17	10,46	0,209	138,6	71,5	34,8
18	11,19	0,213	140,5	70,1	32,8
19	11,85	0,215	146,4	82,5	37,8
20	12,44	0,227	148,3	72,9	33,5
21	12,95	0,228	146,4	79,8	35,0
22	13,73	0,229	142,5	71,5	35,0
23	14,44	0,237	146,4	77,0	39,3
24	15,08	0,240	138,6	70,1	34,5
25	15,65	0,241	148,3	79,8	35,5
26	16,14	0,242	138,6	71,5	32,8
27	16,78	0,245	146,4	77,0	37,0
28	17,35	0,247	142,5	75,6	34,8
29	17,84	0,250	154,1	96,3	39,5
30	18,57	0,264	148,3	77,0	36,3
31	19,16	0,273	146,4	85,3	37,5
32	19,67	0,275	156,0	88,0	36,3
VB _{max} = VB		VB _N = 0,699 mm			

TESTE Nº 2 - Material ABNT 1020 original. Grupo A.
V = 265 m/min.

OBS.	TEMPO DE CORTE (min)	DESGASTE VB (mm)	F _s (kgf)	F _v (kgf)	F _r (kgf)
1	0,77	0,122	127,0	55,0	28,0
2	1,47	0,126	130,9	57,8	28,8
3	2,23	0,141	134,7	57,8	29,8
4	2,93	0,146	128,9	59,1	29,8
5	3,75	0,166	134,7	61,9	30,0
6	4,52	0,180	138,6	64,6	32,0
7	5,22	0,182	138,6	63,3	31,8
8	6,03	0,198	138,6	68,8	34,5
9	6,78	0,205	150,2	82,5	38,5
10	7,47	0,210	148,3	82,5	38,5
11	8,31	0,219	146,4	78,4	39,3
12	9,09	0,236	140,5	72,9	36,0
13	9,92	0,242	154,1	88,0	40,8
14	10,69	0,245	144,4	72,9	35,3
15	11,45	0,257	140,5	71,5	36,5
16	12,15	0,266	144,4	74,3	37,3
17	12,77	0,270	158,0	93,5	41,5
18	13,48	0,280	150,2	77,0	38,0
$VB_{max} = VB$		$VB_N = 0,608 \text{ mm}$			

TESTE Nº 3 - Material ABNT 1020 original. Grupo A.
V = 300 m/min.

OBS.	TEMPO DE CORTE (min)	DESGASTE VB (mm)	F _s (kgf)	F _v (kgf)	F _r (kgf)
1	0,79	0,100	128,9	55,0	30,0
2	1,52	0,123	127,0	53,6	28,5
3	2,26	0,135	134,7	57,8	31,3
4	2,99	0,143	134,7	57,8	30,5
5	3,78	0,163	136,7	66,0	34,0
6	4,56	0,168	142,5	70,1	35,8
7	5,36	0,188	150,2	78,4	40,0
8	6,15	0,192	150,2	77,0	38,5
9	6,94	0,208	154,1	83,9	42,3
10	7,67	0,228	165,7	90,8	45,0
11	8,47	0,247	152,2	78,4	40,8
12	9,22	0,261	150,2	77,0	37,8
13	9,91	0,268	163,8	90,8	41,5
14	10,43	0,284	158,0	92,1	41,0
VB _{max} = VB		VB _N = 0,590 mm			

TESTE Nº 4 - Material ABNT 1020 normalizado e recozido. Grupo B.
V = 236 m/min.

OBS.	TEMPO DE CORTE (min)	DESGASTE VB (mm)	F _s (kgf)	F _v (kgf)	F _r (kgf)
1	0,70	0,104	130,9	61,9	30,0
2	1,33	0,120	132,8	63,3	31,3
3	1,89	0,133	130,9	61,9	30,0
4	2,37	0,146	134,7	64,6	29,8
5	3,09	0,167	130,9	63,3	31,0
6	3,75	0,178	142,5	78,4	37,3
7	4,33	0,179	142,5	77,0	35,3
8	4,83	0,182	134,7	68,8	31,0
9	5,45	0,196	136,7	68,8	32,5
10	6,02	0,200	136,7	68,8	32,0
11	6,51	0,208	134,7	67,4	30,0
12	7,20	0,210	138,6	68,8	33,3
13	7,83	0,224	152,2	89,4	39,0
14	8,38	0,225	134,7	66,0	31,0
15	9,19	0,243	148,3	78,4	37,8
16	9,92	0,245	148,3	78,4	36,0
17	10,58	0,262	146,4	83,9	38,0
18	11,16	0,274	142,5	78,4	35,3
19	11,67	0,276	138,6	77,0	35,0
20	12,38	0,302	150,2	83,9	40,5
21	13,01	0,304	144,4	79,8	37,3
22	13,57	0,319	146,4	81,1	37,3
$VB_{max} = VB$		$VB_N = 0,485 \text{ mm}$			

