

TESE

963

Dissertação de Mestrado

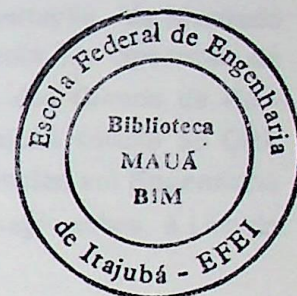
Lincoln Cardoso Brandão



Ministério da Educação e do Desporto
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 – 05 / 01 / 1917

INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO



**A influência da velocidade de avanço no desgaste
de ferramentas em operações de torneamento**

Lincoln Cardoso Brandão

Orientador:

Prof. Dr. Roberval Rymer da Silva Carvalho

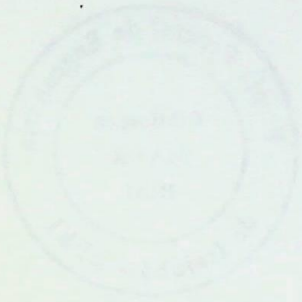
Itajubá - 1997

CLASS. 681.9 (043.2)
CUTER. B817i
TOMBO. 963



ESCOLA POLITÉCNICA DE ENGENHARIA DE TUAZIL
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

A influência da velocidade de avanço no desgaste
de ferramentas em operações de torneamento

Elaborado por

Prof. Dr. Roberto Luiz de Souza Carneiro



Ministério da Educação e do Desporto
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

ANEXO I

PRONUNCIAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

A Banca Examinadora, abaixo assinada, nomeada pela Portaria nº 375 de 26 de dezembro de 1997, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: "A Influência da Velocidade de Avanço no Desgaste da Ferramenta em Operação de Torneamento" apresenta pronunciamento no sentido de que o Coordenador dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) a expedição do título de **Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica**, na **Área de Projeto e Fabricação**, satisfeitas as demais exigências regimentais, à Lincoln Cardoso Brandão.

Itajubá, 29 de dezembro de 1997.

Prof. Olivio Novaski
1º Examinador - UNICAMP

Prof. Durval Uchoas Braga
2º Examinador - FUNREI

Prof. Roberval Rymer da Silva Carvalho
3º Examinador - EFEI - (Orientador)



Ministério da Educação e do Desporto
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

ANEXO II

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Titulo da Dissertação: "A Influência da Velocidade de Avanço no Desgaste da Ferramenta em Operação de Torneamento".

Autor: Lincoln Cardoso Brandão

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
1º	A	
2º	A	
3º	A	ERSC
4º	—	—

Resultado Médio: Conceito A, ou seja, APROVADO

Observações: _____

Itajubá, 29 de dezembro de 1997

Prof. Olívio Novaski

1º Examinador - UNICAMP-SP

Prof. Durval Uchoas Braga

2º Examinador - FUNREI-MG

Prof. Roberval Rymer da Silva Carvalho

3º Examinador - EFEI (Orientador)

Page 1

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia utilizada para a determinação da influência da velocidade de avanço na vida de ferramentas em operações de torneamento para um par ferramenta-peça, tendo como limite de vida para a ferramenta o desgaste de flanco de 0,3 milímetros. Para isso realizou-se ensaios para diferentes velocidades de avanço da ferramenta, observando-se o comportamento do desgaste da ferramenta. Todas as variáveis utilizadas nos ensaios de usinagem foram mantidas constantes para os ciclos de vida das arestas da ferramenta, tendo-se a variação da velocidade de avanço em função do diâmetro da peça. Durante os ensaios foram monitorados os valores de rugosidade superficial e potência consumida pelo motor principal da máquina. Concluiu-se que, a velocidade de avanço teve influência na vida da ferramenta alterando os valores dos comprimentos de corte encontrados nos ensaios.

ABSTRACT

This research work shows a methodology that was used to find the influence of the feed rate in tool's life at turning operations for a pair tool-piece, where the tool's life limits to wear was 0,3 milimeter. Thus experiments were made where the value of feed rate's could be increase slowly, and this way the wear's evolution was watched. Every variables that were used in the test of turning were maintained constant to the edge's tool life cycles, and the speed rate's variation was reached with the reduced slowly diameters of the specimens. During the test the roughness surface and cutting power used for the main machine motor were monitored. It was ended that, the feed rate had influenced in the life of the tool altering the values of the cutting length found in the test.

Dedicatória

A meus pais, minha esposa Fátima e minha filha Mariana dedico este trabalho.

Agradecimentos

A Deus, por me ter concedido concluir mais uma etapa em minha vida.

Ao Prof. Dr. Roberval Rymer da Silva Carvalho, pela amizade e orientação durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. Durval Uchôas Braga pelo incentivo na realização deste trabalho.

Ao Prof. Marcos Aurélio de Souza, pelo apoio, colaboração e orientação durante a realização dos ensaios na fase experimental.

Ao Prof. José M. E. Vicente, pelo empréstimo do sistema de monitoramento monitek 9442.

Aos colegas de Pós-Graduação, pelo apoio em todos os momentos.

Aos professores e funcionários da EFEI, que ajudaram de forma direta ou indireta na realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
DEDICATÓRIA E AGRADECIMENTOS	iii
SUMÁRIO	iv
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
SIMBOLOGIA	xii
Capítulo 1 - INTRODUÇÃO	1
Capítulo 2 - AVARIAS E DESGASTE DE FERRAMENTAS	
2.1 - Introdução	5
2.2 - Avarias das ferramentas de corte	5
2.3 - Desgaste das ferramentas de corte	7
2.3.1 - Desgaste por abrasão	8
2.3.2 - Desgaste por fadiga	8
2.3.3 - Desgaste por difusão	9
2.3.4 - Desgaste por aderência	10
2.3.5 - Desgaste por oxidação	10
2.4 - Principais desgastes das ferramentas de corte	11
2.4.1 - Desgaste da superfície de saída	11
2.4.2 - Desgaste da superfície principal de folga	13
2.5 - Desgaste de ferramentas - fatores de influência	16
2.5.1 - Velocidade de corte	16
2.5.2 - Avanço	17
2.5.3 - Velocidade de avanço	18
Capítulo 3 - CRITÉRIOS DE VIDA DE FERRAMENTAS	21
3.1 - Introdução	21
3.2 - Relação entre vida da ferramenta e temperatura	26
3.3 - Relação entre vida da ferramenta e a rugosidade superficial	26

3.4 - Relação entre vida da ferramenta e a força de corte	27
Capítulo 4 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL	29
4.1 - Material	29
4.2 - Ensaios de dureza e tração	29
4.3 - Ensaios de torneamento	36
4.3.1 - Ensaios com pastilhas TCMT 11 02 04 - S1P sem recobrimento e SPGN 09 03 04 - P30 sem recobrimento	36
4.3.2 - Aquisição dos dados da potência elétrica consumida	39
4.3.3 - Medição dos desgastes de flanco	40
4.3.4 - Medição da rugosidade superficial	42
Capítulo 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5.1 - Variação do comprimento de corte usinado	45
5.2 - Variabilidade da rugosidade superficial	49
5.3 - Monitoramento da potência consumida pelo motor principal da máquina	52
Capítulo 6 - CONCLUSÃO	55
Capítulo 7 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR	61
APÊNDICE A	63
APÊNDICE B	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Características das pastilhas de metal duro	15
Tabela 4.1 - Composição química do material usinado	29
Tabela 4.2 - Medidas de dureza Brinnell, realizadas com esfera de 2,5 mm e carga de 187,5 kp	31
Tabela 4.3 - Variáveis utilizadas nos ensaios com a pastilha TCMT 11 02 04 - S1P	38
Tabela 4.4 - Variáveis utilizadas nos ensaios com a pastilha SPGN 09 03 04 - P30	39
Tabela 5.1 - Resumo dos tempos de corte obtidos durante os ensaios - Pastilha TCMT 11 02 04 – UR	49
Tabela 5.2 - Resumo dos tempos de corte obtidos durante os ensaios - Pastilha SPGN 09 03 04 - P30	49
Tabela B.1 - Resultados obtidos nos cinco ensaios de torneamento com a pastilha TCMT 11 02 04 - UR sem fluido refrigerante	73
Tabela B.2 - Resultados obtidos nos Quatro ensaios de torneamento com a pastilha SPGN 09 03 04 - P30 com fluido refrigerante	74
Tabela B.3 - Quadro de análise de variância 1 ^o Ensaio	75
Tabela B.4 - Quadro de análise de variância 2 ^o Ensaio	76
Tabela B.5 - Quadro de análise de variância 3 ^o Ensaio	76
Tabela B.6 - Quadro de análise de variância 4 ^o Ensaio	77
Tabela B.7- Quadro de análise de variância 5 ^o Ensaio	77
Tabela B.8 - Quadro de análise de variância 1 ^o Ensaio	78
Tabela B.9 - Quadro de análise de variância 2 ^o Ensaio	78
Tabela B.10 - Quadro de análise de variância 3 ^o Ensaio	79
Tabela B.11 - Quadro de análise de variância 4 ^o Ensaio	79
Tabela B.12 - Valores de rugosidade para os ensaios realizados com a pastilha TCMT 11 02 04 - UR sem fluido refrigerante - Ponto A	80
Tabela B.13 - Valores de rugosidade para os ensaios realizados com a pastilha TCMT 11 02 04 - UR sem fluido refrigerante - Ponto B	81

Tabela B.14 - Valores de rugosidade para os ensaios realizados com a pastilha SPGN 09 03 04 - P30 com fluido refrigerante - Ponto A	82
Tabela B.15 - Valores de rugosidade para os ensaios realizados com a pastilha SPGN 09 03 04 - P30 com fluido refrigerante - Ponto B	83
Tabela B.16 – Valores do consumo de potência do do motor principal da máquina para os ensaios realizados com a pastilha TCMT 11 02 04 - UR	84
Tabela B.17 – Valores do consumo de potência do motor principal da máquina para os ensaios realizados com a pastilha SPGN 09 03 04 - P30	85

Índice	16
Figura 2.1 – Influência do avanço sobre o desgaste da superfície de corte	17
Figura 2.2 – Variação da velocidade de corte em função da variação do avanço para um tempo de vida L_{50}	18
Figura 2.3 – Comportamento do ângulo de folga α em função da variação na velocidade de avanço	20
Figura 3.1 – Res. variação em escala logarítmica da curva de vida de ferramentas	22
Figura 3.2 – Representação da curva de vida utilizando duas retas diferentes para fins de análise de ferramenta	23
Figura 3.3 – Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte	25
Figura 3.4 – Correlação entre a força de corte e de avanço e o desgaste do tempo L_{50}	26
Figura 4.1 - Curva longitudinal da amostra com aquecimento (temperatura de 100°C)	31
Figura 4.2 - Curva longitudinal da amostra com aquecimento (temperatura de 100°C)	32
Figura 4.3 - Curva transversal da amostra sem aquecimento (temperatura de 100°C)	33
Figura 4.4 - Curva longitudinal da amostra sem aquecimento (temperatura de 100°C)	33
Figura 4.5 - Vista geral do tempo CNC	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Sulcos transversais desenvolvidos em forma de pentes	6
Figura 2.2 – Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte	7
Figura 2.3 – Componentes do desgaste da ferramenta para o caso de usinagem do aço com ferramenta de metal duro	11
Figura 2.4 – Ocorrência do desgaste de cratera na superfície de saída	12
Figura 2.5 – Ocorrência do desgaste de flanco na superfície de folga	14
Figura 2.6 – Determinação do tempo de corte em função do desgaste de flanco VB	16
Figura 2.7 – Influência do avanço sobre o desgaste da superfície de folga	17
Figura 2.8 – Variação da velocidade de corte em função da variação do avanço para um tempo de vida fixo	18
Figura 2.9 – Comportamento do ângulo de folga α em função da variação da velocidade de avanço	20
Figura 3.1 – Representação em escala logarítmica da curva de vida da ferramenta	22
Figura 3.2 – Representação da curva de vida utilizando dois critérios diferentes para fim de vida da ferramenta	23
Figura 3.3 – Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte	25
Figura 3.4 – Correlação entre a força de corte e de avanço e o desgaste de flanco VB	28
Figura 4.1 - Corte transversal da amostra com ataque químico (ampliação de 100x)	32
Figura 4.2 - Corte longitudinal da amostra com ataque químico (ampliação de 100x)	32
Figura 4.3 – Corte transversal da amostra sem ataque eletrolítico (ampliação de 100x)	33
Figura 4.4 – Corte longitudinal da amostra sem ataque eletrolítico (ampliação de 100x)	33
Figura 4.5 - Vista geral do torno CNC	34

Figura 4.6 - Vista parcial do torno CNC	34
Figura 4.7 – Sistema para aquisição dos dados de potência	35
Figura 4.8 –Projeto de perfil utilizado nos ensaios	35
Figura 4.9 - Corpo de prova cilíndrico utilizado nos ensaios	38
Figura 4.10 – Esquema do equipamento para aquisição dos dados de potência utilizado nos ensaios	40
Figura 4.11 – Gráfico esquemático para uma vida T_i em função de uma velocidade de corte v_c	41
Figura 4.12 – Esquema da variação da curva de desgaste pelo comprimento de corte ou vida da ferramenta	42
Figura 5.1 – Comportamento das curvas de velocidade de avanço utilizadas nos cinco ensaios realizados com a ferramenta TCMT 11 02 04 - UR sem fluido refrigerante	48
Figura 5.2 – Comportamento das curvas de velocidade de avanço utilizadas nos cinco ensaios realizados com a ferramenta SPGN 09 03 04 - P30 com fluido refrigerante	48
Figura 5.3 – Comportamento da rugosidade superficial máxima em relação ao comprimento de corte usinado - Ensaio com ferramenta TCMT 11 02 04 - UR sem fluido refrigerante - Ponto A	50
Figura 5.4 – Comportamento da rugosidade superficial máxima em relação ao comprimento de corte usinado - Ensaio com ferramenta TCMT 11 02 04 - UR sem fluido refrigerante - Ponto B	51
Figura 5.5 – Comportamento da rugosidade superficial máxima em relação ao comprimento de corte usinado - Ensaio com ferramenta SPGN 09 03 04 - P30 com fluido refrigerante - Ponto A	51
Figura 5.6 – Comportamento da rugosidade superficial máxima em relação ao comprimento de corte usinado - Ensaio com ferramenta SPGN 09 03 04 - P30 com fluido refrigerante - Ponto B	52
Figura 5.7 – Consumo da potência do motor principal da máquina em função do comportamento do desgaste de flanco - Ensaio com ferramenta TCMT 11 02 04 - UR sem fluido refrigerante	53

Figura 5.8 – Consumo da potência do motor principal da máquina em função do comportamento do desgaste de flanco - Ensaio com ferramenta SPGN 09 03 04 - P30 com fluido refrigerante	54
Figura A.1 – Resíduos da Regressão linear desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte lc 1 ^o Ensaio	63
Figura A.2 – Resíduos da Regressão linear desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte lc 2 ^o Ensaio	63
Figura A.3 – Resíduos da Regressão linear desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte lc 3 ^o Ensaio	64
Figura A.4 – Resíduos da Regressão linear desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte lc 4 ^o Ensaio	64
Figura A.5 – Resíduos da Regressão linear desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte lc 5 ^o Ensaio	65
Figura A.6 – Resíduos da Regressão linear desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte lc 1 ^o Ensaio	65
Figura A.7 – Resíduos da Regressão linear desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte lc 2 ^o Ensaio	66
Figura A.8 – Resíduos da Regressão linear desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte lc 3 ^o Ensaio	66
Figura A .9 – Resíduos da Regressão linear desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte lc 4 ^o Ensaio	67
Figura A.10 – Ajuste de linha - desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte lc 1 ^o Ensaio	67
Figura A.11 – Ajuste de linha - desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte lc 2 ^o Ensaio	68
Figura A.12 – Ajuste de linha - desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte lc 3 ^o Ensaio	68
Figura A.13 – Ajuste de linha - desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte lc 4 ^o Ensaio	69
Figura A.14 – Ajuste de linha - desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte lc 5 ^o Ensaio	69

Figura A.15 – Ajuste de linha - desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte lc 1 ^o Ensaio	70
Figura A.16 – Ajuste de linha - desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte lc 2 ^o Ensaio	70
Figura A.17 – Ajuste de linha - desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte lc 3 ^o Ensaio	71
Figura A.18 – Ajuste de linha - desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte lc 4 ^o Ensaio	71
Figura A.19 – Comportamento das curvas linearizadas de velocidade de avanço utilizadas nos cinco ensaios realizados com a ferramenta TCMT 11 02 04 - UR sem fluido refrigerante	72
Figura A.20 – Comportamento das curvas linearizadas de velocidade de avanço utilizadas nos cinco ensaios realizados com a ferramenta SPGN 09 03 04 – P30 com fluido refrigerante	72

SIMBOLOGIA

1 - Letras gregas

$\alpha_{1,2}$ = ângulo de folga [°];

$\phi_{1,2}$ = ângulo de recalque do material [°];

σ_{tt} = limite de resistência a ruptura transversal da pastilha [kgf / mm²];

2 - Letras romanas

f = avanço da ferramenta [mm/rot];

ap = profundidade de corte [mm];

I_{A,B,C} = corrente de entrada [A];

KB = dimensão do desgaste de cratera [mm];

KM = distância do centro da cratera até a aresta da ferramenta [mm];

KT = profundidade da cratera [mm];

lf = comprimento útil do corpo de prova [mm];

lc = comprimento de corte [m];

N = rotação do eixo-árvore [RPM];

RA = dureza da pastilha em RockWell A [kgf / mm²];

R_{CH} = resistência ao choque térmico [adm];

R_{KT} = resistência ao desgaste na superfície de saída [adm];

R_{MAX} = rugosidade máxima [μm];

R_{VB} = resistência ao desgaste na superfície de folga [adm];

TC_{1,2,3} = Transformador de corrente

V_{A,B,C} = tensão de entrada da máquina [v];

vf = velocidade de avanço [mm/rot];

- VB = desgaste de flanco [mm];
- VB_B = desgaste médio de flanco [mm];
- VB_{MAX} = valor do desgaste máximo de flanco [mm];
- VB_C = valor do desgaste da ponta da ferramenta [mm];
- VB_N = desgaste de entalhe [mm];
- vc = velocidade de corte [m/min];
- vc_{ef} = velocidade efetiva de corte [m/min];
- z = número de peças [ADM].

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Com o aumento da produção industrial que se faz necessário atualmente para atender a um mercado de consumo que cresce a cada dia e a um público-alvo cada vez mais exigente no que se refere à tecnologia dos novos produtos, onde uma das principais exigências é a qualidade com preços mais acessíveis, fica clara a necessidade das empresas se aperfeiçoarem a cada dia, buscando a absorção de novas tecnologias.

A operação de usinagem representa o mais versátil e o mais comum processo de manufatura e é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos algo em torno de 10 % de toda a produção de metais, empregando dezenas de milhares de pessoas em todo o mundo (*Trent, 1991*).

Praticamente, todo conjunto mecânico é submetido a algum tipo de operação de usinagem em seu estágio inicial, intermediário ou final de manufatura, haja visto que o mesmo proporciona um alto padrão de acabamento, com flexibilidade e qualidade. Peças que são usinadas se originam de produtos provenientes dos mais diversos processos de fabricação, como fundição, conformação, soldagem e etc (*Trent, 1991*).

O processo de usinagem tem ainda a particularidade de permitir que se tenham modelos teóricos simplificados, onde a dispersão dos resultados experimentais apresenta boa aceitabilidade e o número de réplicas dos testes pode ser reduzido de forma satisfatória, buscando sempre quantificar os resultados, avaliando tendências e comparando os resultados obtidos para as variáveis do processo.

Dessa maneira, torna-se cada vez mais importante a implantação de sistemas automatizados de manufatura para o aumento da flexibilidade do setor de produção para pequenos e médios lotes de peças nas áreas de usinagem, onde o resultado esperado pelo setor industrial com essas inovações é

principalmente atender à demanda do consumo com qualidade, aliada a uma redução satisfatória dos custos e tempos diretos e indiretos que envolvem o processo de fabricação por usinagem.

Essa flexibilidade está sendo possível com a implantação de máquinas e ferramentas modernas, tais como Centros de Torneamento e de Usinagem Computadorizados, Células de Manufatura e até mesmo a Manufatura Integrada por Computador (CIM), onde a utilização de recursos humanos se restringe à inspeção e correção de eventuais problemas operacionais, os quais são minimizados pelo uso de sistemas de monitoramento e controle.

À medida que aumenta o uso de sistemas automatizados de usinagem, cresce a necessidade de sistemas de monitoramento de ferramentas que podem detectar desde eventos anormais de usinagem, como ferramentas quebradas ou colisões, até eventos considerados normais, porém indesejáveis, como o desgaste da ferramenta de corte, sendo que a rápida detecção dessas falhas pode minimizar danos materiais assim como reduzir custos e tempo.

Uma constante preocupação no sistema produtivo industrial, principalmente para aqueles que trabalham com a usinagem dos metais, é definir o exato momento de troca da ferramenta de corte. Atenta-se aqui para a adoção de critérios físicos que determinam a vida da ferramenta.

Entretanto, existem trabalhos de pesquisa que visam obter a vida da ferramenta em função de critérios físicos que são considerados variáveis do processo, onde se busca um método estatístico simplificado reduzindo-se o número de experimentos, com conseqüente redução de custos e tempos, além de obter facilmente a interdependência das variáveis envolvidas no processo. Entretanto, os experimentos são desenvolvidos em diversos níveis dessas variáveis, permitindo dessa maneira avaliar indiretamente a vida da ferramenta.

Para obter maior rendimento do processo de produção utilizam-se centros de torneamento com velocidades fixadas na máxima produção, onde, nesse caso o custo da máquina não é significativo. A condição de máximo avanço e profundidade de corte é outra condição para o aumento da produção, que é basicamente função da potência da máquina. Na maioria das situações em usinagem prefere-se a velocidade de corte máxima, pois é ela quem exerce maior

nas escórias
existem outros
o objetivo não é sali
em ensaios

influência no desgaste da ferramenta, entretanto, para a vida da ferramenta essa não é independente do avanço e da profundidade de corte.

defeito

O principal objetivo desse trabalho é realizar ensaios de torneamento, mantendo-se constantes todas as variáveis, como avanço, profundidade de corte e principalmente a velocidade de corte, uma vez que, durante um ciclo automático de desbaste externo com valores fixos dessas variáveis, o diâmetro realmente decresce enquanto a velocidade de avanço aumenta, sendo que essas condições não são levadas em consideração na seleção de ferramentas por catálogos técnicos que fixam apenas a velocidade de corte e o avanço como importantes para a vida da ferramenta.

justif

Assim sendo, com a redução do diâmetro da peça em um ciclo de desbaste, obtém-se a variação da velocidade de avanço pelo aumento da rotação, o que torna a velocidade de avanço um fator que deve ser levado em consideração, pois esse poderá vir a afetar a ocorrência do desgaste da ferramenta.

Porém não afeta

Após a realização dos ensaios, far-se-á uma avaliação da vida da ferramenta em função do comprimento de corte usinado, para as diversas velocidades de avanço, tendo como estratégia de vida da ferramenta um desgaste de flanco de 0,3 milímetros.

Este trabalho se divide em sete capítulos, assim discriminados:

- ⇒ no **CAPÍTULO 1** é feita uma introdução, na qual se pretende demonstrar a importância do monitoramento e do controle do desgaste de ferramentas nos processos de usinagem;
- ⇒ no **CAPÍTULO 2** são apresentados conceitos referentes à perda de capacidade de corte das pastilhas de metal duro, demonstrando os tipos de desgastes e avarias e seus respectivos fatores de influência;
- ⇒ no **CAPÍTULO 3** são apresentados conceitos referentes aos critérios de fim de vida e tipos de monitoramento utilizados;

- ⇒ no *CAPÍTULO 4* são mostrados a metodologia experimental utilizada e a forma como foram conduzidos os ensaios;
- ⇒ no *CAPÍTULO 5* são apresentadas as análises dos resultados dos ensaios realizados;
- ⇒ no *CAPÍTULO 6* são feitas as conclusões do trabalho;
- ⇒ no *CAPÍTULO 7* são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

AVARIAS E DESGASTES DE FERRAMENTAS DE CORTE

2.1 - Introdução

Num processo de usinagem, existem duas causas relevantes para determinar a substituição da ferramenta: as avarias e os desgastes progressivos que ocorrem da ferramenta durante o processo, os quais serão descritos abaixo.

2.2 - Avarias das ferramentas de corte

Podem ser consideradas como avarias, os sulcos distribuídos em forma de pente, as trincas, os lascamentos, as deformações plásticas e a quebra da ferramenta que ocorrem na cunha de corte durante uma determinada operação de usinagem, conforme demonstrado na figura 2.1 (*Ferraresi, 1977 - A*).

Vários fatores podem contribuir para o mecanismo de quebra da ferramenta, como operações de corte interrompido, pequenos ângulos de cunha, paralisação do processo sem a prévia retirada da ferramenta, vibrações durante o processo de usinagem, dentre outros.

Quanto às avarias, pode-se definir sucintamente que:

- a) a deformação plástica da aresta de corte que ocorre em função de altas pressões e altas temperaturas na região de corte e o progressivo desgaste da superfície de folga e/ou saída, muda as características da geometria da ferramenta e essa variação poderá gerar a quebra da mesma;

b) os lascamentos normalmente ocorrem em ferramentas frágeis e com arestas de corte onde o ângulo de cunha tem valores agudizados (Novaski, 1989);

c) as trincas ocorrem principalmente em pastilhas de metal duro pouco tenazes e são causadas por variações bruscas de temperatura e por cargas dinâmicas elevadas (Novaski, 1989).

Além disso, as quebras acontecerão quando as ferramentas já apresentarem desgastes acentuados, variação brusca de temperatura ou a variação de cargas dinâmicas, pois eles poderão funcionar como um concentrador de tensões no local, fragilizando principalmente as ferramentas de metal duro e cerâmica (Braga, 1992).

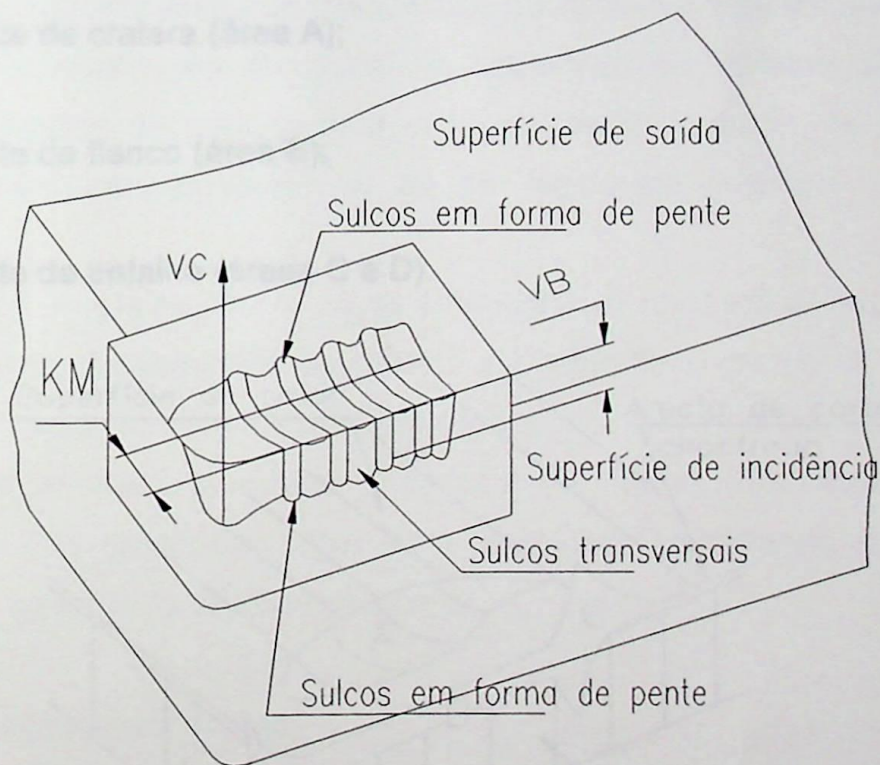


Figura 2.1 - Sulcos transversais desenvolvidos em forma de pentes (Ferraresi, 1977-A).