TESTE Nº 5 - Material ABNT 1020 normalizado e recozido. Grupo B.
 $V = 265 \text{ m/min.}$

OBS.	TEMPO DE CORTE (min)	DESGASTE VB (mm)	F _s (kgf)	F _v (kgf)	F _r (kgf)
1	0,84	0,103	125,1	57,8	30,0
2	1,59	0,134	127,0	59,1	29,0
3	2,37	0,147	134,7	66,0	33,3
4	3,08	0,159	132,8	61,9	30,0
5	3,77	0,174	138,6	71,5	33,5
6	4,39	0,201	134,7	66,0	32,0
7	5,14	0,213	132,8	63,3	31,3
8	5,82	0,224	134,7	66,0	31,8
9	6,67	0,235	146,4	79,8	38,5
10	7,46	0,256	150,2	88,0	40,0
11	8,36	0,267	146,4	77,0	38,3
12	9,19	0,293	146,4	77,0	38,0
13	9,95	0,298	150,2	83,9	40,0
14	10,65	0,337	161,8	104,5	48,0
$VB_{\max} = VB$		$VB_N = 0,496 \text{ mm}$			

TESTE N° 6 - Material ABNT 1020 normalizado e recozido. Grupo B.
V = 300 m/min.

OBS.	TEMPO DE CORTE (min)	DESGASTE VB (mm)	F _s (kgf)	F _v (kgf)	F _r (kgf)
1	0,79	0,123	125,1	56,4	28,8
2	1,51	0,139	130,9	61,9	31,5
3	2,31	0,167	132,8	60,5	31,0
4	3,05	0,203	142,5	68,8	35,0
5	3,77	0,214	140,5	68,8	33,8
6	4,43	0,238	140,5	70,1	33,3
7	5,24	0,242	159,9	96,3	44,8
8	5,96	0,282	146,4	74,3	36,3
9	6,77	0,330	167,7	99,0	47,0
$VB_{\max} = 0,619 \text{ mm}$		$VB_N = 0,423 \text{ mm}$			

TESTE Nº 7 - Material ABNT 8620 original. Grupo C.
V = 236 m/min.

OBS.	TEMPO DE CORTE (min)	DESGASTE VB (mm)	Fs (kgf)	Fv (kgf)	Fr (kgf)
1	0,71	0,119	130,9	55,0	27,0
2	1,35	0,130	136,7	59,1	28,5
3	1,92	0,143	136,7	59,1	28,5
4	2,41	0,153	138,6	60,5	28,5
5	3,12	0,165	138,6	61,9	31,0
6	3,76	0,174	140,5	64,6	31,5
7	4,33	0,178	142,5	63,3	30,0
8	4,83	0,182	142,5	64,6	30,5
9	5,60	0,189	148,3	64,6	34,0
10	6,30	0,200	146,4	67,4	33,0
11	6,93	0,211	148,3	68,8	33,5
12	7,49	0,212	148,3	70,1	32,5
13	7,97	0,213	148,3	71,5	31,5
14	8,60	0,217	154,1	78,4	40,0
15	9,16	0,228	150,2	79,8	39,0
16	9,65	0,231	150,2	78,4	37,5
17	10,36	0,243	158,0	79,8	40,0
18	11,00	0,246	156,0	79,8	38,5
19	11,57	0,250	156,0	82,5	38,5
20	12,07	0,260	158,0	83,9	38,5
21	12,78	0,269	156,0	82,5	40,3
22	13,42	0,274	159,9	88,0	40,0
23	14,01	0,275	154,1	82,5	38,3
24	14,51	0,276	161,8	94,9	41,0
25	15,25	0,277	161,8	90,8	42,8
26	15,91	0,290	167,7	99,0	45,0
27	16,50	0,292	163,8	96,3	42,8
28	17,01	0,302	165,7	99,0	44,0

$VB_{max} = 0,339$ mm

$VB_N = 0,456$ mm

TESTE Nº 8 - Material ABNT 8620 original. Grupo C.
V = 265 m/min.