2.3 - Desgastes das ferramentas de corte.

Podemos considerar que durante a usinagem dos metais, a ação do corte pode mudar a geometria da ferramenta e do cavaco. Existe uma tendência no sentido de que ocorrem variações na força de corte e pode haver também uma variação do comportamento metalúrgico devido ao aquecimento progressivo. O processo de desgaste de uma determinada ferramenta ocorre tanto na região de saída do cavaco como na região de folga da ferramenta, e pode gerar aumento da rugosidade superficial, vibração do sistema e etc (Dearnley et al., 1982).

Pelo menos três formas de desgaste podem ser identificadas na figura 2.2.

1. desgaste de cratera (área A);
2. desgaste de flanco (área B);
3. desgaste de entalhe (áreas C e D).

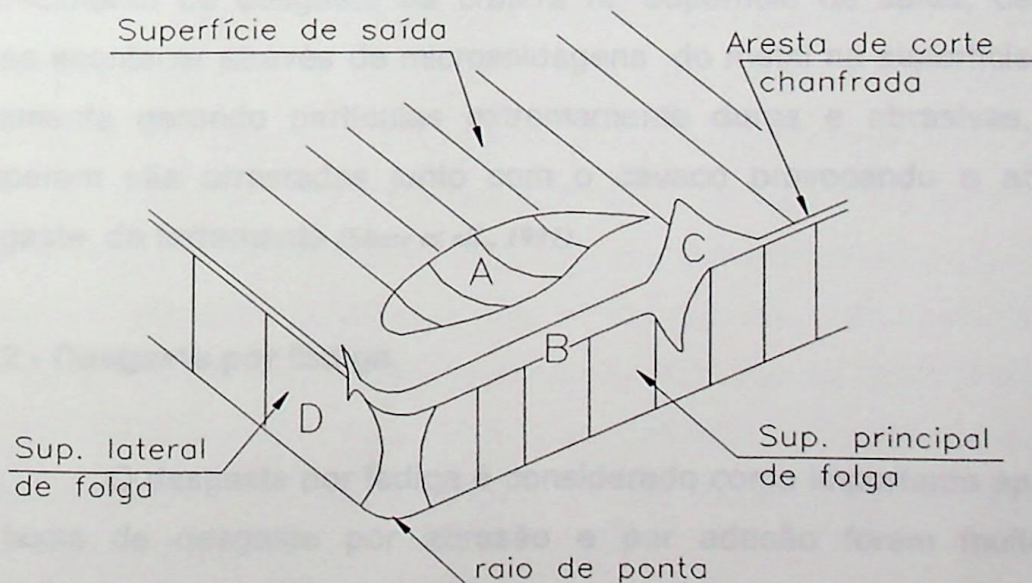


Figura 2.2 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte (Dearnley et al., 1982).

Os desgastes na ferramenta durante o processo de usinagem ocorrem por fatores diversos, tais como a ação química, a abrasão mecânica, a oxidação e o fenômeno de difusão. Esses fatores podem ocorrer simultaneamente ou não, dependendo sobretudo das condições de usinagem.

2.3.1 - Desgaste por abrasão

O mecanismo mais comum de desgaste de ferramentas de usinagem é o desgaste por abrasão, que acontece devido ao atrito entre a superfície gerada na peça e a aresta de corte da ferramenta, ocasionada principalmente pela força normal representada pela força passiva.

Em alguns casos, entretanto, devido a inclusões extremamente duras originadas dos processos de manufatura, de processos de tratamento térmico ou de uma microsoldagem do metal na superfície da ferramenta, a dureza em algumas regiões da peça poderá ser igual ou superior à da ferramenta, e o deslocamento dessas partículas ao se romperem aceleram o desgaste por abrasão

A aresta postiça de corte é também um fator influente para aumentar o aparecimento do desgaste de cratera na superfície de saída, devido ao fato dessa acontecer através de microsoldagens do metal na superfície de saída da ferramenta gerando partículas extremamente duras e abrasivas, que ao se romperem são arrastadas junto com o cavaco provocando a aceleração do desgaste da ferramenta (*Shaw et al., 1991*).

2.3.2 - Desgaste por fadiga

O desgaste por fadiga é considerado como importante apenas quando as taxas de desgaste por abrasão e por adesão forem muito pequenas. Superfícies que são repetidamente submetidas a carregamentos e descarregamentos podem gradualmente falhar por fadiga, principalmente pelo arrancamento das porções da superfície.

Essa situação pode surgir em condições de corte intermitentes, que podem causar a fratura da ponta da ferramenta. A fadiga em subsuperfícies pode ser iniciada com a inclusão de não-metálicos e a quebra por fadiga irá ocorrer normalmente se a tensão do material da ferramenta estiver abaixo de um certo limite de resistência.

Dessa forma, a pressão de contato será determinada pelas propriedades de escoamento do material da peça usinada, assim o desgaste por fadiga irá ocorrer geralmente, a altas velocidades de corte e avanço e podem levar a ferramenta a uma falha catastrófica (*Trent, 1991*).

2.3.3 - Desgaste por difusão

A difusão ocorre principalmente pela elevação da temperatura em decorrência de altas velocidades de corte e da adesão entre os materiais. Como se sabe, é na superfície de saída que o cavaco se compacta, aumentando sua adesão e permanência, o que permite acelerar o desgaste de cratera por difusão. Este fenômeno não é comum em ferramentas de cerâmica devido à presença de elementos como o Al_2O_3 , TiC, TiN, TiCN, e o Nitreto de Boro Cúbico Policristalino e em ferramentas de metal duro que possuam o recobrimento com Al_2O_3 .

Esse mecanismo de desgaste só poderá atuar na superfície de saída devido o atrito do contato ferramenta-peça ser constante nessa região, sendo que a taxa de desgaste se elevará com o aumento da velocidade de corte e do avanço. Se adicionarmos elementos como o Carbeto de Tântalo (TaC), eles irão reduzir o desgaste de cratera por difusão, desde que modifiquem a estrutura dos grãos de Carbeto de Tungstênio (WC) e estes reduzam sua solubilidade na peça (*Trent, 1991 and Shaw., 1991*).

2.3.4 - Desgaste por aderência

Como foi mencionado, pressões de contato existentes entre a face da ferramenta e a parte inferior do cavaco em situação de baixa velocidade de corte provocam o mecanismo de aderência. Nessas condições, quando houver somente uma camada de cavaco ou quando a aresta postiça estiver ocorrendo, o desgaste por aderência irá ocorrer devido aos fragmentos microscópicos que são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto ao fluxo de material adjacente à interface material/peça (*Trent, 1991*).

Dessa forma, o desgaste por aderência é primariamente um mecanismo de desgaste na face da ferramenta e geralmente ocorre a baixas condições de corte quando uma aresta postiça de corte aparecer e o contato com a ferramenta se tornar menos contínuo. Para minimizar o efeito desses tipos de desgastes podem ser usadas ferramentas com revestimento de TiN devido ao seu baixo coeficiente de atrito.

2.3.5 - Desgaste por oxidação

O desgaste por oxidação ocorre devido ao contato da ferramenta com o ar, somado ao fluido refrigerante a altas temperaturas; dessa forma, podemos considerar o desgaste por oxidação como um provável causador do desgaste de entalhe na região da extremidade da região de corte, entre a ferramenta e a seção do cavaco.

O desgaste de uma ferramenta é o resultado da ação dos vários fenômenos citados anteriormente, que podem ser denominados como componentes do desgaste. Dependendo do material da ferramenta, material da peça e das condições de usinagem, prevalece um ou outro dos componentes sobre os demais. Através da figura 2.3 abaixo, pode-se visualizar, de forma qualitativa, a ação dos diferentes componentes em função da temperatura de corte.

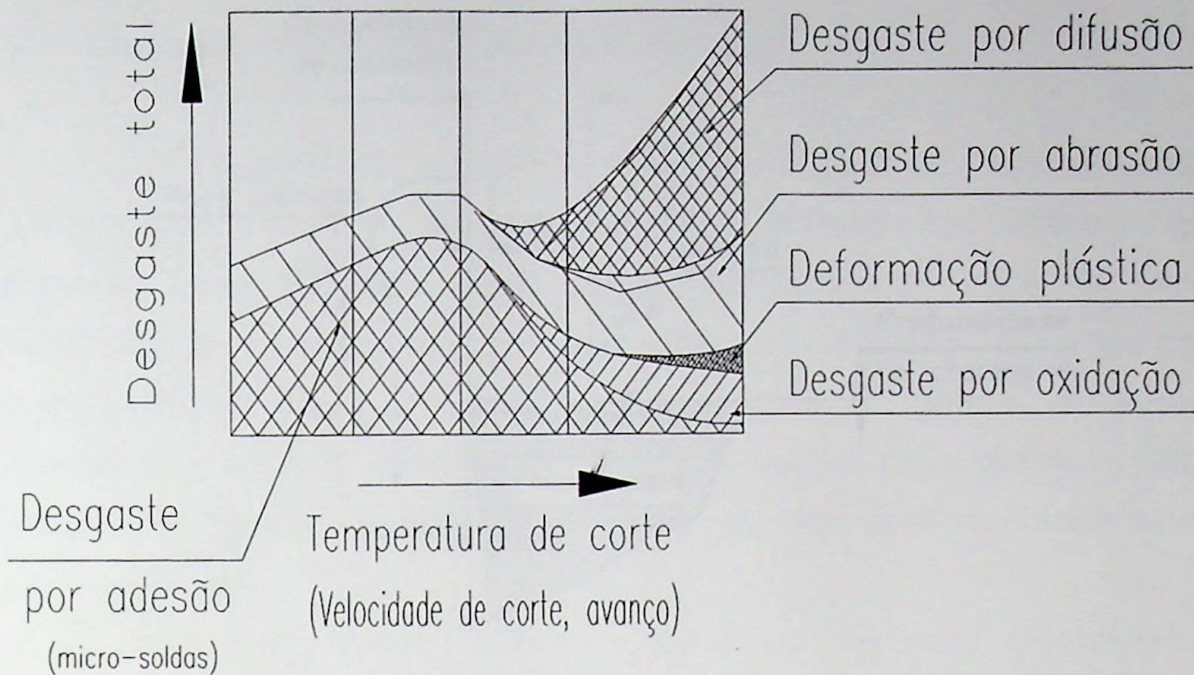


Figura 2.3 - Componentes do desgaste da ferramenta para o caso de usinagem do aço com ferramenta de metal duro (Ferraresi, 1987, - B).

2.4 - Principais desgastes das ferramentas de corte.

2.4.1 - Desgaste da superfície de saída.

Um dos principais fenômenos que influenciam no desgaste de cratera é o fenômeno da difusão, influenciado pela pressão, temperatura e aderência, ocorrendo a perda de massa da ferramenta pela migração dos átomos de Carbono da ferramenta para a peça (Lee, Young-Son, 1971). A figura 2.4 apresenta um esquema básico do comportamento do cavaco sobre a superfície de saída.

2.4.2 - Desgaste da superfície principal de folga

O desgaste da superfície de folga ou desgaste de flanco corresponde a um volume de material removido durante o processo de usinagem, que é medido no plano ortogonal, tendo como nomenclatura o índice VB, causado basicamente pela existência de uma ação abrasiva na região de contato entre o flanco da ferramenta e a superfície que está sendo gerada na usinagem, ocasionando uma ação abrasiva originada por reações físico-químicas (difusão, formação de ligas e oxidação) que podem ou não ocorrer simultaneamente (*Dearnley et al., 1982*).

Entretanto, desses fatores os que podem ser mais considerados na abrasão são as reações físico-químicas como mecanismo de desgaste. A abrasão porém, ocorre devido ao elevado atrito na interface ferramenta-peça, causando a remoção de micropartículas da ferramenta, esse atrito constante eleva também a temperatura, o que pode favorecer o mecanismo da difusão (*Dan, Li and Mathew, 1990*).

O desgaste de flanco ou desgaste da superfície de folga é considerado um bom parâmetro para definir o exato momento de troca da ferramenta e, na maioria das vezes, é o mais indicado, devido à facilidade que se tem para levantar seus valores durante a usinagem sem que se tenha maiores dificuldades para a remoção da ferramenta, ou até mesmo a medição deste sem a remoção da ferramenta do local de fixação

A figura 2.5 apresenta geometricamente como ocorre o desgaste de flanco, sendo seu valor medido no plano ortogonal da ferramenta.

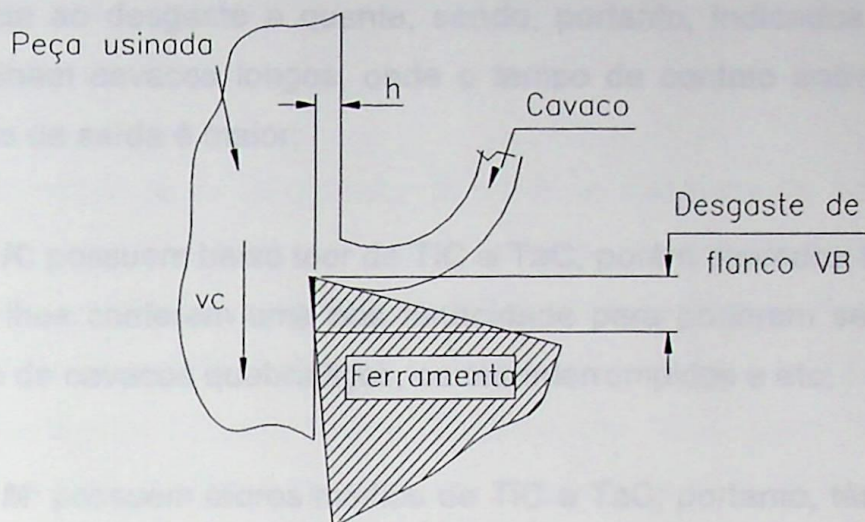


Figura 2.5 - Ocorrência do desgaste de flanco na superfície de folga (Cook, 1973).

Existem relações empíricas para o cálculo da resistência ao desgaste da superfície de folga, ao desgaste de cratera, e resistência ao choque térmico. Entretanto, não vamos fazer aqui a apresentação dessas demonstrações, elas neste momento, estão fora dos objetivos deste trabalho. Apresentamos todavia, de forma resumida o resultado desses cálculos pela tabela 2.1.

Os valores indicados nessa tabela servem para orientar o usuário na escolha da pastilha adequada para cada caso específico de usinagem, mostrando que as características das pastilhas de metal duro e os valores de R_{VB} , R_{KT} e R_{CH} são adimensionais, sendo utilizados somente para comparação entre si.

Dessa forma, pode-se observar que para o aumento dos valores dos desgastes de cratera R_{KT} e de flanco R_{VB} os valores da resistência ao choque térmico R_{CH} são inversamente proporcional.

Apresentamos abaixo um resumo das características básicas dos três grupos principais para pastilhas de metal duro (Novaski, 1989).

- * **GRUPO P:** possuem elevado teor de TiC e TaC, que lhes conferem uma boa resistência ao desgaste a quente, sendo, portanto, indicados para materiais que originam cavacos longos, onde o tempo de contato entre o cavaco e a superfície de saída é maior;
- * **GRUPO K:** possuem baixo teor de TiC e TaC, porém elevados teores de WC e Co, que lhes conferem uma boa tenacidade para poderem ser utilizados em materiais de cavacos quebradiços, cortes interrompidos e etc;
- * **GRUPO M:** possuem teores médios de TiC e TaC; portanto, têm propriedades intermediárias entre os metais duros dos grupos P e K, sendo normalmente utilizados para ligas de aço inox e ligas especiais.

Tabela 2.1 - Características das pastilhas de metal duro (Novaski,1989).

CLASSE	WC %	TiC %	TaC %	σ_{tt} kgf/mm ²	R _A kgf/mm ²	R _{VB}	R _{CH}	R _{KT}
P01	10,0	65,0	5,0	90	91,4	5,2	0,71	7,3
P10	62,0	16,0	14,0	140	90,4	3,8	2,68	3,4
P20	73,0	10,0	7,5	170	89,8	3,1	3,80	2,4
P30	75,0	8,0	8,0	180	89,4	2,7	4,10	2,2
P40	78,0	5,5	5,0	200	89,0	2,4	4,80	1,7
P50	79,5	2,5	4,0	230	88,4	1,9	5,90	1,1
M10	83,0	7,0	4,0	140	90,6	4,0	2,68	1,8
M20	82,0	5,0	6,0	175	90,2	3,5	3,90	1,7
M30	84,0	3,0	3,0	200	89,2	2,5	4,80	1,1
M40	82,5	0,5	3,0	240	88,4	1,9	6,30	0,6
K01	95,5	-	1,0	145	91,4	5,2	2,98	-
K10	93,0	-	1,0	170	90,6	4,0	3,80	-
K20	93,0	-	1,0	190	90,0	3,3	4,40	-
K30	92,5	-	-	210	89,2	2,5	5,20	-
K40	87,2	-	0,8	250	88,4	1,9	6,70	-

2.5 - Desgaste de ferramentas - fatores de influência.

2.5.1 - Velocidade de corte.

A influência da velocidade de corte no desgaste de ferramentas pode ser observada quando plotamos várias curvas de velocidade em um mesmo gráfico, sendo envolvidas as variáveis vida de ferramenta pelo desgaste de flanco e mantendo-se constante o avanço e a profundidade de corte para um mesmo par ferramenta-peça. Dessa forma, fixamos um valor para a dimensão do desgaste de flanco conforme apresentado nos pontos a, b, c e d. (Ferraresi, D. 1977-A-).

Dessa forma, pode-se deduzir que o desgaste cresce mais rapidamente acompanhando o crescimento da velocidade de corte. No caso da figura 2.6, tem-se a velocidade de corte aumentando no sentido da velocidade de corte $Vc1$ para a velocidade de corte $Vc4$ (direita para a esquerda); além disso, quando aumentamos muito o valor da velocidade de corte, podemos observar a alteração do comportamento do desgaste de flanco, onde às vezes se poderá notar o aparecimento de entalhes na região desgastada da ferramenta (Ferraresi, D. 1977-A-).

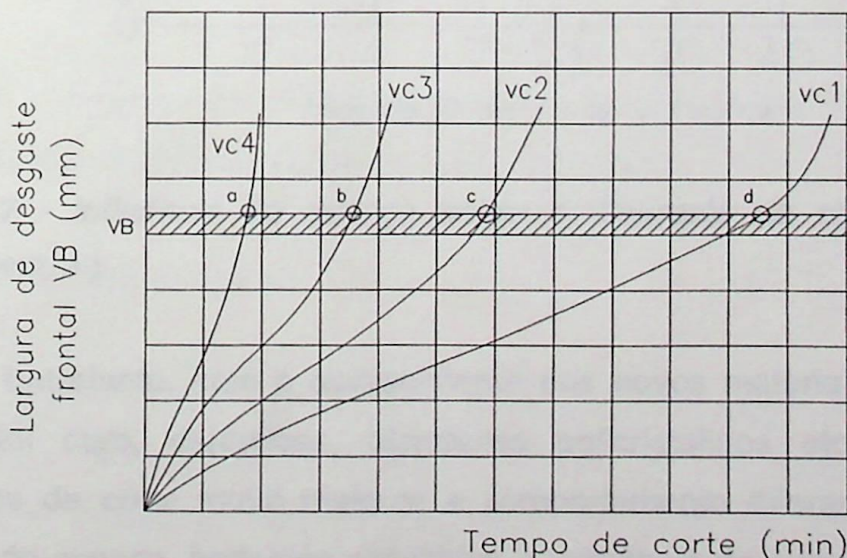


Figura 2.6 - Determinação do tempo de corte em função do desgaste de flanco VB (Ferraresi, 1977-A-).

2.5.2 - Avanço

Podemos observar na figura, que com o aumento do avanço, os valores máximos e mínimos do desgaste se deslocam para velocidades de corte mais baixas; além disso, os valores de desgaste crescem para maiores valores de avanço, pois esses, provocam uma remoção mais rápida do material evitando o aparecimento da aresta postiça de corte (Ferraresi, 1977- A-).

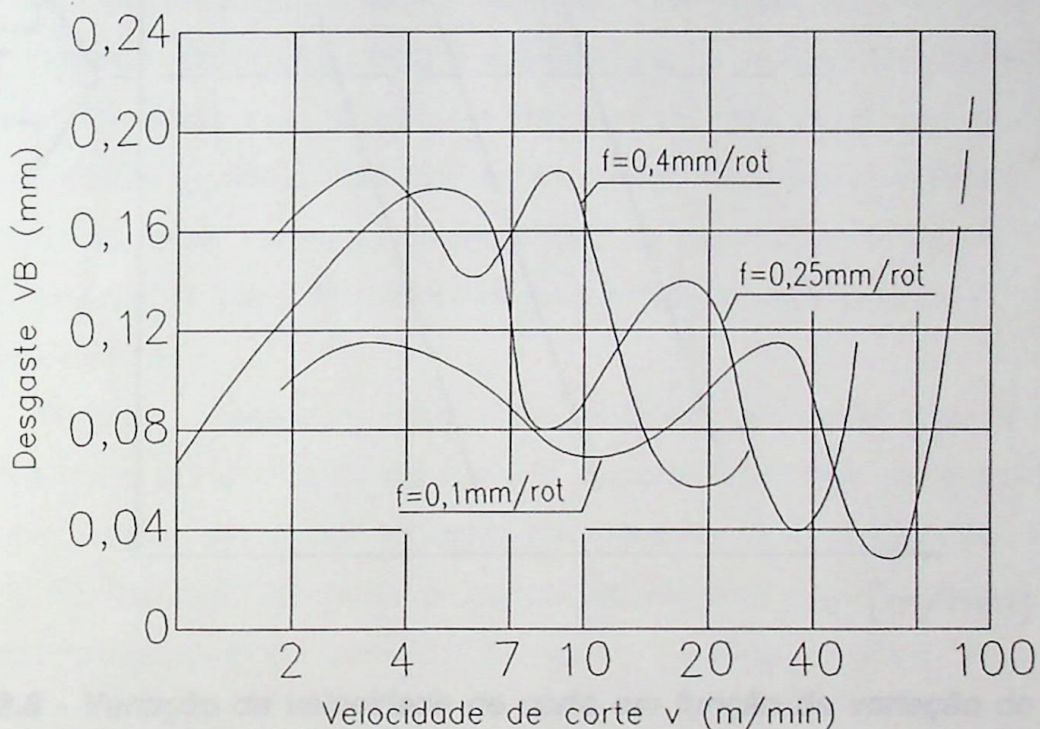


Figura 2.7 - Influência do avanço sobre o desgaste da superfície de folga (Ferraresi, 1977,-A-).

Entretanto, com o aparecimento dos novos materiais de engenharia, como metal duro, cerâmicas, diamantes policristalinos etc., que oferecem velocidades de corte muito maiores e comportamento diferente em relação à influência do avanço, podemos simplificar a influência do avanço da ferramenta, conforme apresentado no gráfico da figura 2.8.

Observa-se que quando fixamos um tempo de vida T e plotamos curvas de avanço em função da velocidade de corte, sendo $f_1 > f_2 > f_3$, pode-se notar que a velocidade de corte decresce à medida que os valores de avanço aumentam. Dessa forma, podemos afirmar que, se variarmos o valor do avanço da ferramenta para maiores valores e fixarmos a velocidade de corte, teremos um aumento significativo na vida T da ferramenta.

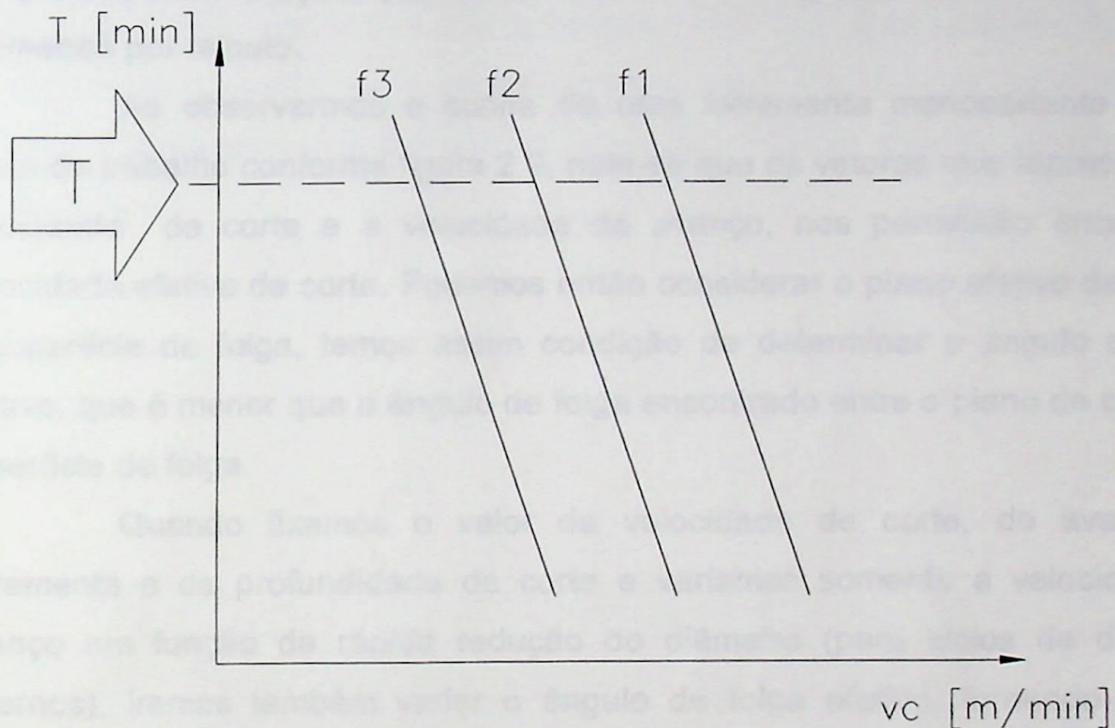


Figura 2.8 - Variação da velocidade de corte em função da variação do avanço para um tempo de vida fixo folga (Ferraresi, 1977-A-).

2.5.3 - Velocidade de avanço

As curvas de vida de ferramentas citadas anteriormente levam em consideração velocidades de corte em função de um desgaste previamente estabelecido. Entretanto, quando se tem um ciclo de desbastes externos sucessivos de diâmetros em uma determinada peça, existe uma variação progressiva da rotação do eixo-árvore, devido ao fato da velocidade ser mantida constante e, em função disso, teremos uma variação também da velocidade de

avanço, que é diretamente proporcional à rotação do eixo árvore da máquina, conforme a equação 2.2.

$$vf = f \cdot N \quad [\text{mm} / \text{min}], \quad (2.2)$$

onde: f é o avanço da ferramenta dado em milímetros por rotação, N é o valor da rotação dado em rotações por minuto e vf é o valor da velocidade de avanço em milímetros por minuto.

Ao observarmos a cunha de uma ferramenta monocortante no seu plano de trabalho conforme figura 2.9, nota-se que os vetores que representam a velocidade de corte e a velocidade de avanço, nos permitirão encontrar a velocidade efetiva de corte. Podemos então considerar o plano efetivo de corte e a superfície de folga, temos assim condição de determinar o ângulo de folga efetivo, que é menor que o ângulo de folga encontrado entre o plano de corte e a superfície de folga.

Quando fixamos o valor da velocidade de corte, do avanço da ferramenta e da profundidade de corte e variamos somente a velocidade de avanço em função da rápida redução do diâmetro (para ciclos de desbaste externos), iremos também variar o ângulo de folga efetivo, tornando-o ainda menor, conforme podemos observar a relação geométrica entre "A" e "B" da figura 2.9.

Podemos ainda observar que, de acordo com a figura 2.9, como a velocidade de corte e a velocidade de avanço são perpendiculares, a tangente de η será obtida pelo modelo matemático da equação 2.3. Podemos, então concluir que, se aumentarmos a velocidade de avanço, o valor de η irá aumentar, alterando então o ângulo de folga efetivo.

$$\text{tg} \eta = \frac{\text{sen} \varphi}{\text{cos} \varphi + \frac{vc}{vf}} \quad (2.3)$$

onde: η é o ângulo entre a velocidade de corte e a velocidade efetiva de corte e φ o ângulo entre a velocidade efetiva de corte e a velocidade de avanço em graus, vc é a velocidade de corte em metros por minuto e vf a velocidade de avanço em milímetros por minuto.

Assim sendo, com a conseqüente redução do ângulo efetivo de folga, o desgaste na superfície de folga poderá ter uma tendência a aumentar, porque a área de atrito entre a ferramenta e a peça será também maior. Por esse motivo se torna importante um estudo do comportamento do desgaste de flanco da ferramenta em função da variação da velocidade de avanço, haja visto que nenhum outro parâmetro de corte foi alterado, como é comum observar-se na literatura atual.

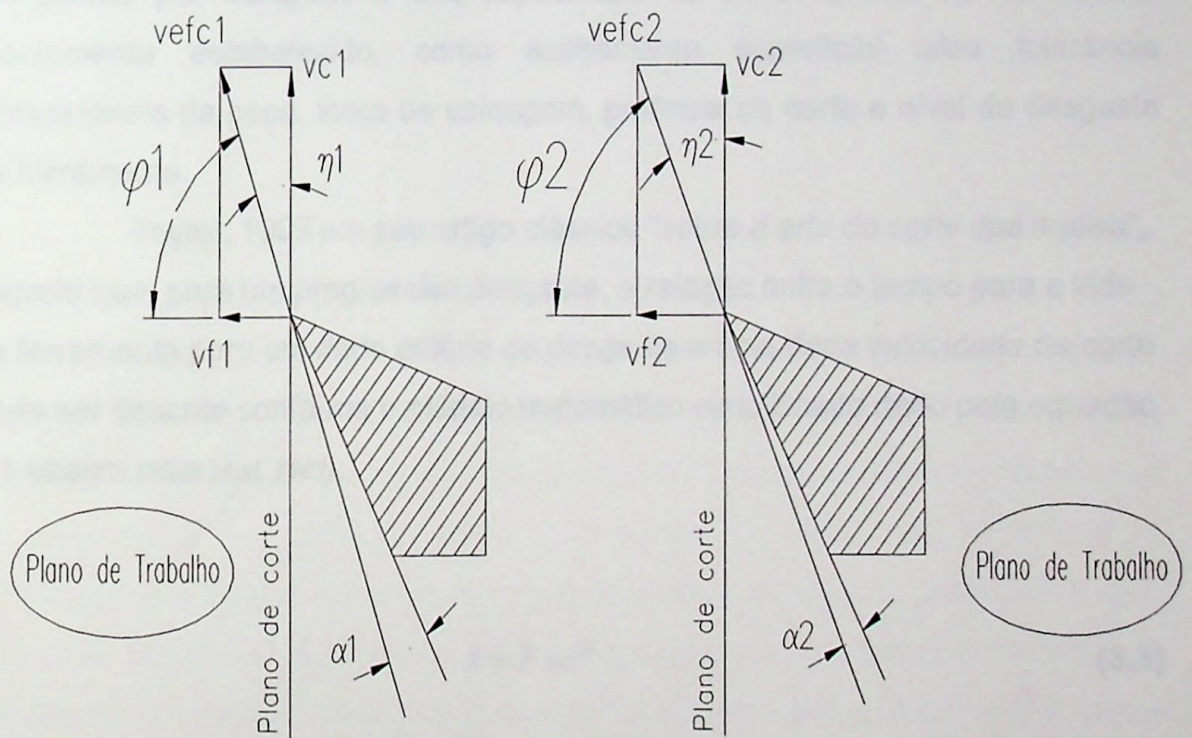


Figura 2.9 - Comportamento do ângulo de folga α em função da variação da velocidade de avanço.

Capítulo 3

CRITÉRIOS DE VIDA DE FERRAMENTAS

3.1 - Introdução

Como foi definido por *Ferraresi (1971)*; *Carvalho (1991)* e *Shaw (1991)*, vida de ferramenta é o tempo durante o qual uma determinada ferramenta trabalha efetivamente entre duas afiações sucessivas (deduzindo-se os tempos passivos), até perder por completo a sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido, como acabamento superficial e/ou tolerância dimensionais da peça, força de usinagem, potência de corte e nível de desgaste da ferramenta.

Taylor, 1907 em seu artigo clássico "sobre a arte do corte dos metais", sugeriu que, para um progressivo desgaste, a relação entre o tempo para a vida da ferramenta para um dado critério de desgaste e uma dada velocidade de corte pode ser descrito conforme o modelo matemático simplificado dado pela equação 3.1 abaixo (*Mills et al, 1983*).

$$k = T.vc^x \quad (3.1)$$

onde: vc é a velocidade de corte em metros por minuto, T é o tempo de vida da ferramenta em minutos, x é o coeficiente angular da reta e k a vida da ferramenta para uma velocidade de corte de 1 metro por minuto. A figura 3.1 apresenta o comportamento dessa curva.



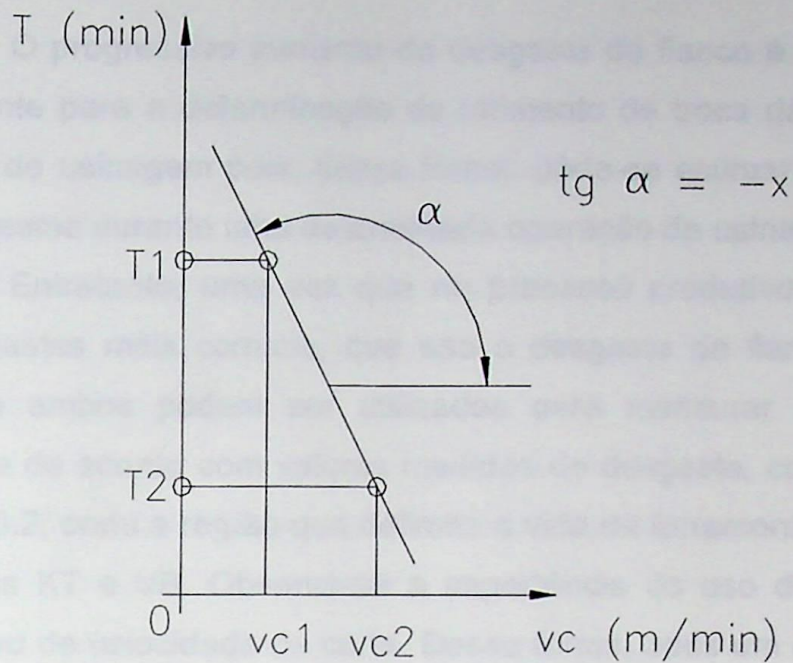


Figura 3.1 - Representação em escala logarítmica da curva de vida da ferramenta (Ferraresi, 1977-A)..

Essa relação básica foi testada e repetida para uma longa série de ferramentas, materiais para a usinagem em diferentes condições de corte, sendo que para condições de corte muito altas ou muito baixas, o critério de desgaste não tem sido totalmente válido pois, para baixos valores de velocidades de corte tem-se o aparecimento da aresta postiça de corte e já para valores mais elevados de velocidade de corte tem-se predominância de desgaste de cratera e deformações plásticas sem que se possa considerar o desgaste progressivo (Mills et al, 1983). Essa equação foi mais tarde expandida para uma forma mais geral, de acordo com o modelo matemático abaixo, passando, então, a ser considerada como modelo expandido de Taylor, conforme demonstrado na equação 3.2.

$$T = \frac{C_2}{vc^p \cdot f^q \cdot ap^r} \quad (3.2)$$

onde \$vc\$ é a velocidade de corte em metros por minuto, \$f\$ é o avanço da ferramenta em milímetros por rotação, \$ap\$ a profundidade de corte em milímetros, e \$p\$, \$q\$, \$r\$ e \$C_2\$ são constantes para a combinação de cada par ferramenta-peça.

O progressivo aumento do desgaste de flanco é bastante significativo e importante para a determinação do momento de troca da ferramenta em uma operação de usinagem pois, dessa forma, pôde-se estimar com maior clareza a vida da mesma durante uma determinada operação de usinagem.

Entretanto, uma vez que no processo produtivo podem aparecer os dois desgastes mais comuns, que são o desgaste de flanco e o desgaste de cratera, e ambos podem ser utilizados para mensurar o valor da vida da ferramenta de acordo com valores medidos de desgaste, conforme demonstrado na figura 3.2, onde a região que delimita a vida da ferramenta se encontra abaixo das curvas KT e VB. Observa-se a importância do uso de KT após um valor significativo de velocidade de corte. Dessa forma, após um determinado valor de velocidade de corte têm-se predominância do desgaste de cratera, dessa forma, a melhor condição será considerar o valor KT como delimitador da vida da ferramenta. Entretanto, quando consideramos o valor de desgaste VB podemos utilizar de uma faixa de velocidades de corte muito mais abrangente (Braga, 1992).

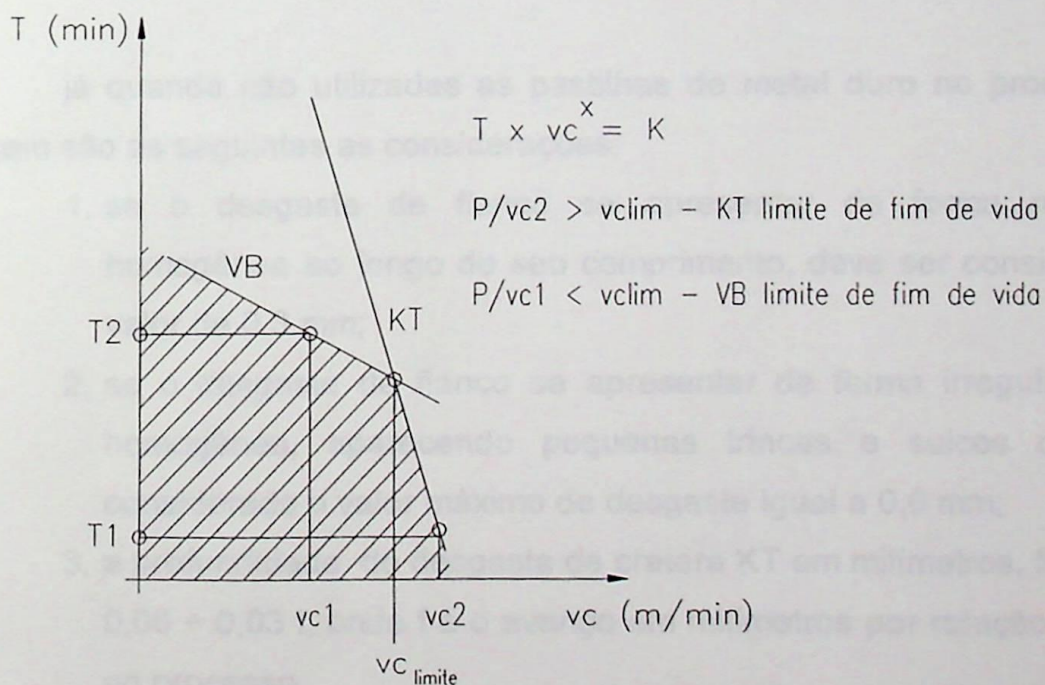


Figura 3.2 - Representação da curva de vida utilizando dois critérios diferentes para fim de vida da ferramenta (Braga, 1992).

Como foi citado no capítulo 2, em todos os ensaios de usinagem o desgaste de flanco é considerado um bom parâmetro para caracterizar a vida de ferramentas, devido à facilidade que se pode ter para retirar os valores de desgastes encontrados, tanto em medições de laboratórios como em ensaios realizados em ambientes industriais. A norma (ISO 3685) recomenda alguns valores de dimensões para o desgaste de flanco e para o desgaste de cratera, conforme descrito a seguir:

Para aços rápidos, são usados três critérios de vida de ferramentas:

1. queima da ferramenta;
2. se o desgaste de flanco se apresentar de forma regular e homogênea ao longo do seu comprimento, deve ser considerado o valor de 0,3 mm;
3. se o desgaste de flanco se apresentar de forma irregular e não homogênea, aparecendo pequenas trincas e sulcos, deve ser considerado o valor máximo de desgaste igual a 0,6 mm.

já quando são utilizadas as pastilhas de metal duro no processo de usinagem são as seguintes as considerações:

1. se o desgaste de flanco se apresentar de forma regular e homogênea ao longo do seu comprimento, deve ser considerado o valor de 0,3 mm;
2. se o desgaste de flanco se apresentar de forma irregular e não homogênea, aparecendo pequenas trincas e sulcos deve ser considerado o valor máximo de desgaste igual a 0,6 mm;
3. a profundidade do desgaste de cratera KT em milímetros, for igual a $0,06 + 0,03 f$, onde f é o avanço em milímetros por rotação utilizado no processo.

Para as ferramentas de cerâmicas, as considerações para a vida de ferramentas são as mesmas considerações feitas para o aço rápido (Mills et al, 1983)

Com o propósito de medir o desgaste de flanco e de cratera, o comprimento da aresta de corte é dividido em três zonas, conforme apresentado na figura 3.3 abaixo.

Zona A - é a quarta parte do comprimento de corte desgastado b , mais afastada da ponta da ferramenta;

Zona B - é a parte restante da aresta de corte entre a zona C e a zona A;

Zona C - é a parte curva na região do raio de ponta da ferramenta.

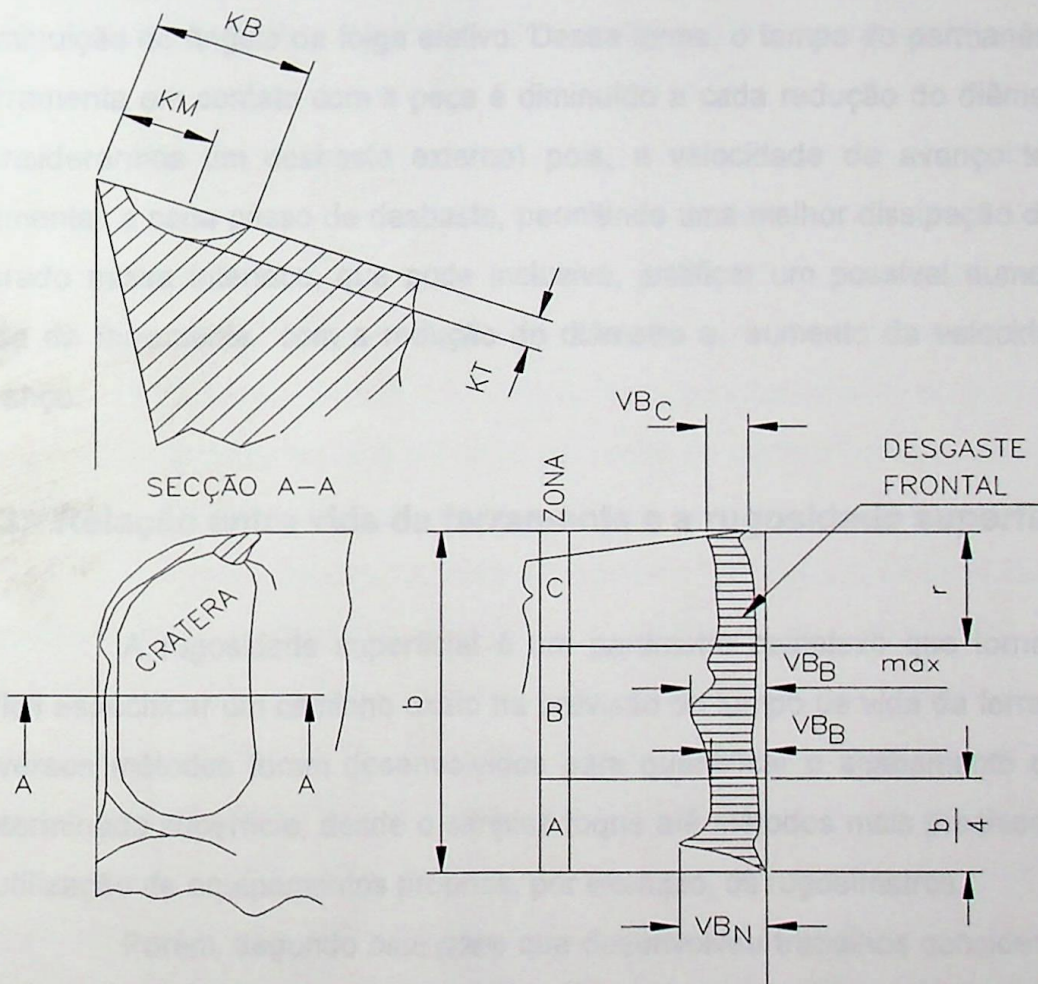


Figura 3.3 - Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte (ISO, 3685).

3.2 - Relação entre vida da ferramenta e temperatura

A temperatura que ocorre na região de contato entre a ferramenta e a peça pode ser medida em uma variedade de métodos, mas o método mais comum utilizado para a realização dessa medição é a colocação de um termopar próximo e/ou inserido dentro da ferramenta através de entalhes previamente realizados (Cook, 1966).

Podemos considerar que, à medida que a velocidade de avanço aumenta em função da redução do diâmetro e mantem-se todas as outras variáveis constantes (avanço, profundidade e velocidade de corte), a temperatura poderá ou não se elevar, mas com variações muito pequenas, devido à diminuição do ângulo de folga efetivo. Dessa forma, o tempo de permanência da ferramenta em contato com a peça é diminuído a cada redução do diâmetro (se considerarmos um desbaste externo) pois, a velocidade de avanço tende a aumentar a cada passo de desbaste, permitindo uma melhor dissipação do calor gerado nessa interface, que pode inclusive, justificar um possível aumento da vida da ferramenta com a redução do diâmetro e aumento da velocidade de avanço.

3.3 - Relação entre vida da ferramenta e a rugosidade superficial

A rugosidade superficial é um parâmetro complexo que torna muito difícil especificar um caminho exato na previsão do tempo de vida da ferramenta. Diversos métodos foram desenvolvidos para quantificar o acabamento de uma determinada superfície, desde o simples toque até métodos mais precisos, como a utilização de equipamentos próprios, por exemplo, os rugosímetros.

Porém, segundo *Diniz (1989)* que desenvolveu trabalhos considerando a rugosidade superficial como critério de vida de ferramentas, o modelo linear que demonstra o comprimento de corte pela rugosidade superficial representa o fenômeno qualitativamente e não quantitativamente.

Dentro do intervalo de velocidades de corte que foram trabalhadas por esse autor não se pode dizer que existe uma correlação direta entre velocidade

de corte e rugosidade superficial, o mesmo ocorrendo com o desgaste de flanco VB que também não apresentou correlação com a rugosidade superficial.

Entretanto, conforme citado anteriormente, com a diminuição do diâmetro, a velocidade de avanço irá aumentar, isso poderá elevar o atrito gerado no contato ferramenta/peça e poderá mudar o comportamento do desgaste para sistemas que não possuam uma rigidez confiável. Assim sendo, como o avanço nesse caso é um parâmetro fixo, a variação da rugosidade superficial poderá ser alterada por desgastes que irão ocorrer no raio de ponta da ferramenta mudando o comportamento do acabamento, não significando que poderá se fazer uma previsão que a rugosidade superficial irá aumentar ou diminuir.

3.4 - Relação entre vida da ferramenta e esforços de corte

O método em que se utiliza a força de corte é considerado um método indireto de medição do desgaste e quebra da ferramenta, onde se tenta correlacionar as componentes de usinagem com o desgaste na superfície de folga da ferramenta. Essa correlação permite que o processo de usinagem possa ser monitorado em tempo real, sem interferência ou interrupções do processo de usinagem, evitando possíveis falhas no processo ou mesmo fornecendo sinais de entrada para utilização do controle adaptativo (*Braga, 1992*).

Em operações de torneamento pode-se verificar um alto coeficiente de correlação entre o desgaste de flanco e as forças de avanço (P_f) e força tangencial (P_c). No gráfico apresentado na figura 3.4 podemos observar melhor essa relação, onde a força de avanço tem um gradiente maior de crescimento para um mesmo intervalo de desgaste, quando comparada com a força de corte.

Isso ocorre, pois, observa-se que em alguns ensaios de torneamento esses apresentam-se com valores interessantes de crescimento de forças de avanço muito mais significantes do que as forças tangenciais de corte, principalmente na usinagem de aços endurecidos e materiais compósitos os quais se caracterizam sem uma estratégia bem definida de parada do processo, considerando um limite para a vida da ferramenta.

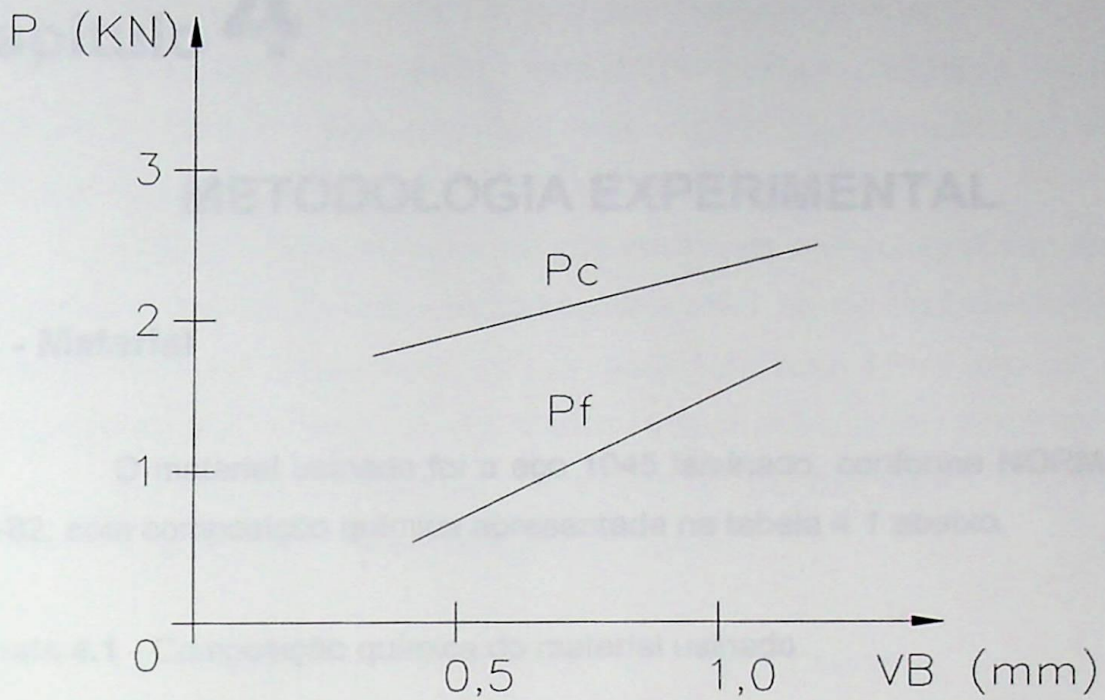


Figura 3.4 - Correla o entre a força de corte e de avanço e o desgaste de flanco VB (Braga, 1992).

Capítulo 4

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.1 - Material

O material usinado foi o aço 1045 laminado, conforme NORMA ABNT NB-82, com composição química apresentada na tabela 4.1 abaixo.

Tabela 4.1 - Composição química do material usinado.

Porcentagem em peso						
C	Mn	P _{MÁX}	S _{MAX}	Si	Cr	Nb
0,46	0,77	0,027	0,014	0,20	0,019	0,003

Todos os corpos de prova foram obtidos de uma mesma corrida de laminação, de acordo com o certificado de qualidade do fornecedor.

4.2 - Ensaio de dureza e tração

A tabela 4.2 mostra os valores das medidas de dureza realizadas em 16 amostras retiradas em distâncias equidistantes ao longo do comprimento da barra. Verifica-se nesta tabela uma boa homogeneidade dos valores de dureza pois, como se pode observar, o coeficiente de variação encontrado no tratamento estatístico dos dados encontra-se dentro de um valor muito próximo quando arredondamos para valores com duas casas decimais.

Os valores de dureza encontrados demonstram que o material trabalhado era um aço ABNT 1045 e, apresentava-se em estado recozido, o que provocou uma diminuição da sua dureza tanto na sua parte superficial como

também na sua parte mais próxima ao centro, proporcionando um grande número de corpos de prova para ocorrer um pequeno desgaste de flanco

A medição da dureza foi realizada em diversos pontos do raio do corpo de prova, sendo que o ponto P5 representa o ponto mais central e o ponto P1 o mais afastado do centro do corpo de prova.

Foram realizadas cinco leituras para cada raio da amostra, sendo que o corpo de prova foi dividido em quatro quadrantes no sentido transversal. Logo em seguida, foram retirados os valores médios de cada ponto do raio; no final, foram realizados 20 ensaios de dureza em cada amostra (*ABNT, NBR 6394*).

Os valores de resistência à tração do material foram fornecidos pelo fabricante e os resultados estão mostrados abaixo.

Limite de escoamento a 0,2 %	→	347,71 N/mm
Limite de resistência	→	612,35 N/mm
Alongamento	→	20%
Estricção	→	40,2%

As figuras de 4.1 a 4.4 mostram os resultados das micrografias de amostras retiradas no sentido longitudinal e transversal dos corpos de prova que foram submetidos aos ensaios de Dureza Brinell. Essas amostras apresentam micro-inclusões do tipo sulfureto (figuras 4.3 e 4.4), série fina e com espessura de 4 μm ; já nas figuras 4.1 e 4.2 observamos uma constituição de perlita mais ferrita, com tamanho de grão ferrítico, conforme mostrado abaixo:

* Corte transversal	→	6 a 8 ASTM.
* Corte longitudinal	→	6 a 8 ASTM.

Esses tamanhos de grãos estão dentro dos valores considerados padrão pelas empresas que trabalham com esse tipo de aço na produção de peças para os mais diversos tipos de componentes mecânicos.

Tabela 4.2 - Medidas de dureza Brinnell, realizadas com esfera de 2,5 mm e carga de 187,5 kp.

Amostra	P1	P2	P3	P4	P5
1	174	174	174	169	167
2	170	170	170	195	170
3	164	170	170	167	167
4	174	170	167	191	167
5	195	187	184	184	180
6	184	184	184	180	184
7	198	191	191	187	184
8	184	180	184	180	184
9	195	191	191	195	191
10	195	198	195	191	195
11	191	191	191	187	191
12	191	195	191	185	191
13	180	184	180	180	180
14	184	180	180	195	180
15	184	180	180	170	180
16	180	180	184	180	187
\bar{X}	183,94	182,81	182,25	183,50	181,13
σ	9,949	8,953	8,552	9,1287	9,208
σ / \bar{X}	0,0541	0,0490	0,0469	0,0497	0,0508

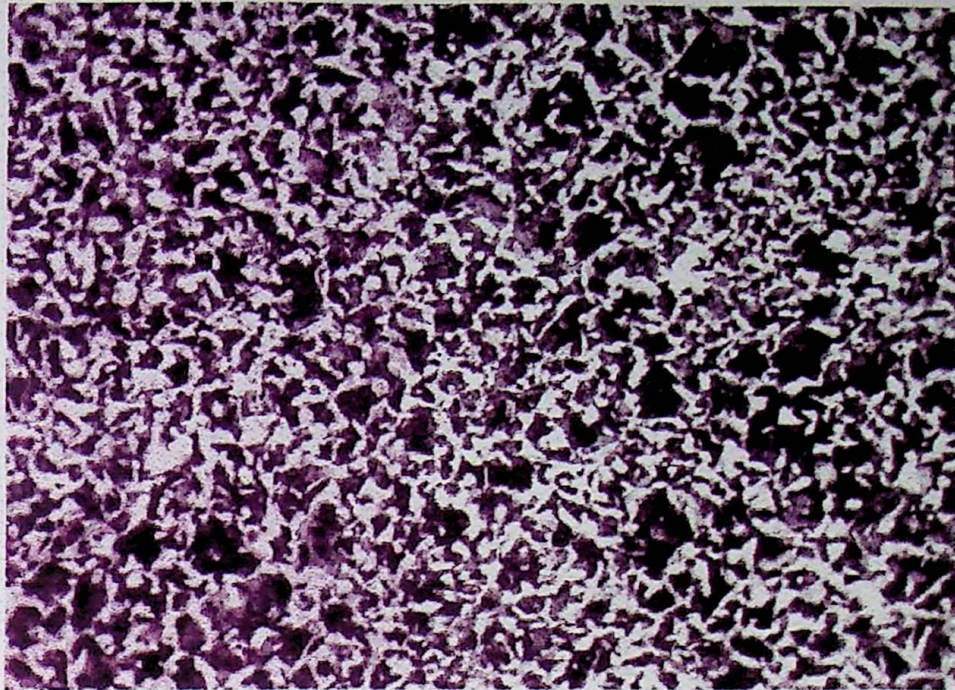


Figura 4.1 - Corte transversal da amostra com ataque químico (ampliação de 100x).