OBS.	TEMPO DE CORTE (min)	DESGASTE VB (mm)	F _s (kgf)	F _v (kgf)	F _r (kgf)
1	0,69	0,144	132,8	53,6	28,5
2	1,31	0,150	132,8	56,4	30,0
3	2,22	0,168	140,5	63,3	33,5
4	3,03	0,192	140,5	63,3	35,0
5	3,80	0,211	144,4	67,4	35,0
6	4,50	0,217	150,2	72,9	36,5
7	5,41	0,225	150,2	72,9	38,0
8	6,25	0,251	156,0	81,1	41,3
9	7,01	0,255	154,1	81,1	39,8
10	7,71	0,263	156,0	83,9	41,8
11	8,63	0,273	158,0	89,4	44,5
12	9,48	0,283	159,9	90,8	42,8
13	10,26	0,290	175,4	107,3	52,3
14	10,98	0,294	175,4	108,6	53,0
15	11,91	0,309	177,3	110,0	54,5
VB _{max} = VB			VB _N = 0,433 mm		

TESTE Nº 9 - Material ABNT 8620 original. Grupo C.
V = 300 m/min.

OBS.	TEMPO DE CORTE (min)	DESGASTE VB (mm)	F _s (kgf)	F _v (kgf)	F _r (kgf)
1	0,79	0,155	134,7	57,8	30,5
2	1,52	0,178	144,4	68,8	36,0
3	2,31	0,209	152,2	75,6	38,0
4	3,04	0,232	156,0	79,8	39,5
5	3,83	0,246	158,0	82,5	39,5
6	4,55	0,264	169,6	93,5	47,5
7	5,34	0,277	154,1	85,3	48,0
8	6,08	0,294	185,1	107,3	56,5
9	6,76	0,301	185,1	105,9	55,0
VB _{max} = 0,375 mm		VB _N = 0,391 mm			

TESTE Nº 10 - Material ABNT 8620 normalizado e recozido. Grupo D.
 $V = 236 \text{ m/min.}$

OBS.	TEMPO DE CORTE (min)	DESGASTE VB (mm)	Fs (kgf)	Fv (kgf)	Fr (kgf)
1	0,66	0,134	127,0	55,0	26,8
2	1,24	0,149	130,9	60,5	28,3
3	1,74	0,151	132,8	61,9	29,0
4	2,45	0,189	134,7	63,3	31,0
5	3,09	0,203	138,6	66,0	33,8
6	3,66	0,208	138,6	68,8	32,0
7	4,15	0,221	136,7	64,6	31,3
8	5,02	0,239	142,5	67,4	32,5
9	5,81	0,259	144,4	77,0	37,8
10	6,53	0,278	144,4	78,4	35,8
11	7,18	0,280	148,3	82,5	37,0
12	7,76	0,282	148,3	83,9	36,8
13	8,27	0,290	150,2	85,3	37,5
14	9,30	0,365	154,1	89,4	41,8
15	10,25	0,426	159,9	97,6	45,0

$VB_{\max} = 0,444 \text{ mm}$	$VB_N = 0,369 \text{ mm}$
--------------------------------	---------------------------

TESTE N° 11 - Material ABNT 8620 normalizado e recozido. Grupo D.
V = 265 m/min.

OBS.	TEMPO DE CORTE (min)	DESGASTE VB (mm)	F _s (kgf)	F _v (kgf)	F _r (kgf)
1	0,72	0,152	130,9	57,8	29,0
2	1,37	0,179	134,7	61,9	29,3
3	2,13	0,238	144,4	70,1	34,0
4	2,82	0,246	146,4	74,3	36,3
5	3,72	0,286	152,2	78,4	37,0
6	4,56	0,370	150,2	79,8	37,8
7	5,34	0,460	167,7	105,9	46,5
VB _{max} = 0,550 mm		VB _N = 0,384 mm			

TESTE N° 12 - Material ABNT 8620 normalizado e recozido. Grupo D.
V = 300 m/min.

OBS.	TEMPO DE CORTE (min)	DESGASTE VB (mm)	F _s (kgf)	F _v (kgf)	F _r (kgf)
1	0,75	0,170	132,8	59,1	30,8
2	1,44	0,301	142,5	72,9	35,5
3	2,22	0,405	156,0	85,3	45,0
4	2,95	0,495	159,9	86,6	44,5
VB _{max} = 0,570 mm		VB _N = 0,292 mm			