Figura 4.2 - Corte longitudinal da amostra com ataque químico (ampliação de 100x).

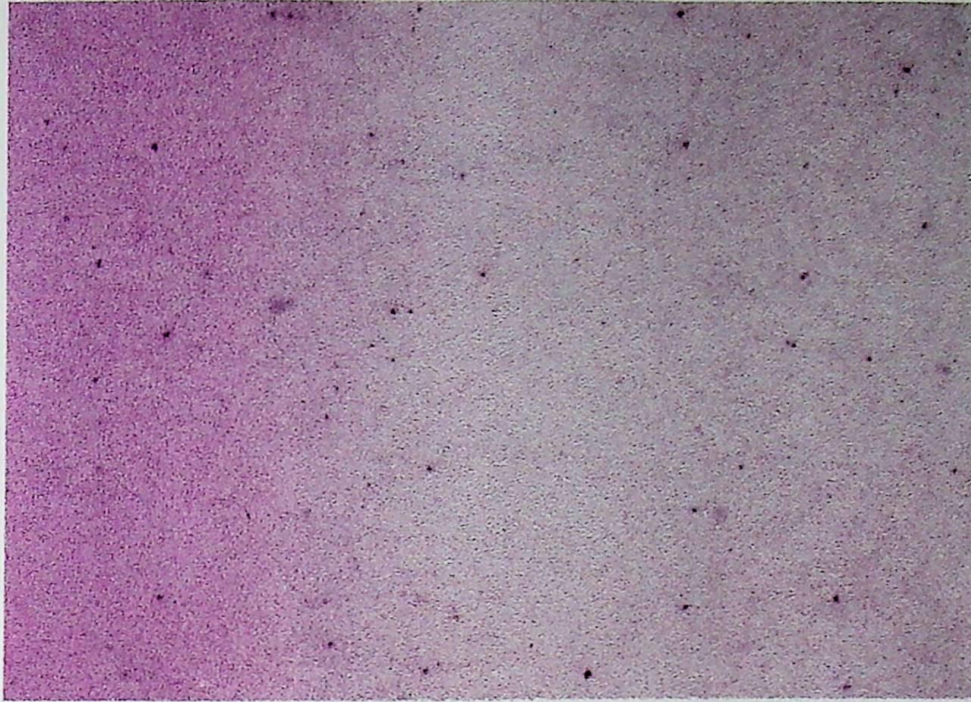


Figura 4.3 - Corte transversal da amostra sem ataque eletrolítico (ampliação de 100x).

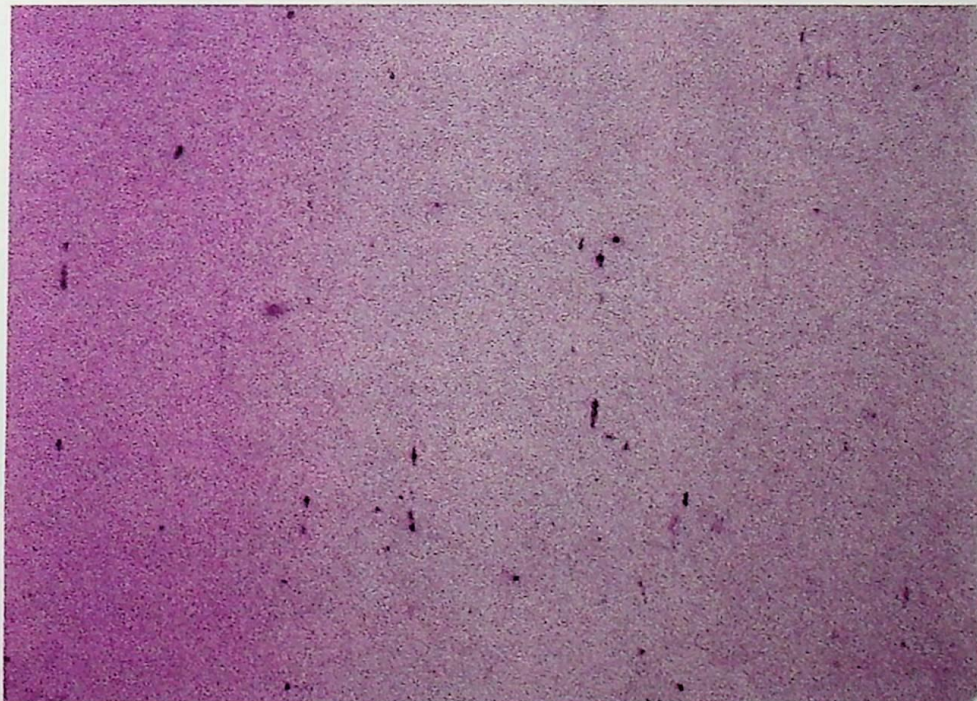


Figura 4.4 - Corte longitudinal da amostra sem ataque eletrolítico (ampliação de 100x).



Figura 4.5 - Vista geral do torno CNC.

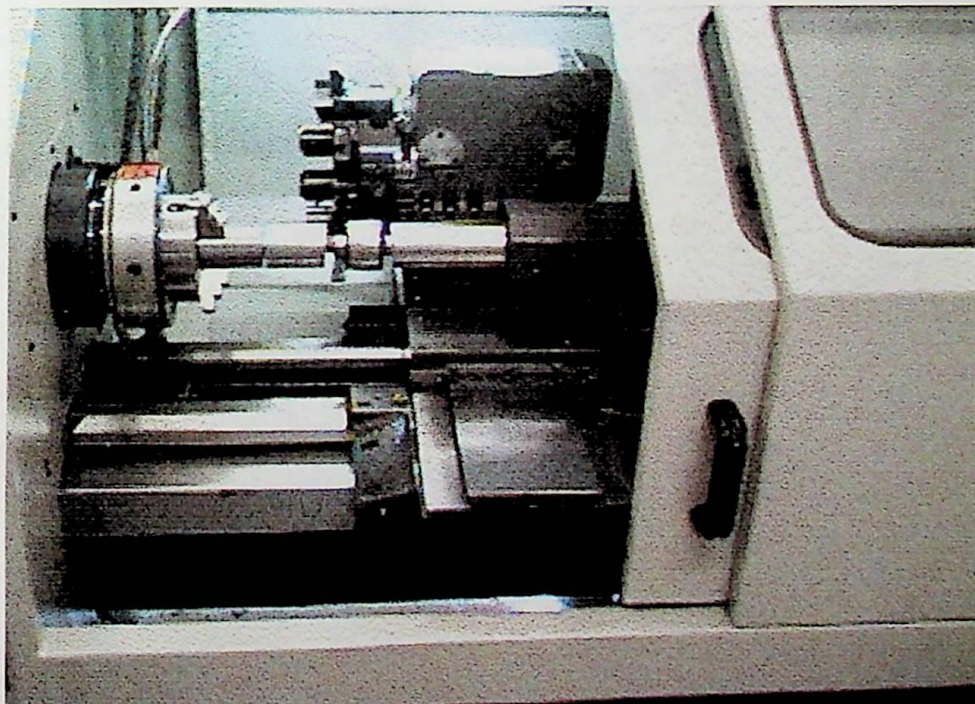


Figura 4.6 - Vista parcial do torno CNC.

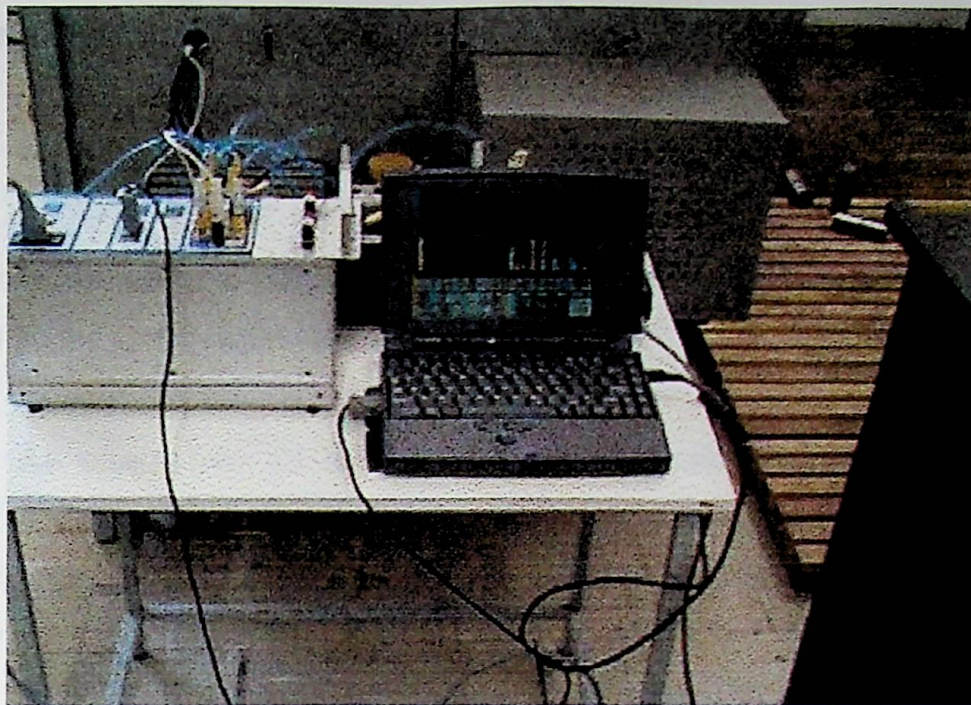


Figura 4.7 - Sistema para aquisição dos dados de potência.



Figura 4.8 - Projetor de perfil utilizado nos ensaios.

4.3 - Ensaio de torneamentos

Os ensaios de torneamento foram realizados da seguinte maneira:

4.3.1 - Ensaio com as pastilhas TCMT 11 02 04 - S1P sem recobrimento e SPGN 09 03 04 - P30 sem recobrimento

As operações de torneamento foram realizadas em um torno CNC NARDINI modelo LOGIC 175 com 7,5 cv de potência (figuras 4.5 e 4.6), sendo os ensaios realizados com corpos de prova com dimensões conforme esquema da figura 4.9.

O objetivo desta fase foi obter o comprimento de corte de referência usinado mantendo-se constantes todos os parâmetros de corte, menos a rotação do eixo árvore da máquina, que irá variar de acordo com o diâmetro do corpo de prova. Para isso, foram realizados sucessivos passes de desbaste nos corpos de prova. Cada ensaio de desbaste de um respectivo diâmetro foi repetido cinco vezes para que se obtivesse uma melhor confiabilidade dos resultados obtidos com relação ao tratamento dos dados.

Dessa forma, pôde-se obter a progressão do desgaste de flanco da ferramenta com relação ao comprimento de corte de referência (l_c), sendo o objetivo desse comprimento de corte de referência permitir relacioná-lo com as várias velocidades de avanço utilizadas durante os ensaios e, assim, definir se realmente existe uma variação significativa da vida da ferramenta.

A usinagem dos corpos de prova iniciou-se com o diâmetros de 48 mm, considerando o diâmetro da ponta da ferramenta, sendo que para cada etapa era considerada uma profundidade de corte de 0,5 milímetros e um avanço de 0,15 milímetros por rotação, sem fluido refrigerante. Após a usinagem de oito corpos de prova, a ferramenta era retirada para que fosse medido o desgaste de flanco, esse procedimento foi repetido até que o desgaste atingisse 0,3 milímetros. A mesma metodologia foi utilizada nos diâmetros imediatamente menores sendo que esse metodologia foi repetida até os corpos de prova atingirem o diâmetro de 32 milímetros.

Esses ensaios foram realizados com as pastilhas TCMT 11 02 04 - S1P sem recobrimento, fixadas em um suporte do tipo STGCR 16 16 H11 e os valores descritos acima para o avanço, velocidade e profundidade de corte foram utilizados dentro dos valores recomendados pelo fabricante (*SANDVIK, 1992*).

Após a finalização de cada ensaio com a pastilha TCMT 11 02 04, e retirado o comprimento de corte (l_c), todos os corpos de prova eram preparados para um novo ensaio, sendo rebaixados com uma profundidade de corte de 1,5 milímetros e um avanço de 0,2 milímetros por rotação, com fluido refrigerante. Da mesma forma, os ensaios foram realizados nessa etapa até que o desgaste de flanco atingisse 0,3 milímetros, sendo que os dados obtidos nesses ensaios foram arquivados para que se pudesse fazer uma posterior comparação. Esse procedimento foi repetido até os corpos de prova atingirem o diâmetro de 33 milímetros.

Esses desbastes para preparação dos corpos de prova foram realizados com as pastilhas SPGN 09 03 04 - P30 sem recobrimento, fixadas em um suporte CSBPL 16 16 H09, e os valores descritos acima para o avanço, velocidade e profundidade de corte foram baseados em um estudo prévio para que se obtivesse um aumento gradativo da velocidade de avanço, onde o diâmetro mínimo não poderia atingir um valor muito pequeno comprometendo dessa maneira, o balanço e a fixação na máquina do corpo de prova que é geralmente compreendido entre 2,5 a 3 vezes o diâmetro.

Nessa etapa, para os ensaios de preparação dos corpos de prova, as medições dos valores do desgaste de flanco foram realizadas após a usinagem completa de 16 corpos de prova, considerando-se o mesmo valor de desgaste da flanco para as duas ferramentas sendo esse valor igual o 0,3 milímetros para a vida da ferramenta.

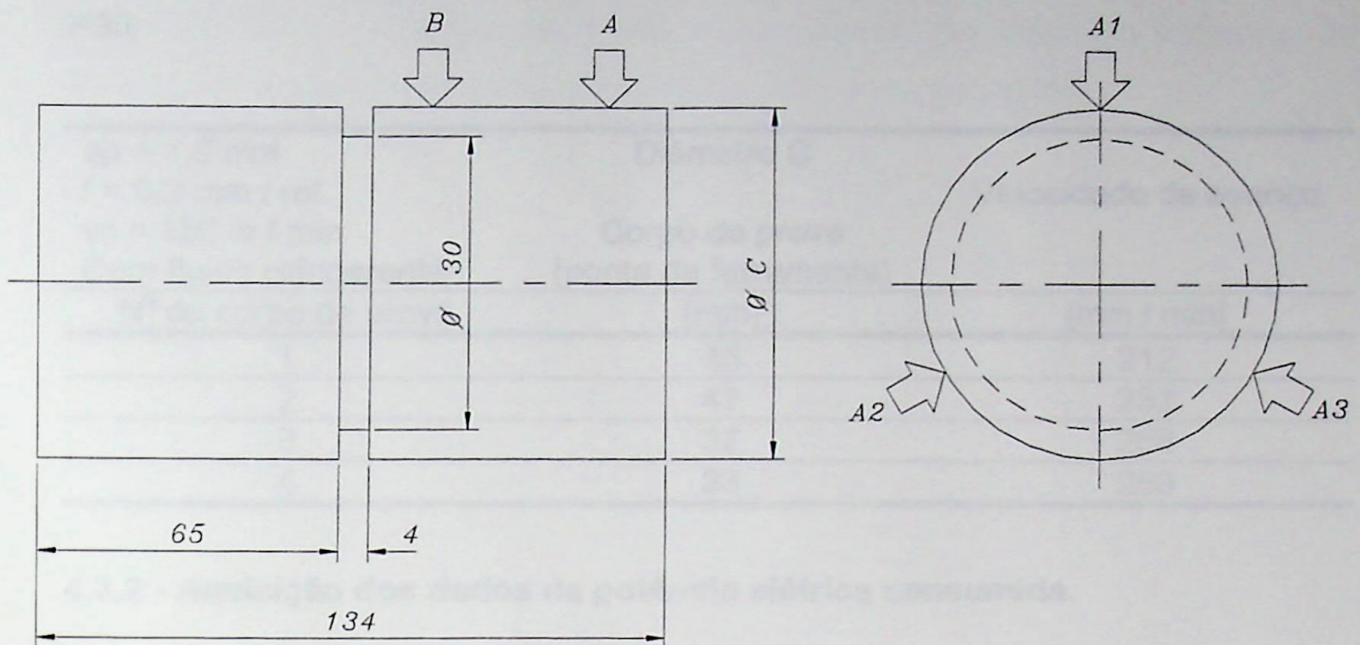


Figura 4.9 - Corpo de prova cilíndrico utilizado nos ensaios. (O valor do diâmetro C é apresentado nas tabelas 4.3 e 4.4).

Tabela 4.3 - Variáveis utilizadas nos ensaios com a pastilha TCMT 11 02 04 - S1P.

N ^o do corpo de prova	Diâmetro C	Velocidade de avanço
	[mm]	[mm / min]
1	48	397,89
2	44	434,06
3	40	477,46
4	36	530,52
5	32	596,83

Tabela 4.4 - Variáveis utilizadas nos ensaios com a pastilha SPGN 09 03 04 - P30.

Com fluido refrigerante		Velocidade de avanço
N ^o do corpo de prova	Corpo de prova (ponta da ferramenta)	[mm / min]
1	45	212
2	41	233
3	37	258
4	33	289

4.3.2 - Aquisição dos dados da potência elétrica consumida.

Os dados da potência elétrica do motor principal da máquina que foram necessários em cada passo de desbaste foram levantados durante a usinagem de cada corpo de prova, sendo que estes eram levantados indiretamente através da corrente principal do motor da máquina por um sistema de aquisição de dados desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Elétrica da EFEI, denominado Monitek 9442 (Vicente, 1992). A figura 4.10 apresenta o esquema básico do equipamento.

A vantagem de se ter um sistema de aquisição de potência elétrica se relaciona à possibilidade de se poder monitorar indiretamente o desgaste da ferramenta e assim verificar possíveis tendências do comportamento do desgaste, com relação a velocidade de avanço.

É importante salientar que, segundo Braga (1992), a potência tem maior importância em operação de desbaste onde a variação da corrente elétrica do motor principal da máquina se mostrou mais significativa em velocidades de corte e avanços da ferramenta com valores superiores.

Entretanto, como a velocidade de avanço em máquinas de comando numérico muitas vezes é comandada por servo motores de avanço, independentes do motor principal da máquina, considerando que esses possuem potências muito pequenas em relação ao motor principal pode-se afirmar que

para esses casos a velocidade de avanço é muito menor que a velocidade de corte e, como a potência do servo motor é pequena exige-se sistemas de medição muito mais sensíveis para detectar pequenas variações.

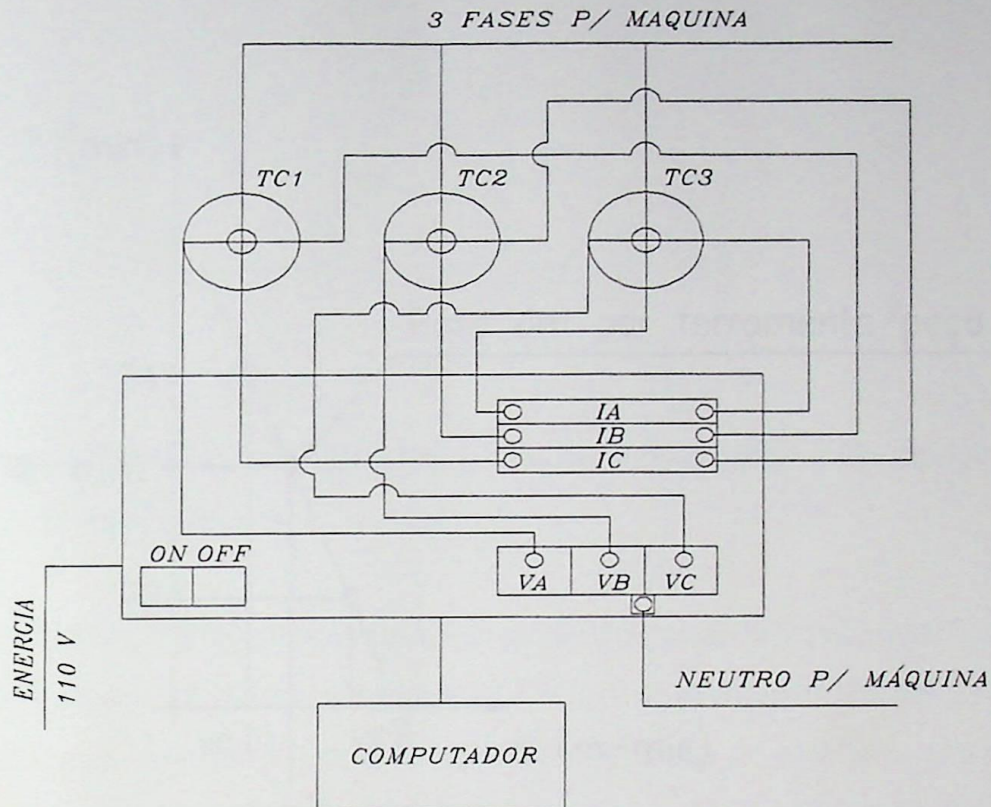


Figura 4.10 - Esquema do equipamento para aquisição dos dados de potência utilizados nos ensaios (Vicente, 1992)

4.3.3 - Medição do desgaste de flanco

A medição do desgaste de flanco da ferramenta foi realizada após a usinagem completa de oito corpos de prova, sendo utilizado um projetor de perfil Carl Zeiss Jena, modelo MP 320 (Figura 4.8), com uma lente de aumento de 50 vezes para que se conseguisse uma maior precisão durante o levantamento das dimensões do desgaste de flanco.

Com esses dados esperava-se na realidade para a velocidade de corte vc_i em metros por minuto uma vida T_i em minutos ou um comprimento (lc), conforme a figura 4.11 .

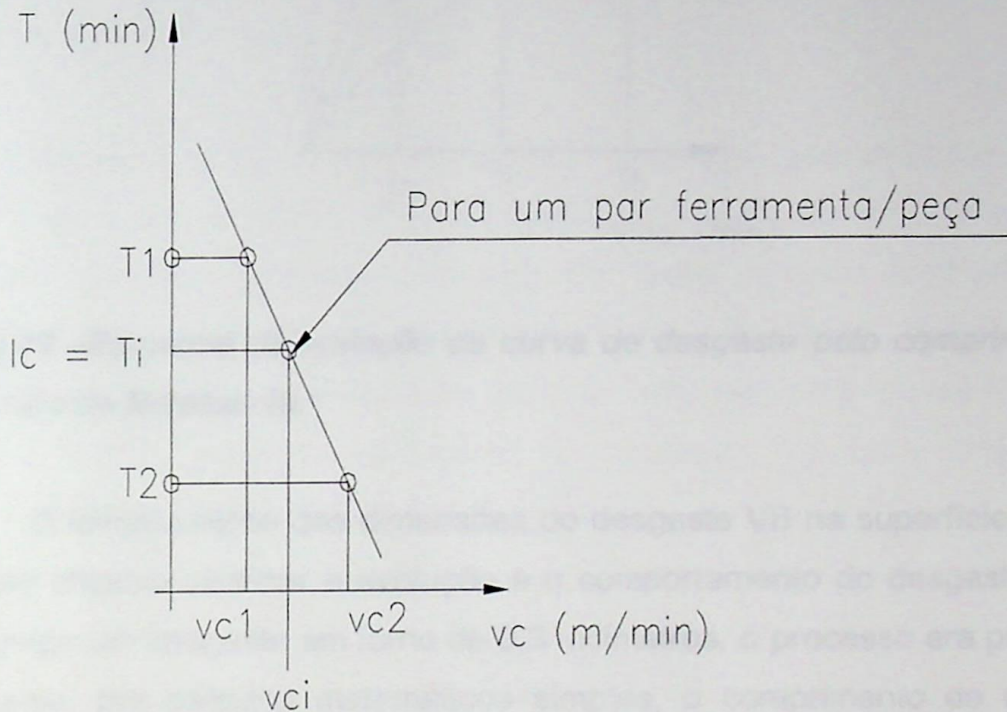


Figura 4.11 – Gráfico esquemático para uma vida T_i em função de uma velocidade de corte vc_i .

Com a variação da rotação em função da redução dos diâmetros, e a fixação como constante de todas as outras variáveis, tem-se a variação da velocidade de avanço e dessa forma, deseja-se verificar o comportamento de uma nova situação da vida T em minutos em função do desgaste de flanco VB em milímetros, onde o que se espera após o levantamento dos dados, é que se tenha uma curva à esquerda (A) representando dessa forma uma perda de vida para a ferramenta, ou uma curva à direita (B) que poderá representar um ganho de vida para a ferramenta utilizada.

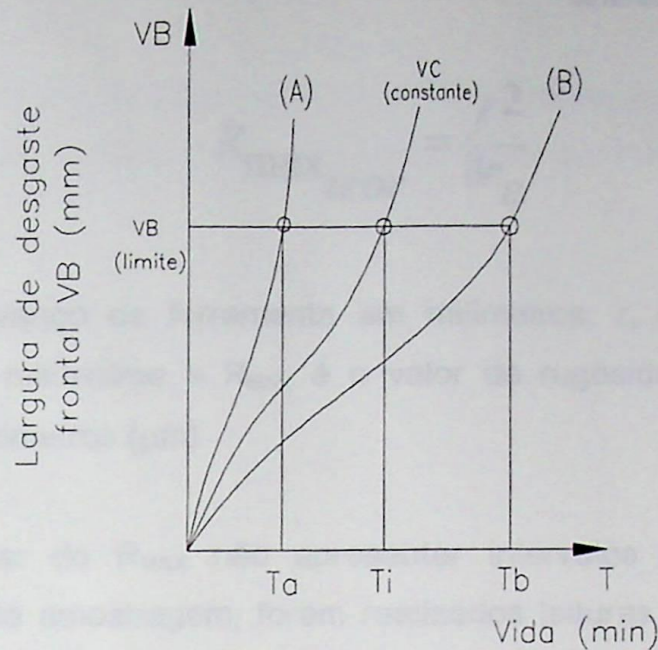


Figura 4.12 –Esquema da variação da curva de desgaste pelo comprimento de corte ou vida da ferramenta.

O levantamento das dimensões do desgaste VB na superfície de folga tinha como objetivo verificar a evolução e o comportamento do desgaste, sendo que ao atingir um desgaste em torno de 0,3 milímetros, o processo era paralisado e obtinha-se, por cálculos matemáticos simples, o comprimento de corte em metros, conforme a equação 4.1 abaixo

$$l_c = \frac{\pi \cdot d \cdot l \cdot a_f \cdot z}{a_f \cdot 10^3} \quad (4.1)$$

4.3.4 - Medição da rugosidade superficial.

A medição da rugosidade superficial da peça foi utilizada como um padrão de associação com a evolução do desgaste da ferramenta. Para isso utilizou-se um rugosímetro da marca Mitutoyo modelo surfest 201, com valores de 0,25 a 2,5 milímetros de cut-off, sendo escolhida como parâmetro a rugosidade máxima R_{MAX} , para que posteriormente pudesse ser realizado uma comparação com a rugosidade máxima teórica, conforme equação 4.2.

$$R_{\max_{teor}} = \frac{f^2}{8r_\epsilon} \quad (4.2)$$

onde: f é o avanço da ferramenta em milímetros, r_ϵ é o raio de ponta da ferramenta em milímetros e R_{\max} é o valor da rugosidade superficial máxima teórica em micrometros (μm).

Apesar de R_{\max} não apresentar intervalos padronizados para os comprimentos de amostragem, foram realizadas leituras com o valor de R_a de rugosidade superficial para que em seguida, fosse utilizada uma relação de conversão entre elas. Na prática, apesar da rugosidade superficial não apresentar uma forma geométrica bem definida, não permitindo dessa forma uma relação constante, pode-se considerar a expressão 4.3 para relacioná-las (Agostinho, Rodrigues e Lirani, 1997).

$$2,00 \leq \frac{R_{\max}}{R_a} \leq 4,00 \quad (4.3)$$

O valor de cut-off utilizado foi igual a 2,5 milímetros pois, devido a rugosidade máxima não possuir intervalos de valores de medição padronizados utilizou-se a equação 4.3 para que fosse encontrada a relação entre ambas. Dessa forma, conforme a relação obtida entre os dois valores de rugosidade superficial os valores indicavam uma rugosidade R_a igual a 3,23 micrometros que recomenda um cut-off de 2,5 milímetros.

A finalidade da utilização do critério de rugosidade superficial foi acompanhar o desgaste de flanco da ferramenta e analisar uma possível relação entre a evolução desse com o comportamento da rugosidade superficial da peça.

A medição da rugosidade foi feita nos pontos A e B a uma distância de 15 mm da extremidade do corpo de prova, em três pontos equidistantes 120° entre si, conforme apresentado na figura 4.9. Os valores apresentados nas

Capítulo 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 - Variação do comprimento de corte usinado.

Ensaio com as pastilhas TCMT 11 02 04 - UR sem fluido refrigerante e SPGN 09 03 04 - P30 com fluido refrigerante.

As figuras 5.1 e 5.2 apresentam os resultados dos cinco ensaios para a variação do desgaste de flanco com a pastilha TCMT 11 02 04 - UR e a pastilha SPGN 09 03 04 - P30, respectivamente, com o comprimento de corte de cada ensaio. Nestas figuras, cada ponto representa a média dos cinco ensaios realizados em cada velocidade de avanço para a pastilha TCMT 11 02 04 - UR e três ensaios para a pastilha SPGN 09 03 04 - P30, apresentando a evolução do comportamento do desgaste em ambos os casos.

As tabelas B.1 e B.2 no apêndice B apresentam um resumo dos dados obtidos nessa fase do ensaio para cada tipo de pastilha. Cada uma das curvas apresentadas nas figuras 5.1 e 5.2 foi aproximada por uma linha reta através de um análise de regressão que gerou os gráficos de ajuste de linha apresentados nas figuras de A10 a A18 no apêndice A. Os resultados dessas análises estão mostrados nas tabelas B.3 e B.11, e as figuras de A.1 a A.9 mostram as curvas dos resíduos da regressão linear pelo comprimento de corte usinado dos ensaios com os dois tipos de pastilha.

Utilizando-se dessas das figuras 5.1 e 5.2, pode-se ter uma visão da variabilidade do desgaste de flanco em função do comprimento de corte, para as cinco velocidades de avanço utilizadas nos ensaios sem fluido refrigerante, com a pastilha TCMT 11 02 04 - UR, e nos quatro ensaios com fluido refrigerante com a pastilha SPGN 09 03 04 - P30.

Esses resultados apresentam os seguintes fatos favoráveis a uma análise:

- a) conforme foi apresentado nas tabelas de B.3 a B.11, no apêndice B, os dados mostram que o menor coeficiente de determinação R^2 encontrado para as análises de regressão é igual a 0,95 para os ensaios realizados com a pastilha TCMT 11 02 04 - UR e os ensaios realizados com a pastilha SPGN 09 03 04 - P30: isso demonstra que o modelo adotado está explicando 95 % da variação do total dos pontos coletados, para o desgaste de flanco, em relação ao comprimento de corte usinado, e apenas 5 % constituem uma variação não explicada pelo modelo, sendo esta distribuição considerada aleatória.
- b) os gráficos de resíduos apresentados nas figuras de A.1 a A.9 do apêndice A também apresentam uma aleatoriedade dos pontos, o que fisicamente demonstra que não existiu uma tendência na distribuição dos pontos em relação à reta média, de maneira a ocorrer algum fator que pudesse influenciar no processo, tornando-o tendencioso para alguma condição.
- c) os coeficientes lineares "A" e "B", tabelas de B.3 a B.9, calculados para cada curva das figuras 5.1 e 5.2, apresentaram valores muito próximos e, sendo esses os valores dos coeficientes de inclinação de uma equação linear, os mesmos demonstram que os dados apresentados podem ser aproximados a um modelo linear de desgaste de flanco pelo comprimento de corte. A linearização das curvas 5.1 e 5.2 são apresentadas nas figuras A.19 e A.20 mostrando que nos ensaios realizados, quando fixamos um valor de desgaste de flanco os valores de vida para a ferramenta tendem a aumentar acompanhando um aumento também da velocidade de avanço.
- d) Se observarmos a tabela 5.1 onde temos o resumo dos tempos e comprimentos de corte obtidos durante os ensaios com a pastilha TCMT 11 02 04 - UR podemos notar um aumento do comprimento de corte usinado pois, do primeiro para o segundo ensaio ocorreu um acréscimo de 10 % no comprimento de corte e conseqüentemente na vida da ferramenta. Entretanto,

observa-se uma tendência a ocorrer uma diminuição desse aumento após cada ensaio, conforme apresentam os valores do segundo para o terceiro 6 %, do terceiro para o quarto 3 % e do quarto para o quinto ensaio 0% de variação do comprimento de corte.

Esse aumento do comprimento de corte das peças usinadas em relação ao aumento da velocidade de avanço, nos leva à confirmação de que, para os ensaios realizados com a ferramenta TCMT 11 02 04 - UR sem fluido refrigerante, ocorreu um ganho da vida significativo, com uma tendência a se anular que é passível de ser avaliada futuramente.

Já para os ensaios realizados com a ferramenta SPGN 09 03 04 - P30 com fluido refrigerante, não ocorreu um aumento significativo no comprimento de corte usinado, dessa forma, pode-se considerar que pelo fato dos ensaios terem sido realizados com fluido refrigerante, esse pode ter mantido o gradiente de temperatura na região de contato ferramenta / peça, influenciando assim o desgaste provocado pela velocidade de avanço.

Além disso, o desgaste de flanco para os diversos ensaios não é igual nos valores finais dos ensaios, mostrando que, devido à medição do desgaste ser realizada em função de um número fixo de corpos de prova para cada etapa, há de se esperar uma pequena sensibilidade nesses valores, considerando a existência de uma tolerância de valores acima e abaixo do número de corpos de prova.

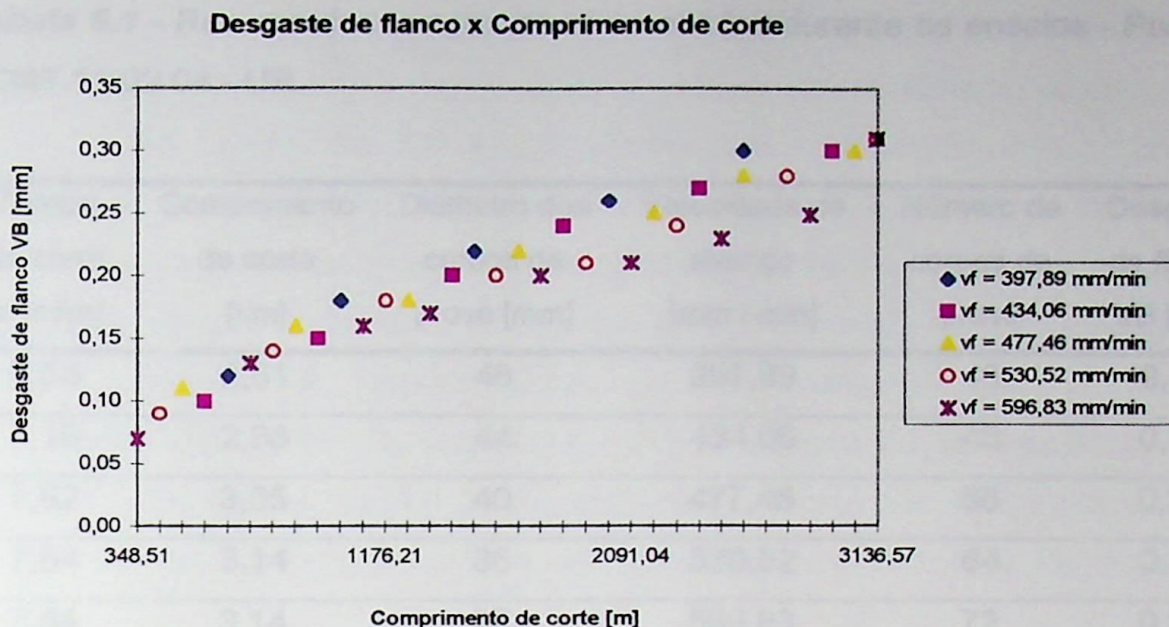


Figura 5.1 - Comportamento das curvas de velocidade de avanço utilizadas nos cinco ensaios realizados com a ferramenta TCMT 11 02 04 - UR sem fluido refrigerante.

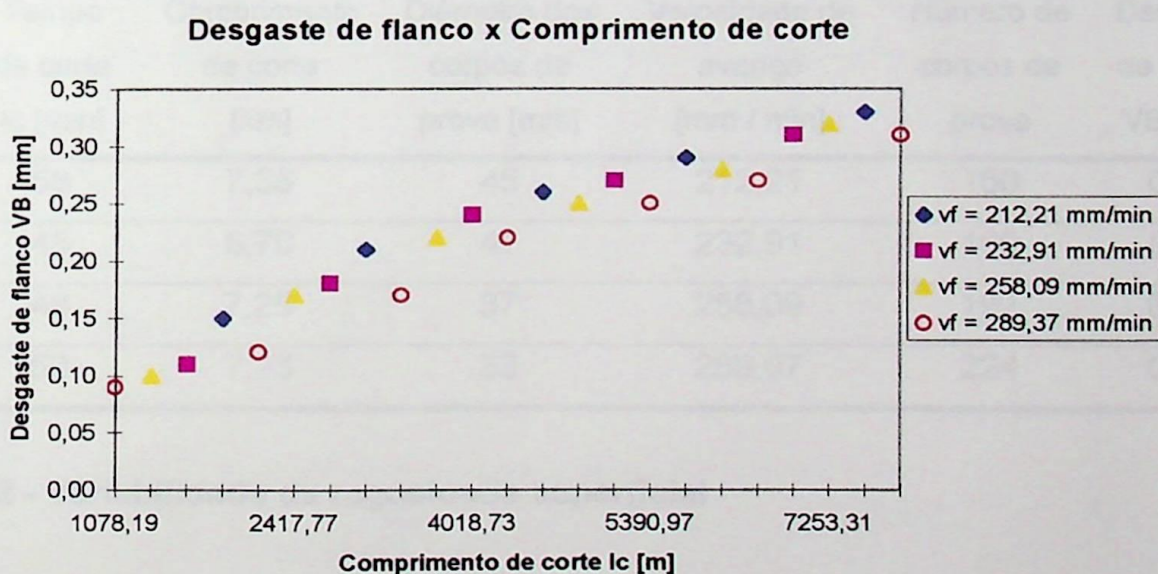


Figura 5.2 - Comportamento das curvas de velocidade de avanço utilizadas nos quatro ensaios realizados com a ferramenta SPGN 09 03 04 - P30 com fluido refrigerante.

Tabela 5.1 - Resumo dos tempos de corte obtidos durante os ensaios - Pastilha TCMT 11 02 04 - UR.

Tempo de corte tc [mim]	Comprimento de corte [km]	Diâmetro dos corpos de prova [mm]	Velocidade de avanço [mm / min]	Número de corpos de prova	Desgaste de flanco VB [mm]
6,53	2,61	48	397,89	40	0,31
7,19	2,88	44	434,06	48	0,30
7,62	3,05	40	477,46	56	0,30
7,84	3,14	36	530,52	64	0,31
7,84	3,14	32	589,83	72	0,31

Tabela 5.2 - Resumo dos tempos de corte obtidos durante os ensaios - Pastilha SPGN 09 03 04 - P30.

Tempo de corte tc [min]	Comprimento de corte [km]	Diâmetro dos corpos de prova [mm]	Velocidade de avanço [mm / min]	Número de corpos de prova	Desgaste de flanco VB [mm]
58	7,35	45	212,21	160	0,33
45	6,70	41	232,91	160	0,31
48	7,25	37	258,09	192	0,32
50	7,25	33	289,07	224	0,31

5.2 - Variabilidade da rugosidade superficial

Ensaio com as pastilhas TCMT 11 02 04 - UR sem fluido refrigerante e SPGN 09 03 04 - P30 com fluido refrigerante.

Os valores obtidos para a rugosidade superficial foram realizados somente durante um dos experimentos, para cada velocidade de avanço, não ocorrendo uma repetibilidade dos ensaios, visto que seu levantamento foi

realizado com o objetivo de acompanhar a variação da rugosidade superficial, e não de observar o comportamento desta em função do crescimento do desgaste.

As figuras de 5.3 a 5.6 apresentam a plotagem dos pontos de rugosidade superficial, realizados com as duas ferramentas, para as regiões A e B do corpo de prova, onde foram coletados três valores de rugosidade superficial para cada região e desta forma encontrou-se um valor médio de rugosidade.

Observando estes dados, pode-se salientar que existiu um crescimento da rugosidade superficial máxima em relação ao comprimento de corte usinado, nestes intervalos de comprimento, mostrando que o desgaste na ferramenta foi significativo para a variação do comportamento da superfície usinada.

As tabelas B.12 e B.13 apresentam um resumo dos valores de rugosidade superficial para os ensaios realizados com as ferramentas TCMT 11 02 04 - UR e SPGN 09 03 04 - P30.

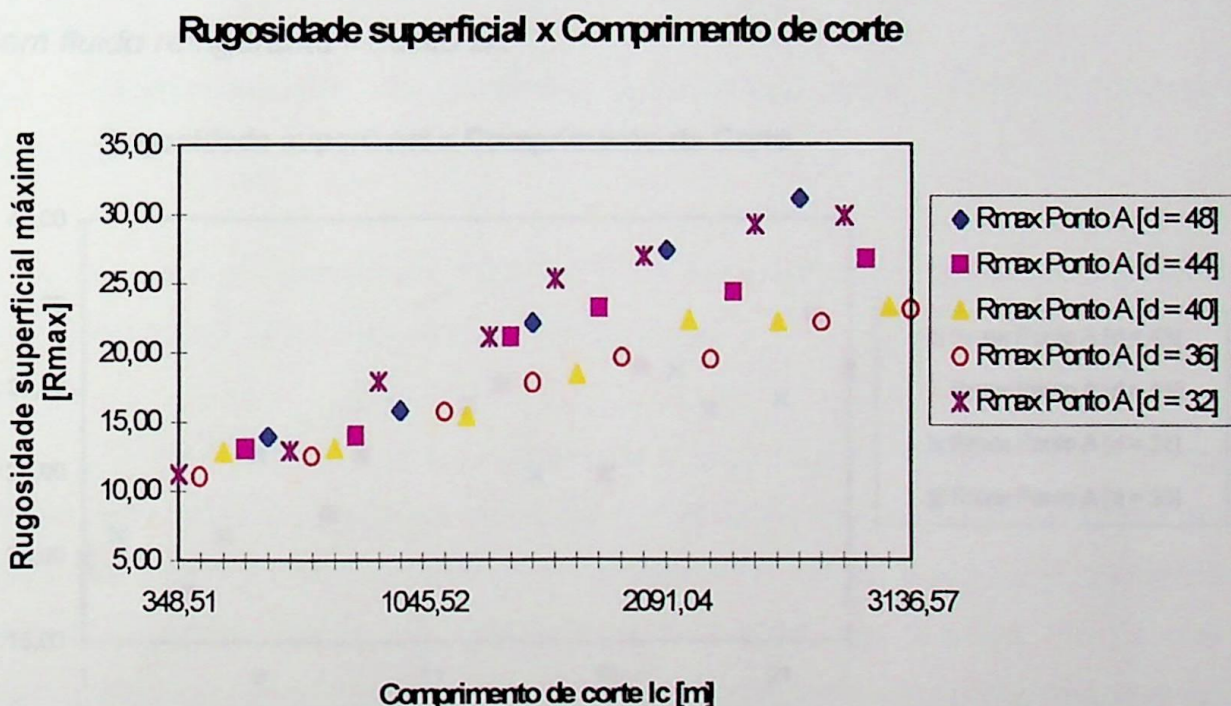


Figura 5.3 - Comportamento da rugosidade superficial máxima em relação ao comprimento de corte usinado - Ensaio com ferramenta TCMT 11 02 04 - UR sem fluido refrigerante - Ponto A .

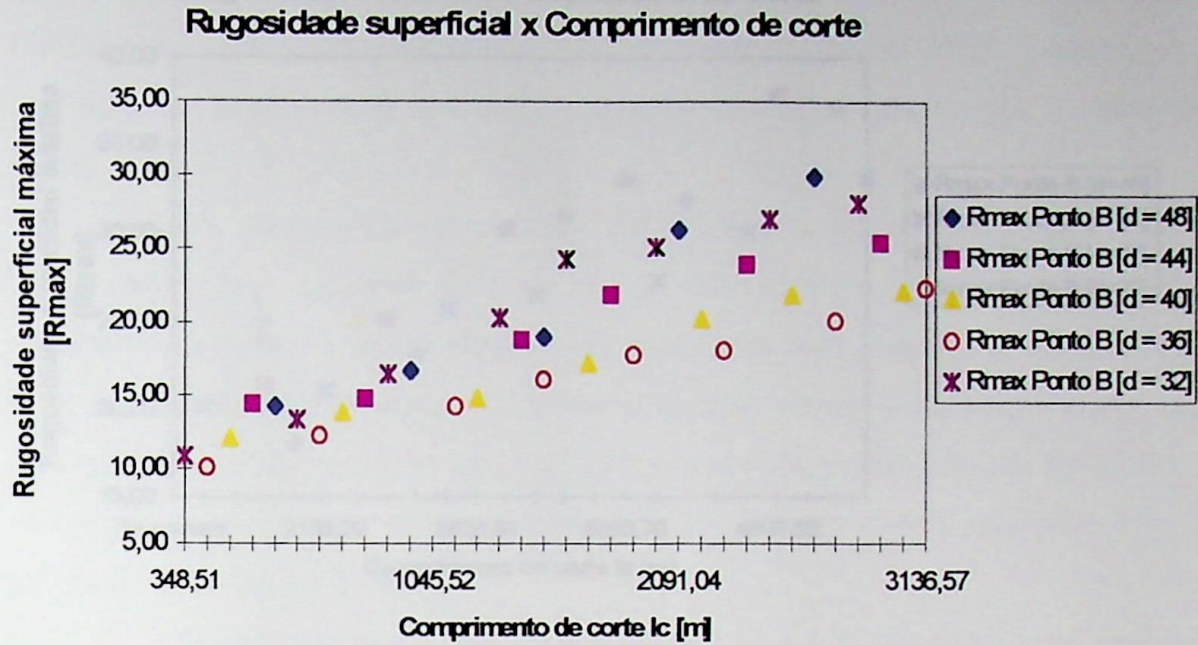


Figura 5.4 - Comportamento da rugosidade superficial máxima em relação ao comprimento de corte usinado - Ensaios com ferramenta TCMT 11 02 04 - UR sem fluido refrigerante - Ponto B .

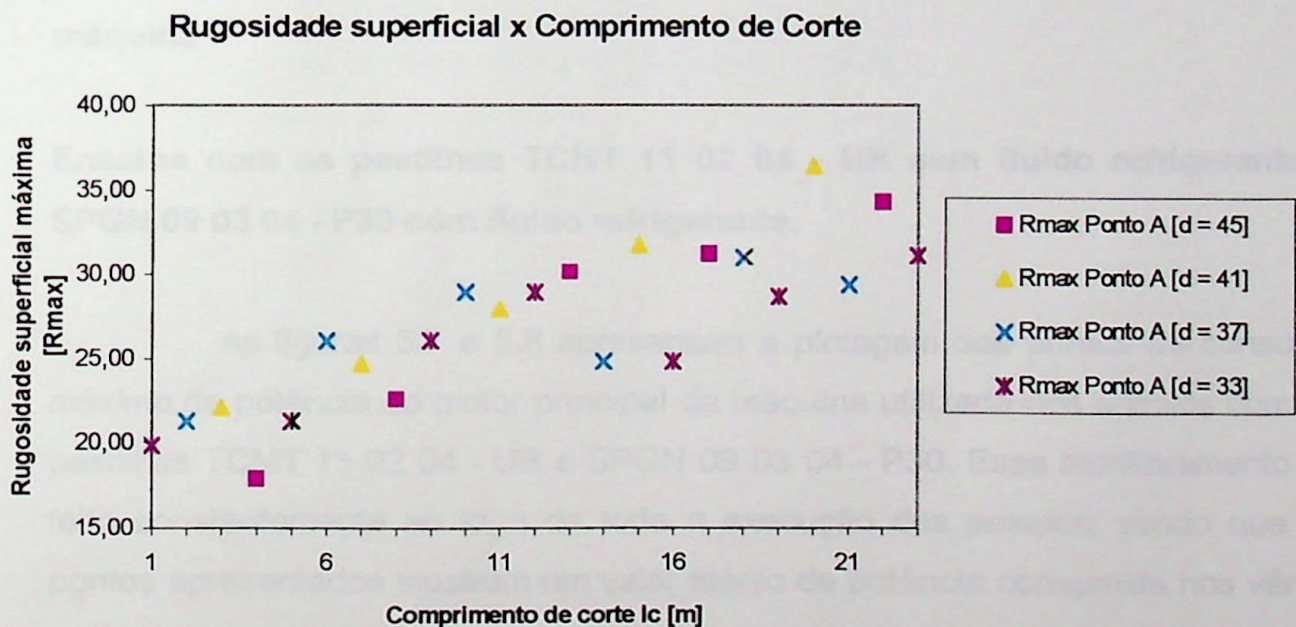


Figura 5.5 - Comportamento da rugosidade superficial máxima em relação ao comprimento de corte usinado - Ensaios com ferramenta SPGN 09 03 04 - P30 com fluido refrigerante - Ponto A.

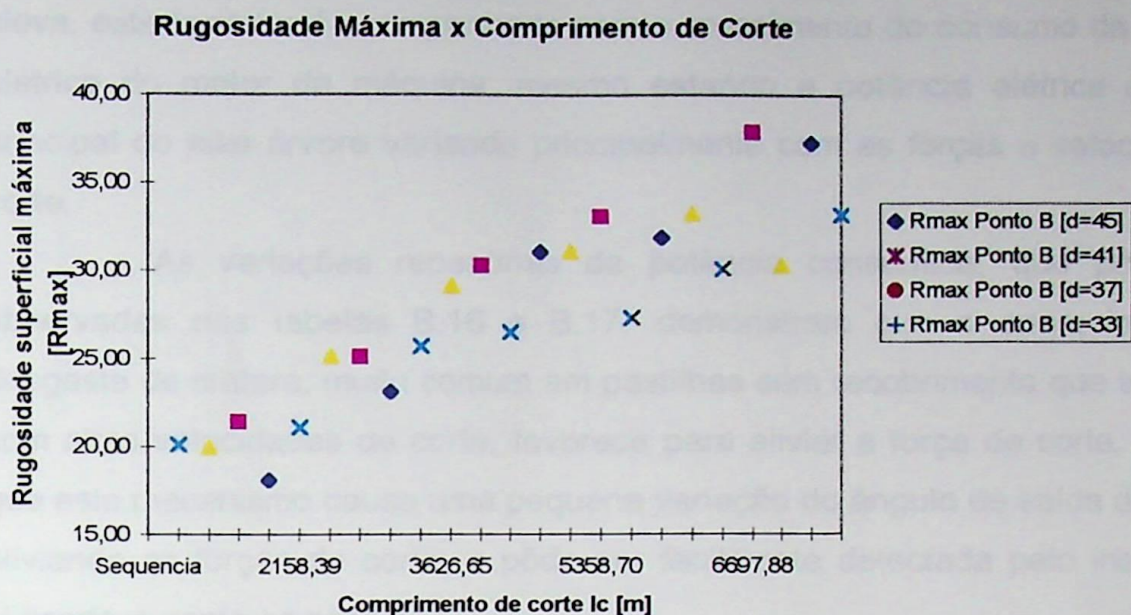


Figura 5.6 - Comportamento da rugosidade superficial máxima em relação ao comprimento de corte usinado - Ensaios com ferramenta SPGN 09 03 04 - P30 com fluido refrigerante - Ponto B.

5.3 - Monitoramento da potência consumida pelo motor principal da máquina

Ensaios com as pastilhas TCMT 11 02 04 - UR sem fluido refrigerante e SPGN 09 03 04 - P30 com fluido refrigerante.

As figuras 5.7 e 5.8 apresentam a plotagem dos pontos de consumo máximo de potência do motor principal da máquina utilizada nos ensaios com as pastilhas TCMT 11 02 04 - UR e SPGN 09 03 04 - P30. Esse monitoramento foi feito constantemente ao longo de toda a execução dos ensaios, sendo que os pontos apresentados mostram um valor médio de potência consumida nos vários ensaios, e somente foram considerados os valores de potência relativos aos desgastes da ferramenta.

Conforme foi apresentado nas figuras 5.8 e 5.9, observamos que o monitoramento da potência elétrica do motor principal da máquina apresenta bons resultados, demonstrando que, à medida que o desgaste da ferramenta se

eleva, este também é acompanhado com o crescimento do consumo da potência elétrica do motor da máquina, mesmo estando a potência elétrica do motor principal do eixo árvore variando principalmente com as forças e velocidade de corte.

As variações repentinas da potência consumida, que podem ser observadas nas tabelas B.16 e B.17, demonstram que o aparecimento do desgaste de cratera, muito comum em pastilhas sem recobrimento que trabalham com altas velocidades de corte, favorece para aliviar a força de corte, uma vez que este mecanismo causa uma pequena variação do ângulo de saída do cavaco aliviando as forças de corte, e pôde ser facilmente detectada pelo instrumento utilizado durante os ensaios.

Entretanto, esse fato não pode ser considerado como um atenuante da potência consumida pela máquina isoladamente, uma vez que a potência em vazio do motor apresentava pequenas oscilações de valores, podendo, dessa forma também influenciar razoavelmente nas variações de potência ao longo dos períodos de trabalho.

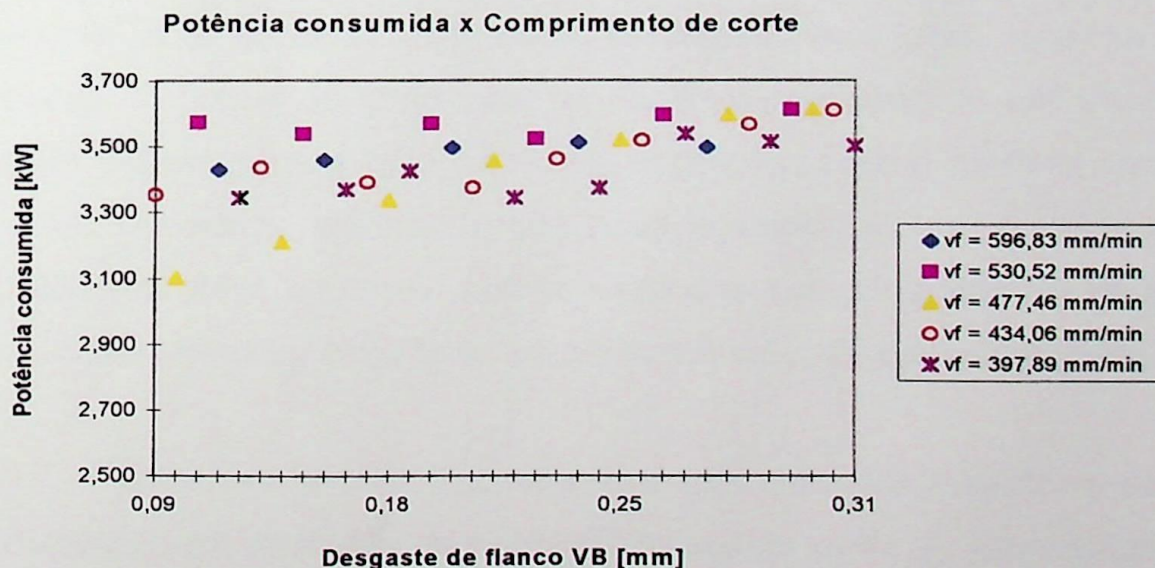


Figura 5.7 - Consumo da potência do motor principal da máquina em função do comportamento do desgaste de flanco - Ensaios com ferramenta TCMT 11 02 04 - UR, sem fluido refrigerante.

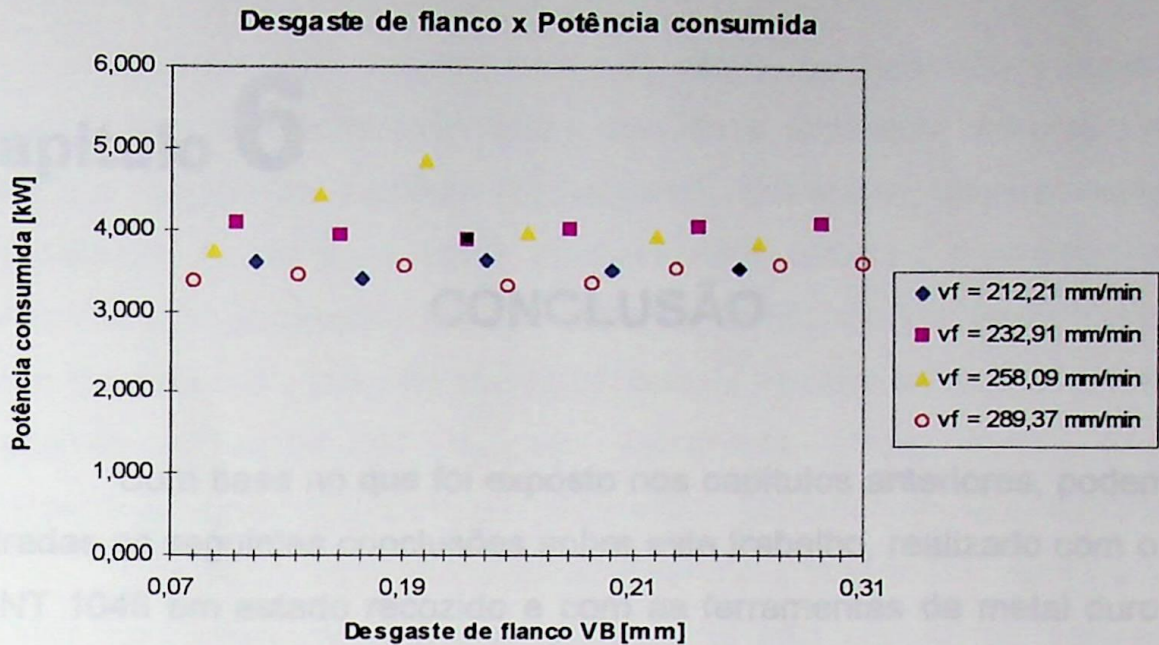


Figura 5.8 - Consumo da potência do motor principal da máquina em função do comportamento do desgaste de flanco - Ensaio com ferramenta SPGN 09 03 04 - P30, com fluido refrigerante.

Capítulo 6

CONCLUSÃO

Com base no que foi exposto nos capítulos anteriores, podem ser retiradas as seguintes conclusões sobre este trabalho, realizado com o Aço ABNT 1045 em estado recozido e com as ferramentas de metal duro das classes P30 e P10 sem recobrimento.

Os valores encontrados para o desgaste de flanco nos ensaios mostraram que com a elevação da rotação do eixo árvore da máquina para atingir uma velocidade de avanço maior, em função da rápida redução do diâmetro, ocorreu um acréscimo do comprimento de corte e conseqüentemente da vida da ferramenta durante os ensaios.

Os gráficos das análises dos resultados e das tabelas do apêndice A e B confirmam essa afirmação, mostrando que teremos aumento do tempo de corte para as diversas situações de velocidade de avanço utilizadas para este par ferramenta-peça com o material usinado. Deve-se considerar entretanto, que esse aumento ocorreu de uma forma decrescente até a equidade apresentada dos comprimentos de corte nos dois últimos ensaios, onde teremos então um valor de comprimento de corte fixo.

Com isso podemos concluir que, quando consideramos operações de usinagem em situações de produção industrial, onde se utiliza valores de velocidade de corte para que se tenha uma máxima produção, o aumento dos valores da velocidade de avanço pela redução dos diâmetros trabalhados irá proporcionar, em alguns casos, um aumento do número de peças produzidas proporcionando com isto um ganho de produtividade.

Quanto ao monitoramento dos valores da rugosidade superficial da peça, os dados nos mostraram uma forte tendência ao crescimento desta em relação ao aumento do desgaste. Entretanto, deve-se salientar que, pelo fato de ser a usinagem um mecanismo dinâmico e as ferramentas não terem sido solicitadas até seu extremo, esses valores podem até cair dentro de uma outra faixa de condição para os valores de vida, melhorando o acabamento superficial da peça trabalhada. Dessa forma, deve-se considerar a rugosidade como um parâmetro qualitativo e não quantitativo.

A potência se mostrou satisfatória como critério de monitoramento da vida de ferramentas, apesar da mesma não apresentar valores de variação significativos para o desgaste de flanco, devido ao valor de desgaste para esse trabalho ser relativamente pequeno. Entretanto, a pequena variação ocorrida na potência demonstra que conforme a sensibilidade dos equipamentos, pode-se ter em tempo real os valores de potência solicitada pelo motor, podendo assim o operador tomar rápidas decisões no processo.

Capítulo 7

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a conclusão do que foi exposto no capítulo anterior pelos dados apresentados nesse trabalho, as recomendações para que possam ser realizados trabalhos futuros são:

1) fazer um estudo mais detalhado, levando em consideração velocidades de corte mais elevadas para que se possa ter velocidades de avanço mais altas que as utilizadas nestes ensaios, usando para isto ferramentas e suporte mais resistentes ao desgastes progressivos e as avarias e sistemas máquina-ferramenta-peça mais rígidos, para que os ensaios possam ser conduzidos até os valores acima do desgaste de flanco de 0,3 milímetros podendo levar a ferramenta até a valores de desgaste de 1,2 milímetros.

2) fazer um estudo semelhante ao realizado neste trabalho para os desgastes da ferramenta, a fim que sejam avaliadas as variações de velocidades de avanço em função de um determinado intervalo para valores de avanço, e comparando esses valores com as variações que ocorrem devido as reduções de diâmetros dos corpos de prova, utilizando também outros conjuntos ferramenta-peça.

3) estudar a possibilidade da utilização de sensoreamento da força de avanço no processo produtivo, com o monitoramento através de dinamômetros afim se obter uma progressão do desgaste das ferramentas utilizadas mais preciso, principalmente sobre o ponto de vista da utilização do critério de monitoramento de força de avanço.

4) desenvolver um trabalho de monitoramento onde sejam utilizadas ferramentas para ciclos de rosqueamento, e que dessa forma, se possa avaliar o comportamento do desgaste de flanco dessas ferramentas quando são utilizados valores de avanço muito maiores como no caso de roscas quadradas e trapezoidais.



JARVALHO, R. R. S. Características de lubrificação viscosa sob o ponto de vista econômico. (Tese de Doutorado) Campinas, São Paulo, 1991.

LOOK, N. H. Tool wear and Tool life. Transactions of the ASME Journal of Engineering for Industry, pp. 931 / 935, 1973.

LOOK, N. H. and NATAK, P. H. The Thermal Mechanisms of Tool Wear. Transactions of the ASME Journal of Engineering for Industry, February 1956, pp. 63 / 101.

DAH, LI and MATHEN, J. Tool Wear and Failure Mechanisms for Turning - A REVIEW. Int. J. Tools Manufact., vol. 4, pp. 578 / 595, 1990.

DEARNEY, P. A. and TRENT, E. W. Thermodynamics of cutting carbide tools. Metal Technology, vol. 9, pp. 80 / 75, Feb. 1962.

DINIZ, A. G. A importância econômica da usina no processo de desenvolvimento científico da indústria de ferramentas e fatores de influência. (Tese de Doutorado) Campinas, São Paulo, 1994.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 6394. **Determinação da Dureza Brinell de Materiais Metálicos** (método de ensaio). Rio de Janeiro: 1980.

AGOSTINHO, O ., L.; LIRANI, J.; RUFFINO, R.,T. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análises de dimensões**, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1990.

BRAGA, D., U. **Monitoramento do processo de torneamento via parâmetros elétricos do motor da máquina**. (Dissertação de Mestrado) Campinas, São Paulo, 1992.

CARVALHO, R., R., S. **Características de usinagem vistas sob o ponto de vista econômico**. (Tese de Doutorado) Campinas, São Paulo, 1991.

COOK, N., H. **Tool wear and Tool life**, Transactions of the ASME Journal of Engineering for Industry, pp. 931 / 938, 1973.

COOK, N., H. and NAYAK, P., N. **The thermal Mechanisms of Tool Wear**, Transactions of the ASME Journal of Engineering for Industry, February 1966, pp. 93 /101.

DAN, LI and MATHEW, J. **Tool Wear and Failure Techniques for Turning - A REVIEW**, Int. J. Tools Manufact. vol. 4, pp. 579 / 598, 1990.

DEARNLEY, P., A . and TRENT, E., M. **Wear mechanisms of coated carbide tools**, Metals Technology, vol. 9, pp. 60 / 75, Feb. 1992.

DINIZ, A., E. **A rugosidade superficial da peça em processos de torneamento: critérios de fim de vida da ferramenta e fatores de influência**. (Tese de Doutorado) Campinas, São Paulo, 1989.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos metais**. Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1977 - A.

FERRARESI, D. **Características de Usinagem dos metais para a operação de torneamento**, ABM, São Paulo, 1987, - C.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTIZATION; **Tool life testing with single point turning tools**, ISSO 3685, Switzerland, 1988.

LEE, YOUNG-SON; **Theoretical Model of Crater Wear**, Transactions of the ASME Journal of Engineering for Industry, vol. 116, pp. 1051 / 1056, 1971.

MILLS and A ., H., REDFORD; **Machinability of Engineering Materials**, Applied Science Publishers, 1983.

NOVASKI, O. **Deteminação das condições de usinagem através dos parâmetros obtidos na indústria**. (Tese de Doutorado) Campinas, São Paulo, 1989.

SANDVIK **Herramientas de Tornear**, C - 100 ; 4 - SPA AB SandiVik Coromant, SandViken, Suécia, 1992.

SHAW, M., C. **Metal Cutting Principles**, Oxford Science Publications, 1991.

TRENT, E., M. **Metal Cutting**, Oxford, Third Edition, 1991.

VICENTE, J., M., E. **Desenvolvimento de um instrumento digital para medição de grandezas elétricas em sistemas trifásicos** (Dissertação de Mestrado). EFEI, Itajubá, Minas Gerais, 1992.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 6162 **Conceitos da técnica de usinagem movimentos e relações geométricas.** (Terminologia) Rio de Janeiro, 1989.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 6162 **Conceitos da técnica de usinagem geometria da cunha de corte.** (Terminologia) Rio de Janeiro, 1989.

BHATTACHARYA, A ., GHOSH A . and HAM, I. **Analisis of Tool Wear PART II: Aplications of Flank Wear Models** , Transactions of the ASME Journal of Egeenring for Industry, February 1970, pp. 109 / 114.

COSTA, C. E. **Monitoramento do processo de desbaste vai corrente elétrica do motor principal da máquina e via vibração da ferramenta** Dissertação de Mestrado, Campinas, São Paulo, 1995.

DANIEL B., D.; **Tool Manufacturing Engineers Handbook**, Society of Manufacturing Engineers, Third Edition, 1976.

DIAS, S., A . **Uma metodologia para a otimização automática de parâmetros de usinagem**, Tese de Doutorado, Florianópolis, Santa Catarina, 1994.

DIETER, G. **Engineering Design: a materials and processing approach** , second Edition, Mc-Graw - Hill International Editions, 1992.

FANG, X., D. **Experimental Investigation of Overall Machining Performances with Overall Progressive Tool Wear at Different Tool faces**, Wear, 173 (1994) 171 / 178.

FANG, X., D. and JAWAHIR, I. S. The Effects of Progressive Tool-Wear and Tool Restricted Contact on Chip Breakability in Machining, Wear, 160 (1993) 243 / 252.

JAWAHIR, I., E. et al. Recent Developments in chip Control Research and Applications, Annals of the CIRP, vol. 42 / 2 / 1993, pp. 659 / 693.

KUNIO UEHARA Automatic Tool Monitoring in NC Turning, Annals of CIRP, vol. 28.1, 1979.

AGAPIOU, J., S. The Optimization of Machining Operations Based on a Combined Criterion, Part 1: The use of Combined Objectives in Single, Transactions of the ASME - Journal of Manufacturing Science and Engineering, MAY 1992, vol. 114, pp. 186 / 192.

LIPSON and SHETH. Statistical Design and Analisis of Engineering experiments, Mc Graw Hill, 1973.

MINISTÉRIO DA INDUSTRIA E COMÉRCIO. Determinação das Características de Usinagem dos Materiais e Ferramentas de Procedência Nacional, na Operação de Torneamento Centro de Tecnologia da UNICAMP, Campinas, São Paulo, 1976.

NAKAYAMA, K. Comprehensive chip form classification based on the cutting mechanism, Annals of the CIRP, vol 4 / 1 / 1992.

NARDINI. Manual de programação, operação e exercícios aplicativos, Comando MCS, novembro de 1995.

OSTAFIEV, V., et al. Distribution of Cutting Tool Contact Loads Along Rake and Flank Surfaces, Annals of the CIRP, vol. 43 / 1994, pp. 55 / 58.

RAVINDRA, H., V. et al. Modelling of Tool Wear Based on Cutting Forces in Turning, Wear, 169 (1993) 25 / 32.

APÊNDICE A

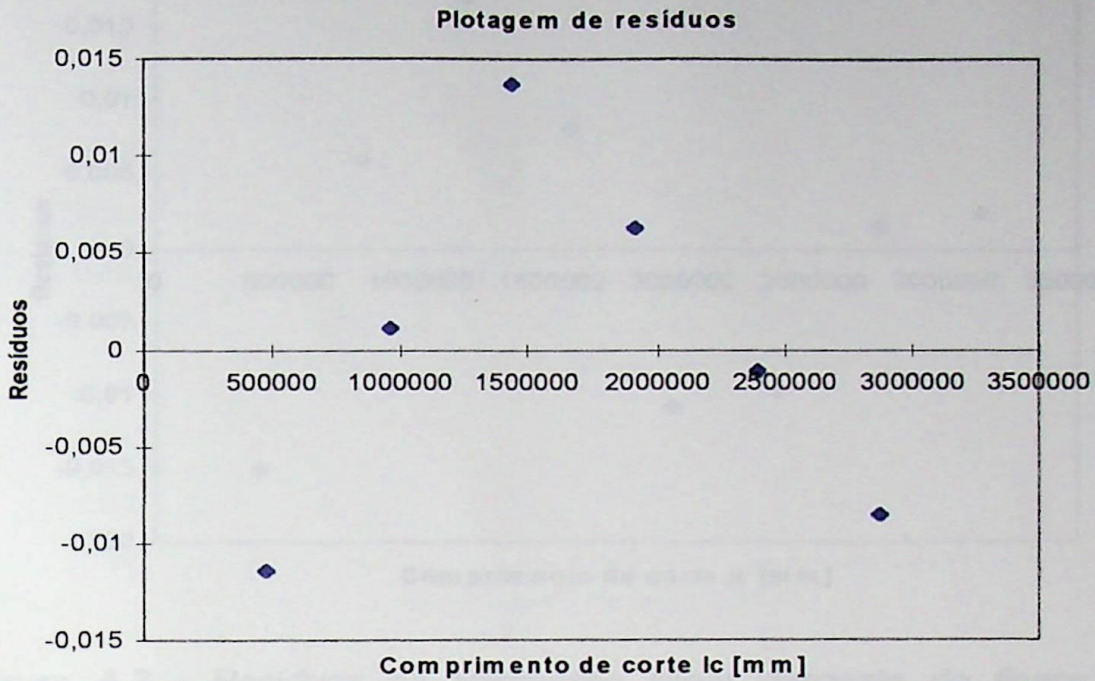


Figura A.1 - Resíduos da Regressão linear desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte l_c (1^o Ensaio - $v_f = 397,89$ mm/min, $v_c = 400$ m/min, $f = 0,15$ mm/rot. e $a_p = 0,5$ mm - Pastilha TCMT 11 02 04 - UR).

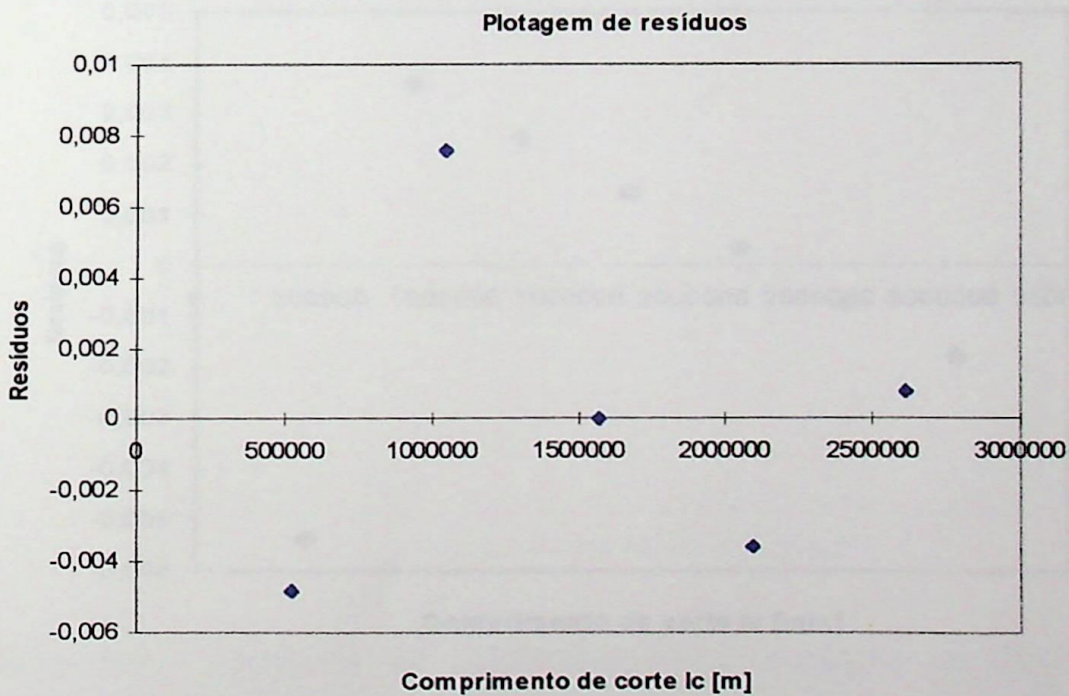


Figura A.2 - Resíduos da Regressão linear desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte l_c (2^o Ensaio - $v_f = 434,06$ mm/min, $v_c = 400$ m/min, $f = 0,15$ mm/rot. e $a_p = 0,5$ mm - Pastilha TCMT 11 02 04 - UR).

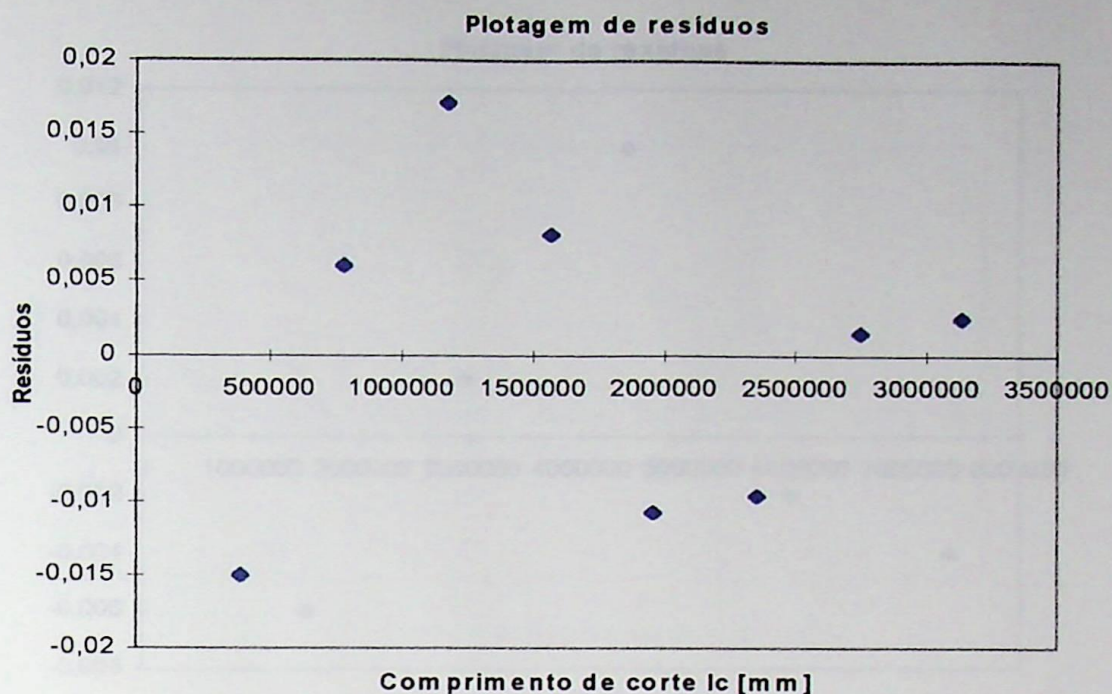


Figura A.3 - Resíduos da Regressão linear desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte l_c (3^o Ensaio - $v_f = 477,46$ mm/min, $v_c = 400$ m/min, $f = 0,15$ mm/rot. e $a_p = 0,5$ mm - Pastilha TCMT 11 02 04 - UR).

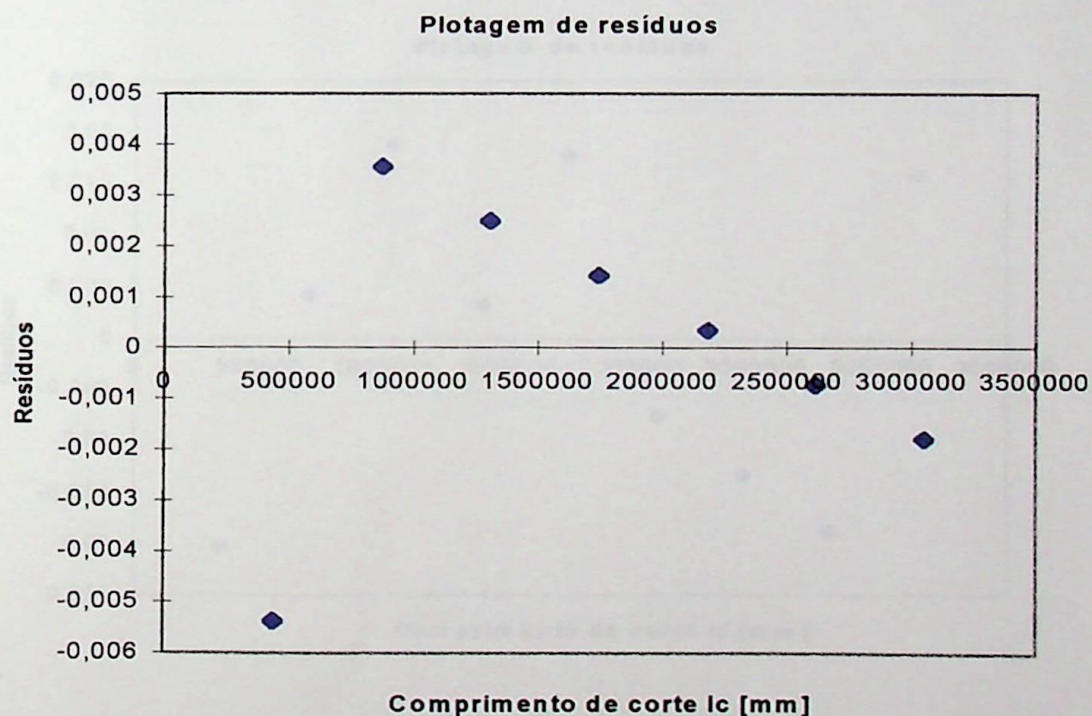


Figura A.4 - Resíduos da Regressão linear desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte l_c (4^o Ensaio - $v_f = 530,52$ mm/min, $v_c = 400$ m/min, $f = 0,15$ mm/rot. e $a_p = 0,5$ mm - Pastilha TCMT 11 02 04 - UR).

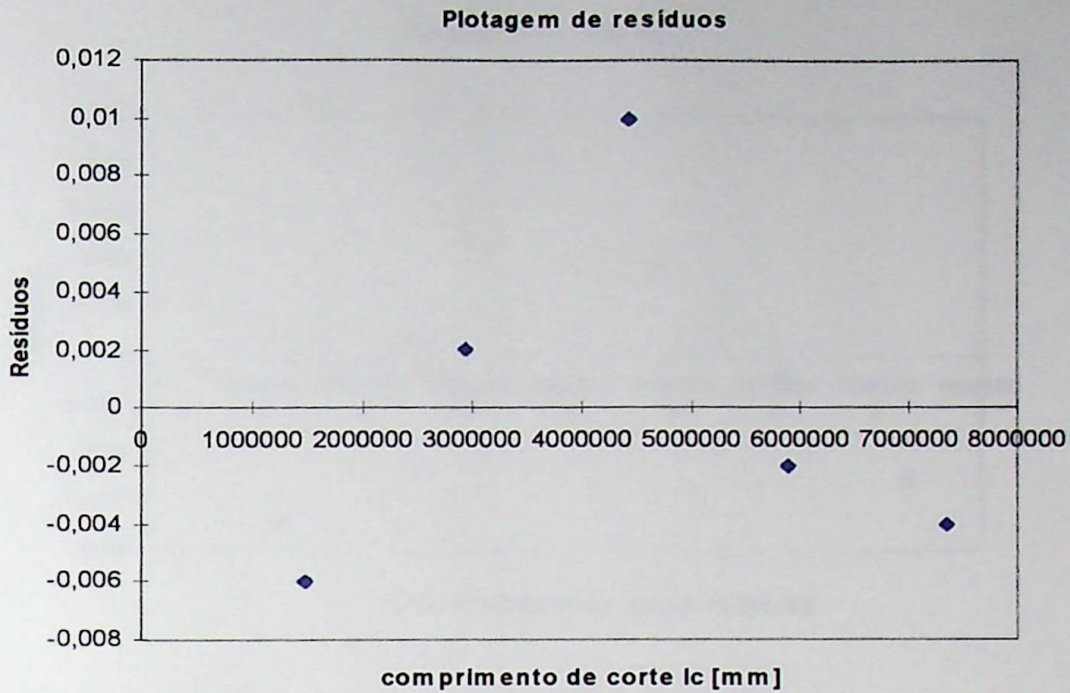


Figura A.5 - Resíduos da Regressão linear desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte l_c (5^o Ensaio - $v_f = 596,83$ mm/min, $v_c = 400$ m/min, $f = 0,15$ mm/rot. e $a_p = 0,5$ mm - Pastilha TCMT 11 02 04 - UR).

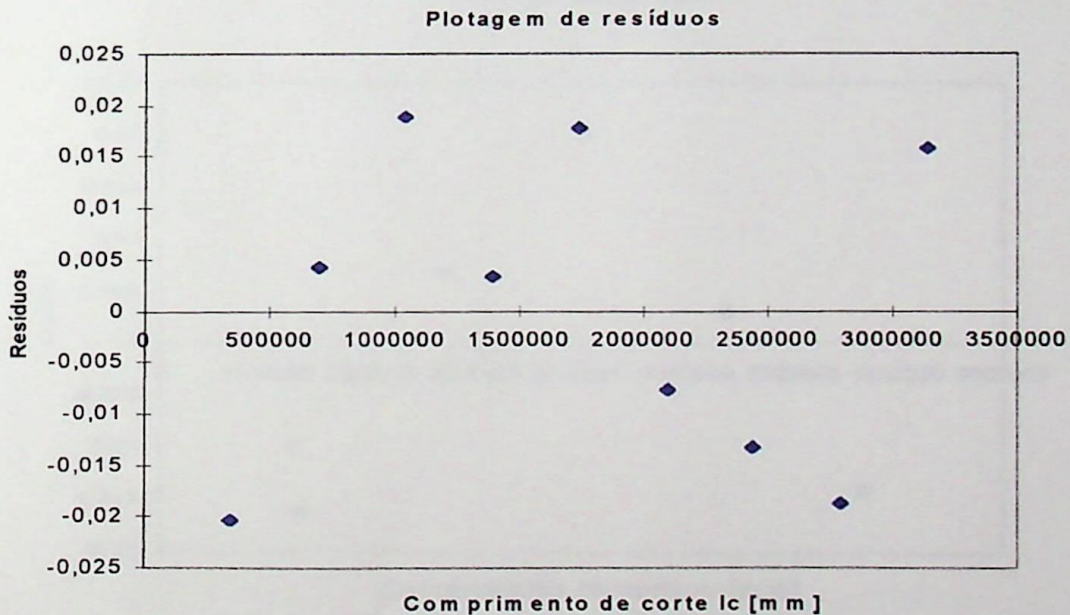


Figura A.6 - Resíduos da Regressão linear desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte l_c (1^o Ensaio - $v_f = 212,20$ mm/min, $v_c = 150$ m/min, $f = 0,20$ mm/rot. e $a_p = 1,5$ mm - Pastilha SPGN 09 03 04 - P30).

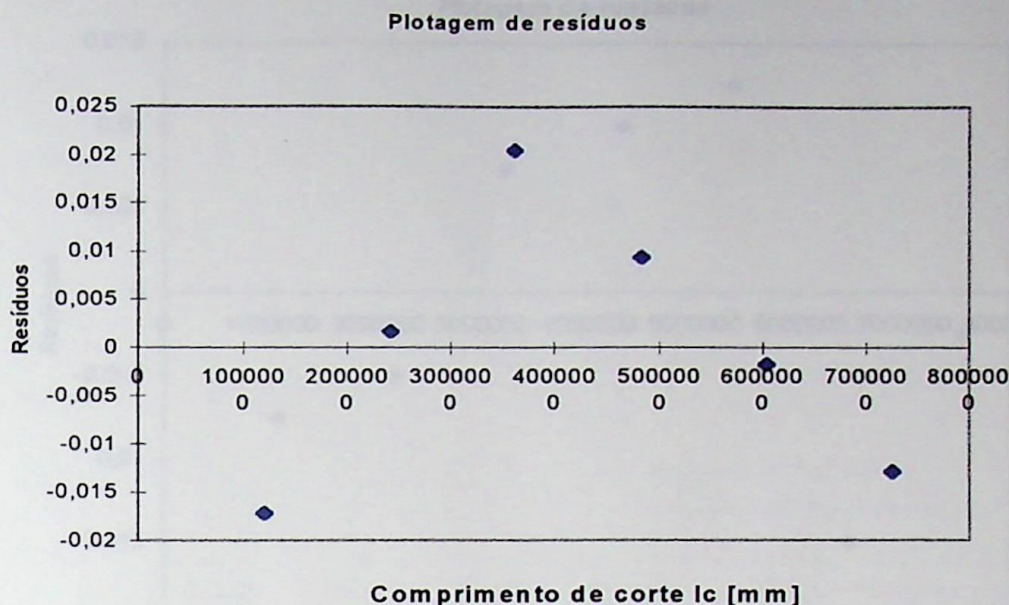


Figura A.7 - Resíduos da Regressão linear desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte l_c (2^o Ensaio - $v_f = 232,91$ mm/min, $v_c = 150$ m/min, $f = 0,20$ mm/rot. e $a_p = 1,5$ mm - Pastilha SPGN 09 03 04 - P30).

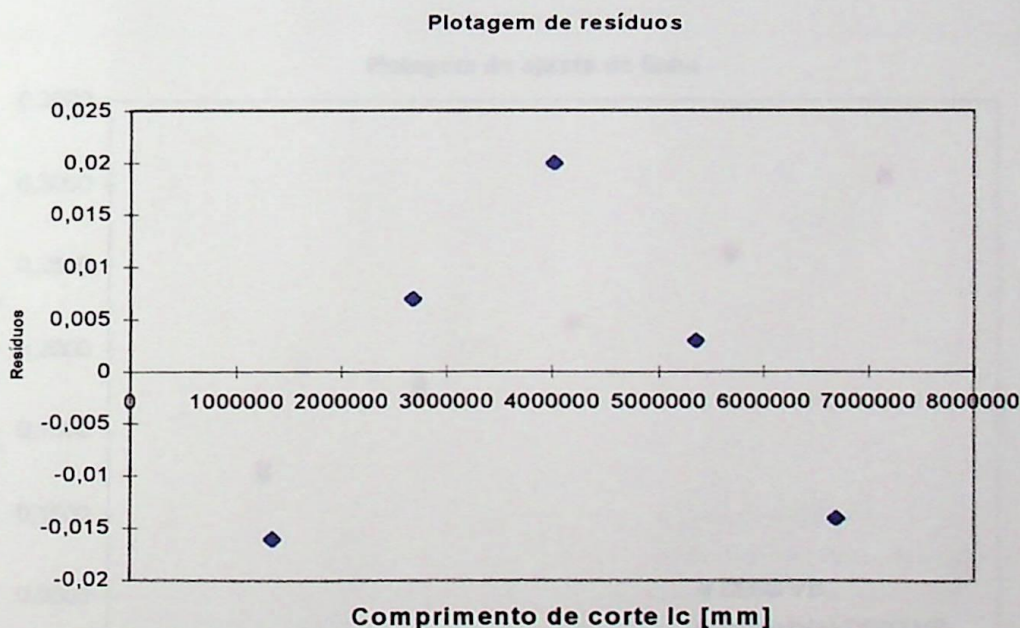


Figura A.8 - Resíduos da Regressão linear desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte l_c (3^o Ensaio - $v_f = 258,09$ mm/min, $v_c = 150$ m/min, $f = 0,20$ mm/rot. e $a_p = 1,5$ mm - Pastilha SPGN 09 03 04 - P30).

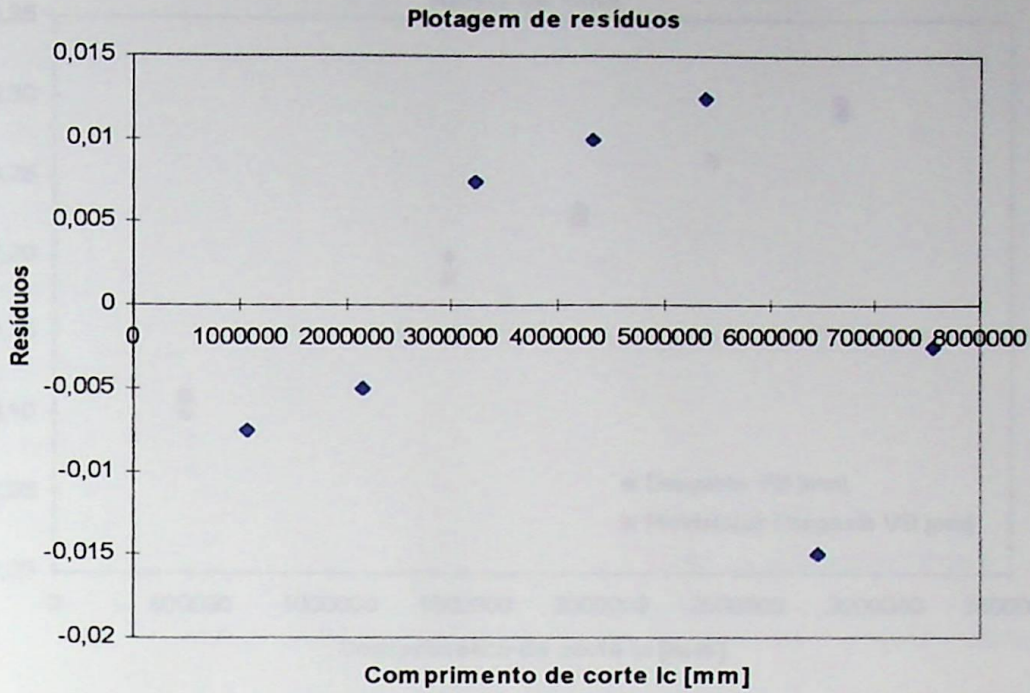


Figura A.9 - Resíduos da Regressão linear desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte l_c (4^o Ensaio - $v_f = 289,37$ mm/min, $v_c = 150$ m/min, $f = 0,20$ mm/rot. e $a_p = 1,5$ mm - Pastilha SPGN 09 03 04 - P30).

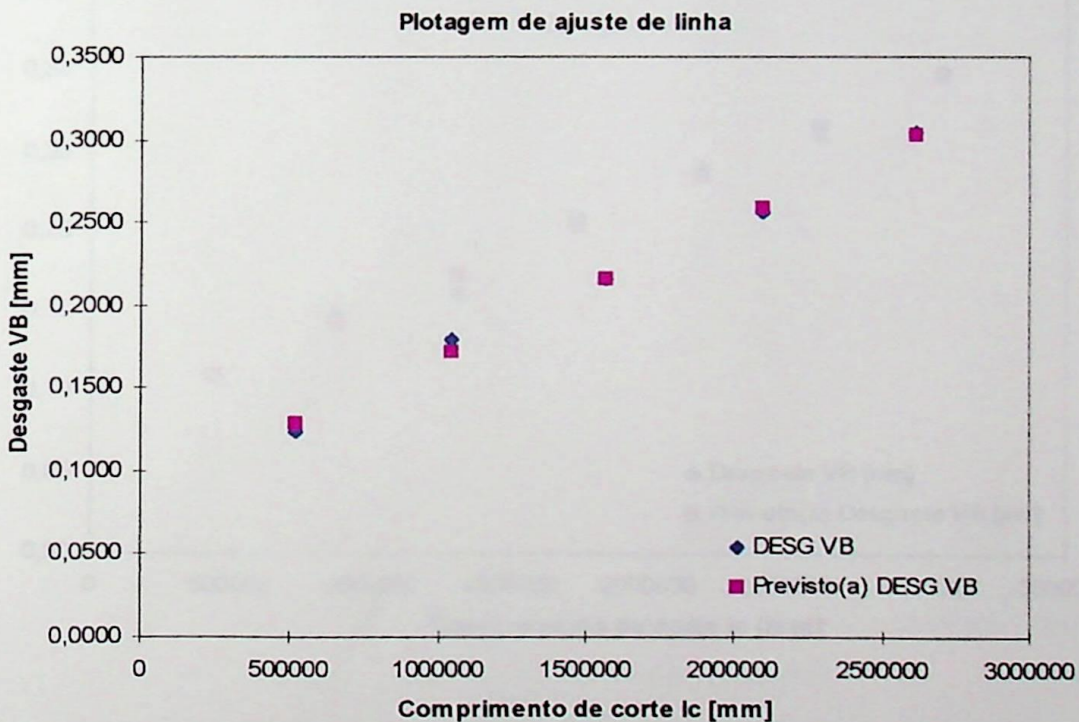


Figura A.10 - Ajuste de linha - desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte l_c (1^o Ensaio - $v_f = 397,89$ mm/min, $v_c = 400$ m/min, $f = 0,15$ mm/rot. e $a_p = 0,5$ mm - Pastilha TCMT 11 02 04 - UR).

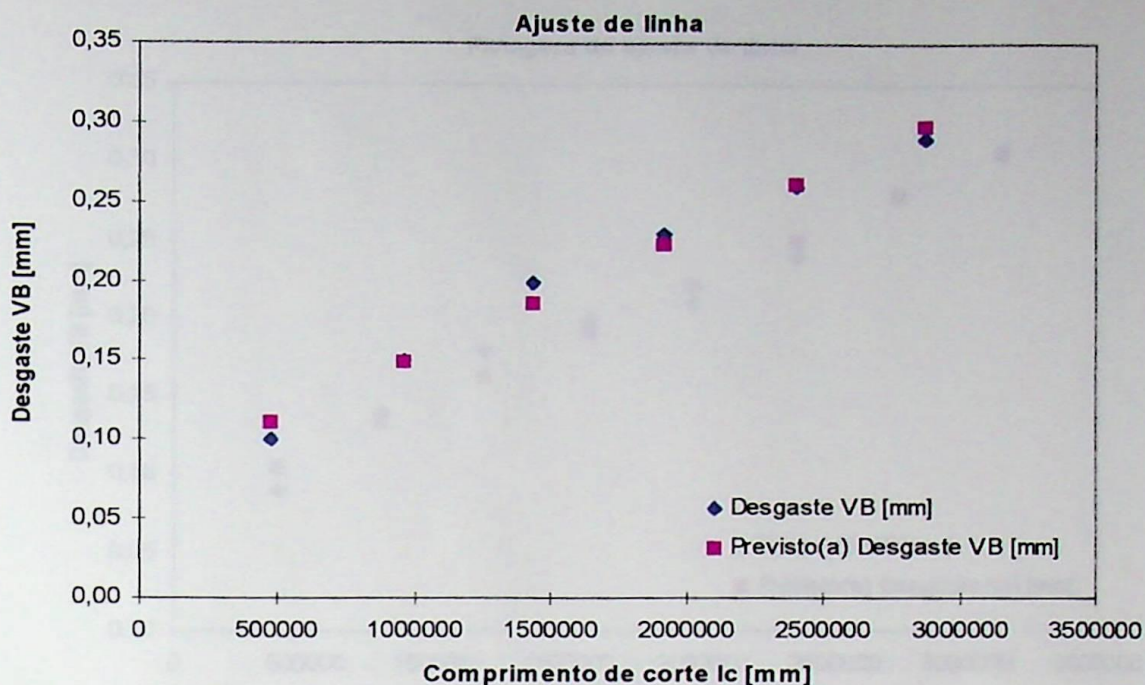


Figura A.11 - Ajuste de linha - desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte l_c (2º Ensaio - $v_f = 434,06$ mm/min, $v_c = 400$ m/min, $f = 0,15$ mm/rot. e $a_p = 0,5$ mm - Pastilha TCMT 11 02 04 - UR).

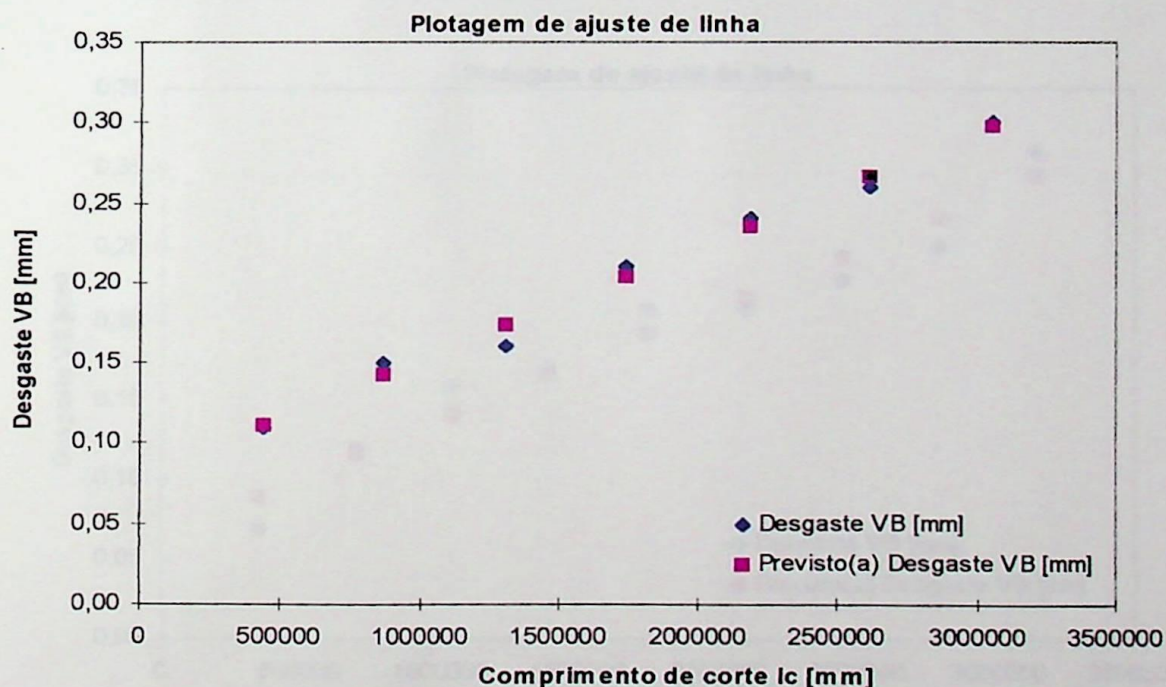


Figura A.12 - Ajuste de linha - desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte l_c (3º Ensaio - $v_f = 477,46$ mm/min, $v_c = 400$ m/min, $f = 0,15$ mm/rot. e $a_p = 0,5$ mm - Pastilha TCMT 11 02 04 - UR).

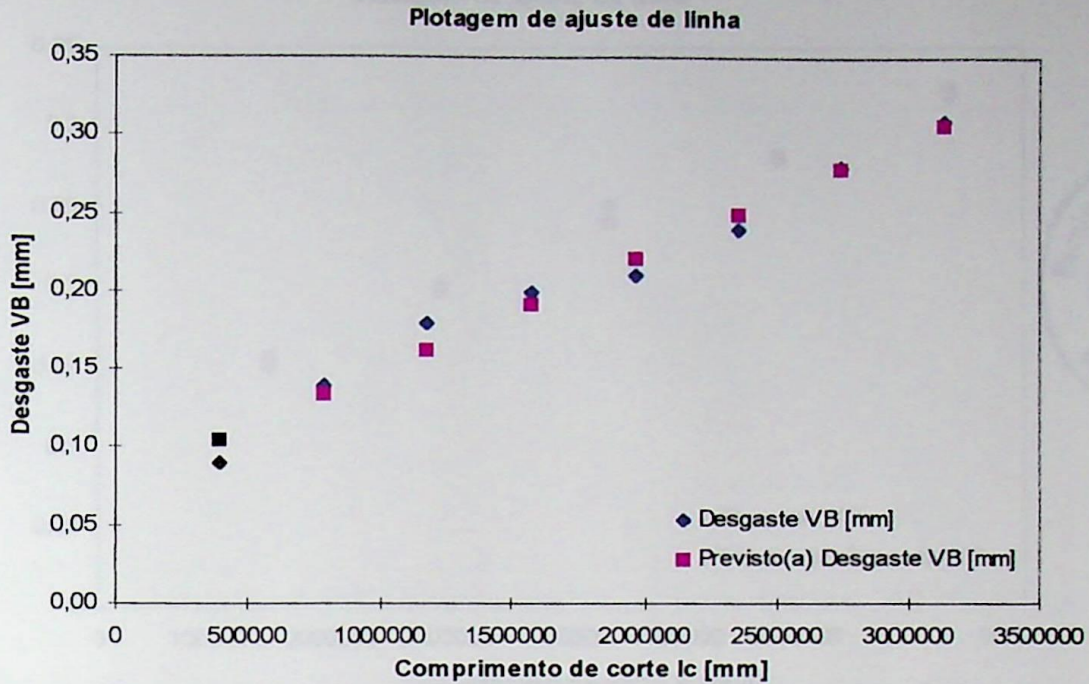


Figura A.13 - Ajuste de linha - desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte l_c (4^o Ensaio - $v_f = 530,52$ mm/min, $v_c = 400$ m/min, $f = 0,15$ mm/rot. e $a_p = 0,5$ mm - Pastilha TCMT 11 02 04 - UR).

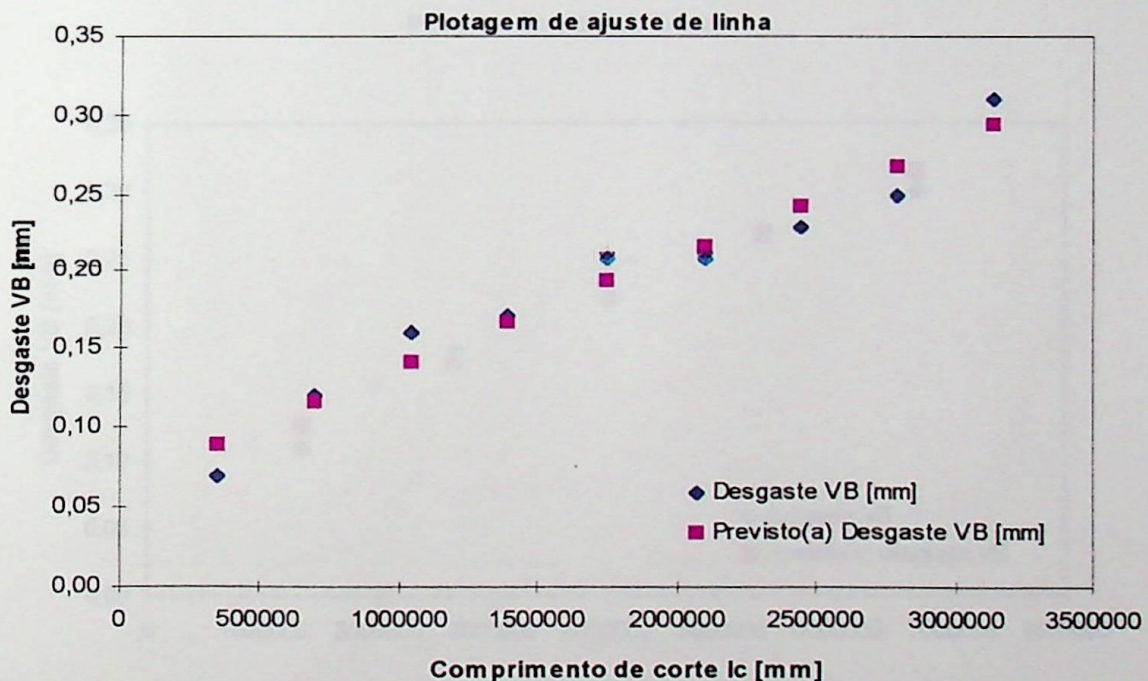


Figura A.14 - Ajuste de linha - desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte l_c (5^o Ensaio - $v_f = 596,83$ mm/min, $v_c = 400$ m/min, $f = 0,15$ mm/rot. e $a_p = 0,5$ mm - Pastilha TCMT 11 02 04 - UR).

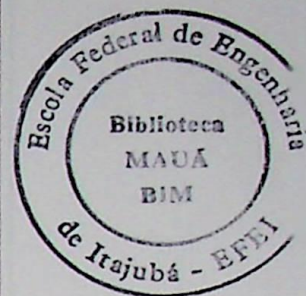
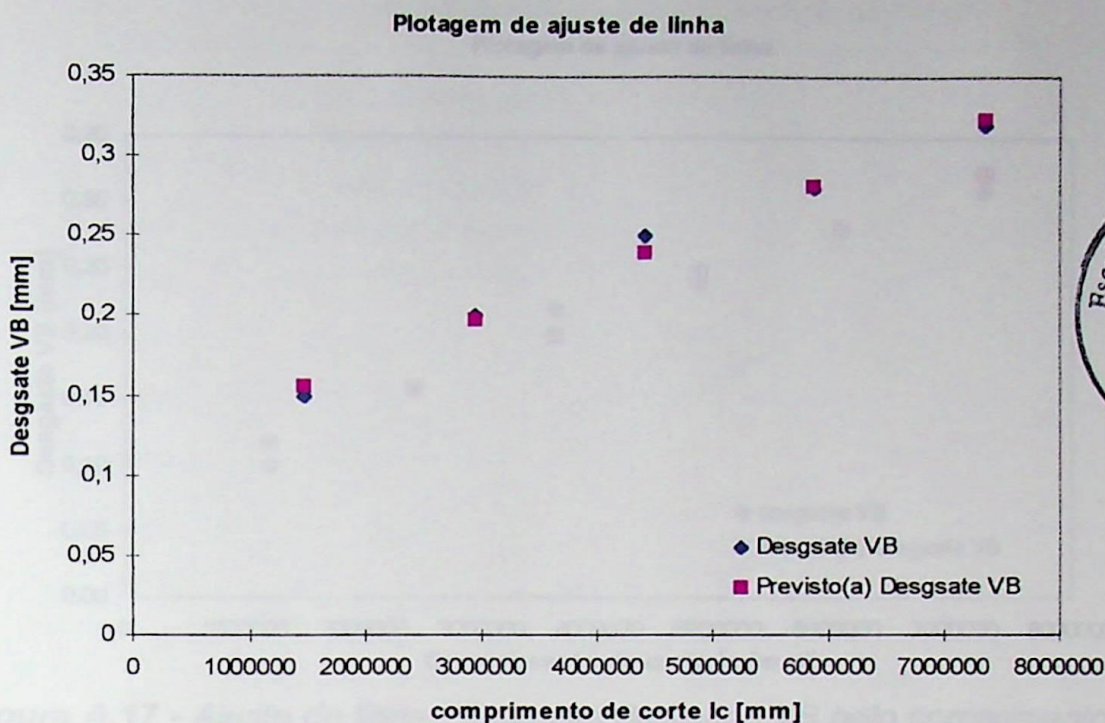


Figura A.15 - Ajuste de linha - desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte lc (1^o Ensaio - $vf = 212,20$ mm/min, $vc = 150$ m/min, $f = 0,20$ mm/rot. e $ap = 1,5$ mm - Pastilha SPGN 09 03 04 - P30).

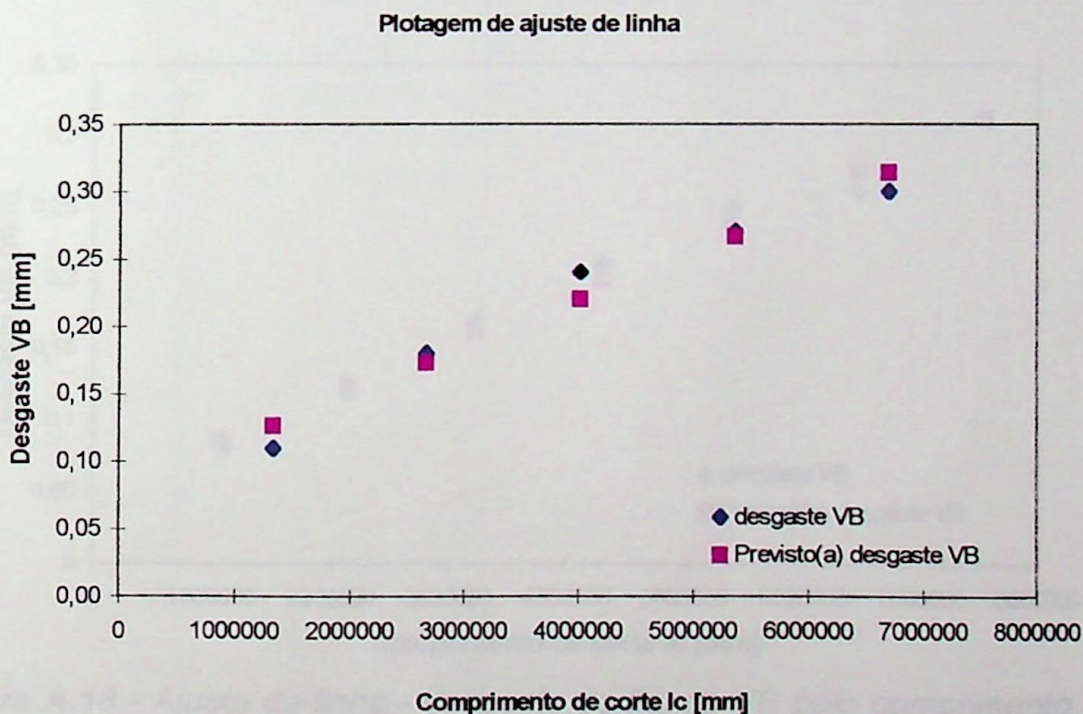


Figura A.16 - Ajuste de linha - desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte lc (2^o Ensaio - $vf = 232,90$ mm/min, $vc = 150$ m/min, $f = 0,20$ mm/rot. e $ap = 1,5$ mm - Pastilha SPGN 09 03 04 - P30).

Plotagem de ajuste de linha

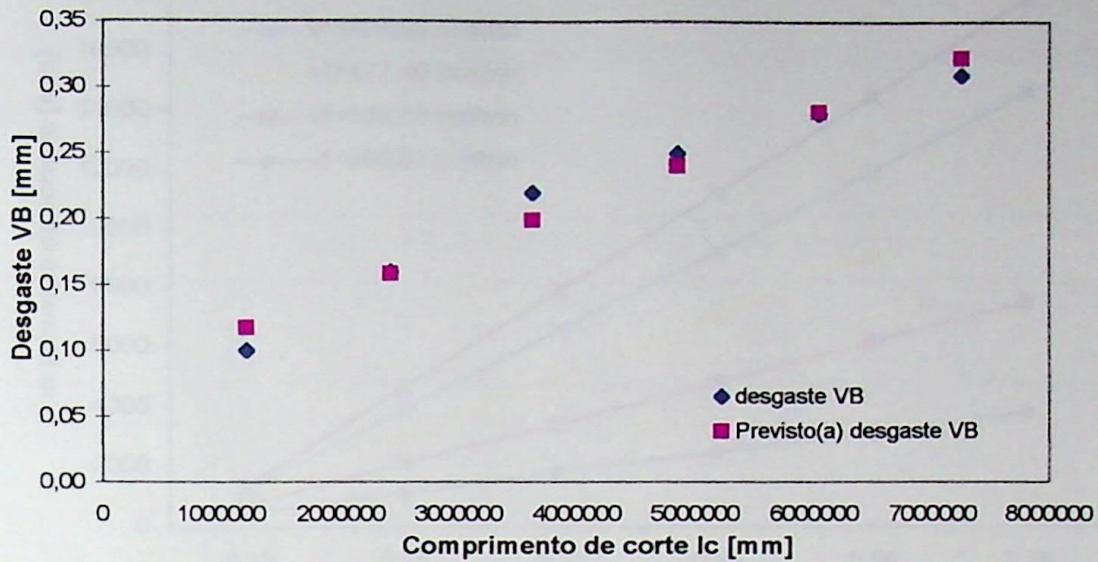


Figura A.17 - Ajuste de linha - desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte lc (3º Ensaio - $vf = 258,09$ mm/min, $vc = 150$ m/min, $f = 0,20$ mm/rot. e $ap = 1,5$ mm - Pastilha SPGN 09 03 04 - P30).

Plotagem de ajuste de linha

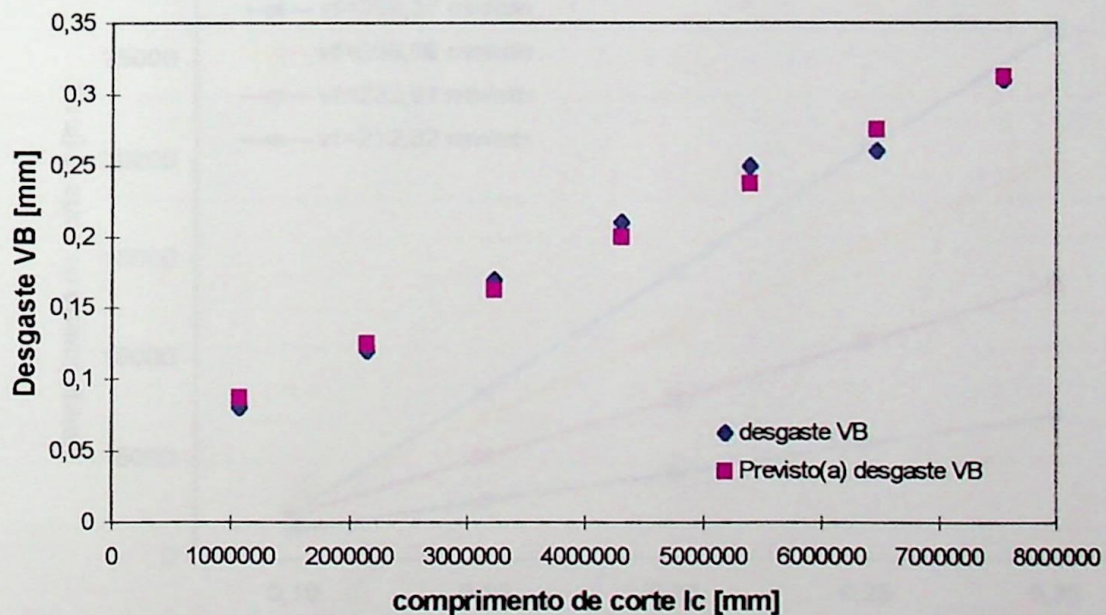


Figura A.18 - Ajuste de linha - desgaste de flanco VB pelo comprimento de corte lc (4º Ensaio - $vf = 289,37$ mm/min, $vc = 150$ m/min, $f = 0,20$ mm/rot. e $ap = 1,5$ mm - Pastilha SPGN 09 03 04 - P30).

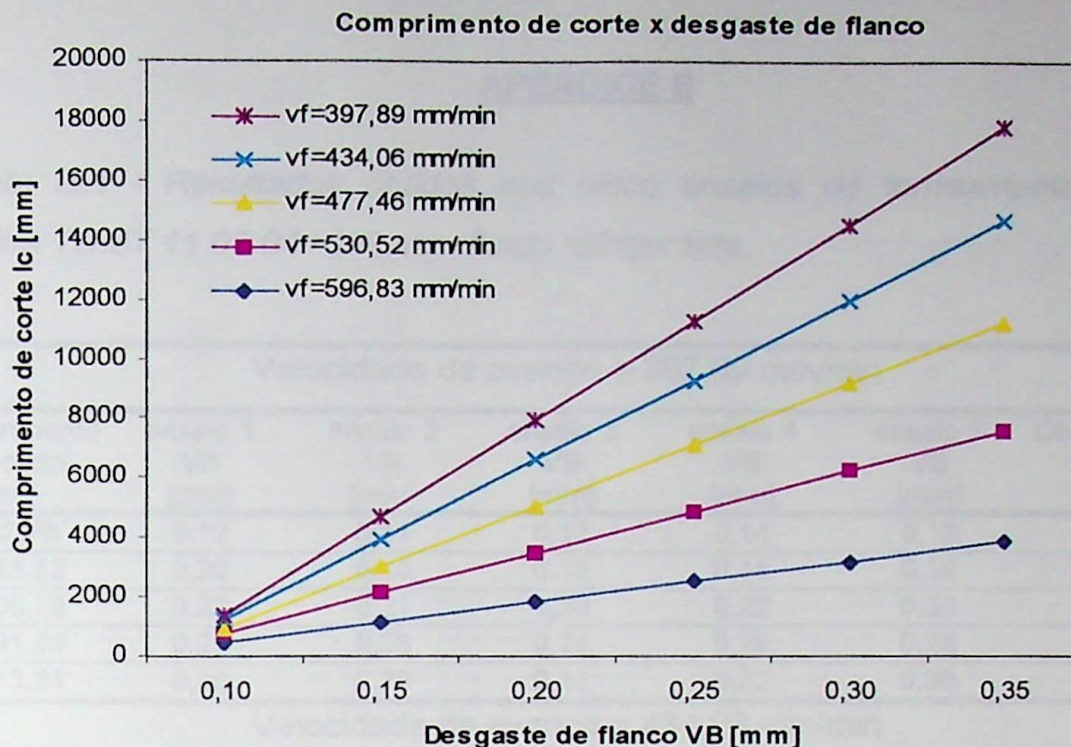


Figura A.19 - Comportamento das curvas linearizadas de velocidade de avanço utilizadas nos cinco ensaios realizados com a ferramenta TCMT 11 02 04 - UR sem fluido refrigerante.

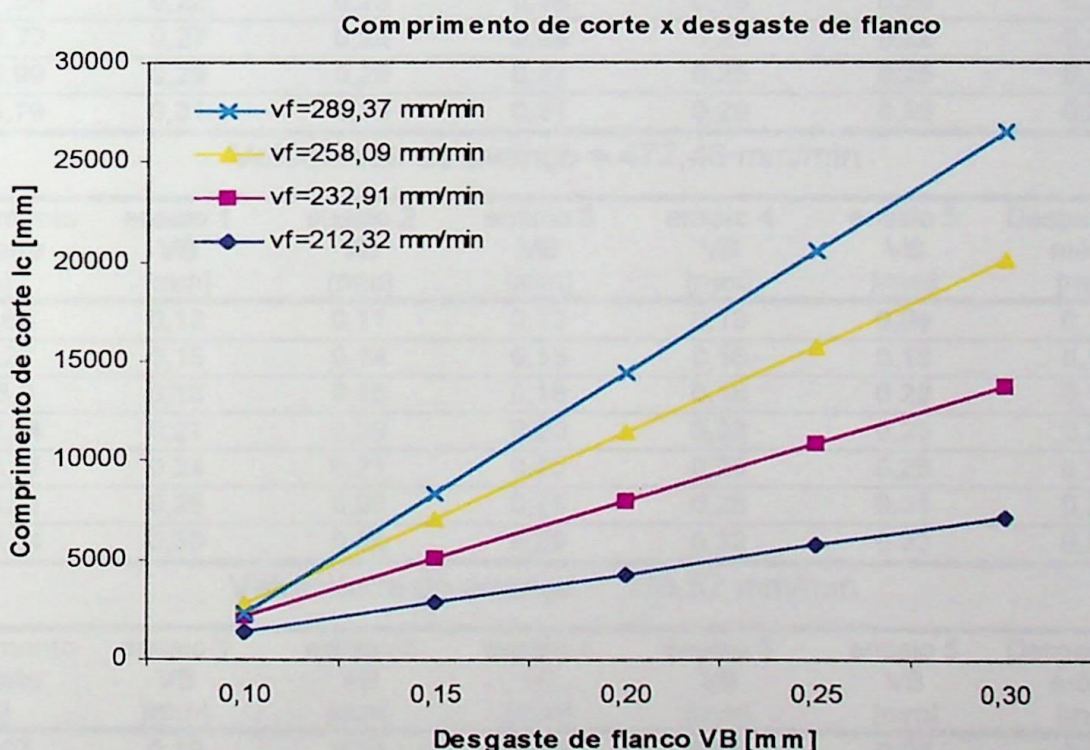


Figura A.20 - Comportamento das curvas linearizadas de velocidade de avanço utilizadas nos cinco ensaios realizados com a ferramenta SPGN 09 03 04 - P30 com fluido refrigerante.

APÊNDICE B

Tabela B.1 - Resultados obtidos nos cinco ensaios de torneamento com a pastilha TCMT 11 02 04 - UR sem fluido refrigerante.

Velocidade de avanço = 397,89 mm/min						
comprimento de corte [m]	ensaio 1 VB [mm]	ensaio 2 VB [mm]	ensaio 3 VB [mm]	ensaio 4 VB [mm]	ensaio 5 VB [mm]	Desgaste VB médio [mm]
522,76	0,12	0,11	0,13	0,14	0,12	0,12
1045,52	0,20	0,15	0,18	0,18	0,19	0,18
1568,28	0,22	0,21	0,20	0,22	0,23	0,21
2091,04	0,24	0,26	0,24	0,26	0,28	0,25
2613,81	0,30	0,29	0,31	0,32	0,30	0,30
Velocidade de avanço = 434,06 mm/min						
comprimento de corte [m]	ensaio 1 VB [mm]	ensaio 2 VB [mm]	ensaio 3 VB [mm]	ensaio 4 VB [mm]	ensaio 5 VB [mm]	Desgaste VB médio [mm]
479,2	0,10	0,10	0,09	0,12	0,11	0,10
958,4	0,15	0,19	0,14	0,15	0,14	0,15
1437,59	0,22	0,22	0,18	0,18	0,20	0,20
1916,79	0,27	0,25	0,24	0,20	0,22	0,23
2395,99	0,29	0,28	0,27	0,25	0,25	0,26
2875,19	0,31	0,30	0,31	0,29	0,28	0,29
Velocidade de avanço = 477,46 mm/min						
comprimento de corte [m]	ensaio 1 VB [mm]	ensaio 2 VB [mm]	ensaio 3 VB [mm]	ensaio 4 VB [mm]	ensaio 5 VB [mm]	Desgaste VB médio [mm]
435,63	0,12	0,11	0,12	0,13	0,09	0,11
871,27	0,15	0,14	0,15	0,16	0,18	0,15
1306,9	0,18	0,16	0,18	0,18	0,22	0,18
1742,54	0,21	0,20	0,20	0,22	0,25	0,21
2178,17	0,24	0,21	0,25	0,26	0,28	0,24
2613,81	0,28	0,26	0,25	0,28	0,31	0,27
3049,44	0,30	0,28	0,29	0,32	0,33	0,30
Velocidade de avanço = 530,52 mm/min						
comprimento de corte [m]	ensaio 1 VB [mm]	ensaio 3 VB [mm]	ensaio 4 VB [mm]	ensaio 5 VB [mm]	ensaio 5 VB [mm]	Desgaste VB médio [mm]
392,07	0,10	0,11	0,06	0,10	0,08	0,09
784,14	0,12	0,15	0,15	0,13	0,17	0,14
1176,21	0,16	0,16	0,22	0,20	0,18	0,18
1568,28	0,18	0,20	0,22	0,18	0,22	0,20
1960,35	0,20	0,21	0,22	0,21	0,23	0,21
2352,42	0,23	0,23	0,25	0,25	0,24	0,24
2744,5	0,28	0,29	0,27	0,26	0,30	0,28
3136,57	0,30	0,31	0,30	0,32	0,33	0,31

Tabela B.1 - Continuação

Velocidade de avanço = 596,83 mm/min						
comprimento de corte [m]	ensaio 1 VB [mm]	ensaio 2 VB [mm]	ensaio 3 VB [mm]	ensaio 4 VB [mm]	ensaio 5 VB [mm]	Desgaste VB médio [mm]
348,51	0,08	0,05	0,07	0,07	0,08	0,07
697,01	0,15	0,10	0,13	0,11	0,11	0,12
1045,52	0,15	0,18	0,14	0,16	0,16	0,16
1394,03	0,17	0,20	0,15	0,17	0,16	0,17
1742,54	0,18	0,20	0,22	0,23	0,20	0,21
2091,04	0,20	0,21	0,22	0,24	0,20	0,21
2439,55	0,23	0,22	0,24	0,25	0,21	0,23
2788,06	0,25	0,25	0,24	0,27	0,24	0,25
3136,57	0,31	0,30	0,31	0,32	0,32	0,31

Tabela B.2 - Resultados obtidos nos quatro ensaios de torneamento com a pastilha SPGN 09 03 04 - P30 com fluido refrigerante.

Velocidade de avanço = 212,21 mm/min				
Comprimento de corte l_c [m]	ensaio 1 VB [mm]	ensaio 2 VB [mm]	ensaio 3 VB [mm]	Desgaste VB médio [mm]
1470,27	0,14	0,15	0,17	0,15
2940,53	0,18	0,23	0,21	0,20
4410,8	0,24	0,26	0,27	0,25
5881,06	0,28	0,29	0,29	0,28
7351,33	0,33	0,32	0,33	0,32

Velocidade de avanço = 232,91 mm/min				
Comprimento de corte l_c [m]	ensaio 1 VB [mm]	ensaio 2 VB [mm]	ensaio 3 VB [mm]	Desgaste VB médio [mm]
1339,58	0,11	0,13	0,10	0,11
2679,15	0,18	0,17	0,19	0,18
4018,73	0,24	0,24	0,25	0,24
5358,3	0,29	0,27	0,26	0,27
6697,88	0,31	0,30	0,31	0,30

Velocidade de avanço = 258,09 mm/min				
Comprimento de corte l_c [m]	ensaio 1 VB [mm]	ensaio 2 VB [mm]	ensaio 3 VB [mm]	Desgaste VB médio [mm]
1208,88	0,09	0,10	0,12	0,10
2417,77	0,16	0,16	0,18	0,16
3626,65	0,21	0,22	0,23	0,22
4835,54	0,24	0,25	0,26	0,25
6044,42	0,29	0,28	0,27	0,28
7253,31	0,32	0,33	0,30	0,31

Tabela B.2 - Continuação

Velocidade de avanço = 289,37 mm/min				
Comprimento de corte l_c [m]	ensaio 1 VB [mm]	ensaio 2 VB [mm]	ensaio 3 VB [mm]	Desgaste VB médio [mm]
1078,19	0,09	0,07	0,10	0,08
2156,39	0,12	0,13	0,11	0,12
3234,58	0,15	0,17	0,20	0,17
4312,78	0,22	0,21	0,22	0,21
5390,97	0,24	0,27	0,25	0,25
6469,17	0,28	0,25	0,27	0,26
7547,36	0,32	0,30	0,32	0,31

Tabela B.3 - Quadro de análise de variância (1^o Ensaio - $v_f = 397,89$ mm/min, $v_c = 400$ m/min, $f = 0,15$ mm/rot. e $a_p = 0,5$ mm - Pastilha TCMT 11 02 04 - UR).

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	Função F
Regressão	1	0,019009	0,019	604,12
Resíduo	3	9,4399 E -5	3,1466 E -5	
Total	4	0,019104		

Coeficiente de explicação	Valores	Coeficientes da reta	Valores	Erro padrão
R ² quadrado	0,99	A	0,08520033	0,00588326
R ² quadrado	0,99	B	8,34032 E -8	3,3933 E -9
Erro padrão	0,0056			

Tabela B.4 - Quadro de análise de variância (2^o Ensaio – $vf = 434,06$ mm/min, $vc = 400$ m/min, $f = 0,15$ mm/rot. e $ap = 0,5$ mm - Pastilha TCMT 11 02 04 - UR).

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	Função F
Regressão	1	0,02595862	0,02595862	349,15
Resíduo	4	0,00029736	7,3446 E -5	
Total	5	0,026256		

Coeficiente de explicação	Valores	Coeficientes da reta	Valores	Erro padrão
R ² quadrado	0,98	A	0,080519993	0,00802704
R ² quadrado	0,98	B	8,0172 E -9	4,3013 E -9
Erro padrão	0,0086			

Tabela B.5 - Quadro de análise de variância (3^o Ensaio – $vf = 477,46$ mm/min, $vc = 400$ m/min, $f = 0,15$ mm/rot. e $ap = 0,5$ mm - Pastilha TCMT 11 02 04 - UR).

Fonte de variação	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	Função F
Regressão	1	0,02728119	0,02728129	1573,13
Resíduo	5	8,671 E -5	1,7342 E -5	
Total	6	0,027368		

Coeficiente de explicação	Valores	Coeficientes da reta	Valores	Erro padrão
R ² quadrado	0,99	A	0,07914305	0,003351953
R ² quadrado	0,99	B	7,5652 E - 8	1,8065 E -9
Erro padrão	0,0041			

Tabela B.6 - Quadro de análise de variância (4^o Ensaio – $vf = 530,52$ mm/min, $vc = 400$ m/min, $f = 0,15$ mm/rot. e $ap = 0,5$ mm - Pastilha TCMT 11 02 04 - UR).

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	Função F
Regressão	1	0,03474439	0,03474439	213,67
Resíduo	6	0,00097561	0,0001626	
Total	7	0,03572		

Coeficiente de explicação	Valores	Coeficientes da reta	Valores	Erro padrão
R ² quadrado	0,97	A	0,07857171	0,00993592
R ² quadrado	0,96	B	7,5359 E -8	5,0185 E -9
Erro padrão	0,0127			

Tabela B.7- Quadro de análise de variância (5^o Ensaio – $vf = 596,83$ mm/min, $vc = 400$ m/min, $f = 0,15$ mm/rot. e $ap = 0,5$ mm - Pastilha TCMT 11 02 04 - UR).

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	Função F
Regressão	1	0,03983527	0,03983527	158,41
Resíduo	7	0,00176029	0,00025147	
Total	8	0,04159556		

Coeficiente de explicação	Valores	Coeficientes da reta	Valores	Erro padrão
R ² quadrado	0,95	A	0,0633801	0,01152041
R ² quadrado	0,95	B	7,3934 E -8	5,8743 E -9
Erro padrão	0,0158			

Tabela B.8 - Quadro de análise de variância (1^o Ensaio – $vf = 212,21$ m/min, $vc = 150$ m/min, $f = 0,20$ mm/rot. e $ap = 1,5$ mm - Pastilha SPGN 09 03 04 - P30).

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	Função F
Regressão	1	0,01820444	0,01820444	267,12
Resíduo	3	0,00020444	6,814 E -5	
Total	4	0,01840889		

Coeficiente de explicação	Valores	Coeficientes da reta	Valores	Erro padrão
R ² quadrado	0,98	A	0,11799991	0,00865813
R ² quadrado	0,98	B	2,902 E -9	1,7755 E -9
Erro padrão	0,0082			

Tabela B.9 - Quadro de análise de variância (2^o Ensaio - $vf = 232,91$ m/min, $vc = 150$ m/min, $f = 0,20$ mm/rot. e $ap = 1,5$ mm - Pastilha SPGN 09 03 04 - P30).

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	Função F
Regressão	1	0,02304	0,02304	88,36
Resíduo	3	0,00078222	0,00026074	
Total	4	0,02382222		

Coeficiente de explicação	Valores	Coeficientes da reta	Valores	Erro padrão
R ² quadrado	0,96	A	0,0933323	0,01693564
R ² quadrado	0,95	B	3,0832 E -8	3,8119 E -9
Erro padrão	0,0161			

Tabela B.10 - Quadro de análise de variância (3^o Ensaio - $v_f = 258,09$ m/min, $v_c = 150$ m/min, $f = 0,20$ mm/rot. e $a_p = 1,5$ mm - Pastilha SPGN 09 03 04 - P30).

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	Função F
Regressão	1	0,02304	0,02304	88,36
Resíduo	3	0,00078222	0,00026074	
Total	4	0,02382222		

Coeficiente de explicação	Valores	Coeficientes da reta	Valores	Erro padrão
R ² quadrado	0,96	A	0,07933323	0,01693564
R ² quadrado	0,95	B	3,3952 E -8	3,8119 E -9
Erro padrão	0,0161			

Tabela B.11 - Quadro de análise de variância (4^o Ensaio - $v_f = 289,37$ m/min, $v_c = 150$ m/min, $f = 0,20$ mm/rot. e $a_p = 1,5$ mm - Pastilha SPGN 09 03 04 - P30).

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	Função F
Regressão	1	0,02948587	0,022948587	153,61
Resíduo	3	0,00076783	0,00019196	
Total	4	0,0302537		

Coeficiente de explicação	Valores	Coeficientes da reta	valores	Erro padrão
R ² quadrado	0,97	A	0,05311124	0,01289817
R ² quadrado	0,96	B	3,4895 E -8	2,7397 E -9
Erro padrão	0,0138			

Tabela B.12 - Valores de rugosidade para os ensaios realizados com a pastilha TCMT 11 02 04 - UR sem fluido refrigerante - Ponto A .

Comprimento de corte l_c [m]	Rmax Ponto A 397,89mm/mim	Rmax Ponto A 434,06 mm/min	Rmax Ponto A 477,46 mm/min	Rmax Ponto A 530,52mm/min	Rmax Ponto A 596,83mm/min
0,00	10,10	11,10	9,90	9,70	9,80
348,51					11,20
392,07				11,10	
435,63			12,80		
479,20		13,10			
522,76	13,90				
697,01					12,90
784,14				12,50	
871,27			13,10		
958,40		14,00			
1045,32					17,90
1045,32	15,80				
1045,52					
1176,21				15,70	
1306,90			15,40		
1394,03					21,10
1437,59		21,10			
1568,28	22,10			17,80	
1742,54					25,30
1742,54			18,40		
1916,79		23,20			
1960,35				19,60	
2091,04					26,90
2091,04	27,40				
2178,17			22,30		
2352,42				19,50	
2395,99		24,30			
2439,55					29,20
2613,81			22,20		
2613,84	31,10				
2744,50				22,10	
2788,06					29,90
2875,19		26,70			
3049,44			23,30		
3136,57				23,10	

Tabela B.13 - Valores de rugosidade para os ensaios realizados com a pastilha TCMT 11 02 04 - UR sem fluido refrigerante - Ponto B .

Comprimento de corte l_c [m]	Rmax Ponto B 397,89mm/mim	Rmax Ponto B 434,06 mm/min	Rmax Ponto B 477,46 mm/min	Rmax Ponto B 530,52mm/min	Rmax Ponto B 596,83mm/min
0,00	11,10	12,10	10,10	9,90	9,90
348,51					10,90
392,07				10,10	
435,63			12,10		
479,20		14,40			
522,76	14,30				
697,01					13,40
784,14				12,30	
871,27			13,80		
958,40		14,80			
1045,32					16,50
1045,32	16,70				
1045,52					
1176,21				14,30	
1306,90			14,80		
1394,03					20,30
1437,59		18,80			
1568,28	19,00			16,10	
1742,54					24,30
1742,54			17,20		
1916,79		21,90			
1960,35				17,80	
2091,04					25,10
2091,04	26,30				
2178,17			20,20		
2352,42				18,10	
2395,99		23,90			
2439,55					27,00
2613,81			21,80		
2613,84	29,90				
2744,50				20,10	
2788,06					28,10
2875,19		25,40			
3049,44			22,10		
3136,57				22,30	

Tabela B.15 - Valores de rugosidade para os ensaios realizados com a pastilha SPGN 09 03 04 - P30 com fluido refrigerante - Ponto B .

Comprimento de corte l_c [mm]	Rmax Ponto B 212,21mm/min	Rmax Ponto B 232,91mm/min	Rmax Ponto B 258,09mm/min	Rmax Ponto B 289,37mm/min
1078,19				20,10
1208,88			19,90	
1339,58		21,40		
1470,27	18,10			
2158,39				21,10
2417,77			25,10	
2679,15		25,10		
2940,53	23,10			
3234,58				25,70
3626,65			29,10	
4018,73		30,30		
4312,78				26,50
4410,80	31,10			
4835,54			31,10	
5358,70		33,10		
5390,97				27,30
5881,06	31,90			
6044,42			33,20	
6469,17				30,10
6697,88		37,90		
7253,31			30,30	
7351,83	37,30			
7547,36				33,20

Tabela B.16 - Valores do consumo de potência do do motor principal da máquina para os ensaios realizados com a pastilha TCMT 11 02 04 - UR.

Nº de	Desgaste	Potência kW	Potência Kw	Potência kW	Potência kW	Potência kW
		397,89	434,06	477,46	530,52	596,83
C.P.	VB [mm]	[mm/min]	[mm/min]	[mm/min]	[mm/min]	[mm/min]
1	0,00	3,423	3,478	3,404	3,264	3,293
8	0,07					3,378
8	0,09				3,353	
8	0,11			3,101		
8	0,10		3,494			
8	0,12	3,431				
16	0,13					3,344
16	0,14				3,436	
16	0,16			3,211		
16	0,15		3,536			
16	0,18	3,457				
24	0,16					3,367
24	0,19				3,389	
24	0,18			3,334		
32	0,17					3,424
24	0,20		3,569			
24	0,22	3,497				
32	0,20				3,373	
32	0,22			3,456		
40	0,20					3,344
32	0,24		3,523			
40	0,21				3,461	
32	0,26	3,512				
48	0,21					3,375
40	0,25			3,518		
48	0,24				3,519	
40	0,27		3,597			
56	0,23					3,539
40	0,30	3,499				
48	0,28			3,597		
56	0,28				3,567	
64	0,25					3,514
48	0,30		3,613			
56	0,30			3,612		
64	0,31				3,611	
72	0,31					3,502

Tabela B.17 - Valores do consumo de potência do motor principal da máquina para os ensaios realizados com a pastilha SPGN 09 03 04 - P30.

Nº de C.P.	Desgaste VB [mm]	Potência kW Vaf = 212,21 mm/min	Potência kW Vaf = 232,91 mm/min	Potência kW Vaf = 258,09 mm/min	Potência kW Vaf = 289,37 mm/min
1	0,00	3,397	3,749	3,675	3,312
32	0,09				3,369
32	0,11			3,725	
32	0,10		4,097		
32	0,12	3,408			
64	0,14				3,459
64	0,16			3,912	
64	0,15		3,948		
64	0,18	3,405			
96	0,19				3,553
96	0,18			4,210	
96	0,20		3,999		
96	0,22	3,514			
128	0,20				3,545
128	0,22			4,001	
128	0,24		4,010		
160	0,21				3,512
128	0,26	3,634			
160	0,25			3,969	
192	0,24				3,521
160	0,27		4,041		
160	0,30	3,682			
192	0,28			3,972	
192	0,28				3,587
192	0,30		4,092		
224	0,31				3,606

EFEI / BIBLIOTECA

ESTE LIVRO DEVE SER DEVOLVIDO NA

ÚLTIMA DATA CARIMBADA.

18.10.98		
20/01/99		
24.3.99		
08/04/99		
10.5.99		
15.6.99		
23.6.99		
13.7.99		
13/08/99		
28.9.99		
27.10.99		
10.11.99		
20.3.2000		
29/03/2000		
05.7.2000		
24/07/00		

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
8200963



NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA