

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO

Comparação da Performance de Fresas de Topo de Metal Duro e Coronite no Fresamento de Aço 1045

Autor: Alessandra Bernardis Rosa

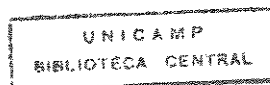
Orientador: Anselmo Eduardo Diniz

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Materiais e Processos

Dissertação de Mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 1999
S.P. – Brasil



8920434

DATA:	BC
CHAMADA:	UNICAMP
Ex:	
GO 90/	37623
C	229/99
	D ☒
CO RB	11,00
	07/05/99
CPD	

CM-00123007-5

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

R71c Rosa, Alessandra Bernardis
 Comparação da performance de fresas de topo de metal duro e coronite no fresamento de aço 1045 / Alessandra Bernardis Rosa.--Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientador: Anselmo Eduardo Diniz
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

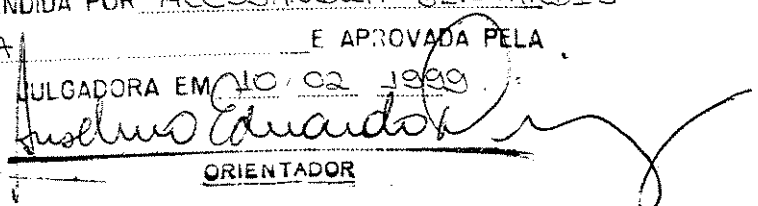
1. Usinagem. 2. Fresagem (Trabalhos em metal). 3. Fresas. 4. Máquinas – Monitoração. 5. Vibração. I. Diniz, Anselmo Eduardo. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

EXEMPLAR CORRETO

DEFENDIDA POR ALESSANDRA BERNARDIS

SA E APROVADA PELA

SÃO JULGADORA EM 10/02/1999


ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Comparação da Performance de Fresas de Topo de Metal Duro e Coronite no Fresamento de Aço 1045

Autor: Alessandra Bernardis Rosa

Orientador: Anselmo Eduardo Diniz

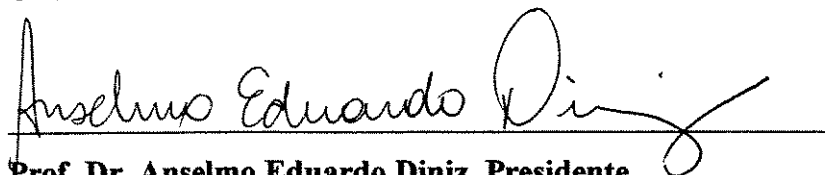
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO

Dissertação de Mestrado

**Comparação da Performance de Fresas de
Topo de Metal Duro e Coronite no
Fresamento de Aço 1045**

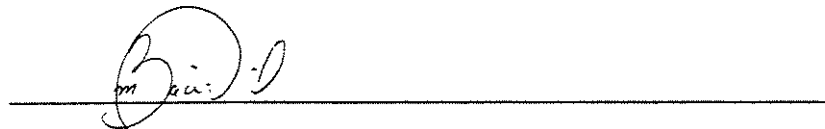
Autor: Alessandra Bernardis Rosa

Orientador: Anselmo Eduardo Diniz



Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz, Presidente

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP



Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva

Universidade Federal de Uberlândia - UFU



Prof. Dr. Olívio Novaski

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Campinas, 10 de fevereiro de 1999.

Dedicatória

À minha mãe, Silvana[†], que acima de tudo sempre me encorajou e incentivou em todos os momentos da minha vida e que com certeza estaria muito orgulhosa neste dia.

Agradecimentos

A realização deste trabalho só foi possível graças a ajuda de diversas pessoas, que em momentos decisivos, prestaram a sua colaboração e às quais presto meu agradecimento:

Ao meu marido Ricardo, pelo incentivo, pela compreensão e abnegação dos momentos juntos em prol deste trabalho.

À minha família, pela confiança e apoio.

Ao Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz, pela sua participação ativa como orientador sempre prontamente disposto a ajudar.

Aos professores, colegas e funcionários do curso de pós-graduação da FEM da UNICAMP, que contribuíram de forma direta ou indireta na realização deste trabalho.

Ao colega do curso de pós-graduação Durval Braga e ao técnico Aristides Magri, pela colaboração durante a realização dos ensaios.

À CAPES, pelo suporte financeiro.

*“Se não houver frutos,
Valeu a beleza das flores.
Se não houver flores,
Valeu a sombra das folhas.
Se não houver folhas,
Valeu a intenção da semente.”*
(Henfil)

RESUMO

ROSA, Alessandra Bernardis, COMPARAÇÃO DA PERFORMANCE DE FRESAS DE TOPO DE METAL DURO E CORONITE NO FRESAMENTO DE AÇO 1045. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP, 1999. 134p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica)

A usinagem dos metais é a técnica mais utilizada pela indústria mecânica na fabricação de peças em geral. Dentre os diferentes processos de usinagem, destaca-se a operação de fresamento, que é uma das mais versáteis, além de proporcionar altas taxas de remoção de cavaco. Porém trata-se também de uma das mais complexas, pois existem diversos fatores que podem influenciar seus resultados. O desenvolvimento tecnológico na área de usinagem dos metais e as diferentes necessidades advindas dos diversos tipos de material a usinar, fizeram com que surgisse no mercado uma grande variedade de ferramentas de corte e também novos materiais para ferramentas. Dentre esses novos materiais, surgiu o *coronite*, que é um material capaz de proporcionar à ferramenta, em especial as fresas de topo, tenacidade similar ao aço rápido e resistência ao desgaste próxima ao metal duro, características até então impossíveis de estarem presentes ao mesmo tempo em uma ferramenta. O objetivo deste trabalho é estudar comparativamente a performance das fresas de topo de diferentes materiais (metal duro e coronite) na usinagem de aços, no que diz respeito a vida da ferramenta e à qualidade superficial da peça usinada. Para isto, diversos ensaios foram realizados sob diversas condições de usinagem e monitorados através de sinais de vibração a fim de tentar se estabelecer com precisão o fim de vida da ferramenta, que é um segundo objetivo deste trabalho. As conclusões mais significativas deste trabalho foram que: a velocidade de corte é um parâmetro muito importante para a rugosidade; fresas de topo de Metal Duro, com diâmetro de até dez milímetros, devem ser usadas quando se tem máquinas com possibilidade de altas rotações e fresas de topo de *coronite*, também com esse mesmo diâmetro, devem ser usadas quando se tem máquinas com rotações mais baixas, em substituição às atuais fresas de topo de aço rápido e aço rápido revestidas.

Palavras chave:

Fresamento de Topo, Coronite, Monitoramento, Vibração

ABSTRACT

ROSA, Alessandra Bernardis, COMPARING THE PERFORMANCE OF CEMENTED CARBIDE AND CORONITE ENDMILLS IN 1045 STEEL MILLING. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP, 1999. 134p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica)

Metal cutting is the most used technique by mechanical industries in manufacturing of parts in general. Amongst the different machining processes, milling operation is one of the most versatile and provide high chip removal rate. However, it is one of the most complex operation, because there are a lot of factors that affects the results. The technological development that took place in metal cutting and the different necessities of the different workpiece materials, made it necessary new cutting tools and new tool materials. Amongst these new materials *coronite* was created. This material is capable to provide to endmills toughness similar to high-speed steel and in the same time wear resistance similar to cemented carbide, characteristics up to then impossible to be found at the same time in a tool. The proposal of this work is to compare the performance of endmill different materials (coronite and cemented carbide) in machining of steels, with regard to tool life and surface quality of the workpiece. Among this goal, several experiments were made under different machining conditions. The workpiece vibration was monitored with the purpose to try to establish with accuracy the end life of tool, which is the second goal of this work. The main conclusions of this work were: the cutting speed is a very important parameter to surface roughness; cemented carbide endmills, with small diameters like 10 millimeters, must be used when high rotations are available. Instead coronite endmills, with the same diameter, must be used when lower rotations are available to substitute the high speed steel endmills with or without coatings.

Key Words:

End Milling, Coronite, Monitoring, Vibration

Sumário

Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	ix
Nomenclatura	x
 <i>CAPÍTULO 1 - <u>Introdução</u></i>	 1
 <i>CAPÍTULO 2 - <u>Fresamento com Fresas de Topo</u></i>	
2.1)- Generalidades	4
2.2)- Tipos Fundamentais de Fresamento	5
2.3)- Fresas de Topo para Superfícies como: Rebaixos, Sulcos, Bolsões	7
2.4)- Forças Atuantes no Fresamento de Topo	9
2.5)- Formas de Cavaco	13
2.6)- Cálculo da Potência de Corte e da Espessura Média de Corte	19
2.7)- Desgastes da Ferramenta no Fresamento	21
2.8)- Escolha das Condições de Usinagem e do Número de Dentes da Fresa	24
2.9)- Acabamento Superficial em Fresamento	28
2.10)- Fresamento de Topo com CORONITE, Metal Duro e Aço Rápido	35

CAPÍTULO 3 - Monitoramento dos Processos de Usinagem

3.1)- Introdução	46
3.2)- Razões da Utilização de Um Sistema de Monitoramento	47
3.3)- Tipos de Monitoramento	50
3.4)- Sistemas de Monitoramento da Usinagem Via Esforços de Corte	52
3.4.1)- Generalidades	52
3.4.2)- Relação entre Desgaste da Ferramenta e Forças de Usinagem	53
3.4.3)- Relação entre Esforços de Corte e as Condições de Usinagem	56
3.4.4)- Monitoramento dos Esforços de Corte Via Parâmetros Elétricos da Máquina-Ferramenta	60
3.4.4.1)- Generalidades	60
3.4.4.2)- Relação entre Desgaste e a Corrente Elétrica do Motor	63
3.5)- Sistema de Monitoramento da Usinagem Via Vibração	65
3.5.1)- Generalidades	65
3.5.2)- Origem das Vibrações em Usinagem e Estabilidade do Sistema	67
3.5.3)- Análise do Sinal e Estratégia de Monitoramento do Desgaste	68

CAPÍTULO 4 – Procedimentos Experimentais

4.1)- Equipamentos e Acessórios Utilizados	73
4.2)- O Equipamento de Monitoramento	73
4.3)- Configuração do Software e Procedimentos Utilizados para a Aquisição de Dados	76
4.4)- O Corpo de Prova	79
4.5)- Metodologia Aplicada ao Ensaio	81

CAPÍTULO 5 – Resultados e Discussões

5.1)- Análise dos Resultados da 1ª Parte dos Ensaios	87
5.1.1)- Análise da Influência da Variação da Velocidade de Corte (v_c) na Rugosidade (R_a) da Peça para a Fresa de Coronite	87
5.1.2)- Análise da Influência da Variação da Velocidade de Avanço (v_f) na Rugosidade (R_a) da Peça para a Fresa de Coronite	89
5.1.3)- Análise da Influência da Variação da Velocidade de Corte (v_c) na Rugosidade (R_a) da Peça para a Fresa de Metal Duro	91
5.1.4)- Análise da Influência da Variação da Velocidade de Avanço (v_f) na Rugosidade (R_a) da Peça para a Fresa de Coronite	94
5.1.5)- Conclusões Referentes aos Resultados da 1ª Parte dos Ensaios	95
5.2)- Análise dos Resultados da 2ª Parte dos Ensaios de Vida e de Repetitividade	96
5.2.1)- Fresa de Coronite	
5.2.1.1)- Análise da Influência da Velocidade de Corte (v_c), da Velocidade de Avanço (v_f) e do Avanço por Dente (f_z) na Rugosidade- R_a da Peça	96
5.2.1.2)- Análise da Influência da Velocidade de Corte (v_c), da Velocidade de Avanço (v_f) e do Avanço por Dente (f_z) no Desgaste e Vida da Ferramenta	100
5.2.1.3)- Comportamento do Sinal de Vibração em função do Comprimento de Avanço (L_f)	105
5.2.2)- Fresa de Metal Duro	
5.2.2.1)- Análise da Influência da Velocidade de Corte (v_c), da Velocidade de Avanço (v_f) e do Avanço por Dente (f_z) na Rugosidade- R_a da Peça	108
5.2.2.2)- Análise da Influência da Velocidade de Corte (v_c), da Velocidade de Avanço (v_f) e do Avanço por Dente (f_z) no Desgaste e Vida da Ferramenta	111
5.2.2.3)- Comportamento do Sinal de Vibração em função do Comprimento de Avanço (L_f)	116
5.2.3)- Conclusões sobre o Estudo Comparativo de Fresas de Metal Duro com Fresas de Coronite	120

CAPÍTULO 6 – Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

6.1)- Conclusões	121
6.2)- Sugestões para Trabalhos Futuros	123
Referências Bibliográficas	125
Bibliografia Consultada	128
Apêndices	129

Lista de Figuras

2.1 - Exemplos de Operações de Fresamento : a) Horizontal; b) Vertical	5
2.2 - Fresamento Cilíndrico Tangencial Discordante e Concordante	6
2.3 - Fresamento Frontal	6
2.4 - Tipos de superfícies que podem ser conseguidas através da operação de fresamento	7
2.5 - Capacidade de avanço axial de vários tipos de fresas	8
2.6 - Capacidade da Profundidade de Usinagem Axialmente	10
2.7 - Componentes das forças de usinagem no fresamento	10
2.8 - Magnitude e Direção da Força Tangencial	11
2.9 - Comportamento da Força de Corte x Velocidade de Corte	11
2.10 - Como o ângulo de hélice e a direção de rotação da ferramenta afetam a força axial	12
2.11 - Fresamento Tangencial: a)- Concordante; b)- Discordante; c)- Seção do Cavaco	13
2.12 - Fresamento Frontal : a)- Simétrico de Rasgo; b)- Simétrico Comum; c)- Assimétrico com toda a superfície sendo fresada; d)-Assimétrico	15
2.13 - Representação Esquemática da Posição de Ataque da Pastilha de Metal Duro	17
2.14 - Posição de uma fresa frontal em relação à peça, mostrando a distância de ajustagem “j”	17
2.15 - Variação das forças no corte simétrico e assimétrico	18
2.16 - Espessura do cavaco no fresamento frontal em função do ângulo de posicionamento do dente e o ângulo de posição	20
2.17 - Variação Cíclica da Temperatura de Corte no Processo de Corte Interrompido	22

2.18 - Distribuição da Temperatura e de Tensões ocorridas na Região de Corte	24
2.19 - Fresas de passo grande, pequeno e extra pequeno	27
2.20 - Superfície Teórica Fresada por fresamento tangencial	28
2.21 - Esquema da Fase Plana de uma Pastilha de Fresa de Facear	30
2.22 - Relação entre Rugosidade Superficial e Velocidade de Corte	32
2.23 - Relação entre Rugosidade Superficial e Profundidade de Usinagem	32
2.24 - Relação entre Rugosidade Superficial e Avanço por Dente	33
2.25 - Relação entre Rugosidade Superficial e Penetração de Trabalho	33
2.26 - Fresamento de uma quina com uma fresa de topo de metal duro	38
2.27- Fresa de Topo de CORONITE	39
2.28 - Alguns fatores de usinagem de fresas de topo	40
2.29 - Comparação de resultados obtidos com fresas de topo de aço rápido recoberto, metal duro recoberto e coronite	41
2.30 - Comparação entre Coronite, Metal Duro e Aço Rápido com respeito a um importantes propriedades para o fresamento de topo	43
2.31- Comparação da Vida da Ferramenta de Coronite, Metal Duro e Aço Rápido na usinagem de aços de vários graus de dureza	45
3.1- Sistema de Monitoramento Automático	49
3.2 - Forças de Corte na presença dos Desgastes de Flanco e de Cratera	54
3.3 - Forças de Corte no Torneamento com Ferramentas de Metal Duro Recobertas	55
3.4 - Variação da Pressão Específica de Corte com Profundidade de Usinagem	57
3.5 a)- Variação da Pressão Específica de Corte com Espessura de Corte	57
b)- Variação da Pressão Específica de Corte com Velocidade de Corte	57
3.6 - Variação da Pressão Específica de Corte com o Avanço/dente	58
3.7 - Nível RMS da aceleração (m/s^2) do local 20 (tampa frontal) em função do desgaste das arestas de corte	71

4.1 - Montagem Experimental utilizada na 1ª Bateria de Ensaios	74
4.2 - Montagem Experimental utilizada na 2ª Bateria de Ensaios	75
4.3 - Esquema de como os rasgos eram fresados durante a 1ª Bateria de Ensaios em dois momentos distintos: a)- quando variava-se v_c ; b)- quando variava-se v_f	78
4.4 - Dimensões do Corpo de Prova utilizado nos ensaios experimentais	79
4.5 - Fixação do Corpo de Prova à Mesa do Centro de Usinagem feita na 1ª Bateria de Ensaios	80
4.6 - Fixação do Corpo de Prova à Mesa do Centro de Usinagem feita na 2ª Bateria de Ensaios	80
5.1- Comportamento da Rugosidade (R_a) para a Fresa de Coronite quando v_c varia	88
5.2 - Comportamento da Rugosidade (R_a) para a Fresa de Coronite quando v_f varia	89
5.3 - Comportamento da Rugosidade (R_a) para a Fresa de Metal Duro quando v_c varia	91
5.4 - Comportamento da Rugosidade (R_a) para a Fresa de Metal Duro quando v_f varia	93
5.5 - Comportamento da Rugosidade (R_a) para Fresas de Coronite em Diferentes Condições de Usinagem	97
5.6 - RMSvibração em função do Comprimento de Avanço para Fresa de Coronite sob as seguintes condições: $v_c= 215$ m/min; $v_f= 624$ mm/min; $a_p=0,95$ mm ; $f_z= 0,030$ mm	98
5.7 - Desgaste de Flanco em função do Comprimento de Avanço para Fresa de Coronite sob as seguintes condições: $v_c= 215$ m/min; $v_f= 624$ mm/min; $a_p=0,95$ mm ; $f_z= 0,030$ mm	99
5.8 - Vida para Fresas de Coronite em Diferentes Condições de Usinagem	101
5.9 - Comportamento do Desgaste de Flanco para fresas de Coronite em Diferentes Condições de Usinagem	102
5.10 - Superfície de Folga de uma aresta da Fresa de Coronite com desgaste de flanco após usinagem de 99 rasgos ($L_f= 8712$ mm) - Condições: $v_c= 172$ m/min; $v_f= 624$ mm/min; $a_p=0,95$ mm; $f_z= 0,038$ mm	104
5.11 - Superfície de Folga de uma aresta da Fresa de Coronite com Desgaste de Flanco após usinagem de 55 rasgos ($L_f=4840$ mm) - Condições: $v_c=215$ m/min; $v_f= 624$ mm/min; $a_p= 0,95$ mm ; $f_z= 0,038$ mm	104
5.12- Fresa de Coronite totalmente inutilizada após 57 rasgos usinados ($L_f= 5016$ mm)	104

5.13 - Comportamento do Sinal de Vibração para Fresas de Coronite em Diferentes Condições de Usinagem	105
5.14 – Comportamento da Rugosidade (Ra) para Fresas de Metal Duro em Diferentes Condições de Usinagem	109
5.15 - Comportamento da Rugosidade (Ra) para Fresas de Metal Duro – Ensaios de Repetitividade	110
5.16 - Comportamento do Desgaste de Flanco para Fresas de Metal Duro – Ensaios de Repetitividade	110
5.17 - Comprimento Total Usinado para Fresas de Metal Duro em uma Única Condição de Usinagem – Ensaios de Repetitividade	112
5.18 - Desgaste de Flanco Máximo para $L_f = 9680$ mm de Fresas de Metal Duro em Condições de Usinagem Distintas	113
5.19 - Comportamento do Desgaste de Flanco para Fresas de Metal Duro em Condições de Usinagem Distintas	114
5.20 - Comportamento do Sinal de Vibração para Fresas de Metal Duro em Condições de Usinagem Distintas	116
II.1 - Diagrama do Programa de Aquisição de Dados usado na 1ª Parte dos Ensaios	129
II.2 - Diagrama do Programa de Aquisição de Dados usado nos Ensaios de Vida	130
II.3 - Diagrama do Programa de Aquisição de Dados usado nos Ensaios de Repetitividade	131

Lista de Tabelas

2.1 - Valores da Pressão Específica de Corte (K_s) para o Fresamento	21
2.2 - Dados Técnicos de Corte para Fresas de Topo de Coronite	42
3.1- Comparação entre as correntes durante vários estágios para a diferentes operações	64
3.2 - Comparação dos níveis RMS de vibração (m/s^2) para três condições de desgaste das ferramentas de corte	70
4.1- Valores Recomendados pelo Fabricante	81
5.1- Comportamento da Rugosidade (R_a) para a Fresa de Metal Duro quando variam-se a v_c e a v_f	93
5.2 - Vida da Ferramenta (min) de Fresamento para diferentes v_f e v_c	100
5.3 - Vida da Ferramenta (min) de Fresamento para diferentes v_f e v_c	103
5.4 - Desgaste de Flanco das Três Arestas da Fresa de Coronite ao final de 55 rasgos Condições: $v_c=172$ m/min; $v_f=624$ mm/min; $f_z=0,038$ mm; $a_p=0,95$ mm	107
5.5 - Desgaste de Flanco de Fresas de Metal Duro ao final de 110 rasgos usinados para Diferentes v_c e v_f	113
5.6 - Desgaste de Flanco das Três Arestas da Fresa de MD ao final de 110 Rasgos Condições: $v_c=240$ m/min; $v_f=870$ mm/min; $a_p=0,95$ mm	115
5.7- Desgaste de Flanco das Três Arestas da Fresa de MD ao final de 110 Rasgos Condições: $v_c=300$ m/min; $v_f=1090$ mm/min; $a_p=0,95$ mm	115
5.8 - Rugosidade (R_a) e RMS do sinal da Fresa de Metal Duro para Diferentes L_f Condições: $v_c=240$ m/min; $v_f=870$ mm/min; $f_z=0,038$ mm; $a_p=0,95$ mm	117
5.9 - Rugosidade (R_a) e RMS do sinal da Fresa de Metal Duro para Diferentes L_f Condições: $v_c=240$ m/min; $v_f=870$ mm/min; $f_z=0,038$ mm; $a_p=0,95$ mm	117

Nomenclatura

Letras Latinas:

a_e	Penetração de Trabalho	[mm]
a_p	Profundidade de Usinagem	[mm]
b	Largura de Corte	[mm]
D	Diâmetro da Fresa	[mm]
F_c	Força Tangencial ou de Corte	[kgf]
F_f	Força de Avanço	[kgf]
F_p	Força Axial ou de Profundidade	[kgf]
f_z	Avanço por dente	[mm/volta]
h	Espessura de Corte	[mm]
h_m	Espessura de Corte Média	[mm]
K_m	Pressão Específica de Corte Média	[kgf/mm ²]
K_s	Pressão Específica de Corte	[kgf/mm ²]
L_f	Comprimento de Avanço	[mm]
n	Rotação	[rpm]
P_c	Potência de Corte	[CV]
R_a	Rugosidade Aritmética Média	[μ m]
u	Distância entre os dentes	[mm]

v_c	Velocidade de Corte	[m/min]
v_f	Velocidade de Avanço	[mm/min]
W_{corte}	Potência Consumida pelo Processo	[W]
W_{motor}	Potência do Motor	[W]
z	Número de dentes da ferramenta	-----

Letras Gregas:

η	Rendimento	[%]
ϕ_o	ângulo de contato entre o dente e a peça	[°]
χ_r	ângulo de posição	[°]
λ_s	ângulo de hélice	[°]

Abreviações:

AR	Aço Rápido	-----
C	Coronite	-----
MD	Metal Duro	-----
RMS	Raiz Quadrada Média	[V]
TiCN	Carbonitreto de Titânio	-----
TiN	Nitreto de Titânio	-----
↑	aumento	-----
↓	diminuição	-----

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

É inegável que a usinagem dos metais é a técnica mais utilizada pela indústria mecânica para a fabricação de peças em geral. Entre os diferentes processos de usinagem existentes, o fresamento é um dos mais versáteis, proporcionando flexibilidade na geração de formas e altas taxas de remoção de material; entretanto é também um dos mais complexos devido ao grande número de fatores que podem influenciá-lo.

Hoje em dia, com a produção seriada e com o uso de modernos centros de usinagem, faz-se necessário a utilização de ferramentas que possam trabalhar em várias direções de usinagem. Não é surpresa saber que a metade das ferramentas utilizadas nestes modernos centros de usinagem são fresas de topo. Existe uma enorme demanda para fresas de topo - aproximadamente 40 milhões são usadas a cada ano, segundo ESP... (1991).

Dentro desse contexto, o setor de usinagem dos metais também não poderia deixar de se adequar a essas novas tecnologias, desenvolvendo para isso, novos métodos de trabalho através de uma pesquisa constante dentro do setor.

Esse desenvolvimento tecnológico e as diferentes necessidades advindas dos diversos tipos de material a usinar, fizeram com que surgisse no mercado uma grande variedade de ferramentas de corte e também alguns novos materiais para ferramentas.

No começo dos anos 80, SANDVIK COROMANT começou um projeto de pesquisa para estudar a possibilidade de criação de um material para a fresa de topo que fosse compatível com as modernas tecnologias de produção. Esta empresa estabeleceu que a combinação de tenacidade e resistência ao desgaste, como a requerida pela operação de fresamento de topo em particular, seria encontrada em um material que tivesse propriedades intermediárias entre o metal duro e o aço rápido (OSKARSSON et al., 1989). Foi assim que surgiu o *coronite*.

Com a descoberta do *coronite* e também com a utilização de técnicas de revestimento, tais como: CVD (deposição química à vapor) ou PVD (deposição física à vapor) que favorecem um melhor desempenho no corte e um maior tempo de vida das ferramentas (LEFÈBVRE et al.,1990) , (PEYRE et al., 994), tem-se atualmente uma ampla faixa de materiais para ferramentas que vão desde o diamante (cuja característica principal é a altíssima dureza) até o aço rápido (cuja característica principal é a sua elevada tenacidade).

Dentro deste contexto, o estudo e a obtenção de dados referentes às variáveis que realmente influem em um processo são muito importantes para que o mesmo possa ser otimizado. Também o monitoramento destes processos é de grande importância para a otimização da vida das ferramentas, pois proporciona a diminuição dos custos de produção industrial, gerando para empresas que possuem essa filosofia, vantagem competitiva num mercado altamente globalizado. Também o monitoramento dos processos de usinagem tem como objetivo a substituição do homem no processo, principalmente quando cabe a este a determinação do instante de troca das ferramentas. Deve-se diminuir ao máximo o julgamento do homem quanto às condições de usinagem, pois este se baseia na sensibilidade, que é variável. Sistemas de monitoramento automático tem a finalidade de determinar o fim de vida da ferramenta, reduzindo assim o erro humano para níveis mínimos, além de fornecer informações objetivas à respeito dos fenômenos que estão ocorrendo no processo.

Este trabalho objetivou o estudo do comportamento de diversas características do processo de fresamento de topo (rugosidade da peça usinada e desgaste das ferramentas utilizadas) ao longo da vida da ferramenta, em diferentes condições de usinagem, a fim de se comparar a performance das fresas de topo de coronite e metal duro, bem como tentar estabelecer, através da utilização de sensores de vibração, o fim de vida de ambas as ferramentas.

O presente trabalho está dividido da seguinte maneira:

- ◆ **Capítulo 1:** Introdução
- ◆ **Capítulo 2:** Fresamento com Fresas de Topo – neste capítulo são descritos os princípios básicos do processo de fresamento, fazendo-se um estudo de todos os parâmetros que

podem influenciá-lo. Deste modo, está se estudando indiretamente como tais parâmetros influenciam a vida da ferramenta de corte.

- ♦ **Capítulo 3**: Monitoramento dos Processos de Usinagem – neste capítulo é apresentado o porquê da utilização de um sistema de monitoramento em processos de usinagem, bem como os diversos tipos existentes. Entretanto, dá-se um maior destaque ao estudo do monitoramento dos esforços de corte via parâmetros elétricos da máquina-ferramenta e via vibração no fresamento de topo.
- ♦ **Capítulo 4**: Procedimentos Experimentais – neste capítulo são discutidos os equipamentos, as ferramentas e a metodologia empregada durante a realização dos ensaios experimentais.
- ♦ **Capítulo 5**: Resultados e Discussões – neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios, bem como uma análise detalhada destes.
- ♦ **Capítulo 6**: Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros – neste capítulo são apresentadas as conclusões retiradas do trabalho em questão, bem como são sugeridos alguns temas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

FRESAMENTO COM FRESAS DE TOPO

2.1)- Generalidades

“A usinagem é um dos mais importantes processos de fabricação da indústria. Embora pareça simples, devido às suas elevadas taxas de produção, na verdade ela é uma operação muito complexa, que envolve muitas variáveis.” (MACHADO et al. ,1991).

Dentre as várias operações de usinagem, pode-se citar a operação de fresamento, que é um dos métodos de usinagem de maior versatilidade e o segundo processo mais usado no meio industrial. Porém ela é também uma das operações mais complexas, pois existem muitos fatores que podem influenciar o seu resultado.

Um conceito dado para operações de fresamento, por FERRARESI (1973), pode ser expresso da seguinte maneira:

- o fresamento é uma operação de usinagem cuja ferramenta, chamada fresa, possui arestas cortantes dispostas simetricamente em torno de um eixo que executa a retirada do material auxiliada pelo movimento de corte (este movimento é proporcionado pela rotação da mesma em torno de seu eixo). O movimento de avanço, que permite o prosseguimento da operação, é feito pela própria peça em usinagem que é fixada na mesa da máquina. A mesa obriga a peça a passar sob a ferramenta em rotação, dando-lhe assim a forma e dimensões desejadas.

Um outro conceito dado à operação de fresamento pode ser expresso como sendo “processo de usinagem executado com ferramentas, geralmente multicortantes, objetivando a obtenção de superfícies quaisquer na peça” (DIN 8589, 1989). A fresa tem diversos dentes de usinagem e cada um retira uma certa quantidade de metal.

Com isso, pode-se dizer que em operações de fresamento, o índice de remoção de material é alto e as possibilidades de se conseguir um bom acabamento são excelentes, além

do que esta operação possibilita flexibilidade na geração de superfícies como será mostrado no item 2.2.

2.2)- Tipos Fundamentais de Fresamento

O fresamento pode ser classificado segundo a posição do eixo-árvore da máquina-ferramenta. Tem-se, segundo FERRARESI (1973):

- ♦ *Fresamento Horizontal*: quando o eixo-árvore está na posição horizontal;
- ♦ *Fresamento Vertical*: quando o eixo-árvore está na posição vertical;
- ♦ *Fresamento Inclinado*: quando o eixo-árvore não está nem na horizontal, nem na vertical, mas inclinado em relação a estas direções.

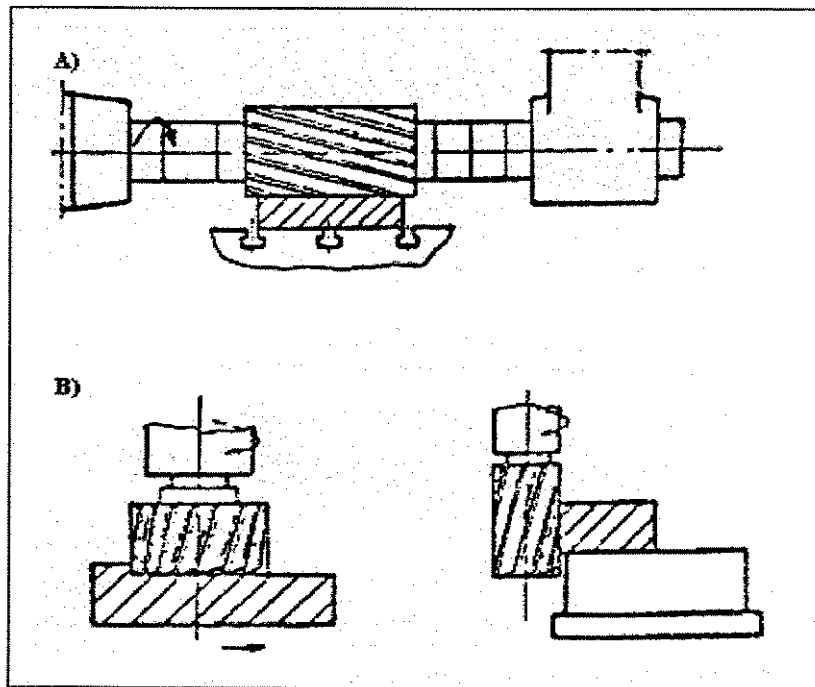


FIGURA 2.1 - Exemplos de Operações de Fresamento : a) Horizontal; b) Vertical

FONTE - FERRARESI, 1973

Uma outra classificação que também pode ser dada ao fresamento, é segundo a disposição dos dentes ativos da fresa (FERRARESI, 1973). Tem-se desta maneira:

a)- *Fresamento Tangencial*: nesta operação os dentes ativos estão na superfície cilíndrica da ferramenta - O eixo da fresa é paralelo à superfície que está sendo gerada. As

fresas são chamadas de fresas cilíndricas ou tangenciais. Essas fresas operam segundo um fresamento concordante ou discordante:

- * Fresamento Concordante: é aquele onde o sentido do movimento de avanço é o mesmo do movimento rotatório da fresa.
- * Fresamento Discordante: é aquele onde o sentido do movimento de avanço é contrário ao sentido do movimento rotatório da fresa.

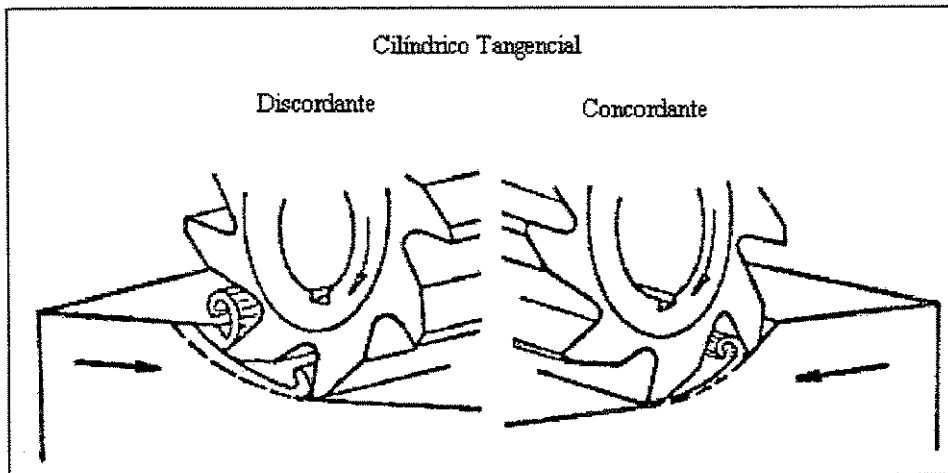


FIGURA 2.2 - Fresamento Cilíndrico Tangencial Discordante e Concordante

FONTE - FERRARESI, 1973

b)- *Fresamento Frontal*: nesta operação as arestas secundárias estão situadas na parte frontal da fresa, gerando a superfície da peça (neste caso o eixo da fresa é perpendicular à superfície que está sendo gerada). As fresas são chamadas de fresas frontais ou de topo.

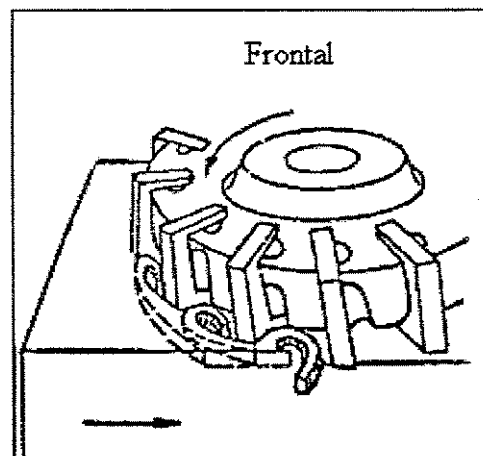


FIGURA 2.3 - Fresamento Frontal

FONTE - FERRARESI, 1973

Através das classificações básicas de fresamento abordadas acima, existem segundo SANDVIK COROMANT (1994), diversos tipos diferentes de geometria (vide FIG.2.4) que podem ser usinadas com diferentes tipos de fresas. Existem fresas frontais de facear, fresas frontais de topo, fresas cilíndricas helicoidais, fresas cilíndricas de disco, entre outras. Cada uma delas terá um melhor desempenho para uma determinada geometria. Este trabalho abordará com mais ênfase as fresas utilizadas para usinar as formas das superfícies 3 e 4, da FIG.2.4 - que são conhecidos como rebaixos e sulcos ou entalhes, respectivamente.

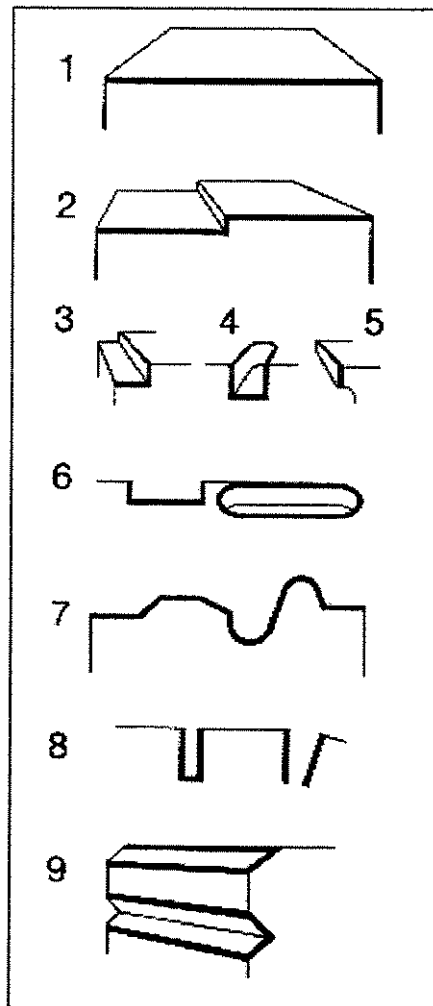


FIGURA 2.4 - Tipos de Superfícies que podem ser conseguidas através de operações de fresamento

FONTE - SANDVIK COROMANT, 1994- p.X-99

2.3)- Fresas de Topo para Superfícies como: Rebaixos, Sulcos, Bolsões

Usinar estas configurações básicas as quais são muito comuns em peças mecânicas, requer um tipo de fresamento frontal combinado com um fresamento tangencial.

Para se usinar superfícies como rebaixos e sulcos é necessário levar em conta que diferentes faces/superfícies deverão ser usinadas simultaneamente. Isto significa dizer que fatores como a penetração de trabalho (a_e) e profundidade de usinagem (a_p) devem ser levadas em consideração na escolha do tamanho e tipo de ferramenta.

Quando se usina um sulco ou entalhe, esta operação envolverá três superfícies a serem usinadas. Os sulcos podem ter extremidades abertas de uma ponta a outra ou podem ser abertos apenas de um lado. Existe também um tipo de sulco fechado em ambas extremidades, que é denominado bolsão que requer fresas de topo que também possam furar (isto é usinar em uma direção axial).

Estes tipos de fresas de topo possuem arestas que vão desde o centro até a extremidade final para furar relativamente fundo, iniciando o corte com avanço axial. Fresas de topo como mostradas na FIG. 2.5 A e B também podem ser utilizadas desde que a profundidade do bolsão a ser usinado não ultrapasse a dimensão “a” da figura.

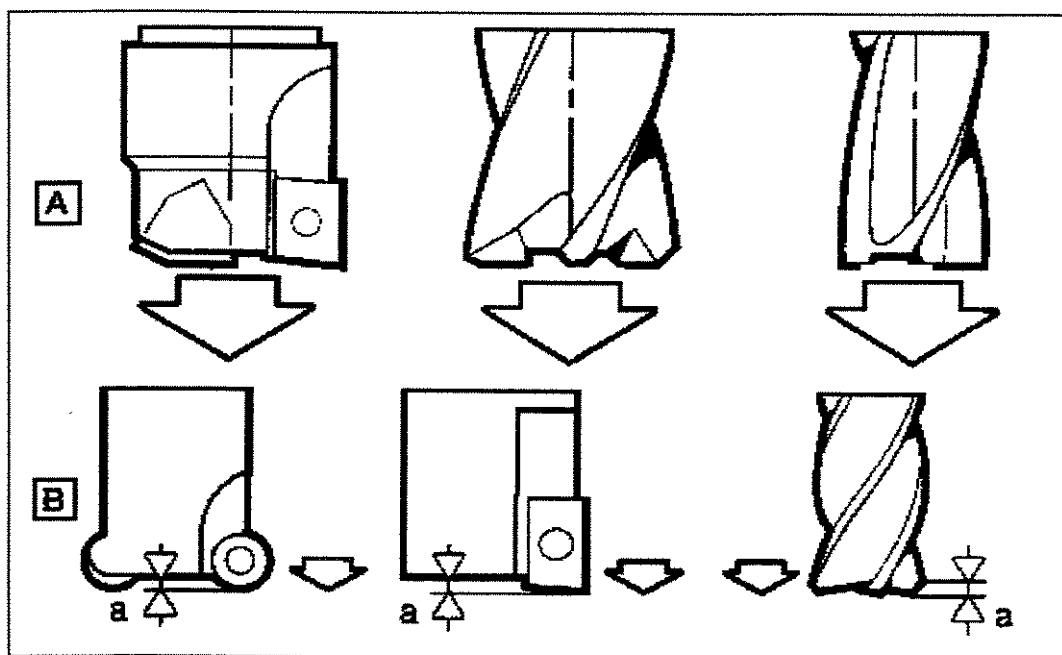


FIGURA 2.5 - Capacidade de avanço axial de várias ferramentas de fresamento

FONTE - SANDVIK COROMANT, 1994-p.X-102

Estas modernas e eficientes fresas de topo que também furam e que utilizam pastilhas, tem também a vantagem de executar o trabalho de duas ferramentas distintas de uma só vez (ela pode furar e também executar o fresamento de sulcos). Esse tipo de fresa de topo tem a

habilidade de usinar em todas as direções de avanço, as quais podem ser especialmente úteis em centros de usinagem. Para este tipo de “freso-furação” é necessário o uso de fluido refrigerante.

A usinagem de quinas e cantos, ou mesmo rebaixos, pode ser considerada uma operação de fresamento lateral feita também por fresas de topo que terão que usinar uma superfície. Um fator de limitação destas fresas poderá ser a deflexão da ferramenta. Um fator de limitação na usinagem de sulcos/ranhuras é muitas vezes a eliminação do cavaco. Fresas modernas são muito eficientes com uma alta taxa de remoção do cavaco, mas é importante garantir que a aglomeração de cavacos não obstrua os bolsões de armazenamento, de modo que possa conduzir à fratura do dente de usinagem. Para isso faz-se uso de ar comprimido ou refrigerante sob pressão diretamente no corte do sulco para remover rapidamente o cavaco.

2.4)- Forças atuantes no Fresamento de Topo

“O conhecimento do comportamento e da ordem de grandeza dos esforços de corte nos processos de usinagem é de fundamental importância, pois eles afetam a potência necessária para o corte (a qual é utilizada para o dimensionamento do motor da máquina-ferramenta), afetam também a capacidade de obtenção de tolerâncias apertadas, a temperatura de corte e o desgaste da ferramenta.” (DINIZ,1997)

As fresas de topo são ferramentas projetadas para avançar axialmente, ou seja, com uma certa profundidade de usinagem (ap) (FIG.2.6) e isto, obviamente as faz mais suscetíveis aos efeitos das forças de usinagem, especialmente quando as mesmas trabalham com altas taxas de usinagem. Um porta-ferramenta muito estável é essencial, do contrário, com o balanço usado no fresamento de topo, deflexão e vibração serão inevitáveis.

As forças geradas no processo de fresamento em geral, são aquelas produzidas pelas arestas de usinagem que usinam as peças.

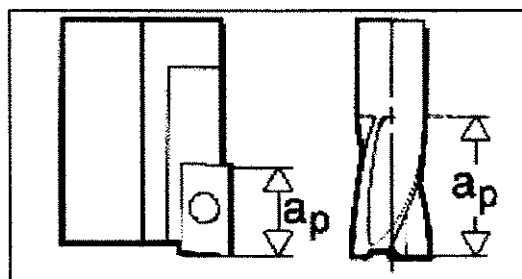


FIG. 2.6 - Capacidade da Profundidade de Usinagem Axialmente

FONTE - SANDVIK COROMANT, 1994 - p.X-89

As forças de usinagem podem ser decompostas em três forças, a saber: F_c (força tangencial ou de corte); F_f (força de avanço) e F_p (força axial ou de profundidade) (vide FIG. 2.7). A força tangencial age na direção da velocidade de corte e tem uma maior influência na potência de corte.

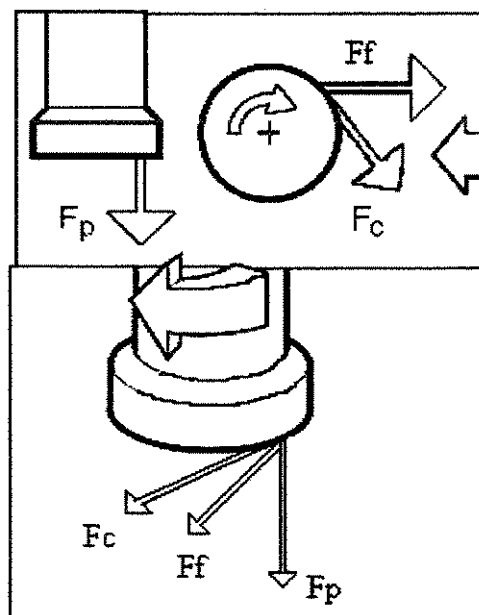


FIGURA 2.7 - Componentes das forças de usinagem no fresamento

FONTE - SANDVIK COROMANT, 1994 - p. X-32

A força de profundidade ou axial, não tem influência na potência de corte, pois é perpendicular aos movimentos (ou seja, é perpendicular ao plano de trabalho, onde ocorrem os movimentos de corte e de avanço). Porém, deve-se estudar o seu comportamento devido ao fato da mesma ser responsável pela deflexão elástica da peça e da ferramenta durante o corte, o que dificulta a obtenção de tolerâncias de forma e dimensão apertadas (DINIZ,1994). A magnitude e direção da força tangencial ou de corte é dada pelo somatório da força tangencial individual de cada dente no corte. Essas forças individuais atuam em várias

direções com o giro da ferramenta. O tipo de operação e especialmente a profundidade de usinagem (a_p) afetam a direção e o tamanho desta força. Quando essa profundidade de usinagem é maior e feita com mais dentes no corte (caso típico de fresamento frontal) a resultante das forças tangenciais será uma força quase que perpendicular à direção do avanço. (FIG. 2.8)

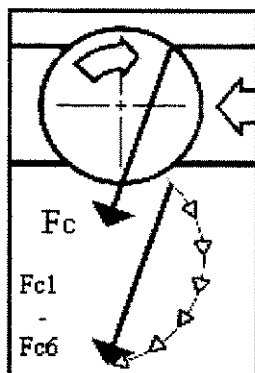


FIGURA 2.8 - Magnitude e direção da força tangencial
FONTE - SANDVIK COROMANT, 1994 - p. X-33

Através da FIG.2.9 pode-se observar que a medida que a velocidade de corte aumenta, a força tangencial diminui. Isso significa dizer que, com o aumento da velocidade de corte o trabalho realizado por unidade volumétrica de cavaco gerado diminui. Assim, a quantidade de calor disponível por volume de cavaco diminui. Sendo assim, menos calor flui para a peça e mais calor flui para o cavaco e para ferramenta, aumentando a temperatura na raiz do cavaco e diminuindo o trabalho, consequentemente a força de corte. Este é um fator que deve ser levado em consideração para se evitar a fratura do dente de usinagem e também quando a peça não é muito rígida.

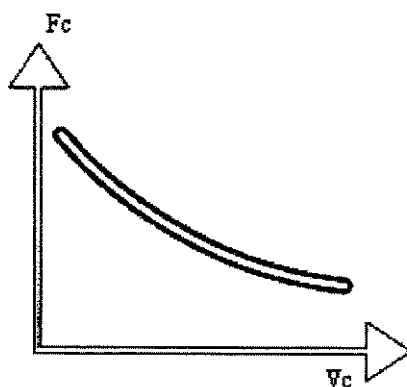


FIGURA 2.9 - Comportamento da Força de Corte x Velocidade de Corte
FONTE - SANDVIK COROMANT, 1994 - p.X-34

Os efeitos das forças de usinagem em uma fresa de topo podem influenciar o resultado esperado consideravelmente. As forças radial, axial e tangencial trabalharão para defletir e puxar a fresa de topo ao longo da operação. Fresamento discordante e concordante bem como qualquer inclinação de ângulo de hélice devem ser considerados na relação do corte proposto.

O ângulo de hélice (λ_s) faz com que a aresta cortante entre gradualmente no material e que a fresa tenha um trabalho mais suave, modificando a intensidade da força axial. Um grande ângulo de hélice irá gerar uma grande força axial puxando a ferramenta para fora do mandril, contra a peça trabalhada, ou empurrando-a para dentro do mandril, dependendo se a hélice é a direita ou a esquerda, conforme pode ser visto na FIG.2.10.

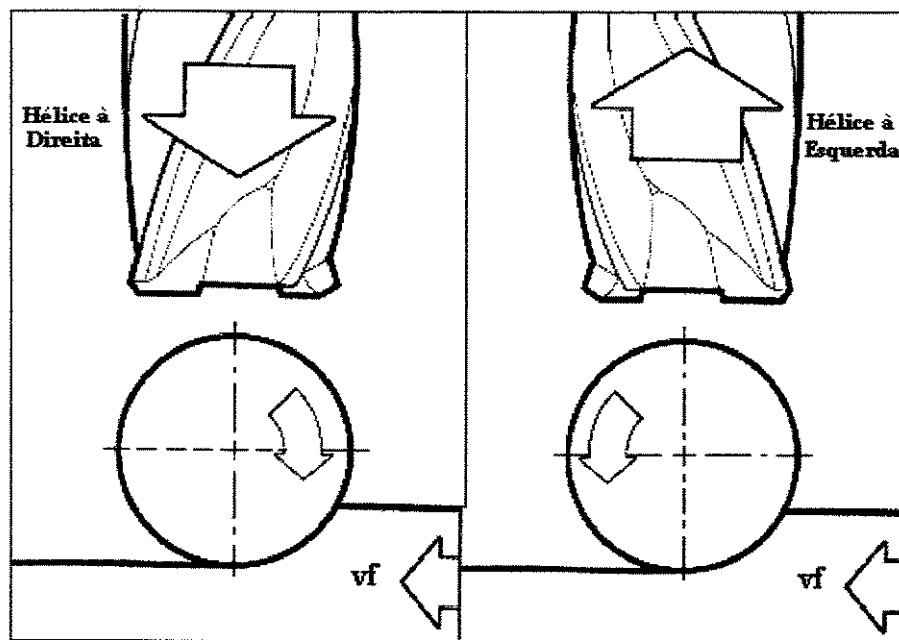


FIGURA 2.10 - Como o ângulo de hélice e a direção de rotação da ferramenta afetam a força axial

FONTE - SANDVIK COROMANT, 1994 - p.X-36

Sendo assim, a seleção deve ser feita de modo a evitar a deflexão da fresa na direção da profundidade de usinagem. É normalmente vantajoso ter a direção da rotação da ferramenta na mesma direção do ângulo de hélice.

2.5)- Formas de Cavaco

A forma do cavaco gerado em operações de fresamento difere da forma daqueles gerados em outras operações de usinagem como no torneamento, na furação, no mandrilamento, etc....

No fresamento tangencial o cavaco tem a forma de uma vírgula, com espessura de corte variável. A espessura de corte pode variar de um valor zero até um valor máximo, se o fresamento for discordante, ou pode variar de um valor máximo até zero, se o fresamento for concordante, conforme pode ser visto na FIG. 2.11.

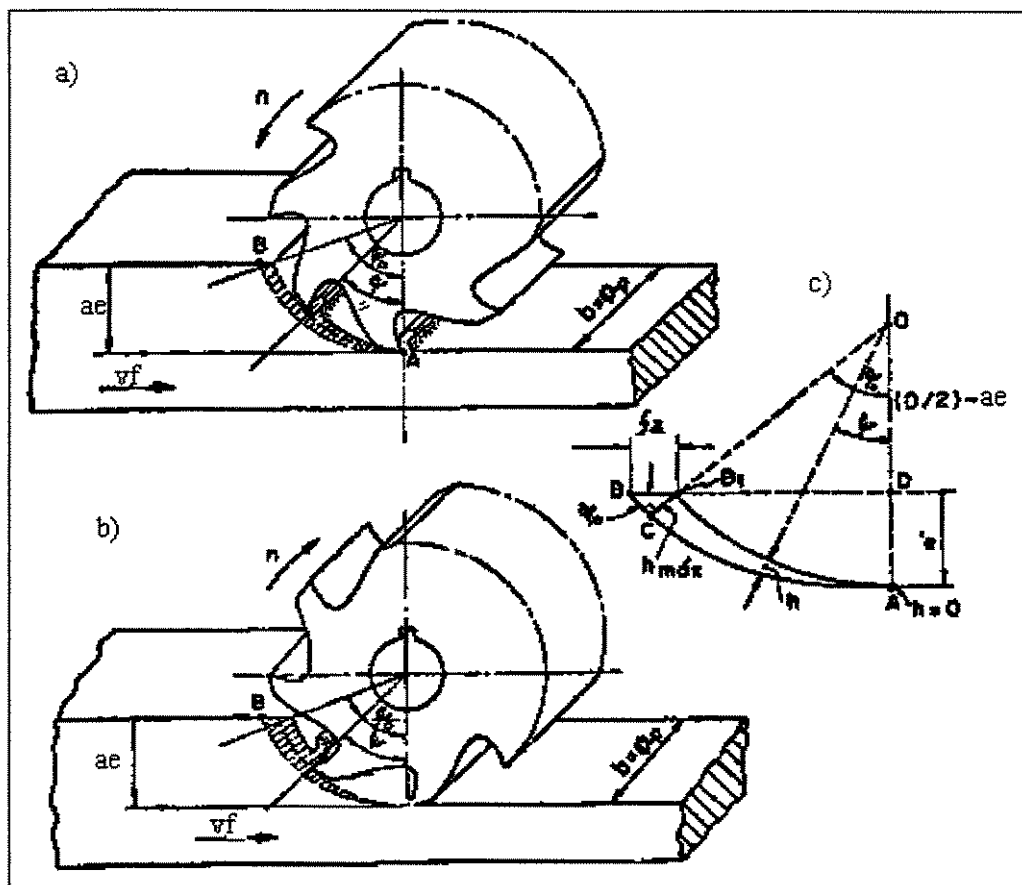


FIGURA 2.11- Fresamento Tangencial: a) Concordante; b) Discordante; c) Seção do Cavaco

FONTE - FERRARESI, 1973

A espessura de corte representada por " h ", é sempre medida numa direção radial da fresa e pode ser expressa por (FERRARESI, 1973):

$$h_{Dmáx} = f_z \cdot \sin \phi = f_z \cdot 2 \cdot \left(\frac{a_e}{D} - \left(\frac{a_e}{D} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (2.1)$$

onde: $h_{Dm\acute{a}x}$ = espessura de corte máxima [mm]
 f_z = avanço por dente [mm]
 a_e = penetração de trabalho [mm]
 D = diâmetro da fresa [mm]
 ϕ_o = ângulo de contato entre o dente e a peça []

No fresamento frontal algumas variações ocorrem quando tem-se:

a) - Fresamento Frontal Simétrico - neste caso o deslocamento do eixo da fresa se faz sobre o eixo de simetria da peça em usinagem. Segundo DINIZ (1997), “este posicionamento central, para fresas de facear, resulta em um menor contato de cada aresta com a peça, quando comparado com o fresamento frontal assimétrico com a fresa de facear utilizando fresa e peça com mesmas dimensões e, portanto, poderá resultar numa maior vida da ferramenta.” O fresamento de bolsões e sulcos é um fresamento frontal, que pode ser considerado como simétrico, feito por fresas de topo como observa-se na FIG.2-12a. Assim tem-se: $a_e=D$, $\phi_o=180^\circ$ e $h_{Dm\acute{a}x}=f_z$. A FIG.2-12b, também representa a operação de fresamento frontal simétrico, porem feito com fresas de facear. Neste caso tem-se: $a_e<D$, $\text{sen}(\phi_o/2) = a_e/D$, h_{dmin} diferente de zero, $h_{Dm\acute{a}x} = f_z$.

No fresamento com fresas de topo, a forma do cavaco se parece com uma meia-lua minguante. No início do corte, a espessura de corte “**h**” começa em zero e alcança um valor máximo igual ao avanço por dente (f_z). Do meio para o final do corte a espessura “**h**” decresce do valor máximo igual ao avanço por dente (f_z) para um mínimo igual a zero. O choque inicial fresa-peça (com espessura de corte “**h**” igual a zero) irá formar cavacos muito finos com grande valor de pressão específica de corte, aumentando assim a deformação plástica, e facilitando a ocorrência de fluxo lateral de cavaco.

Segundo SHAW, citado por DINIZ (1997), “durante o processo de formação de cavaco, parte do volume do material da peça deformado não se transforma em cavaco, mas sim, escorrega entre a peça e a superfície de folga da ferramenta, gerando o chamado *fluxo lateral de cavaco*. A medida que o avanço (f) ou a espessura de corte (h) cresce, o fluxo lateral de cavaco é relativamente menor, pois agora quase todo o volume de material deformado se transforma em cavaco, fazendo com que a pressão específica de corte (K_m) diminua.”

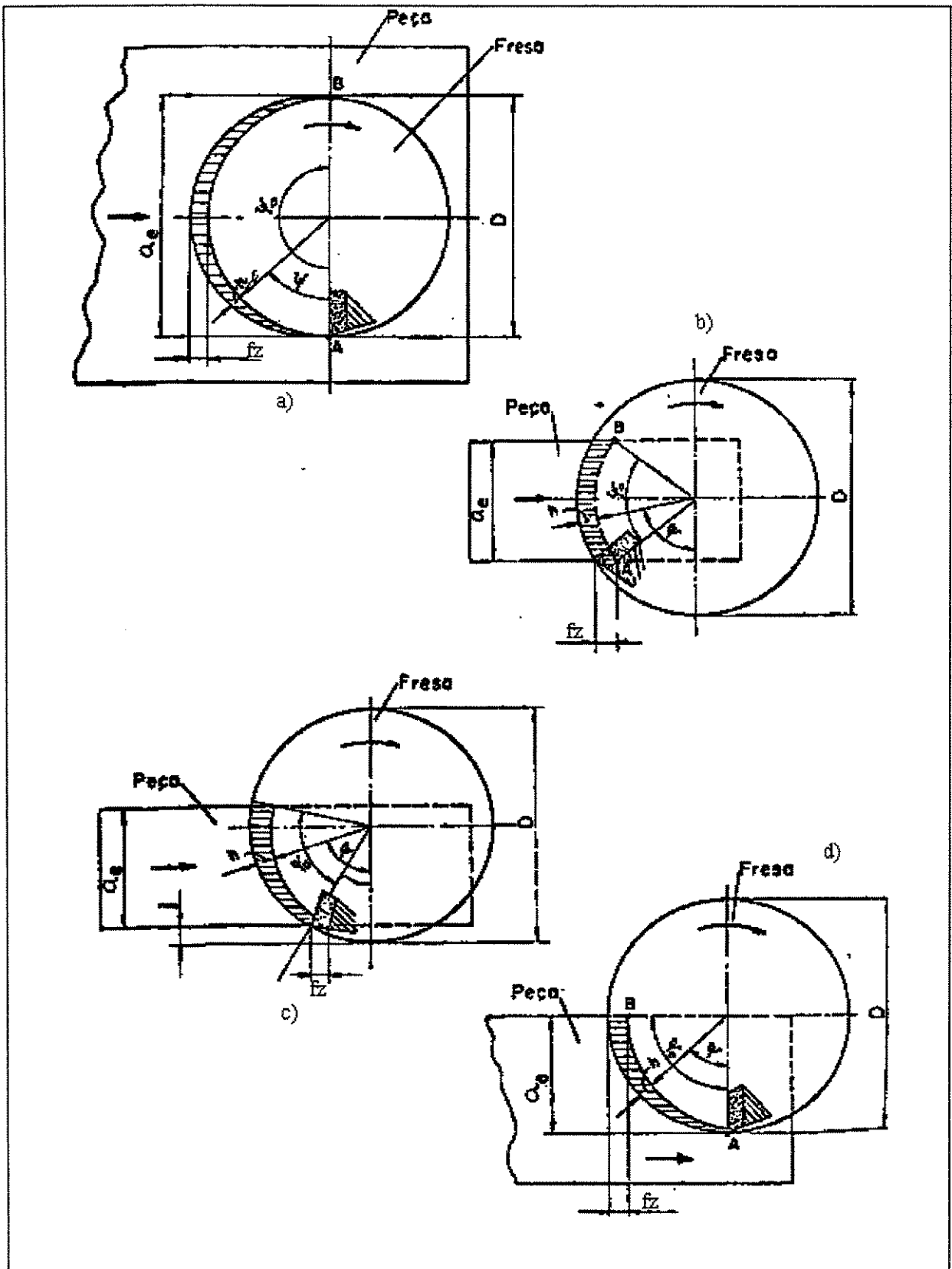


FIGURA 2.12 - Fresamento Frontal: a) simétrico de rasgo; b) simétrico comum;
c) assimétrico, com toda superfície sendo fresada; d) assimétrico
FONTE - FERRARESI, 1973

- Fresamento Frontal Assimétrico - neste caso o corte não se dá sobre o eixo de simetria da peça em usinagem. Quando toda uma superfície está sendo fresada (FIG.2.12-c) tem-se: $a_e < D$, $h_{Dmin} \neq 0$ e $h_{Dmax} = f_z$. Este tipo de fresamento é vantajoso quando o diâmetro da fresa é grande em relação à largura da peça, pois quando isto acontece, tem-se um maior número de dentes simultaneamente no corte e, com isto, menores esforços de corte por dente, e conseqüentemente, ter-se-á um corte mais suave. Ainda com relação ao fresamento frontal assimétrico, quando se deseja obter um contato favorável entre a aresta cortante e o material da peça a ser usinada, recomenda-se que o centro da fresa esteja situado dentro da largura (a_e) da peça. FERRARESI (1973), propôs a seguinte relação:

- $a_e \approx 0,75 D$ na usinagem de ferro fundido
- $a_e \approx 0,60 D$ na usinagem de aço

SANDVIK COROMANT (1994), também sugere que o diâmetro da fresa (D) seja de 20% à 50% maior que a largura da peça (a_e). Isto se deve ao fato de que o choque inicial fresa-peça não deva se dar com espessura de corte (h) igual a zero, ou próxima a este valor, pois se isto acontecer irão ocorrer as inconveniências já citadas anteriormente.

Ainda com relação ao contato favorável entre a aresta cortante e o material da peça que esta sendo usinado (principalmente no caso de fresas frontais com pastilhas de metal duro), é necessário que se estude a posição em que a pastilha vai tocar o material quando ela entra no corte em cada rotação. Tal posição de ataque vai depender dos ângulos da ferramenta e da posição relativa da fresa com a peça.

Na FIG.2.13, estão representados com as letras STUV, os quatros vértices da seção de cavaco no início do corte. Para que a solicitação por choque na pastilha seja pequena, é necessário que a pastilha toque o material primeiramente no ponto U, onde a área para resistir ao choque é maior. Torna-se muito prejudicial a pastilha se o choque inicial ocorrer no ponto S, isto é, na sua extremidade.

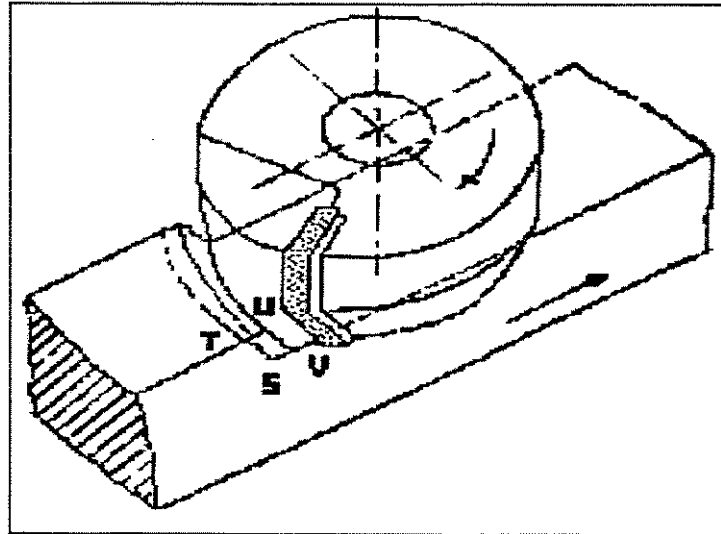


FIGURA 2.13 – Representação Esquemática da posição de Ataque da Pastilha de Metal Duro

FONTE - FERRARESI – 1973

Chama-se de *tempo de choque*, o tempo gasto entre o primeiro contato e o contato completo da pastilha com a seção do cavaco. O tempo de choque deve ser o maior possível, para que o efeito do choque na pastilha seja pequeno. Para que isto aconteça, toma-se nas fresas frontais a distância de ajustagem “ j ” (FIG.2.14), sendo que as condições mais favoráveis para a penetração do dente no material em usinagem são obtidas quando o afastamento “ j ” é da ordem de 5% do diâmetro da fresa (FERRARESI,1973), não podendo ser igual a zero, porque isto acarretaria em se ter “ h ” igual a zero, o que geraria maiores esforços de atrito e maiores esforços para o rompimento da tensão superficial na entrada do dente no corte (SANDVIK COROMANT, 1994).

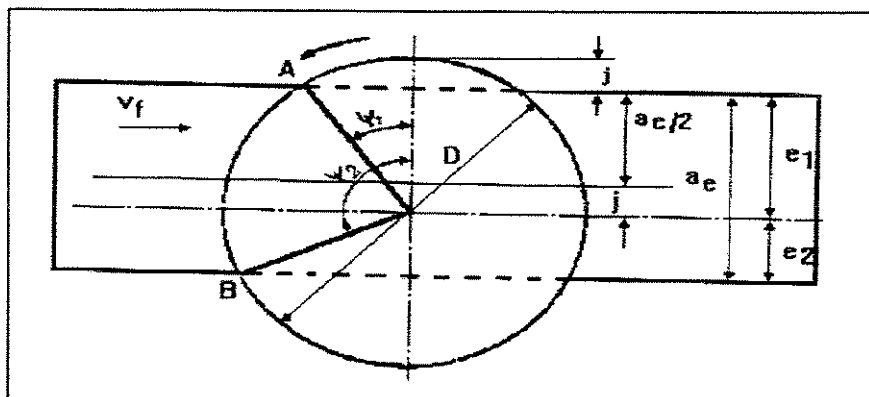


FIGURA 2.14 – Posição de uma Fresa Frontal em relação à peça mostrando a distância de ajustagem “ j ”

FONTE - FERRARESI – 1973

CALDERANI FILHO (1998), realizou ensaios experimentais de maneira a buscar uma relação entre a posição da fresa e a vida da ferramenta, variando para isso a distância de ajustagem “j” e medindo desgastes das pastilhas de metal duro de tempo em tempo, até que o critério estabelecido para o fim de vida da ferramenta fosse atingido. As distâncias de ajustagem “j” escolhidas pelo autor foram: 4,75 – 11,75 – 18,75 – 25,75 – 32,75 mm. A ferramenta utilizada foi uma fresa de 125 mm de diâmetro com 8 pastilhas de metal duro – P25, usada para usinar uma barra de aço 1045 de seção quadrada de 87,5 mm².

CALDERANI FILHO (1998), concluiu que para as condições similares testadas em seu trabalho, o corte assimétrico utilizando-se a menor distância de ajustagem ($j = 4,75$ mm) é o mais recomendado em termos de vida da ferramenta, por apresentar valores de desgaste de flanco menores que os outros. O autor ainda conclui que maiores valores de “j” implicam na predominância de lascamento sobre o desgaste de flanco e menores valores de “j” implicam na predominância de desgaste da aresta de corte sobre o lascamento.

Quando se compara o corte simétrico com o assimétrico, pode-se dizer que no corte simétrico a direção das forças radiais irá variar a medida que a aresta de corte penetra na peça, o que pode levar à vibrações e à quebra prematura da aresta. Porém quando o corte é assimétrico, a variação da força radial é bem menor e com isso menor é a tendência a vibração.

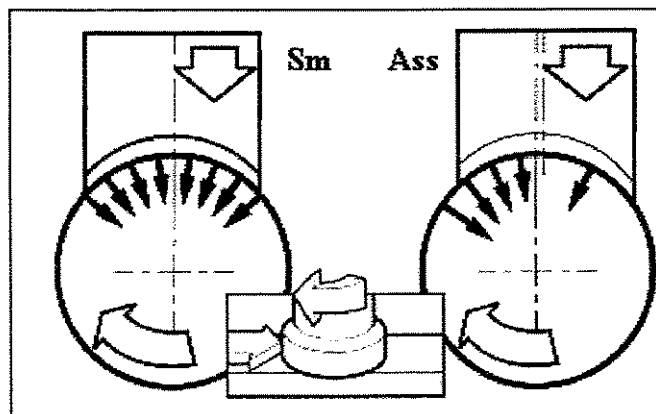


FIGURA 2.15 - Variação das forças no corte simétrico e assimétrico

FONTE - SANDVIK COROMANT - 1994 -p.X-44

2.6)- Cálculo da Potência de Corte e da Espessura Média de Corte

Em uma operação de fresamento a espessura do cavaco é variável e o número de dentes no corte também varia. Sendo assim, tais fatores irão influenciar a potência de corte consumida fazendo com que a mesma também varie. Porém, na maioria das vezes, o dimensionamento da potência requerida da máquina pode ser feito através do cálculo da potência média, principalmente quando se tem vários dentes atuando simultaneamente no corte e quando a máquina-ferramenta for suprida com um volante (que é um disco preso ao eixo-árvore da máquina-ferramenta, que armazena energia nos momentos em que o corte requer potência mínima, para devolvê-la ao corte quando estes necessita de potência máxima).

Segundo FERRARESI (1973), a equação da potência média de corte pode ser expressa por :

$$P_c = \frac{K_m \cdot a_e \cdot b \cdot v_f}{60 \cdot 75 \cdot 1000} = 2,22 \times 10^{-7} \times K_m \cdot a_e \cdot b \cdot v_f = 2,22 \times 10^{-7} \times K_m \cdot a_e \cdot b \cdot f_z \cdot z \cdot n \quad [CV] \quad (2.2)$$

onde:

K_m = pressão específica de corte para um valor médio da espessura de corte [kgf/mm^2]

a_e = penetração de trabalho [mm]

b = largura de corte [mm]

v_f = velocidade de avanço [mm/min]

f_z = avanço/dente [mm]

n = rotação [rpm]

z = número de dentes

A equação 2.2 é válida tanto para fresamento tangencial como frontal.

Como foi dito acima, a espessura de corte (h) varia ao longo do ângulo de contato (ϕ), e a pressão específica será fortemente influenciada por essa espessura de corte. Logo para se calcular o valor de K_m (que é geralmente retirado de tabelas empíricas) é necessário antes calcular o valor da espessura média de corte (h_m).

Assim, conforme a FIG.2.16, tem-se para fresamentos frontais:

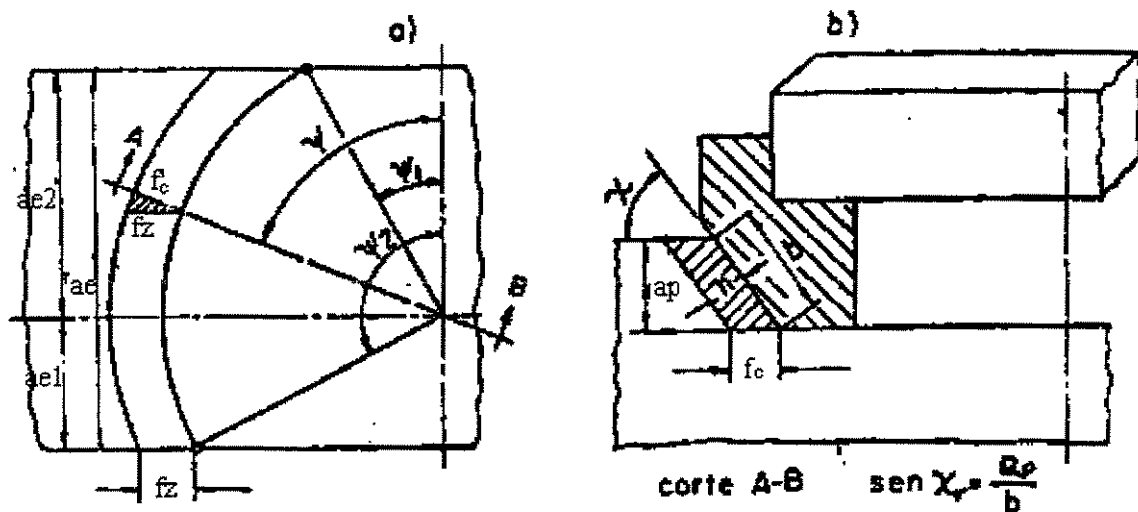


FIGURA 2.16- Espessura do Cavaco no Fresamento Frontal em função do ângulo de posicionamento de dente e o ângulo de posição

FONTE - FERRARESI, 1973

$$h_m = \frac{\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} h \cdot d\varphi}{\varphi_2 - \varphi_1} = \frac{1}{\varphi_2 - \varphi_1} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (f_z \cdot \sin \chi_r \cdot \sin \varphi) d\varphi$$

$$h_m = \frac{1}{\varphi_2 - \varphi_1} [f_z \cdot \sin \chi_r \cdot (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2)] \quad [\text{mm}] \quad (2.3)$$

onde:

φ_1 = ângulo entre o ponto de entrada (ou saída no fresamento concordante) do dente e a vertical

φ_2 = Ângulo entre o ponto de saída (ou entrada no fresamento discordante) do dente e a vertical

φ_0 = Ângulo de contato entre o dente e a peça

f_z = avanço por dente [mm]

χ_r = ângulo de posição (geralmente igual a 90°)

De posse do valor de h_m , consulta-se tabelas do tipo da TAB.2.1, para se retirar o valor de K_m e assim poder calcular o valor da potência de corte.

Tabela 2.1 - Valores da Pressão Específica de Corte (K_m) para o Fresamento
(FERRARESI,1973)

Material	Resistência (σ_t) [kgf/mm ²] ou Dureza	Valores Aproximados de K_m [kgf/mm ²]								
		Espessura de Corte h (mm)								
		0.025	0.04	0.063	0.1	0.16	0.25	0.4	0.63	1.0
1030	52	535	475	425	375	330	295	260	230	205
1035	58	405	370	340	310	280	255	235	215	195
1045	67	385	360	340	320	300	280	260	245	230
1060	77	425	390	360	330	305	280	260	240	220
8620	77	570	510	455	400	355	315	280	250	220
4140	73	675	600	535	475	420	370	330	290	260
4137	60	495	455	415	375	340	310	280	255	230
6150	60	600	530	475	420	370	330	290	260	230
Fofu duro	HRC=46	420	390	355	325	300	275	250	230	210
Ff GG26	HB=200	270	240	215	190	170	150	135	120	105

2.7)-Desgastes da Ferramenta no Fresamento

Vários são os fenômenos causadores dos desgastes em uma ferramenta de usinagem. Dentre os principais citam-se: abrasão mecânica, difusão, oxidação e aderência. Cada um destes fenômenos causará algum tipo de desgaste ou avaria da ferramenta. Entretanto, a operação de fresamento possibilita algumas características peculiares que facilitam o processo de desgaste da ferramenta, por se tratar de uma operação que tem a ação de corte interrompido, onde existem variações de temperatura, dos esforços de corte e da espessura de corte (h). Segundo MACHADO et al. (1991) “muitos materiais de ferramentas usados no fresamento tem sua vida limitada pelo lascamento da aresta de corte, que provavelmente é causado por uma combinação de choques térmicos e mecânicos.”

As características peculiares do fresamento são:

➤ VARIAÇÕES DE TEMPERATURA E ESFORÇOS MECÂNICOS

“A temperatura gerada numa operação de corte interrompido flutua ciclicamente elevando-se durante o período de corte e caindo no período de pausa” (MACHADO et al., 1991), ou seja, quando uma dada aresta está em contato com a peça realizando o corte, a mesma se aquece. Como a espessura de corte (h) é variável, a distribuição de temperatura é irregular. Quando esta aresta sai do corte, (passando a girar em altas velocidades ao ar), a mesma irá entrar em contato com o fluido refrigerante (e com o ar) que a resfriará.

O ambiente térmico experimentado pelas ferramentas no corte intermitente tem sido investigada por muitos pesquisadores. Dentre eles, citam-se BHATIA et al. (1980) e PALMAI (1987) que fizeram investigações de como se processa essa variação cíclica da temperatura.

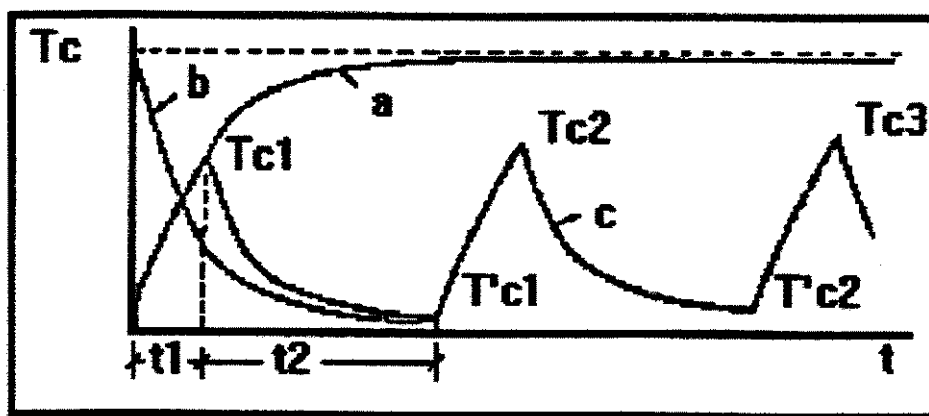


FIGURA 2.17 – Variação Cíclica da Temperatura de Corte no Processo de Corte Interrompido
FONTE - PALMAI, 1987

Na FIG. 2.17 a curva a representa a usinagem num processo de corte contínuo, onde a temperatura de corte (T_c) cresce até atingir a estabilização e depois volta à temperatura inicial (curva b) no final do processo. A curva c representa a variação da temperatura de corte (T_c) num corte interrompido (fresamento), sendo que a temperatura cresce até um valor T_{c1} durante o tempo ativo do corte (t_1) e depois cai até o valor T'_{c1} durante o tempo inativo de corte (t_2) e assim sucessivamente para os valores T_{c2} , T'_{c2} , T_{c3} , etc...

O resultado das investigações mostraram que a distribuição de temperatura depende das condições de corte (principalmente da velocidade de corte, avanço e da relação entre o tempo ativo e o inativo de uma aresta de corte durante um ciclo), do material de ferramenta de corte e do material da peça, pois estes fatores irão alterar o ciclo (tempo ativo/tempo inativo), do processo e a velocidade de aquecimento e resfriamento da aresta cortante.

Segundo MACHADO et al. (1991), “a temperatura flutuante na interface entre ferramenta e cavaco gera uma modificação na distribuição de tensões na região de corte da ferramenta e resulta na formação de fissuras térmicas”.

FERRARESI (1977), explica essa modificação na distribuição de tensões ocorrida na região de corte da seguinte forma:

A FIG.2.18-a mostra as curvas de distribuição da temperatura e tensão em relação a uma profundidade “x” a partir do ponto de contato cavaco-ferramenta. Durante o período de corte, a camada superficial da ferramenta - que está a uma temperatura bastante alta – (FIG.2.18-a) se dilata. Entretanto, as camadas que estão a temperaturas inferiores terão uma dilatação bem menor. Sendo assim, essas camadas irão impedir um maior progresso desta dilatação nas camadas superiores. Desta forma, originam-se na camada superficial (na interface cavaco-ferramenta) tensões de compressão (FIG. 2.18-b). Em consequência disto, a uma determinada profundidade “x” da superfície de contato, existirão tensões de tração. No instante seguinte, quando a aresta de corte passa a girar ao ar, haverá o resfriamento (ou seja, a temperatura diminui). Neste instante, essa camada superficial fica submetida à tração, enquanto que as camadas inferiores passarão a ser solicitadas à compressão (FIG.2.18-c e d). Essa variação das tensões devido à variação de temperatura após um determinado tempo de usinagem, pode levar à formação de fissuras térmicas, que causarão posteriormente, a deterioração da aresta de corte por lascamento.

Com relação à variação dos esforços mecânicos, BHATIA et al. (1980) lembram que, “em certos casos somente os impactos mecânicos podem provocar também a falha de ferramentas de metal duro.” Entretanto, estes mesmos autores ressaltam que “isto normalmente ocorre quando se utiliza avanços superiores a um valor crítico, o qual depende das condições de corte empregadas.”

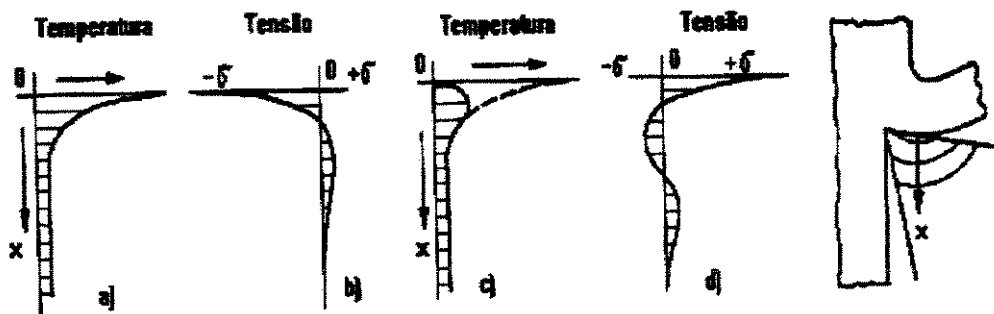


FIGURA 2.18 – Distribuição da Temperatura e das Tensões ocorridas na Região de Corte

FONTE - FERRARESI, 1977 - p.354

No momento de entrada no corte, a aresta irá sofrer um impacto, pois as forças de corte crescem rapidamente e depois variam conforme a direção e a espessura do cavaco. Isto poderá causar trincas por fadiga mecânica no material.

A somatória das trincas de origem térmica com as de origem mecânica irão resultar num tipo de formação na cunha cortante da ferramenta conhecida como *sulco em forma de pente*. Segundo FERRARESI (1977), tais sulcos são observados com frequência em operações de fresamento com pastilhas de metal duro.

As avarias (lascamento, trincas), bem como todos os desgastes das ferramentas, gerar a quebra da ferramenta. Algumas vezes, porém, a quebra pode acontecer de maneira inesperada devido a alguns fatores como ferramenta muito dura, carga excessiva sobre a ferramenta, raio de ponta, ângulo de ponta ou ângulo de cunha muito pequenos, corte interrompido, parada instantânea de movimento de corte, etc... A quebra da ferramenta ocasiona não só estrago na ferramenta, mas também no porta-ferramenta (se o corte não for interrompido imediatamente após a quebra) e na própria peça.

2.8)- Escolha das Condições de Usinagem e do Número de Dentes da Fresa

Existem muitas variáveis que influenciam os resultados de uma operação de fresamento. Porém, dentre essas variáveis, os principais fatores que devem ser levados em consideração na escolha das condições de usinagem são:

a)- Profundidade de usinagem (a_p):

“Do ponto de vista econômico, deve-se utilizar a maior profundidade de usinagem possível, já que esta influencia pouco no desgaste da ferramenta e seu aumento provoca um aumento proporcional na remoção de cavaco.”(DINIZ,1997)

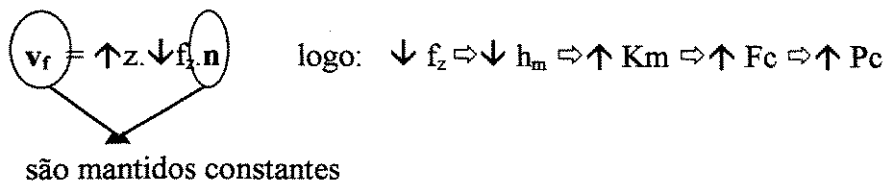
No caso de fresa frontais, o comprimento das arestas deve ser utilizado ao máximo, porém é interessante obedecer a recomendação de que o comprimento de corte ($b=a_p/\sin \chi_r$) não deve exceder a 2/3 do comprimento total da aresta da pastilha (segundo SANDVIK COROMANT, 1990) evitando assim vibrações indesejadas.

Porém, existem outros fatores que restringem o uso de grandes profundidades de usinagem, a saber: potência e rigidez da máquina, rigidez da peça, rigidez do sistema de fixação da peça e da ferramenta e o acabamento superficial da peça.

b)- Avanço (f) e Número de Dentes da Fresa (z):

Para a seleção do avanço em operações de fresamento, existem vários fatores que devem ser considerados, dentre eles: tipo da fresa, material da ferramenta, acabamento superficial, a potência da máquina disponível, etc... Sabe-se que o avanço não é diretamente proporcional a potência consumida. Quando o avanço/dente (f_z) cresce, fazendo crescer a espessura média de cavaco (h_m) a pressão específica de corte (K_m) diminui. Assim a potência necessária para a usinagem que é dada pela equação 2.3, também cresce, mas não na mesma proporção do crescimento de f_z , devido à diminuição do valor de K_m . Sendo assim, se houver um aumento do avanço/dente, haverá uma redução na potência necessária para se usinar um mesmo volume de cavacos na unidade de tempo. Segundo DINIZ (1997) , para fresamento tangencial o valor de h_m deve estar entre 0,04 e 0,2 mm e para fresamento frontal o valor de h_m não pode ser menor que 0,1 mm.

Quando se aumenta o número de dentes, ou seja, passa-se a usinar com fresas de passo pequeno (muitos dentes no corte) mantendo a rotação constante e também uma mesma velocidade de avanço da mesa, haverá aumento da potência, devido ao aumento da pressão específica de corte média (K_m), pois:



Então conclui-se que fresas de passo grande (poucos dentes) consomem menos potência e fresas de passo pequeno (muitos dentes) consomem mais potência.

Com relação à escolha do número de dentes existem alguns fatores que ajudam na sua escolha para cada operação. Dentre eles tem-se: o material da peça (materiais que geram cavacos longos exigem um espaço maior entre os dentes que materiais de cavacos curtos), o tamanho da peça (é interessante ter no mínimo 2 dentes atuando simultaneamente no corte), a estabilidade do sistema máquina-fresa-dispositivo de fixação-peça e o acabamento superficial que se deseja (quanto menor o avanço por dente melhor o acabamento superficial da peça).

A classificação das fresas quanto ao seu número de dentes pode ser observada na FIG. 2.19 e é feita da seguinte forma:

- A- Fresas de Passo Grande: são fresas com poucos dentes e possuem grandes bolsões para armazenamento de cavacos. São mais usadas para desbaste e semi-acabamento de aços e onde a tendência à vibração se torna uma ameaça ao resultado desejado.
- B- Fresas de Passo Pequeno: são fresas com muitos dentes e que possuem moderados bolsões para armazenamento de cavacos. São mais usadas para a usinagem de ferro-fundido (devido ao seu cavaco curto) e para operações em aços em operações de semi-acabamento e acabamento. Permitem alta taxa de remoção de cavaco.
- C- Fresas de Passo Extra-Pequeno: são fresas com muitos dentes e que possuem bolsões de armazenamento de cavacos muito pequenos. Permite razoáveis velocidades de avanço para avanço por dentes não muito reduzidos e, com isto, obtém-se um razoável volume de remoção do cavaco. Adequada para o corte interrompido de ferro fundido, de aços com pequenas profundidades de usinagem e para o fresamento de ligas de titânio (onde a velocidade de corte precisa ser mantida baixa).

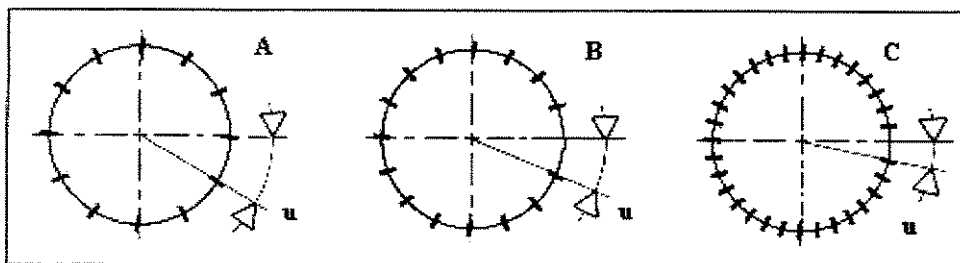


FIGURA 2.19 - Fresas de passo grande, pequeno e extra-pequeno

FONTE - SANDVIK COROMANT - p. X-22

A distância entre os dentes é dada pela fórmula: $u = \pi.D/z$ [mm] (2.4)

onde : **D** é o diâmetro da fresa [mm]

z é o número de dentes, segundo SANDVIK COROMANT (1990).

c)- Velocidade de Corte (v_c):

Variando-se a velocidade de corte , consequentemente varia-se o avanço por dente, se a velocidade de avanço (v_f) não for alterada. Numa fresadora o que se ajusta é a velocidade de avanço ou seja, a velocidade da mesa fresadora. Se uma alteração na velocidade de corte for necessária, varia-se então a rotação da fresa e consequentemente altera-se o avanço por dente (f_z). Modificando o avanço por dente está se alterando a espessura média do cavaco (h_m) com todas as conseqüências citadas no item b). Quando se modifica a velocidade de avanço (v_f) está se modificando o volume de material removido na unidade de tempo (V).

Por exemplo: um aumento na velocidade de corte (v_c) sem alteração da velocidade de avanço (v_f), provoca uma diminuição do avanço por dente (f_z) e da espessura do cavaco (h), sem entretanto se alterar o volume de cavaco removido na unidade de tempo, o que causará um aumento do número de dentes que entram no corte e acarretará uma maior pressão específica de corte por dente. Com isto ocorrerá um acréscimo na potência consumida.

Conclui-se então que ao se escolher a velocidade de corte existem alguns fatores que deverão ser ponderados. Além disso, o aumento de v_c causa uma forte diminuição da vida da ferramenta, o que também é verdade em todos os outros processos de usinagem. Preliminarmente é interessante adotar uma velocidade de corte que contribua para se obter uma vida econômica para a ferramenta, uma vez que a velocidade de corte tem uma maior influência sobre a vida da ferramenta que o avanço e a profundidade de usinagem.

2.9)- Acabamento Superficial em Fresamento

As exigências quanto ao acabamento superficial são, muitas vezes, um critério importante em fresamento. Sabe-se que no fresamento tangencial (com fresas cilíndricas) uma superfície ondulada é produzida. A altura desta ondulação define a rugosidade máxima teórica, que é calculada a partir do diâmetro da fresa e do avanço/dente (f_z).

Esta rugosidade máxima teórica é dada pela equação:

$$R_{max\text{teor}} = \frac{f_z^2}{4D} \quad (2.5)$$

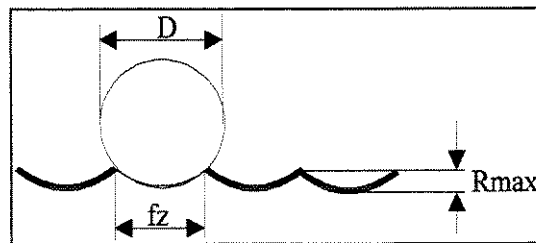


FIGURA 2.20 - Superfície Teórica fresada por fresamento tangencial

FONTE - DINIZ, 1997

Para o fresamento frontal, como o utilizado neste trabalho, não se tem uma equação para a rugosidade teórica, mas sabe-se que a rugosidade é fortemente influenciada pelo avanço/dente, devido a aspectos geométricos do corte. Sendo assim, teoricamente, a medida em que se diminui o avanço/dente (f_z), a rugosidade superficial também deveria diminuir. Entretanto, cabe aqui salientar que equações do tipo desta, somente consideram aspectos geométricos teóricos e não podem ser consideradas exatas (SANDVIK COROMANT, 1990).

A rugosidade máxima real, no entanto, é sempre maior ou igual à rugosidade teórica pois outros fatores também influem no seu valor. Dentre eles tem-se:

- posicionamento irregular das pastilhas no sentido axial (no caso de fresas frontais);
- fluxo de saída de cavacos irregular;
- desgaste não uniforme das arestas;
- fixação e/ou rigidez deficientes da peça que podem gerar vibrações que são reproduzidas na superfície da peça;
- condições operacionais da máquina-ferramenta.

“A rigidez de uma máquina e o seu bom estado de conservação refletirão diretamente no acabamento superficial e nas tolerâncias dimensionais que podem ser produzidas na peça. Se qualquer parte da máquina, como os mancais do fuso, as superfícies das guias da mesa ou o mecanismo de avanço, tiverem desgaste excessivo, estas condições afetarão adversamente as tolerâncias e os acabamentos superficiais que podem ser obtidos”(STROLBERG, 1994). Sem um ajuste adequado e a devida manutenção da máquina, podem ocorrer vibrações que reduzirão a vida da ferramenta e também provocarão um acabamento ruim.

O pior acabamento é obtido quando somente um dente gera uma superfície. Uma mudança entre fresamento concordante e discordante, pode em alguns materiais, melhorar o acabamento superficial (o fresamento concordante melhora o acabamento superficial devido à diminuição da vibração). O uso adequado de fluido de corte, especialmente quando do acabamento de materiais que tem tendência ao empastamento, também melhora o acabamento superficial. Uma aplicação eficiente de fluido de corte como refrigerante, pode aumentar a vida da ferramenta, diminuir a rugosidade superficial, aumentar a precisão dimensional e diminuir a potência consumida em relação ao corte a seco. Também, no fresamento tangencial, a penetração de trabalho (a_e) deve ser mantida baixa, pois esta tem um importante efeito na deflexão da ferramenta. Porém esta penetração de trabalho não pode diminuir muito, principalmente no corte de materiais que tem alta taxa de encruamento, como o aço inoxidável austenítico, para que se evite o encruamento da superfície.

O acabamento superficial no fresamento de topo dependerá da condição da batida radial da ferramenta. Entretanto, a relação diâmetro de corte/balanço, avanço por dente e fixação da ferramenta são fatores que também precisam ser considerados (SANDVIK COROMANT, 1994).

Para operações de fresamento frontal, existem pastilhas utilizadas nas fresas de facear, que possuem uma fase plana que liga a aresta principal à aresta secundária, como pode ser visto na FIG. 2.21. Esta fase plana deve ter um comprimento “**bs**” de 3 à 10 vezes o avanço por dente (f_z). Esta parte plana tem a função de quebrar os picos de rugosidade, gerando assim uma superfície com melhor acabamento do que as pastilhas com raio de ponta.

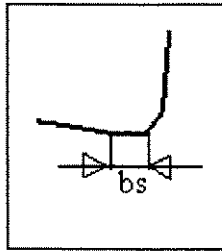


FIGURA 2.21 - Esquema da fase plana de uma pastilha de fresa de facear

FONTE - DINIZ,1997

“Nem sempre as arestas de uma fresa frontal de facear estão todas em um mesmo plano paralelo à superfície usinada. Isto ocorre devido à tolerância das pastilhas, à folga nos mancais do eixo-árvore e à rebarbas ou defeitos na fixação das pastilhas na fresa. Quando isto ocorre, somente a(s) pastilha(s) mais saliente(s) gera(m) a superfície acabada e são responsáveis pela rugosidade da peça” (DINIZ,1997).

Quando apenas uma (1) pastilha está em um plano mais saliente que todas as outras, recomenda-se que o avanço por volta (f) seja menor que a fase plana da pastilha (bs) (SANDVIK COROMANT, 1990). Dessa maneira, uma determinada área da peça que foi fresada em uma volta ainda poderá ser alisada nas voltas subsequentes. Para se conseguir um melhor acabamento possível é necessário que se tenha “ bs ” grande e que mais de uma aresta de corte estejam no mesmo plano. Para que isso ocorra é necessário que as arestas cortantes mais salientes estejam regularmente distribuídas pela periferia da fresa, para que suas fases planas tenham seus passes superpostos.

“Por outro lado, se “ bs ” aumenta, a tendência à vibração da ferramenta e da peça também aumenta, devido ao maior comprimento de contato e, assim, a rugosidade tende a piorar. Então, para fins de rugosidade da peça, existe um valor ótimo de “ bs ”, que não é nem muito pequeno, para que uma mesma área cortada possa ser alisada algumas vezes e nem muito grande, para que a vibração não seja incentivada. Se o avanço (f) aumenta, aumenta a necessidade de se manter mais de uma aresta no mesmo plano” (DINIZ,1997).

Na usinagem de materiais de cavacos curtos, como ferro fundido e/ou quando baixa rugosidade é desejada, costuma-se utilizar *pastilhas alisadoras*. Em geral, substitui-se uma das pastilhas da fresa com pastilhas intercambiáveis, por uma pastilha alisadora. As *pastilhas*

alisadoras são pastilhas das fresas de facear, que tem a fase plana (bs) alargada a fim de reduzir a rugosidade da peça. Para se ter uma idéia da ordem de grandeza, em pastilhas comuns “**bs**” varia de 1 a 2,5 mm, podendo chegar a 4 mm. Em pastilhas alisadoras um valor típico de “**bs**” é 10 mm. O ajuste desta pastilha deve ser feito de maneira que a fase plana esteja 0,02 à 0,1 mm mais saliente do que todas as outras de modo que possa exercer sua função que é a de diminuir a rugosidade da peça (SANDVIK COROMANT, 1990).

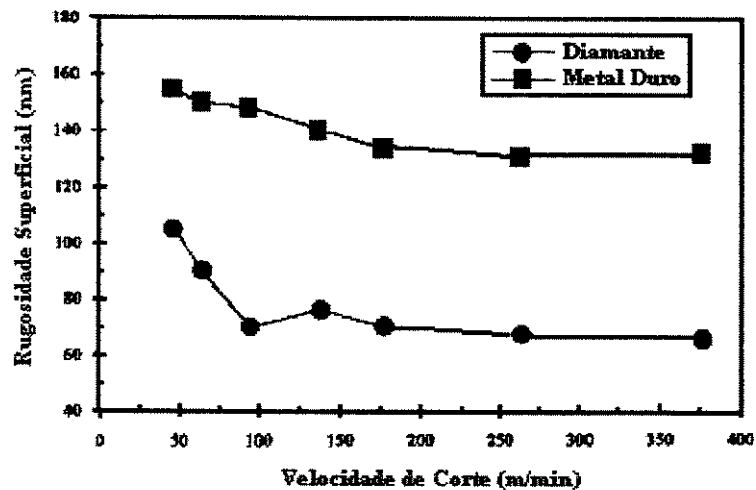
Na usinagem de aços e materiais de cavacos longos, pastilhas alisadoras possuem uma menor aplicação devido ao fato de que muitas vezes há dificuldade na saída dos cavacos ou problemas com vibração. Outra desvantagem da pastilha alisadora é que ela se desgasta mais rapidamente que as outras, podendo causar uma parada prematura do corte para que somente ela seja substituída. Então a utilização deste tipo de pastilha deve ser cuidadosamente analisada, levando-se em conta as vantagens e desvantagens de seu uso.

KIM & KANG (1997), estudaram os efeitos das condições de usinagem sobre a rugosidade superficial no fresamento de uma liga de alumínio (AL2024). Para os experimentos foram utilizados dois tipos de fresas de topo: a primeira utilizava pastilhas de metal duro e a segunda foi especialmente projetada pelo autores, sendo que os insertos nela utilizados eram de diamante policristalino (PCD). A velocidade rotacional do fuso variou na faixa de 2.500 à 20.000 rpm.

As condições de corte para o experimento utilizada pelos autores foram as seguintes:

- velocidade de corte : 47 à 377 m/min
- avanço por dente : 0,38 à 4,35 μ m
- penetração de trabalho : 1 à 6 mm
- profundidade de usinagem : 0,04 à 1 mm
- tamanho da peça: 45 x 28 x 28 mm³
- material da peça : liga de alumínio (AL2024) - (dureza 47 HB)
- diâmetro de ambas fresas: 6 mm
- comprimento total de ambas fresas : 50 mm
- número de dentes de ambas fresas : 2 dentes

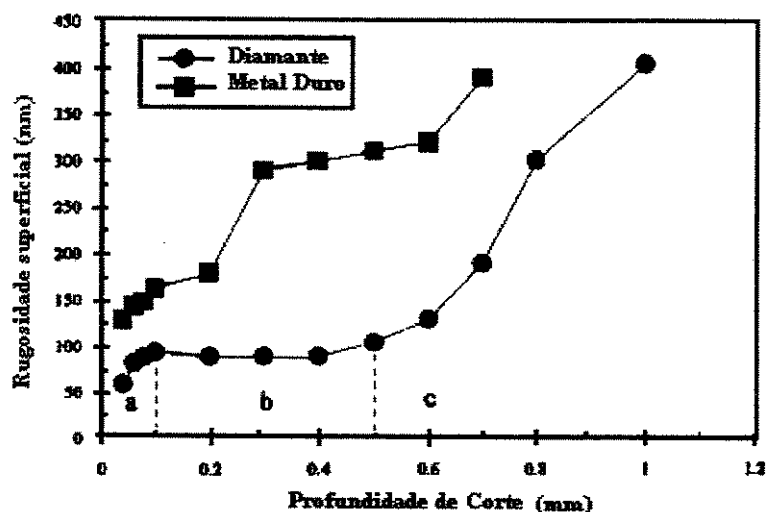
As FIG. 2.22, 2.23, 2.24 e 2.25 (KIM & KANG, 1997) mostram a influência da velocidade de corte, da profundidade de usinagem, do avanço por dente, e da penetração de trabalho para a rugosidade R_a , no fresamento de topo da liga AL2024, utilizando-se pastilhas de metal duro e de diamante policristalino (PCD) respectivamente.



onde: $f_z = 2,2 \mu\text{m}$; $a_e = 6 \text{ mm}$; $a_p = 0,2 \text{ mm}$

FIGURA 2.22- Relação entre Rugosidade Superficial e Velocidade de Corte

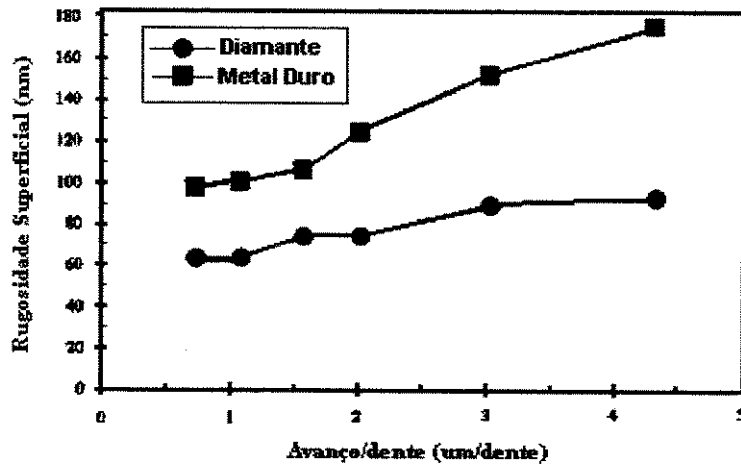
FONTE - KIM & KANG, 1997



onde: $v_c = 188,5 \text{ m/min}$; $f_z = 4,35 \mu\text{m}$; $a_e = 6 \text{ mm}$

FIGURA 2.23 - Relação entre Rugosidade Superficial e Profundidade de Usinagem

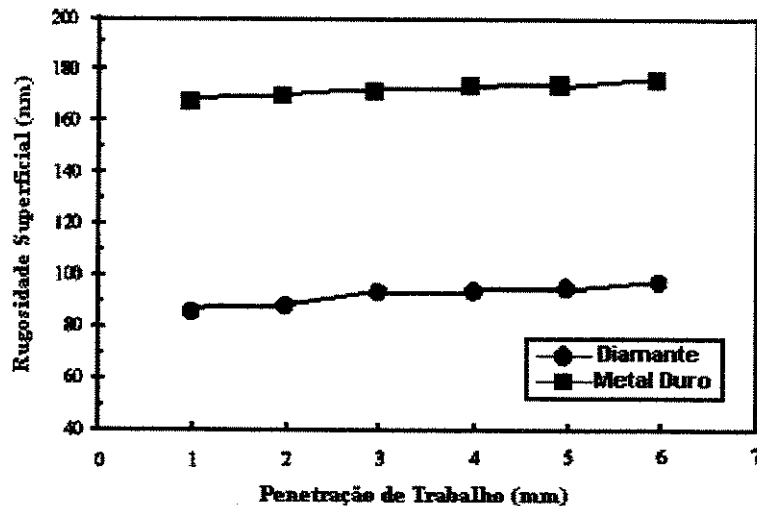
FONTE - KIM & KANG, 1997



onde: $v_c = 188,5$ m/min; $a_e = 6$ mm; $a_p = 0,2$ mm

FIGURA 2.24 - Relação entre Rugosidade Superficial e Avanço por Dente

FONTE - KIM & KANG, 1997



onde: $v_c = 188,5$ m/min; $f_z = 4,35$ μ m; $a_p = 0,2$ mm

FIGURA 2.25 - Relação entre Rugosidade Superficial e Penetração de Trabalho

FONTE - KIM & KANG, 1997

Destas figuras os seguintes comentários podem ser feitos:

- **FIG. 2.22:** observa-se para esta figura que a rugosidade superficial diminui com o aumento da velocidade de corte. Observa-se também que os valores de R_a são bem maiores para a fresa de topo com insertos de metal duro do que para a fresa com insertos de diamante

policristalino. Além disso, para ambos casos a rugosidade superficial somente melhora muito vagarosamente com velocidades acima de 170 m/min.

- FIG.2-23: observa-se de um modo geral que a rugosidade superficial aumenta com o aumento da profundidade de usinagem para ambas ferramentas. No caso da fresa de topo com insertos de diamante, aparentemente existem três (3) regiões distintas. Com uma profundidade de usinagem entre 0,08 e 0,5 mm percebe-se que a rugosidade superficial é quase constante (região b). Entretanto, com a profundidade de usinagem menor que 0,08 mm a rugosidade superficial cresce rapidamente (região a) e com uma profundidade de usinagem superior a 0,5mm a rugosidade também cresce rapidamente (região c). Segundo os autores, a tendência crescente apresentada na região c, é devido à deflexão da ferramenta. A fresa de topo com insertos de metal duro não apresentou essas três (3) regiões bem definidas.
- FIG.2.24: observa-se que a rugosidade superficial aumenta com o aumento do avanço por dente para ambas ferramentas. Porém esse aumento é pequeno para a fresa de topo de diamante, ao contrário do que acontece com a fresa de topo com insertos de metal duro, a qual apresentou um maior crescimento da rugosidade superficial (R_a) para avanços acima de 2 μm .
- FIG.2.25: observa-se nesta figura que a rugosidade superficial para ambas fresas mantém-se constante com o crescimento da penetração de trabalho. Porém nota-se que os valores de R_a obtidos para a fresa de topo com insertos de metal duro são bem maiores que para a fresa de diamante (quase 2 vezes maior).

Dos comentários acima, KIM & KANG (1997), chegaram a conclusão de que para o fresamento de acabamento de ligas de alumínio, utilizando altas velocidades de corte, o fator que mais afeta a qualidade superficial é a profundidade de usinagem (ap).

2.10)- Fresamento de Topo com CORONITE, Metal Duro e Aço

Rápido

“Ao longo dos últimos 15 anos a usinagem recebeu grandes aperfeiçoamentos com a introdução no mercado, da nova geração de materiais para ferramentas.” (MACHADO et al., 1991). Porém qualquer que seja o material para ferramenta em consideração, é necessário que o mesmo apresente algumas características importantes que dependem de uma série de fatores, tais como: material a ser usinado, condições de usinagem, forma e dimensões da ferramenta, condições da operação, entre outros.

Essas características são:

- * dureza à quente: procura-se cada vez mais materiais que consigam ultrapassar uma temperatura de 1000°C com dureza o suficiente para suportar as tensões de corte.
- * resistência ao desgaste: procura-se cada vez mais materiais que consigam resistir aos diversos fenômenos causadores de desgaste nas ferramentas.
- * tenacidade: que representa a quantidade de energia necessária para romper o material. Uma ferramenta tenaz é sinônimo de uma ferramenta que consegue resistir bem aos choques inerentes ao processo.

O fresamento é uma operação de usinagem que tem ação de corte interrompido. Sendo assim, é necessário que a fresa seja tenaz para resistir aos choques térmicos e mecânicos (tais choques podem gerar trincas levando à quebra da fresa).

Com isso as fresas são fabricadas principalmente de aço rápido, aço rápido com cobertura e metal duro. Fresas de grandes diâmetros, como as fresas frontais de facear ou fresas cilíndricas de disco são feitas de metal duro com corpo de aço carbono. Para fresas de topo, que possuem pequenos diâmetros, o material utilizado é normalmente o aço rápido ou aço rápido com cobertura, pois para se conseguir altas velocidades compatíveis com o metal duro seria necessário que a máquina utilizada fornecesse altíssimas rotações. Ainda com relação às fresas de topo que possuam diâmetros inferiores a 20 mm, existe uma outra opção de material conhecido como CORONITE. Atualmente, porém, os modernos centros de usinagem tem propiciado rotações muito altas do eixo-árvore. Rotações acima de 10.000 rpm

estão se tornando comuns e, em alguns casos, rotações de 25.000 rpm já podem ser alcançadas em centros de usinagem utilizados em trabalhos regulares de produção. Assim, além do coronite, que como será visto neste item, possui propriedades intermediárias entre o metal duro e o aço rápido e, portanto, possibilita a utilização de velocidades de corte intermediárias, também o metal duro começa a ser utilizado em fresas de diâmetro pequeno (fresas inteiriças de metal duro), visto que velocidades de corte entre 200 e 300m/min já podem ser atingidas nesta faixa de diâmetros (menores que 20 mm) (SANDVIK COROMANT, 1997).

No início dos anos 80, a SANDVIK COROMANT começou uma extensa pesquisa na tentativa de se criar um material para fresas de topo, que fosse compatível com as modernas tecnologias de produção. Sendo assim, estabeleceu-se que a combinação de tenacidade e resistência ao desgaste requeridos pela operação de fresamento de topo em particular, seria encontrada em um material que estivesse entre o metal duro e o aço rápido.

Foi assim que surgiu o CORONITE. O CORONITE é composto de partículas extremamente finas de nitreto de titânio (TiN - partículas de cerca de 0,1 µm de diâmetro que são muito menores que as partículas duras encontradas no metal duro, cujo tamanho varia de 1 à 10 µm). Essas partículas extremamente finas de metal estão dispersas em uma matriz de aço temperado perfazendo um total de 35 à 60% do volume do material. Essa proporção de partículas duras é bem maior do que o volume de partículas duras possível de ser obtida no aço rápido, mas menor que o volume de partículas duras do metal duro.

Na maioria das vezes, as ferramentas de CORONITE (principalmente as fresas de topo) não são feitas totalmente de sólido CORONITE. Normalmente ela é composta de três partes: um núcleo de aço que adiciona tenacidade à ferramenta - em fresas de topo que também tem a capacidade de furar, este aço é o *aço rápido*, e em fresas que não tem a capacidade de furar, apenas fresam, este aço é o *aço mola* – (ESP... ,1991) ; uma camada de CORONITE que recobre o núcleo (cerca de 15% do diâmetro da fresa) e uma camada exterior de cobertura de TiN ou TiCN com aproximadamente 2 µm de espessura. A alta afinidade físico-química das camada de TiCN ou TiN da cobertura com o Coronite criam uma forte ligação entre o substrato e a cobertura, diminuindo a possibilidade de lascamento. Esta camada de cobertura

possui uma alta resistência ao desgaste da superfície de folga da ferramenta e o Coronite possui uma alta resistência ao desgaste de cratera. Assim, quando uma ferramenta deste tipo é afiada na sua superfície de saída (retirando dali toda a camada de cobertura) não precisa ser coberta de novo e, mesmo assim, mantém uma alta resistência ao desgaste.

As principais propriedades do CORONITE são:

- possui tenacidade similar ao aço rápido e bem maior que o metal duro;
- seu módulo de elasticidade (que tem relação com a rigidez do material) é menor que o do metal duro, porém maior do que o aço rápido;
- sua dureza à quente e resistência ao desgaste são bem maiores que do aço rápido;
- possui baixa tendência à craterização (ou seja, possui baixa tendência à formação do desgaste na superfície de saída da ferramenta), devido ao fato de que o TiN é muito estável quimicamente;
- sua capacidade de produzir superfícies com bons acabamentos é maior que a do aço rápido e do metal duro. Isso provavelmente ocorre devido ao pequeno tamanho do grão das partículas de Coronite, que proporcionam uma aresta de corte bem afiada. Essa geometria da aresta é preponderante quando a espessura do cavaco é pequena e por isso, nestes casos, a rugosidade da peça é menor que nas peças usinadas com fresas de metal duro.

Com relação às fresas de topo de metal duro inteiriças ou brasadas, estas são feitas na maioria com tamanhos de diâmetro de 10 à 50 mm com dentes de usinagem longos, estando assim capacitadas para se usinar largas quinas/cantos (FIG. 2.26). Esses tipos de fresas são convenientes para certas operações e materiais, além do que elas oferecem um bom acabamento superficial com produtividade diversas vezes maior que o aço rápido.

O fresamento lateral feito com este tipo de fresa pode ser realizado com a profundidade de usinagem (a_p) relativamente grande. Essas ferramentas são rígidas, minimizando assim a deflexão e gerando bom acabamento.

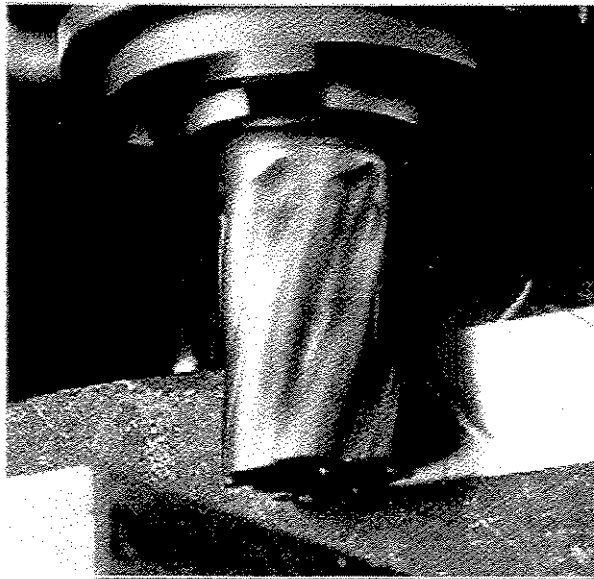


FIGURA 2.26 - Fresamento de uma quina com uma fresa de topo de metal duro

FONTE - SANDVIK COROMANT - 1994 - p.X-97

Fresas de Topo de Metal Duro Brasadas e Helicoidais também tem a capacidade para furar e foram projetadas especialmente para a usinagem de alumínio. Um ângulo de hélice de 25° e um ângulo de saída positivo a fazem conveniente para desbaste e acabamento de várias peças reforçadas. Entretanto, a profundidade de usinagem (a_p) nestes casos tem que ser limitada para minimizar a deflexão.

Fresamento de topo de pequenos diâmetros, onde geralmente os diâmetros estão abaixo de 20 mm, representam uma grande porção de aplicações realizadas geralmente por ferramentas de aço rápido. Segundo SANDVIK COROMANT (1994), tais ferramentas, usadas por muitas décadas, apesar do seu custo ser baixo, apresentam hoje um inferior desempenho se comparadas às ferramentas de CORONITE.

Segundo SANDVIK COROMANT (1994), para áreas de aplicação, onde as fresas de topo estão abaixo de 20 mm, chegando até poucos milímetros de diâmetro, as fresas de CORONITE são as mais recomendadas, pois possuem um alto desempenho, sendo uma alternativa às fresas de aço rápido. O CORONITE combina a tenacidade do aço rápido com a resistência ao desgaste do metal duro, chegando a usinar a uma velocidade dez vezes maior que outras ferramentas similares nesta área. Também obtém-se uma vida para a ferramenta mais longa, além de apresentar um melhor acabamento superficial (R_a da ordem de $1,0 \mu\text{m}$).

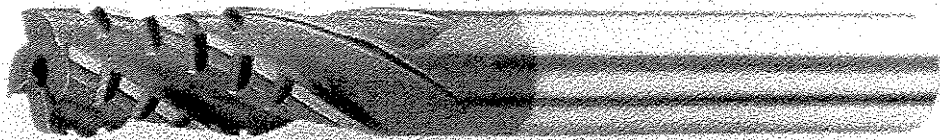


FIG.2.27 - Fresa de Topo de CORONITE

FONTE - SANDVIK COROMANT - 1994 - p.III-41

O CORONITE é, geralmente utilizado em fresas de topo e são aceitáveis para operações envolvendo desbaste e acabamento e também para a usinagem de sulcos, bolsões e perfis. Tais ferramentas são aceitáveis na usinagem da maioria dos materiais (na sua grande maioria usinagem de aços, porém também tem um bom desempenho quando usinam aço inoxidável, ferro fundido, alumínio e ligas de titânio).

O fresamento de topo, especialmente para aço inoxidável e materiais de baixo carbono com tendência ao empastamento, tanto em operações de acabamento como desbaste, devem possuir um grande ângulo de hélice (40°) e um grande ângulo de saída. Para o fresamento de topo em geral, um ângulo de saída de 30° é aceitável (SANDVIK COROMANT, 1994).

As fresas de topo apresentadas na FIG.2.28 cobrem os tipos de ferramentas para desbaste, acabamento, e semi-acabamento de sulcos, bolsões e contornos. Consegue-se obter um bom acabamento superficial com essas fresas de topo. Velocidades de corte de 100 m/min e acima são recomendados para usinagem de aços sem liga.

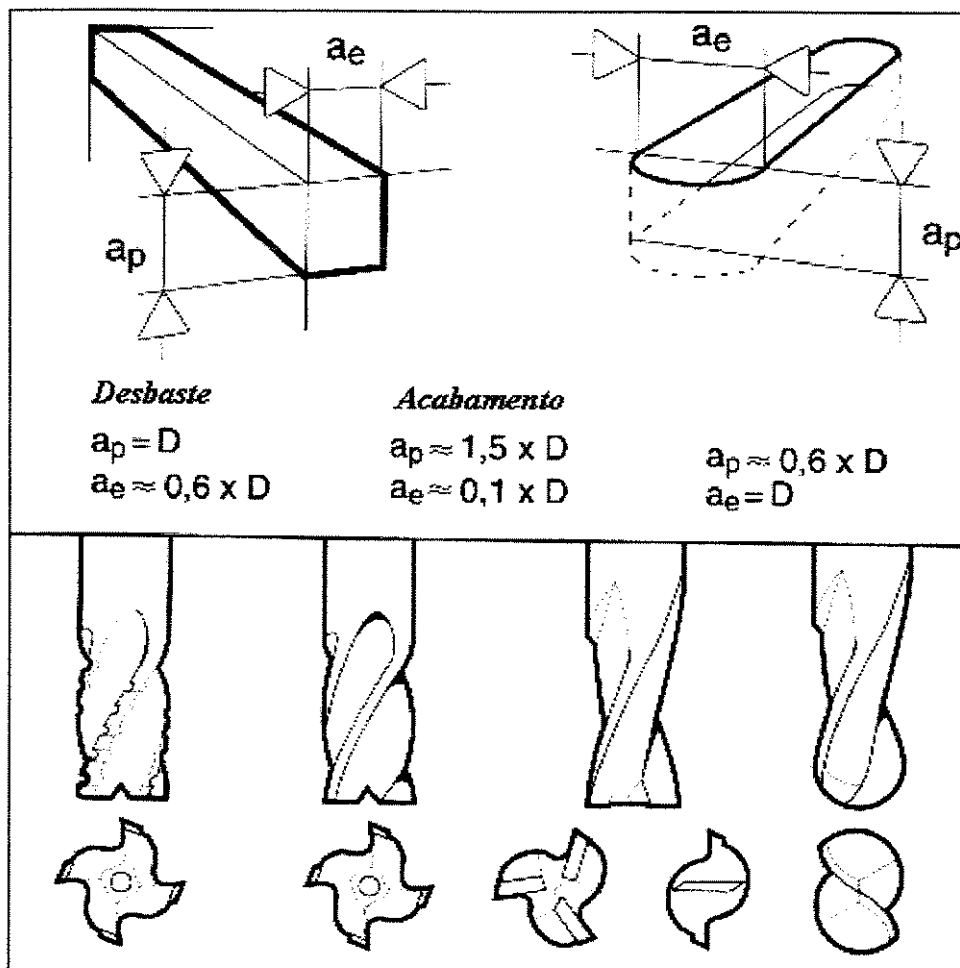


FIGURA 2.28- Alguns fatores de usinagem de fresas de topo

FONTE - SANDVIK COROMANT - 1994 - p.X-99

A FIG.2.29 mostra típicos melhoramentos obtidos com este novo material no fresamento de acabamento de um típico contorno feito em aço matriz. Quando comparada ao aço rápido recoberto, a fresa de topo de coronite mostrou resultado superior na vida da ferramenta e na confiabilidade. Quando comparada ao metal duro recoberto, a fresa de topo de coronite apresentou comportamento similar com relação à vida da ferramenta.

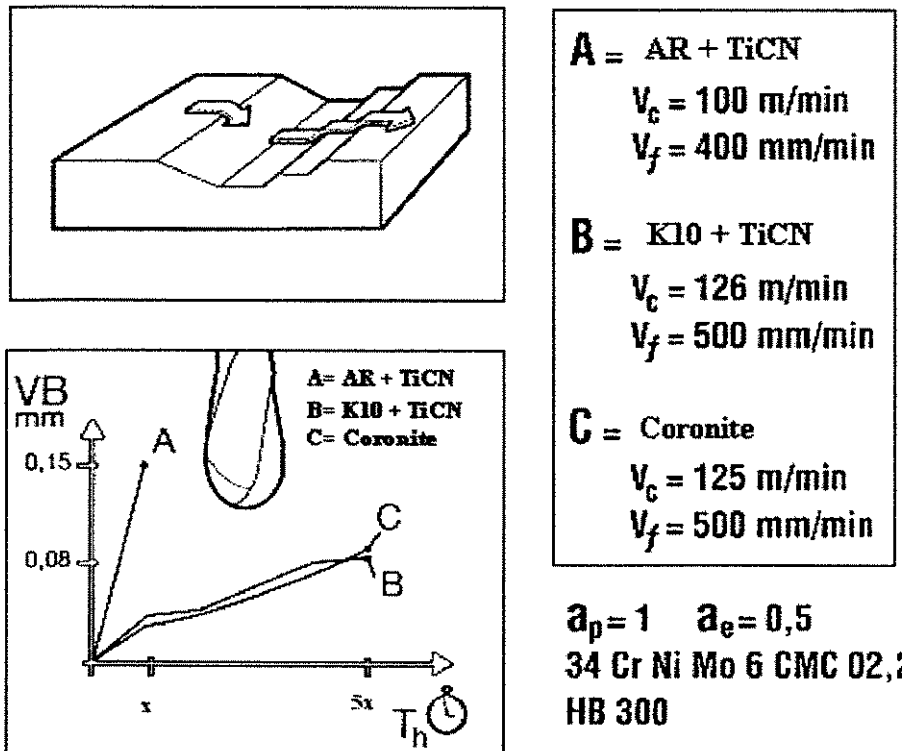


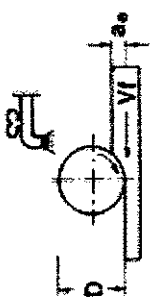
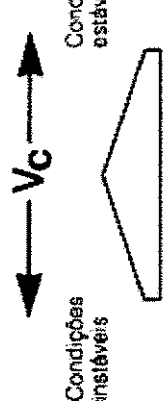
FIGURA 2.29 - Comparação de resultados obtidos com fresas de topo de aço rápido recoberto, metal duro recoberto e coronite.

FONTE - SANDVIK COROMANT - 1994 - p.III-44

A fresa de topo de aço rápido resistiu somente a 20% do tempo obtido com as fresas de topo de metal duro recoberto e coronite. Para um tempo maior, a fresa de topo de metal duro recoberto apresentou micro fissuras na aresta de corte, enquanto que a fresa de coronite apresentou desgaste de flanco uniforme.

O Institute of Technology, em Aachen, na Alemanha, comparou o desempenho de fresas de topo de coronite e metal duro quando do fresamento de topo de um aço doce (200 HB) e o desempenho de fresas de topo de coronite e aço rápido quando do fresamento de topo de um aço de alta liga (340 HB). Em ambos os casos, sete vezes mais peças por fresa foram produzidas com coronite do que com as outras duas ferramentas. Em materiais normais tais como aço de baixo teor de carbono e aços de baixa liga, uma tripla melhoria na produtividade foi obtida, enquanto que em materiais de difícil usinabilidade também grandes melhorias foram obtidas. Os dados de usinagem são mostrados na TAB. 2.2 (SANDVIK COROMANT,1992).

Tabela 2.2 - Dados Técnicos de Corte para Fresas de Topo de Coronite
(SANDVIK COROMANT, 1992)

Aplicação					Tabela de avanço, $v_f = \text{mm/min}$				Furação
					Fresagem lateral $a_e < 0,5D$		ragem $a_p \ll \frac{a_e}{2}$	Fresagem frontal	
Material	CMC No.	HB Máx.			$a_e < 0,5D$	$a_e < 0,15D$	$a_p \ll \frac{a_e}{2}$		
Aço sem liga	01.1	150			400	300	370	600	125 160
Aço sem liga Aço de baixa liga	01.2 02.1	225 250			320	240	300	450	100 130
Aço de baixa liga Ferro fundido cinzento	02.2 08	350 250			230	170	210	320	70 90
Aço de alta liga Ligas de titânio Aço inoxidável	03.11 23.4 05.2	450 350 250			130 130 130	100 100 100	120 120 -	200 250 200	25 25 25
Ligas à base de Níquel	20.2	300			30	20	25	40	10 15
Alumínio	30	150			>900	>450	-	>900	>150 >200

A FIG. 2.30 mostra uma comparação feita entre CORONITE, metal duro e aço rápido com relação a um número importante de propriedades para o fresamento de topo (ESP..., 1991).

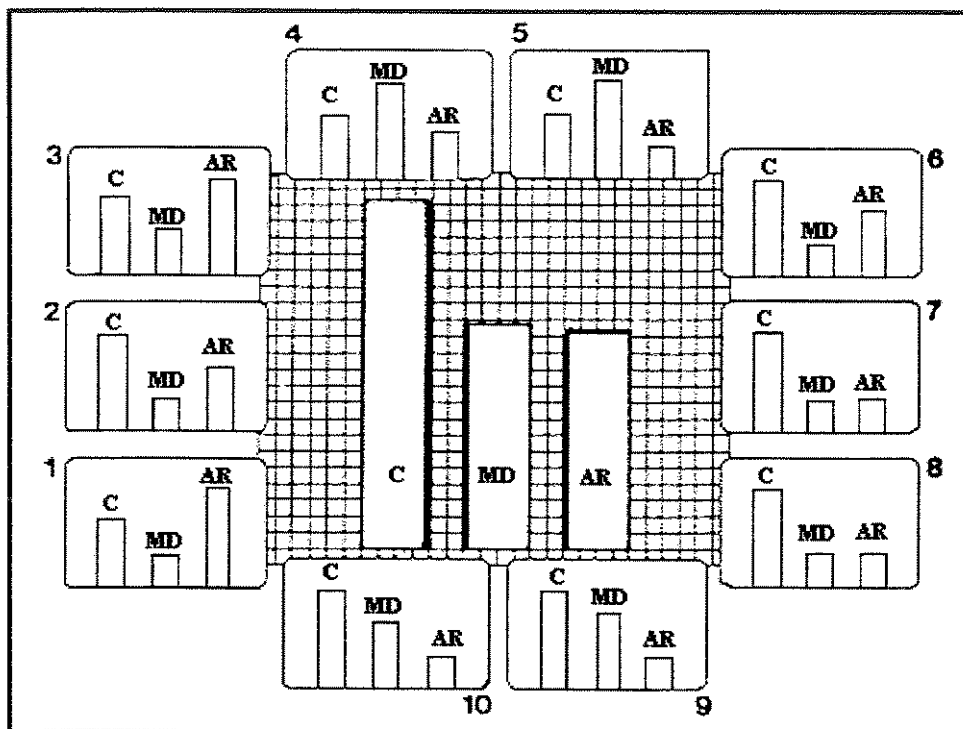


FIGURA 2.30 - Comparação entre CORONITE (C), Aço Rápido (AR) e Metal Duro (MD) com respeito a um número de importantes propriedades para o fresamento de topo

FONTE - ESP..., 1991

Tem-se nesta figura:

- 1)- Tenacidade do Dente : com relação à tenacidade pode-se dizer que o aço rápido é mais tenaz que o coronite que por sua vez é mais tenaz que o metal duro.
- 2)- Tenacidade da Aresta de Corte no Fresamento Discordante : foi observado que durante o fresamento discordante lascas da aresta de corte acompanham os cavacos retirados durante o corte. Essas partículas que são levados embora durante o processo de desgaste da fresa são menores para fresa de coronite.
- 3)- Resistência à Flexão: quanto pode uma fresa de topo fletir antes de se quebrar ? Sabe-se que materiais tenazes se deformam bastante antes de se romper. Como o aço rápido possui alta

tenacidade, este foi que o que apresentou melhor desempenho com relação à resistência à flexão.

4)- Rigidez ou Módulo de Elasticidade : é definido como o quociente entre a tensão aplicada e a deformação elástica resultante. Está relacionado com a rigidez do material. Um material rígido é um material que se deforma pouco para uma dada tensão como é o caso do metal duro, que apresentou a maior rigidez.

5)- Dureza à Quente : é definida como sendo a capacidade de um material manter-se resistente ao desgaste em altas temperaturas de trabalho. Sabe-se que o metal duro possui uma maior dureza à quente que os outros materiais analisados, apresentando dessa maneira um melhor desempenho.

6)- Dentes Afiados: observou-se que dos três materiais analisados, o coronite foi o que apresentou uma maior facilidade em manter a aresta corte afiada. Isso se deve ao fato de que o coronite possui partículas extremamente finas e duras de TiN, que perfazem uma grande porção do volume do material. Isso faz com que os grãos estejam igualmente distribuídos, e indiretamente a resistência ao desgaste também, fazendo com que dessa forma os dentes (ou a aresta de corte) de coronite não possuam pontos frágeis.

7)- Tendência à Adesão: na maioria dos materiais de usinagem existe uma tendência do material da peça aderir ou empastar na aresta de corte da ferramenta. Com o coronite essa tendência é extremamente baixa.

8)- Desgaste Balanceado/Uniforme: a aresta de corte de uma fresa de coronite se desgasta por igual e se mantém afiada mesmo quando gasta. Isto não acontece com os outros dois materiais analisados.

9)- Resistência ao Desgaste de Cratera: uma propriedade do coronite é a sua baixa tendência à craterização (desgaste na superfície de saída da ferramenta) devido ao fato de que o TiN é muito estável quimicamente. Por isso ele obteve um melhor desempenho que o aço rápido e o metal duro.

10)- Qualidade da Superfície: todas as ferramentas geram boas superfícies quando estão novas, ou seja, com as arestas afiadas. Uma fresa de coronite gera boas superfícies mesmo quando a aresta está gasta.

A FIG. 2.31 também mostra uma comparação da vida entre ferramentas de CORONITE, aço rápido e metal duro na usinagem de aços de vários graus de dureza.

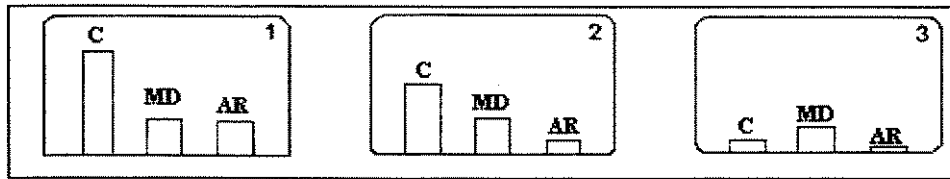


FIGURA 2.31 - Comparação da Vida entre ferramentas de CORONITE, Aço Rápido e Metal Duro na usinagem de aços de vários graus de dureza: (1) Doce (200HB) - (2) Duro (400HB) - (3) Extremamente Duro (550HB)

FONTE - ESP... , 1991

Segundo ESP... (1991), o coronite apresentou uma maior vida na usinagem do aço doce (200 HB) e do aço duro (400 HB), e o metal duro apresentou uma maior vida, seguido do coronite e do aço rápido respectivamente, para o fresamento do aço extremamente duro (550 HB).

Observa-se que, para os testes realizados na FIG.2.31, as condições de usinagem utilizadas não foram apresentadas. Acredita-se que, se as condições utilizadas (para a realização destes ensaios de vida) forem variadas, haverá também uma mudança nos resultados obtidos.

Entretanto, sabe-se que casos de usinagem nunca são exatamente os mesmos. Logo, existem alguns situações onde o aço rápido ou o metal duro poderiam ser melhores aproveitados que o coronite. Em materiais duros tais como aços de alta liga, o metal duro pode ser uma boa escolha. Em situações que demandam tenacidade extrema, tais como em velhas máquinas com pobre estabilidade, o aço rápido deve ser preferido.

Sendo assim, um dos objetivos deste trabalho é comparar a performance do coronite e do metal duro, em diferentes condições de usinagem, tanto no que diz respeito ao desgaste e vida da ferramenta, quanto no que diz respeito ao acabamento superficial da peça.

CAPÍTULO 3

MONITORAMENTO DOS PROCESSOS DE USINAGEM

3.1)- Introdução

A usinagem dos metais é um dos mais importantes processos de fabricação da indústria, que vem a cada dia, recebendo uma maior atenção por parte de pesquisadores com a finalidade de efetuar uma análise mais profunda, de modo a suprir as necessidades do mercado, respondendo assim, com produtos de melhor qualidade em um menor tempo de fabricação. Tais características podem ser obtidas através da otimização do ferramental e dos processos e também através da otimização de sistemas que possibilitam o monitoramento e controle em tempo real. Qualquer tentativa para se melhorar a vida da ferramenta e/ou a produtividade é benéfica, podendo assim representar importantes economias no custo global das peças.

Vários são os fatores que dificultam o monitoramento dos processos de usinagem, porém, um dos fatores responsáveis por esse relativo insucesso é a inexistência de um consenso quanto ao sinal ou efeito da usinagem que deve ser monitorado, de modo que este possa ser usado para uma ampla variedade de processos de usinagem e para todo o campo de aplicação. Sendo assim, os diversos tipos de materiais de ferramentas, os diferentes materiais a serem usinados, as diferentes condições de usinagem empregadas e as máquinas-ferramentas com diversas condições de uso contribuem para que os sistemas de monitoramento não sejam universais, tornando-se assim específicos a cada situação (BONIFÁCIO, 1993).

Considerando as novas técnicas de fabricação e a busca de uma maior eficiência dos sistemas produtivos com conseqüente redução de custos, não se pode correr riscos quanto à sub-utilização dos recursos destinados ao processo de usinagem (como por exemplo, a troca de ferramentas antes do momento devido) e deve-se reduzir o máximo possível o julgamento do operador quanto às condições de usinagem, pois este se baseia na sensibilidade e experiência humana, que é variável, tornando-se assim imprevisível as conseqüências da má utilização dos recursos disponíveis (TANGUY, 1993).

PIRES & DINIZ (1996), lembram que “em ambientes fabris modernos, sistemas de monitoramento de processos de usinagem, para a determinação do momento de troca da ferramenta, são incorporados às máquinas-ferramenta, eliminando a necessidade de avaliação da vida da ferramenta por parte dos operadores.” Entretanto, na maioria das indústrias brasileiras cabe ainda ao operador decidir o momento de troca da ferramenta, o qual não possui critérios objetivos para executar essa tarefa. Então a pergunta que se faz é: o que deve ser feito para reverter essa situação?

PIRES & DINIZ (1996), relatam no trabalho que ambos desenvolveram em uma fábrica de usinagem média e pesada, onde o momento de substituição da ferramenta era responsabilidade do operador da máquina, que a troca das arestas de pastilhas de torneamento utilizadas se dava antes do momento adequado (~ 68% das arestas). Estes autores constataram então a necessidade de se treinar os operadores sobre conceitos e técnicas de como correlacionar o desgaste de ferramentas com o crescimento da corrente elétrica do motor de acionamento da máquina. Após esse treinamento ficou constatado que a porcentagem de arestas desperdiçadas havia sido reduzida para 18,6%.

Do exposto acima fica claro que, se o julgamento dos operadores pudesse ser substituído por sistemas que estabelecessem automaticamente o fim de vida da ferramenta de corte, o risco de erro humano seria reduzido para níveis mínimos ou até mesmo extinto.

3.2)- Razões da Utilização de Um Sistema de Monitoramento

Segundo DINIZ (1994), “a utilização de sistemas de monitoramento tem como objetivo aumentar a vantagem econômica em relação à produção convencional, com o menor gasto possível”.

Diversas são as razões que fazem com que o desenvolvimento de tais sistemas seja realizado. Dentre eles destacam-se:

⇒ o surgimento de novos e caros materiais para as ferramentas que precisam ter sua utilização otimizada;

- ⇒ o surgimento de materiais de difícil usinagem e cujo comportamento do processo ainda é desconhecido;
- ⇒ as mudanças dos processos produtivos que estão tornando os lotes cada vez menores, encarecendo a rejeição de peças;
- ⇒ a busca pela automatização da manufatura.

Um sistema de monitoramento do processo que seja capaz de detectar as falhas de funcionamento da ferramenta utilizada na máquina evitará danos às peças, à ferramenta e a própria máquina assegurando também a qualidade da peça.

Segundo TANGUY (1993), “dentre os primeiros usuários de sistemas de monitoração da usinagem, alguns resolveram adotá-los depois de graves acidentes ocorridos no curso da fabricação que afetaram peças unitárias de custo elevado ou elementos sensíveis de uma máquina-ferramenta nova.”

Atualmente existem sistemas de monitoramento da usinagem automáticos, ou seja, eles possuem duas funções complementares que são: a detecção de falhas e a execução de ações de prevenção como por exemplo, interrupção do avanço, retração da ferramenta, etc... (FIG.3.1). Os procedimentos preventivos são implantados no nível de comando da máquina podendo ser do tipo “*reflexo*” (por exemplo, parada de emergência) ou do tipo “*inteligentes*” (que são modulados em função do defeito detectado e de informações complementares sobre a ferramenta).

Várias são as vantagens da utilização de um sistema de monitoramento automático, dentre elas destacam-se: (TANGUY,1993)

- ⇒ proteção do equipamento;
- ⇒ proteção dos operadores;
- ⇒ redução do tempo de parada de máquina quando os operários estão ausentes;
- ⇒ aumento da autonomia e do tempo disponível da máquina;
- ⇒ redução do número de peças sucateadas e do consumo de ferramentas.

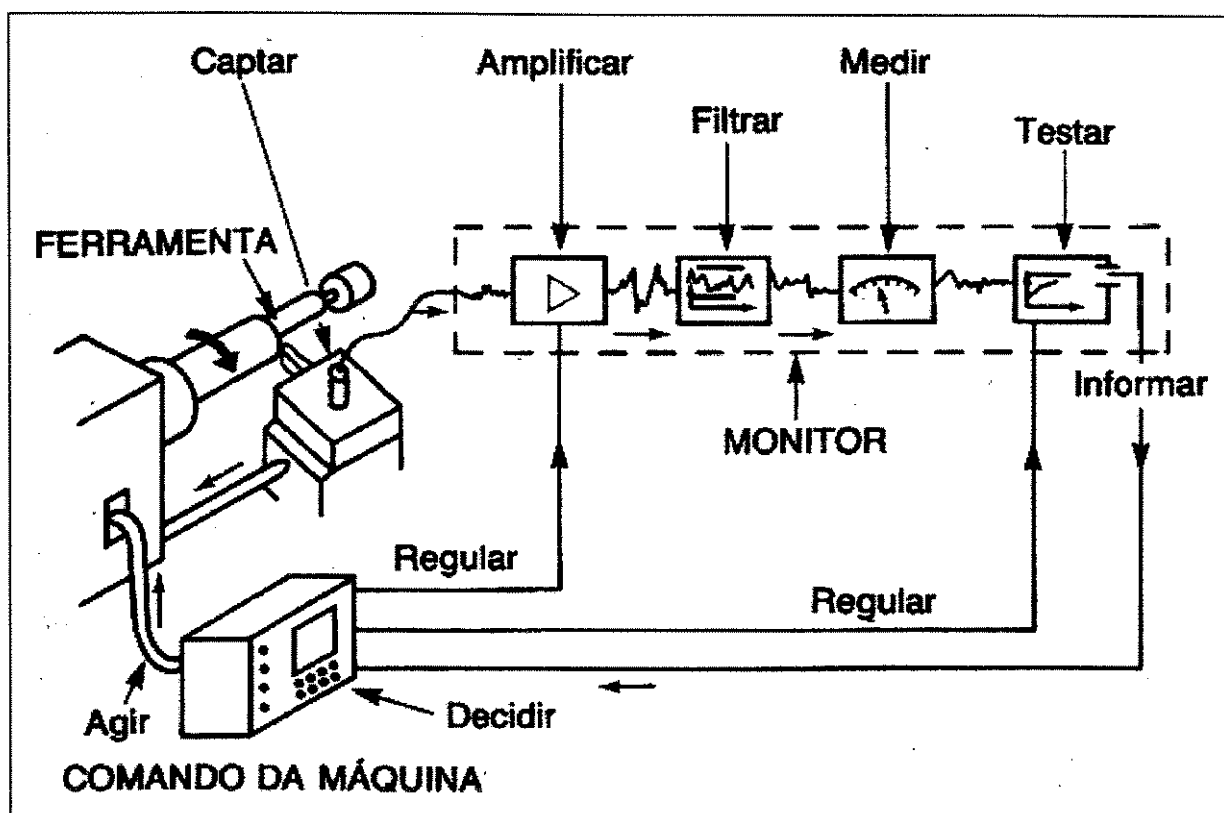


FIGURA 3.1 - Sistema de Monitoramento Automático

FONTE - TANGUY, 1993

Um dos primeiros sistemas de monitoração da quebra de ferramentas foi usado na fábrica de motores da Mercedes-Benz de Mannheim, na Alemanha, e propiciou vantagens substanciais de custo. Nesta fábrica “houve uma economia acumulada pela redução dos custos de materiais de US\$ 17000 sobre uma produção anual de 12.000 peças, porque o consumo de ferramentas foi reduzido de US\$0,27 para US\$ 0,14 por peça, como resultado de vidas mais longas das ferramentas. Além disso, essa maior longevidade ocorreu devido a um aumento dramático nos valores especificados tanto para a vida da ferramenta, como para a remoção de material por ferramenta, os quais foram possibilitados pela confiabilidade do processo e da máquina obtida em função da rápida detecção da quebra da ferramenta e das rápidas respostas da máquina após a quebra.” (KLUFT,1997)

Observa-se então que, as razões para se investir num sistema de monitoramento são muitas e por demais diversificadas. TANGUY (1993), lembra que “investir em equipamentos de monitoramento não é somente um passo para a modernidade, mas sim um passo que irá trazer respostas adaptadas a problemas bem definidos.”

3.3)- Tipos de Monitoramento

Existem diversos métodos de monitoramento de parâmetros como desgaste da ferramenta e rugosidade superficial da peça citados pela literatura. Estes diferentes métodos de monitoramento podem ser realizados de maneira direta ou indireta.

O método de monitoramento direto é aquele no qual a medição do parâmetro desejado é feita diretamente sobre a peça ou sobre a ferramenta de corte. Neste tipo de sistema de monitoramento o processo necessita ser interrompido para que o parâmetro possa ser medido, ocasionando assim um tempo adicional ao processo. A vantagem da utilização dos métodos diretos é que estes não apresentam interferências de outros parâmetros, por outro lado, são difíceis de serem utilizados na prática por não conseguirem efetuar as medições enquanto o processo está acontecendo.

Dentre os principais métodos de monitoramento direto do desgaste da ferramenta citados pela literatura, destacam-se: (DINIZ,1994)

- método óptico;
- desgaste de partículas e radioatividade;
- resistência da junção peça-ferramenta;
- dimensão da peça.

O método de monitoramento indireto é aquele no qual a medição do parâmetro desejado (como por exemplo desgaste) é feito indiretamente, ou seja, é feito pelo monitoramento de algum outro parâmetro (como por exemplo: força, emissão acústica, vibração, etc..) possível de ser medido em tempo real (enquanto o processo acontece) procurando relacioná-lo com o primeiro. Os métodos de monitoramento indireto são de fácil aplicação além de interferirem pouco no processo, pelo fato de, em geral, utilizarem equipamentos de dimensões reduzidas.

Uma desvantagem dos métodos indiretos reside no fato de que o parâmetro medido é, muitas vezes, influenciado não somente pelo parâmetro que se deseja medir (como por

exemplo o desgaste da ferramenta), mas também pelas condições de usinagem, geometria e material da ferramenta, etc... (DINIZ,1994)

Diversos são os meios de monitoramento indireto do processo estudados e aplicados nos dias de hoje, sendo os principais os seguintes:

- Monitoramento dos esforços de corte;
- Monitoramento dos parâmetros elétricos da máquina-ferramenta;
- Monitoramento da emissão acústica gerada pelo processo;
- Monitoramento da vibração do sistema máquina-ferramenta-dispositivo-peça.

Uma outra classificação que pode ser dada a um sistema de monitoramento é a seguinte (DINIZ,1994):

- A) - Contínuo ou Intermitente : muitos sistemas são capazes de monitorar o processo o tempo todo. Porém quando se torna necessária a digitalização dos dados para a armazenagem na memória do computador, somente parte do processo pode ser amostrado, devido ao fato do tempo que se passa amostrando o sinal ser dependente da frequência de amostragem e da capacidade de memória do computador.
- B) - em Processo ou Pós-Processo: dependendo se a grandeza é monitorada durante o decorrer do processo ou se a mesma é monitorada depois de terminado o processo.
- C) - Sistemas com Multi-Sensores : sabe-se que quanto maior for a quantidade de sensores presentes em um processo maior será a confiabilidade dos resultados, porém mais complexo e caro o sistema irá se tornar. De um mesmo sinal proveniente de apenas um sensor podem ser extraídos mais de um parâmetro, que irão servir para o monitoramento da grandeza, auxiliando assim na confiabilidade do sistema.

O presente trabalho dará uma atenção especial a dois métodos de monitoramento indireto, os quais serão, o monitoramento da corrente elétrica do motor principal da máquina (que é uma maneira indireta de se medir os esforços de corte) e o monitoramento da vibração do sistema máquina-ferramenta-dispositivo-peça.

3.4)- Sistemas de Monitoramento da Usinagem Via Esforços de Corte

3.4.1)- Generalidades

Segundo BLUM & INASAKI (1990), uma forte competição encorajou o uso de sistemas de manufatura flexíveis e complexos, levando a um alto nível de automação da manufatura. Entretanto, o maior obstáculo em sistemas de produção ainda tem sido a confiabilidade no monitoramento de operações de usinagem. O desgaste da ferramenta e a sua catastrófica falha são as limitações-chave para a produção de produtos de alta qualidade.

Atualmente, uma das mais utilizadas técnicas de monitoramento da ferramenta e que vem sendo experimentada há mais tempo, é aquela baseada na medição dos esforços de corte do processo de usinagem. Existem diversas formas de medição, porém a mais usual é a medição das forças diretamente utilizando-se dinamômetros.

Dinamômetros são instrumentos que ao serem deformados, são capazes de produzir correntes ou cargas elétricas que são proporcionais às forças que causaram essa deformação. Segundo FERRARESI (1977), as características básicas de um dinamômetro são: rigidez, sensibilidade e precisão. Um dinamômetro de usinagem deve ser tal que suas medições tenham precisão e sensibilidade da ordem de 1%, ou seja, se um dinamômetro foi projetado para medir uma força média de 100 kgf, um incremento de 1 kgf deve ser facilmente indicado. Com relação à rigidez, a fim de que a força registrada não seja influenciada por nenhum movimento vibratório do próprio dinamômetro, sua frequência natural deve ser muito maior (no mínimo 4 vezes maior) que a frequência de excitação da vibração.

Segundo SHAW (1984), uma outra característica importante necessária em um dinamômetro, é a ausência de sensibilidade cruzada, isto é, se uma força é aplicada em uma dada direção, esta não deve causar nenhuma leitura numa direção perpendicular à ela. Por exemplo, se uma força é aplicada na direção de avanço, esta não deve causar nenhuma leitura na direção de corte.

Existem também outras maneiras de se medir os esforços de corte, dentre eles tem-se:

A)- Medição de Torque

B)- Medição de Parâmetros Elétricos do Motor de Acionamento da Máquina-Ferramenta

O presente trabalho dará uma enfoque especial a medição da corrente elétrica do motor para a medição dos esforços de corte, uma vez que estes estão diretamente relacionados aos desgastes da ferramenta, ou seja, quanto maior o desgaste, maiores serão os esforços de corte, e conseqüentemente, maior será a corrente elétrica necessária ao processo.

3.4.2)- Relação entre Desgaste da Ferramenta e Forças de Usinagem

Investigações tem sido realizadas por vários autores, no sentido de correlacionar as componentes das forças de usinagem com o desgaste da ferramenta. (DINIZ,1994)

MICHELETTI et al., citado por DINIZ (1994), concluíram que o desgaste da ferramenta varia linearmente com a força de corte, apresentando assim um alto grau de correlação entre elas.

Segundo DINIZ (1997), “na presença somente de desgaste de flanco a pressão específica de corte aumenta a medida que o desgaste cresce, devido ao crescimento do atrito peça-ferramenta. Entretanto, quando o desgaste de cratera aparece juntamente com o desgaste de flanco, o crescimento da pressão específica de corte (K_s) já não é tão proeminente”.

A FIG.3.2 mostra o comportamento típico do crescimento da força de corte quando os desgastes de flanco e o de cratera ocorrem simultaneamente.

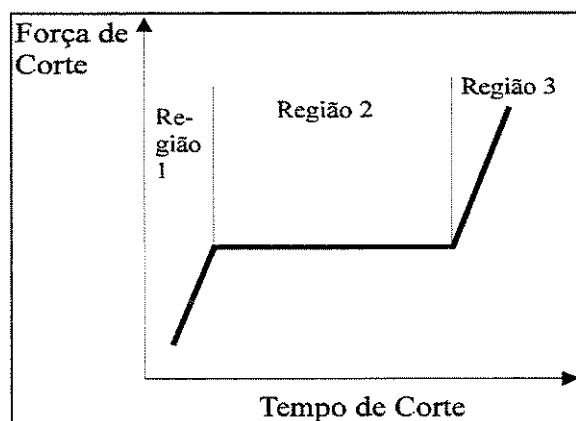


FIGURA 3.2 - Força de Corte na Presença dos Desgastes de Flanco e de Cratera

FONTE - DINIZ, 1997

A variação dos esforços de corte podem ser divididos em três regiões distintas nesta figura. Os valores crescem rapidamente nos estágios iniciais de corte (Região 1), depois sua taxa de crescimento diminui bastante tornando-se quase constante com o crescimento do desgaste de flanco (V_B) (Região 2), para no fim da vida da ferramenta voltar a crescer rapidamente (Região 3)

A interpretação deste gráfico pode ser feita da seguinte maneira:

- * REGIÃO 1 : o aumento dos valores da força nesta região é causado principalmente pelo fato de que o crescimento do desgaste de flanco ocorre mais rapidamente que o desgaste de cratera. Assim, um maior atrito entre peça e ferramenta irá causar o crescimento da força.
- * REGIÃO 2 : com o crescimento do desgaste de cratera, o ângulo efetivo de saída aumenta, diminuindo assim os esforços de deformação do cavaco. Deste modo, a contribuição do desgaste de flanco para o aumento da força é compensado, fazendo com que os valores das componentes da força se estabilizem.
- * REGIÃO 3 : o crescimento dos valores da força nesta região é devido à excessiva deformação já causada à aresta de corte. Esta região representa a fase final da vida da ferramenta com altos valores de desgaste de flanco e de cratera.

A FIG 3.3 mostra o comportamento da força de corte em função do tempo de corte no torneamento de aços com ferramentas de metal duro recobertas.

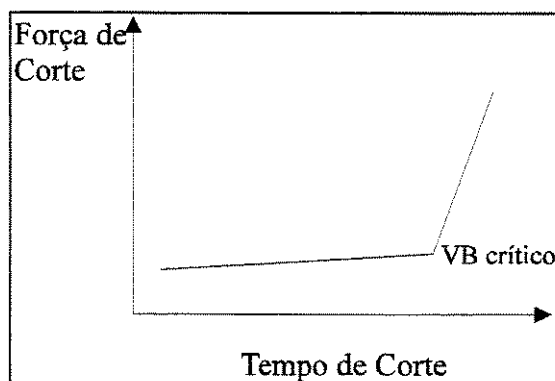


FIGURA 3.3 - Força de Corte no Torneamento com Ferramentas de Metal Duro Recobertas

FONTE - DINIZ, 1994

Segundo DINIZ & COSTA (1995), o desgaste de cratera neste tipo de ferramenta não ocorreu (o que é típico em ferramentas de metal duro com cobertura) e o crescimento do desgaste de flanco se deu de uma maneira bem lenta. Desta maneira observou-se que a força de corte cresceu lentamente com o tempo de corte até que se atingiu um determinado valor de desgaste de flanco, a partir do qual o substrato da ferramenta passou a ter contato com a peça e o desgaste de flanco passou a crescer rapidamente, fazendo com que a força de corte também crescesse muito rapidamente.

WILCOX et al. (1995), estudaram o efeito que pequenas mudanças na geometria de pastilhas de Metal Duro tem sobre o sinal de emissão acústica (EA) e sobre os esforços de corte durante o fresamento frontal de desbaste. Para isso, os autores prepararam artificialmente as pastilhas de maneira que as mesmas tivessem simulações de desgaste de flanco, de cratera, de entalhe, de quebra da aresta de corte e também mudanças no ângulo de saída. Os testes foram executados em diferentes materiais e sob diferentes condições de corte, de tal maneira que, para o teste 1, a componente da força de corte perpendicular à direção do avanço (F_p – força perpendicular) foi medida com a ajuda de um dinamômetro e para o teste 2, a razão entre as componentes radial e tangencial da força de corte foi calculada através da relação $Fr = Kr \cdot Ft$, que segundo os autores indica que a componente radial da força de corte (Fr) está relacionada com a componente tangencial (Ft) através de uma constante (Kr) que depende da espessura média de cavaco e da geometria da ferramenta.

As seguintes conclusões foram obtidas:

- ❖ espera-se que o desgaste de flanco produza um aumento tanto na força de corte quanto no sinal de EA, quando este afeta todas as pastilhas aproximadamente de modo igual. Para o teste 2 , onde foram usados menores valores de avanço por dente (f_z) e profundidade de usinagem (a_p), o nível das forças observado foi um pouco menor que para o teste 1. Além disso os esforços de corte para o teste 2 se mostraram mais sensíveis à mudanças no desgaste de flanco.
- ❖ a avaria do dente, tanto quanto o desgaste de entalhe também aumentam os esforços de corte. Com relação às mudanças no ângulo de saída da ferramenta, para a faixa pesquisada não foram observados efeitos significantes sobre os esforços de corte.

3.4.3)- Relação entre os Esforços de Corte e as Condições de Usinagem

Uma das grandes dificuldades do monitoramento indireto dos desgastes da ferramenta, através da utilização dos esforços de corte, é a influência das condições de usinagem nos seus valores, fazendo com que o crescimento da força de usinagem não seja exclusivamente causado pelo crescimento do desgaste.

Segundo FERRARESI (1977), a força de corte pode ser expressa pela relação:

$$F_c = K_s \cdot A \quad (3.1)$$

onde : F_c = força de corte [kgf]

K_s = pressão específica de corte [kgf/mm²]

A = área da seção de corte = $b \cdot h = a_p \cdot f$ [mm²]

As FIG. 3.4 e 3.5 A e B mostram o padrão de variação da pressão específica de corte com a profundidade (a_p), espessura de corte (h) e com a velocidade de corte (v_c).

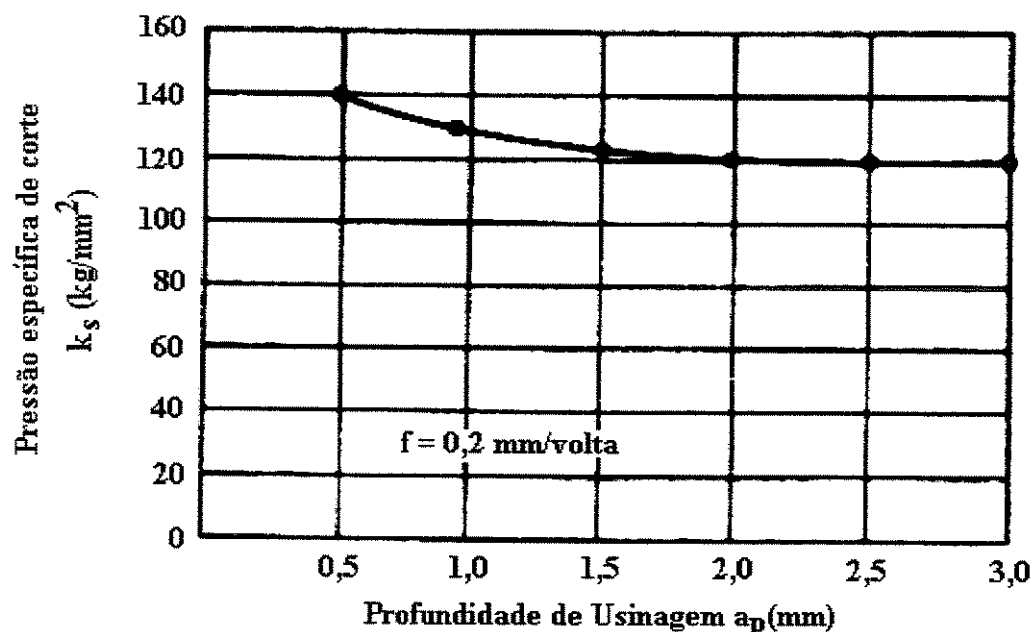


FIGURA 3.4- Variação da Pressão Específica de Corte com a Profundidade de Usinagem

FONTE - FERRARESI, 1977

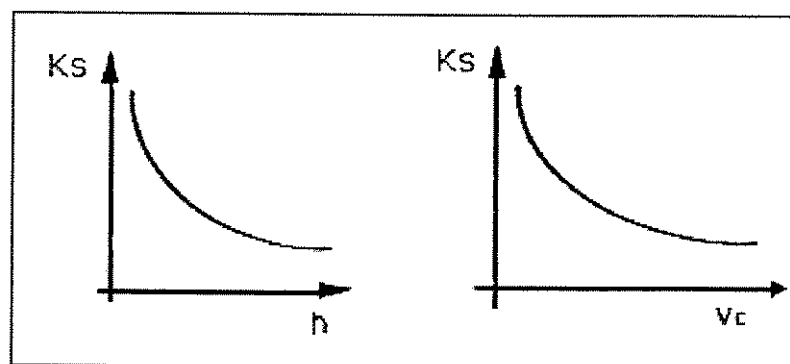


FIG.3.5 A)- Variação da Pressão Específica de Corte com Espessura de Corte

B)- Variação da Pressão Específica de Corte com Velocidade de Corte

FONTE - DINIZ, 1994

Pode-se observar que K_s decresce rapidamente com o crescimento de h e v_c para valores pequenos de h e v_c , e apresenta um pequeno decréscimo quando os valores de h e v_c crescem, a partir de determinados valores. Isto faz com que a força de corte permaneça quase constante com a velocidade, para valores altos de v_c (100 à 150 m/min). Observa-se também (FIG.3.6), que o crescimento da pressão específica de corte (K_m) com o avanço (f) (ou com h) não é diretamente proporcional, já que, embora este

cause o crescimento da força através do aumento da seção de corte, este crescimento é atenuado pelo decréscimo de K_s .

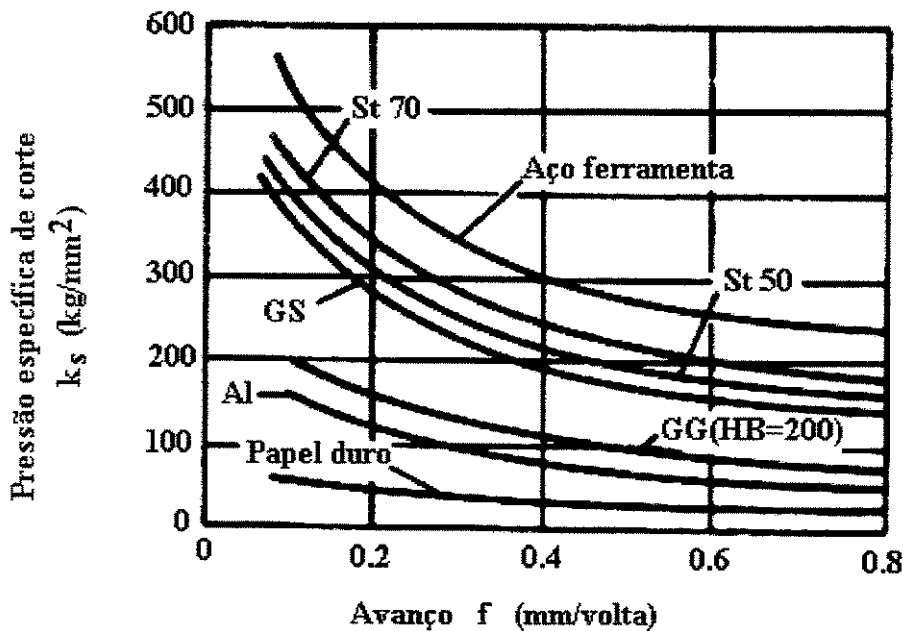


Figura 3.6 - Variação da Pressão Específica de Corte com o Avanço
 FONTE – FERRARESI, 1970

Com relação à profundidade de usinagem (a_p) (FIG.3.4), o seu aumento praticamente não altera o valor de K_s , a não ser para pequenos valores de a_p , pois o crescimento da profundidade de usinagem só faz aumentar o comprimento de contato ferramenta-peça, sem aumentar as velocidades envolvidas.

Com o propósito de desenvolver uma técnica de monitoramento para o desgaste da ferramenta para o fresamento frontal, DIEI & DORNFELD (1987 a,b) estudaram os efeitos das variáveis do processo e o efeito do desgaste da ferramenta sobre o sinal da emissão acústica (EA) e sobre os esforços de corte e concluíram que existe uma forte correlação entre as forças de corte e o sinal de emissão acústica com o desgaste de flanco.

Entretanto LIN & YANG (1995), lembram que os autores acima, apesar de todas as suas contribuições, não forneceram uma maneira de se estimar o desgaste da ferramenta através dos dados medidos. Sendo assim, LIN & YANG propuseram um

modelo de força para o fresamento frontal e um método para se estimar os coeficientes dos esforços de corte médios utilizados neste modelo. Este método proposto para se estimar os coeficientes, leva em consideração a espessura de corte média (h), o comprimento médio do dente de usinagem e o desgaste de flanco. Levando tudo isso e também a influência dos parâmetros de corte em consideração, os autores afirmam que é possível estimar o desgaste da ferramenta.

Com o propósito de estabelecer um modelo para coeficientes dos esforços de corte em função das condições de usinagem, LIN & YANG estudaram como tais condições afetariam tais coeficientes dos esforços de corte. Para isso foram realizados testes utilizando-se as seguintes condições:

- ⇒ 3 níveis de velocidade de corte : 78,75 - 94,50 - 111,25 (m/min)
- ⇒ 3 níveis de avanço : 0,1 - 0,2 - 0,3 (mm/revol.)
- ⇒ 3 níveis de profundidade de usinagem : 1 - 2 - 3 (mm)
- ⇒ 3 níveis de desgaste de flanco artificiais : 0,1 - 0,5 - 0,9 (mm)
- ⇒ material da peça : liga de alumínio T6061
- ⇒ pastilhas de metal duro SECO S25 M

Os esforços de corte eram obtidos através de um dinamômetro e depois então os coeficientes eram estimados utilizando o modelo proposto.

Eles concluíram que os efeitos do desgaste da ferramenta, do avanço e da profundidade de usinagem sobre os coeficientes dos esforços de corte são significantes, enquanto que a velocidade de corte influencia muito pouco (ou quase nada) os coeficientes dos esforços de corte para o caso estudado pelos autores. Teoricamente, a temperatura aumenta quando aumenta-se a velocidade de corte ou quando o desgaste de flanco cresce. O resultado esperado pelos autores, seria de que os coeficientes da força de corte diminuiriam com o aumento da temperatura, devido ao aumento da velocidade de corte. Entretanto não foi isto que aconteceu. A explicação dos autores para a não influência da velocidade de corte sobre estes coeficientes, se baseia nas mudanças ocorridas nas propriedades do material da peça (liga de alumínio) devido à variação da temperatura durante o corte.

Segundo FERRARESI (1977), a velocidade de corte (v_c) influencia mais as forças de avanço e de profundidade do que a força de corte. Mesmo com valores acima de 100 m/min os valores destas duas componentes da força de usinagem continuam a cair com o crescimento da velocidade de corte, o que não acontece com a força de corte, que tende a se estabilizar quando v_c ultrapassa esses valores.

DINIZ (1994), sugere que para se evitar ou reduzir a influência das condições de usinagem no monitoramento do desgaste da ferramenta via esforços de corte, as seguintes abordagens poderiam ser tentadas:

- 1º)- relacionar os valores das componentes das forças de usinagem em início e fim de vida da ferramenta com as condições de usinagem $[F_{\text{final}} / F_{\text{inicial}} = f(v_c, f, a_p)]$;
- 2º)- relacionar as componentes da força de usinagem entre si, ou seja, quando se divide uma componente da força por outra, muitas vezes consegue-se evitar a influência das condições de usinagem.
- 3º)- fazer uma análise do espectro de frequências, pois muitas vezes o crescimento dos componentes da força se dá principalmente em uma determinada faixa de frequências. Quando então filtra-se o sinal da força, pode-se reduzir sensivelmente o ruído causado por outros fatores de crescimento dos esforços de corte.

3.4.4)- Monitoramento dos Esforços de Corte Via Parâmetros Elétricos da Máquina-Ferramenta

3.4.4.1)- Generalidades

Como já foi comentado anteriormente, existem diversas maneiras de se medir os esforços de corte para se monitorar a ferramenta. Uma delas é a medição dos esforços de corte via parâmetros elétricos, tais como corrente e tensão elétrica dos motores de acionamento da máquina-ferramenta.

Tal método tem algumas vantagens tais como :

- * é um dos métodos que menor intrusividade apresenta ao processo de usinagem, uma vez que os sensores responsáveis por captar os sinais são instalados distantes da região de corte, o que não é o caso dos dinamômetros que exigem a sua colocação bem próxima da região de corte;

- * os sensores utilizados são de tecnologia simples (o mais utilizado é o Sensor de Efeito HALL), o que os tornam de menor custo se comparado a outros sistemas. Segundo COSTA (1995), durante muitos anos a aplicação do Sensor de Efeito HALL permaneceu restrita a laboratórios. Entretanto, com o desenvolvimento tecnológico e com o aparecimento de elementos semicondutores, a sua utilização se expandiu para os mais variados campos.

- * o sistema permite que o monitoramento seja realizado em tempo real, sem a interrupção do processo.

Segundo DINIZ (1994), como em qualquer sistema de monitoramento da usinagem, este método também apresenta algumas desvantagens pelo fato de não ser tão preciso quanto à medição das forças, devido a dois fatores, a saber:

- * existe uma diferença entre a potência consumida pelo processo e a potência consumida pelo motor (devido à eficiência do motor e do sistema de transmissão de rotações) pois:

$$\boxed{W_{\text{motor}} = W_{\text{corte}} / \eta} \quad (3.2)$$

onde: W_{motor} = potência do motor [Watt]

W_{corte} = potência consumida pelo processo [Watt]

η = rendimento

- * a outra desvantagem é o fato de que a medição elétrica filtra os componentes dinâmicos dos esforços de corte, possibilitando somente o trabalho sobre as médias dos valores elétricos.

A potência elétrica ou a corrente elétrica consumidas pelos motores de acionamento da máquina-ferramenta são proporcionais à potência mecânica consumida pelo processo (FERRARESI, 1977). Isto quer dizer que, medir parâmetros elétricos, tais como corrente ou voltagem, é medir indiretamente os esforços de corte, ou seja:

$$W_{\text{eltr}} = W_{\text{corte}} / \eta \quad (3.2)$$

$$\text{Mas em um motor de corrente contínua: } W_{\text{eltr}} = R.I^2 \quad (3.3)$$

$$\text{Porém : } W_{\text{corte}} = (F_c \cdot V_c) / 60 \cdot 75 = K_s \cdot b \cdot h \cdot V_c / 60 \cdot 75 \quad (3.4)$$

Substituindo as equações (3.3) e (3.4) em (3.2) tem-se:

$$R.I^2 = (K_s * b * h * V_c) / 60 * 75 * \eta \Rightarrow \boxed{R.I^2 = K_s * CTE}$$

ctes

onde: R = resistência elétrica [Ω]

I = corrente [A]

Ks = pressão específica de corte [kgf/mm²]

b = largura de corte [mm]

h = espessura de corte [mm]

v_c = velocidade de corte [m/min]

Conclui-se então que mantendo-se b, h, η e v_c constantes, ao se medir os parâmetros elétricos do motor da máquina está se medindo um valor diretamente proporcional à força de corte.

De uma forma geral, os esforços de corte estão diretamente relacionados à vida da ferramenta, seu desgaste ou quebra, provocando assim um maior consumo da potência necessária ao processo.

3.4.4.2)- Relação entre o Desgaste e a Corrente Elétrica do Motor

MANNAN & BROMS (1989), desenvolveram um trabalho com o objetivo de verificar como se dá a variação da corrente elétrica do motor de diferentes máquinas-ferramenta em relação ao desgaste da ferramenta. Para isso foram escolhidos três processos de usinagem a saber: torneamento, fresamento de topo e furação.

Os testes para a operação de torneamento foram conduzidos em um torno SMT SWEDTURN 6 e as operações de fresamento e furação em um centro de usinagem MAZAC AJV 25/405 equipado com um sistema de controle automático de avanço (AFC).

A TAB.3.1 sumariza os resultados encontrados para a medição da corrente nas operações de fresamento, torneamento e furação respectivamente, em diferentes estágios do processo de usinagem que são: máquina em vazio, corte com uma ferramenta nova, corte com uma ferramenta gasta e corte com uma ferramenta prestes a se danificar. Nesta tabela, a corrente do motor durante o corte em vazio foi considerada como um nível unitário de corrente e as demais situações foram consideradas múltiplos deste nível unitário.

MANNAN & BROMS (1989) concluíram que as medições da corrente do motor são mais sensíveis à mudanças térmicas ocorridas na máquina-ferramenta, especialmente as correntes medidas no servo-motor de avanço, que demonstraram ser mais sensíveis a essas mudanças do que as do motor principal.

Esses autores também concluíram que a sensibilidade da corrente elétrica ao crescimento dos desgastes da ferramenta não é tão boa quando comparada a outras técnicas de monitoramento. Segundo os mesmos autores, isso se deve ao fato de que a corrente (força) monitorada deveria aumentar na mesma proporção que o crescimento do desgaste, o que não acontece, como por exemplo, com o processo de furação estudado por eles, onde a corrente monitorada não aumentou significativamente até que a broca tivesse alcançado o fim de sua vida.

TABELA 3.1 - Comparação entre as correntes durante vários estágios para a diferentes operações

FONTE - MANNAN & BROMS, 1989

<u>OPERAÇÕES:</u>		Corte em Vazio	Ferramenta Nova	Ferramenta Gasta	Quebra da Ferramenta
<u>Fresamento:</u> $v_c = 36 \text{ m/min}$ $f_z = 0,1 \text{ mm/revol}$ $a_p = 12 \text{ mm}$ $a_e = 8 \text{ mm}; z = 4$	Corrente do Servo Motor de Avanço	1	3,1	3,8	4,8
	Corrente do Motor Principal	1	9,0	10,5	12,1
<u>Torneamento:</u> $v_c = 180 \text{ m/min}$ $f = 0,45 \text{ mm/ver}$ $a_p = 3 \text{ mm}$	Corrente do Servo Motor de Avanço	1	1,8	3,0	3,3
	Corrente do Motor Principal	1	5,0	5,9	6,8
<u>Furação:</u> $v_c = 30 \text{ m/min}$ $f = 0,2 \text{ mm/ver}$ $D \text{ broca} = 3 \text{ mm}$	Corrente do Servo Motor de Avanço	1	3,2	7,7	9,3
	Corrente do Motor Principal	1	5,0	17,8	19,1

Entretanto, MANNAN & BROMS (1989) concordam com outro autores que a sensibilidade da corrente elétrica à quebra da ferramenta é muita alta, dando sinais com razoável antecedência de que sua quebra está prestes a acontecer.

Ao lado do monitoramento do desgaste da ferramenta, o sensoreamento de sua quebra é uma parte importante do conceito completo do monitoramento do processo de usinagem, porque a detecção de uma quebra inesperada da ferramenta pode evitar severos danos à máquina-ferramenta, à peça que está sendo usinada e à própria ferramenta. Além disto, em operações de desbaste, onde o objetivo é retirar material da peça sem muita preocupação com o acabamento superficial, é permitido que o desgaste da ferramenta atinja altos valores, somente devendo-se evitar a quebra da ferramenta.

Segundo TANGUY (1993), “um sistema de monitoramento que detecte as quebras de ferramentas, permite, numa linha de produção, limitar os efeitos da quebra apenas à operação e à peça presente no momento da quebra.” Um fabricante de motores de automóvel, estabelecido no sul da França, interessou-se especialmente em detectar as quebras de fresas. Na usinagem de cárteres, uma operação de furação situada no início da linha, provocava com certa frequência o rompimento da fresa e depois o da broca, que sucedia ao fresamento. O dano só era observado no fim da linha, ou seja, 40 peças mais tarde. O dispositivo de detecção instalado foi amortizado na primeira quebra de fresa.

LEE et al. (1995), desenvolveram um algoritmo que detecta a quebra da ferramenta em tempo real, para o processo de fresamento através do monitoramento indireto dos esforços de corte. Os esforços de corte foram indiretamente medidos através da corrente alternada do motor principal. O algoritmo para a detecção da quebra da ferramenta “on-line” utiliza um diagrama de blocos que possui um indexador primário (usando a força de corte residual média) e um indexador secundário (usando a variação da força de cada ferramenta), os quais são capazes de distinguir a quebra instantaneamente (na maioria das vezes causada por mudanças na profundidade de usinagem e nas taxas de avanço, entrada e saída do dente na peça, etc...), mesmo em casos onde existe uma grande batida radial da ferramenta.

3.5)- Sistema de Monitoramento da Usinagem Via Vibração

3.5.1)- Generalidades

Segundo AGOSTINHO et al (1981), “a rigidez de um sistema mecânico qualquer pode ser definida como sendo a capacidade deste em resistir à ocorrência de deflexão elástica.” Como não existe nenhum sistema perfeitamente rígido, todo corpo submetido a esforços dinâmicos irá vibrar. Esta vibração ocorre também em processos de usinagem e pode ser investigada de maneira a fornecer importantes informações para o conhecimento do “status” do processo (COSTA,1995).

Segundo DINIZ (1994), os sinais de vibração de vários processos de usinagem – em faixas de frequência de poucos Hz à alguns kHz – tem sido investigados por muitos pesquisadores. Tais sinais contém informações muito úteis e oferecem excelentes possibilidades de diagnóstico em tempo real para problemas críticos de usinagem dos metais, como desgaste da ferramenta.

Na prática, os sinais de vibração consistem geralmente de inúmeras frequências, as quais ocorrem simultaneamente, de modo que, de imediato, não se pode notá-los simplesmente olhando para as respostas de amplitude com relação ao tempo, nem determinar quantos componentes de vibração há e onde eles ocorrem. Sabe-se que esses componentes podem ser revelados comparando-se a amplitude da vibração à sua frequência através de uma técnica conhecida como *Análise de Frequência* a qual é considerada como base para o diagnóstico da medição da vibração (DINIZ,1994).

Porém a dificuldade principal do monitoramento via vibração, está na identificação e isolamento da faixa de frequência de vibração que de fato é influenciada pelo processo de desgaste e quebra da ferramenta, uma vez que o sistema global de usinagem possui vários fatores que geram vibração e que não estão relacionados com o processo de desgaste e quebra da ferramenta.

Segundo SANDVIK COROMANT (1994), as vibrações em operações de fresamento podem resultar dos seguintes fatores:

- Balanço do Fuso: é a distância entre a peça e o cabeçote do fuso. Deve ser mínimo para se obter uma máxima rigidez.
- Diâmetro e Posicionamento da Fresa: deve-se encontrar uma posição mais vantajosa para a ferramenta para se evitar vibrações, caso a peça ou a fixação não forem rígidos.
- Avanço/dente: é sempre muito importante e deve ser checado especialmente quando se tem tendências à vibração.
- Porta-Ferramentas com Sistema ou Barra Anti-Vibratória: são necessários quando se tem operações de fresamento com balanço.

- Fixação da Peça: para se obter melhores resultados a peça precisa ser devidamente fixada em relação as forças de corte que são desenvolvidas no processo de usinagem.

3.5.2)- Origem das Vibrações em Usinagem e Estabilidade do Sistema

Segundo SHAW (1984), as fontes que geram vibração em um processo de usinagem podem ser classificadas em dois tipos a saber:

- Vibração Forçada
- Vibração Auto-Excitada

Define-se vibração em processos de usinagem como sendo o movimento cíclico relativo entre peça e ferramenta.

➤ Vibração Forçada:

A vibração forçada ocorre quando um carregamento externo variando ciclicamente possui uma frequência próxima à frequência natural do sistema ferramenta-peça-máquina-dispositivo de fixação. Quando isto acontece, o sistema absorve mais energia por ciclo vibracional do que retorna ao meio, através do amortecimento. A energia absorvida ficará então disponível para aumentar a amplitude vibracional.

Dentre alguns fatores que contribuem para a geração de vibração forçada destacam-se:

- ❖ Folga de mancais e rolamentos;
- ❖ Utilização do equipamento além da sua capacidade;
- ❖ Desbalanceamento de eixos;
- ❖ Vibrações do motor;
- ❖ Má lubrificação do equipamento; etc...

➤ **Vibração Auto-Excitada:**

A vibração auto-excitada irá ocorrer quando mais energia for absorvida do que desprendida durante um ciclo simples. Para se induzir uma vibração auto-excitada basta a ferramenta se chocar ou encontrar uma pequena incrustação dura no material.

Segundo DINIZ (1994), outras fontes que podem gerar este tipo de vibração são: a usinagem descontínua, a espessura variável do cavaco, o atrito, dentre outras.

Segundo WALLACE (1997), “vibrações auto-excitadas ocorrem quando forças geradas pela ferramenta superam a rigidez do sistema ferramenta-porta-ferramentas-fuso e excedem as forças contrárias impostas por sistemas de amortecimento da vibração. Qualquer descontinuidade ou uma mudança na estrutura cristalina do material agem como uma barreira na transmissão de energia vibracional funcionando como um sistema de amortecimento.”

WALLACE (1997), também comenta que, para uma dada penetração de trabalho (a_e) e rotação (n) existirá uma profundidade de usinagem (a_p) que produzirá forças altas o suficiente para estimular vibrações auto-excitadas. A mínima profundidade de usinagem (a_p) no qual o efeito de amortecimento do processo estará perdido é chamada de profundidade de usinagem crítica ($a_{p \text{ crítico}}$).

Conclui-se então que, das definições de vibração expostas até o presente momento, a que interessa ao monitoramento do processo e quebra da ferramenta é a vibração auto-excitada, no qual está contida toda a vibração proveniente do contato ferramenta-peça.

3.5.3)- Análise do Sinal e Estratégia de Monitoramento do Desgaste

A análise do sinal de vibração, como qualquer outro tipo de sinal, pode ser feita no domínio do tempo ou da frequência.

No domínio da frequência, a técnica mais utilizada é da análise espectral (DINIZ, 1994). Para um sinal simples ela possibilita avaliar a densidade de potência espectral (PSD), função que representa a distribuição de energia sobre o domínio da frequência. Em outras palavras, quando um corpo vibra, em geral ele o faz em infinitas frequências diferentes, cada uma com sua amplitude de vibração. Através do PSD pode-se ter uma idéia do valor desta amplitude para cada faixa de frequência.

No domínio do tempo, os parâmetros estatísticos mais usados para a análise do sinal de vibração (na verdade sinal de aceleração instantânea do porta-ferramenta) são a média, o desvio-padrão, a raiz quadrada da média, etc...

Segundo DINIZ (1994), “encontrar a faixa de frequências sensíveis ao desgaste é o principal aspecto do monitoramento via vibração, pois vários são os fatores causadores da vibração do sistema e estes fatores são aleatórios, o que impossibilita a identificação e qualificação de cada um deles no processo global de usinagem”. Uma vez determinada a faixa de frequências que realmente é sensível ao processo de desgaste da ferramenta, o monitoramento via vibração se torna extremamente atraente. O fato de uma dessas faixas estar associada à frequência natural do porta-ferramenta, torna o monitoramento bastante mais cômodo, pois essa frequência pode ser facilmente encontrada para os mais diversos tipos de ferramenta e porta-ferramentas, bastando para isso causar um impacto no porta-ferramenta, e com o próprio sistema de monitoramento, encontrar sua frequência natural, que será a frequência do sinal de resposta causado na ferramenta pelo impacto. Feito isso, o próprio sistema pode monitorar a faixa de frequência do monitoramento.

Entretanto, SOUZA et al. (1997) lembram que, com o surgimento de novas máquinas automatizadas para a usinagem de materiais, como por exemplo fresadoras CNC, “a aplicação da técnica de monitoramento do desgaste de ferramentas de fresamento via vibração mecânica, requer um conhecimento prévio do comportamento dinâmico da máquina, que é bastante diferente do comportamento das demais máquinas de usinagem, porque a variação da geometria física, ou seja, o deslocamento da mesa de trabalho e do eixo porta-fresa durante a usinagem altera as suas propriedades dinâmicas, tais como as frequências naturais e o fator de amortecimento modal do sistema”.

Os mesmos autores também lembram que, os locais adequados para se instalar os acelerômetros (que irão medir o nível de vibração na estrutura da fresadora CNC), devem ser aqueles que apresentam uma menor sensibilidade à influência das variações da geometria da máquina durante o processo de usinagem. Descoberto quais são esses pontos, é possível correlacionar os valores RMS do nível de vibração (adquiridos para estes pontos) com o desgaste da ferramenta.

SOUZA et al. (1997), realizaram alguns experimentos e concluíram que com o aumento do desgaste da ferramenta o nível RMS do sinal de vibração também aumenta (vide TAB.3.2), comprovando assim que a vibração pode ser utilizada para o monitoramento do desgaste de ferramentas de corte em uma fresadora.

TABELA 3.2 - Comparação dos Níveis RMS de aceleração (m/s^2) para três condições de desgaste das ferramentas de corte
FONTE - SOUZA et al., 1997

LOCAL:	Sem Cortar:	Ferramentas Novas:	Consideravelmente Desgastada:	Extremamente Desgastada:
Mancal (01)	2,1864	2,8076	2,5751	3,4118
Traseira (14)	0,9284	1,2775	1,4685	1,9242
Frontal (20)	1,0216	2,9837	3,1212	4,8677

A FIG 3.7, apresenta a evolução do nível RMS da aceleração com o desgaste das arestas de corte para a banda linear e com o filtro passa alta de 250 Hz no local de monitoramento 20 (tampa frontal de proteção da máquina).

Observa-se que o nível RMS da aceleração não cresce continuamente com o aumento do desgaste. Inicialmente ele tem pouca variação, podendo até diminuir, apresentando um ponto mínimo de V_B máx em torno de $\sim 0,5$ mm, para só então crescer consideravelmente.

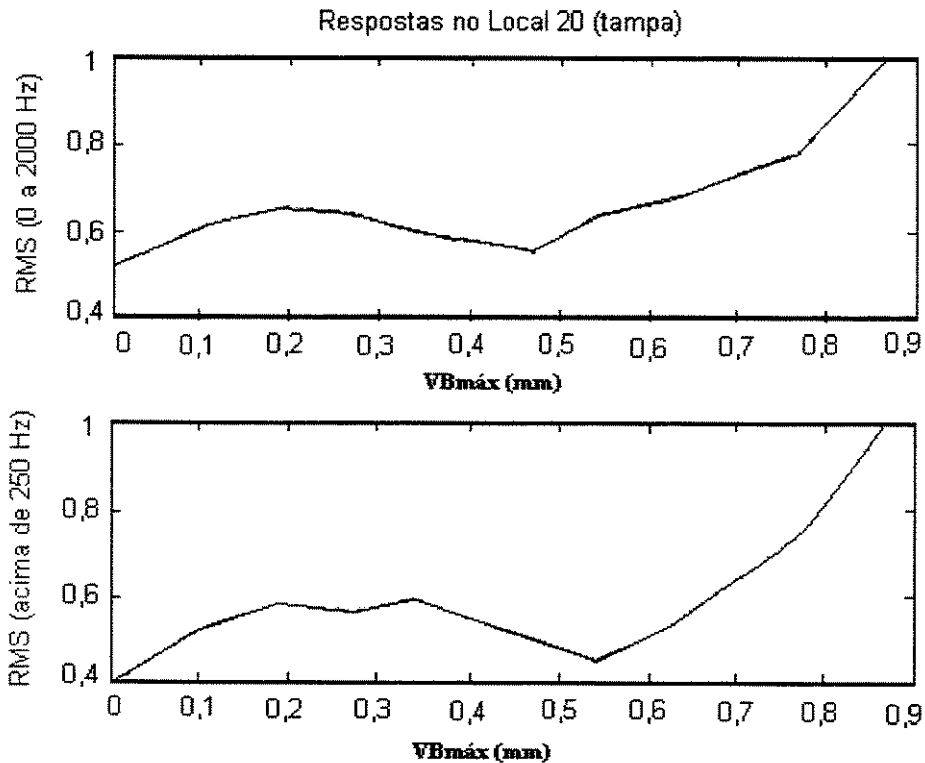


FIGURA 3.7 - Nível RMS de aceleração (m/s^2) do local 20 em função do desgaste das arestas de corte
 FONTE - SOUZA, 1998 – p.65

SOUZA (1998), explica esse comportamento da seguinte forma: “no início, pelo assentamento das arestas de corte na fresa e pela evolução dos desgastes das mesmas, ou seja, pela dificuldade de se obter a mesma altura na 8 arestas de corte durante o ajuste inicial da montagem da fresa, acaba-se definindo alturas diferentes das mesmas em relação à peça, o que provocará, portanto, no início do processo de fresamento, cortes com profundidades diferentes. As arestas mais protuberantes serão as mais exigidas desenvolvendo portanto mais rapidamente o desgaste. Isso gera menores esforços de corte do que quando todas as arestas de corte trabalham na mesma altura, e esforços menores implicam em nível de vibração menor durante o processo. Entretanto à medida em que se aumenta o número de passes as arestas costumam a se desgastar de maneira desigual, aumentando assim os esforços de corte que acarretarão níveis de vibração maiores na fresadora”.

CAPÍTULO 4

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são descritos os testes experimentais executados de modo a estudar comparativamente a performance de fresas de topo de diferentes materiais (Metal Duro e Coronite) na usinagem de aço-carbono comum, no que diz respeito à vida da ferramenta e à qualidade superficial da peça.

Para o cumprimento do objetivo citado acima em uma única peça de aço-carbono ABNT 1045 (com dureza de 91,5 HR_B) diversos rasgos foram fresados, sob diferentes condições de usinagem. Numa primeira bateria de ensaios, feita com ambas as ferramentas, foram variadas as velocidades de corte e de avanço bem como a profundidade de usinagem, monitorando-se a corrente elétrica consumida pelo motor da máquina. Além disso, analisou-se a influência destes parâmetros no comportamento da rugosidade e consequentemente no acabamento superficial da peça. Após a análise desta primeira bateria de ensaios, resolveu-se fixar a profundidade de usinagem ($a_p = 0,95\text{mm}$) e variar somente as velocidades de corte e de avanço, analisando assim a influência destes parâmetros na rugosidade e também agora no desgaste das ferramentas. Foi realizada então uma segunda bateria de ensaios, onde três condições de usinagem distintas foram estabelecidas para cada uma das ferramentas. Cabe aqui ressaltar que essas três condições de usinagem, para ambas as fresas, foram escolhidas de tal maneira que as mesmas pudessem ser comparadas entre si, ou seja, mantido um parâmetro constante, como por exemplo para a 1ª e a 2ª condições, analisava-se a influência dos outros parâmetros não constantes no comportamento da rugosidade e como os mesmos poderiam influenciar na vida da ferramenta. Assim, sucessivamente as condições foram sendo comparadas entre si. Nesta segunda bateria de ensaios decidiu-se utilizar um outro sistema de monitoramento (o escolhido foi o monitoramento do sistema máquina-ferramenta-dispositivo-peça) já que os dados obtidos com o monitoramento da corrente (na 1ª bateria de ensaios) não foram confiáveis.

4.1)- Equipamentos e Acessórios Utilizados

Para o fresamento dos rasgos foi utilizado um centro de usinagem vertical MORI-SEIKI modelo SV- 40, comando FANUC, com rotação máxima da árvore de 12.000 rpm, com variação contínua de velocidade e com motores independentes para o acionamento da mesa e rotação da ferramenta, os quais eram acionados por corrente alternada. A potência do motor principal da máquina-ferramenta era de 30 HP (~ 22 KW). As fresas utilizadas eram da SANDVIK COROMANT modelos R216.33-10045-AC 19P MC 45 (metal duro) e R216.33-10040-AA 13P NI45 (coronite) ambas com três arestas de corte, diâmetro igual a 10 mm e com geometria quase que idênticas, as quais foram acopladas em um mandril de alta precisão Hydro-Grip modelo C5-391.CGA-20 074, também da SANDVIK COROMANT. Na primeira bateria dos ensaios utilizou-se fluido de corte à base de 5% de óleo solúvel CASTROL COOLEDGE BI - Classe BIII e na segunda bateria dos ensaios a usinagem dos rasgos foi feita à seco.

As rugosidades das superfícies usinadas foram medidas através de um rugosímetro MITUTOYO SurfTest-211, com “cut-off” ajustado em 0,8 mm, portátil, o que facilitou bastante as medições, pois o mesmo podia ser levado até o local do experimento.

Os desgastes das ferramentas, bem como as fotografias dos mesmos, foram adquiridas no GLOBAL IMAGE ANALYSER, que consiste de um microscópio ótico com capacidade de ampliação de até 50X aliado à uma câmara de vídeo de alta resolução (preto e branco) ligada a uma placa digitalizadora no computador (um Pentium 166 MHz). Os dados coletados pela placa são analisados por um software (GLOBAL LAB) no qual foi possível efetuar uma série de medições do desgaste de flanco das ferramentas.

4.2)- O Equipamento de Monitoramento

Como já citado anteriormente, a corrente elétrica consumida pelo motor principal da máquina foi monitorada em uma 1ª bateria de ensaios.

A montagem experimental utilizada está esquematizada na FIG.4.1

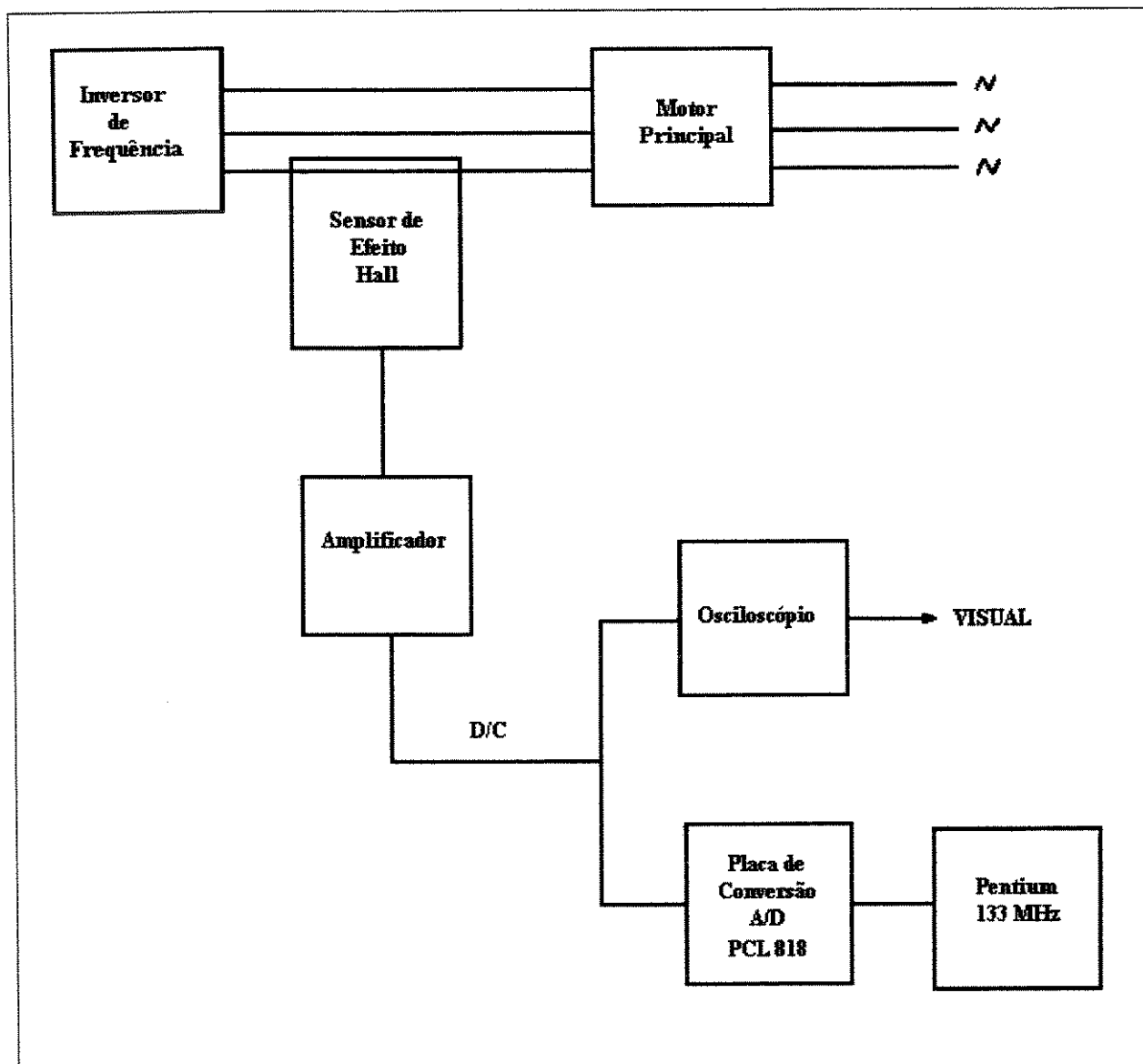


FIGURA 4.1 - Montagem Experimental Utilizada na 1ª Bateria de Ensaios

O sinal de corrente elétrica foi adquirido através do Sensor de Efeito Hall que estava ligado ao inversor de frequência, que também estava conectado à entrada do motor principal do centro de usinagem vertical. O sensor enviava o sinal a um amplificador e posteriormente a uma placa de aquisição de sinais para ser armazenado na memória do microcomputador. O sinal que saía do amplificador era distribuído para um osciloscópio Y-TEKTRONIX 2261 para que se pudesse controlar visualmente a existência ou não do sinal durante os ensaios. A calibração da medição foi feita de tal maneira que 1 A de corrente na máquina implicava em 0,1 V de tensão medida na placa. Nesta primeira parte dos ensaios foi utilizado apenas 1 canal

(dos 16 canais existentes na placa) com uma taxa de amostragem de 2000 Hz, o equivalente a 1024 pontos amostrados em cada meio rasgo efetuado pela fresa.

Após essa primeira bateria de ensaios, foi efetuada uma segunda, onde agora a vibração do sistema máquina-ferramenta-dispositivo-peça foi monitorada.

A montagem experimental utilizada está esquematizada na FIG.4.2

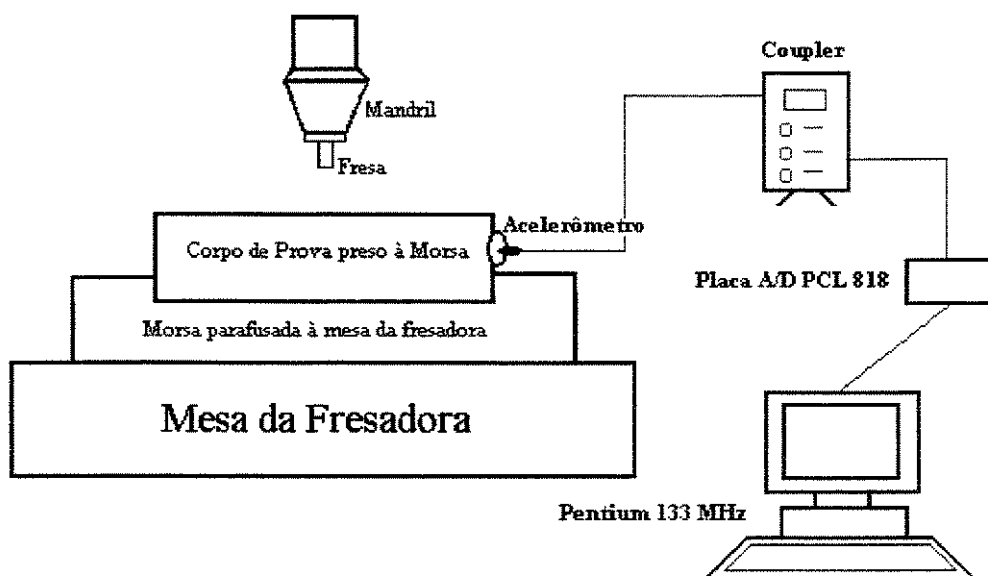


FIGURA 4.2 - Montagem Experimental Utilizada na 2ª Bateria de Ensaios

Para a aquisição dos sinais de vibração foi utilizado um acelerômetro piezoelétrico KISTLER que transforma estes sinais em tensão elétrica, permitindo dessa forma a leitura destes pontos via computador.

Algumas das principais características deste acelerômetro são listadas a seguir: (KISTLER,1995)

- Faixa de Medição: $\pm 500g$
- Sensibilidade à 100 Hz: 9,67 mV/g
- Faixa de Temperatura de Operação: -54° à 120° C
- Frequência Ressonante: 54,0 KHz

O acelerômetro por si só não permite a leitura dos dados. Ele precisa de um equipamento chamado “COUPLER” ou acoplador que supre o acelerômetro com uma corrente de excitação constante e também é o responsável pela conexão entre o acelerômetro e a placa de conversão A/D. O acoplador utilizado no experimento foi um COUPLER/POWER SUPPLY - 4 canais, da KISTLER que é bastante versátil e é o tipo indicado para o acelerômetro utilizado nos ensaios. (KISTLER,1995)

A leitura dos sinais adquiridos foi armazenada na memória de um micro computador. Também nesta segunda parte dos ensaios foi utilizado apenas um único canal com taxa de amostragem de 30 KHz para os ensaios de vida com ambas as fresas, e para os ensaios de repetitividade as taxas de amostragem foram de 50 Hz para a fresa de Metal Duro e 30 Hz para a fresa de Coronite. As taxas de amostragem caíram bastante nestes ensaios, porque o objetivo era monitorar todo o tempo de corte, sem ocupar um espaço muito grande na memória do computador.

Cabe salientar que os sinais adquiridos pelos conjuntos de monitoramento alimentavam um microcomputador PENTIUM 133 MHz, que estava equipado com uma placa A/D PCL 818, da empresa ADVANTECH, que permite leituras com taxas de amostragem de até 100 KHz (USER'S MANUAL, 1993) e também o software WAVEPRO versão 1.0 desenvolvido pela empresa SOLBET.

4.3)- Configuração do Software e Procedimentos Utilizados para a Aquisição dos Dados

A placa de aquisição analógica/digital necessita ser comandada via software para que se possa adquirir os dados. Isso pode ser feito a partir de linguagens como Pascal, C , C⁺⁺ , etc... ou através de softwares específicos de aquisição de dados. Neste trabalho optou-se pela utilização do software WAVEPRO versão 1.0, desenvolvido pela empresa SOLBET, para a aquisição de dados.

Os sinais foram adquiridos, como já visto anteriormente, por meio de sensores estrategicamente instalados, sendo em seguida direcionados a dispositivos de condicionamento

de sinais específicos e então ao conversor A/D. Para a realização da 2ª bateria de ensaios, onde foi monitorado a vibração do sistema, decidiu-se instalar o acelerômetro na lateral direita da peça (vide FIG.4.2), porque o sinal de vibração que interessa no monitoramento da vida da ferramenta é causado pelo contato ferramenta-peça. Portanto, quanto mais próximo estiver o acelerômetro da região de corte mais eficaz será o sinal captado.

Os diagramas, bem como as configurações do programa de aquisição de dados usados tanto na 1ª parte como na 2ª parte dos ensaios estão apresentados no Apêndice I .

Na 1ª parte dos ensaios, a fim de se amostrar o sinal de corrente desejado, optou-se por uma taxa de amostragem de 2000 Hz. A cada vez que o sistema de aquisição era acionado eram amostrados 1024 pontos. O sistema de aquisição era acionado a cada meio rasgo efetuado pela fresa, pois a cada meio rasgo as condições de usinagem eram alteradas. A aquisição propriamente dita se dava ao disparar o sistema, o que era feito no momento em que a ferramenta tocava a peça, de modo a coletar os dados no início, meio e fim do corte de cada meio rasgo que a fresa usinava (pois a cada meio rasgo eram variadas as velocidades de corte e as profundidades de usinagem em um primeiro momento, mantendo-se a velocidade de avanço, e em um segundo momento o inverso acontecia, variava-se as velocidades de avanço também para as mesmas profundidades anteriores, mantendo-se a velocidade de corte constante) (FIG.4.3 A e B)

Já na 2ª parte dos ensaios, a fim de se amostrar o sinal de vibração desejado, optou-se por uma taxa de amostragem de 30.000 Hz , uma vez que o sinal de vibração pode atingir até 10.000 Hz, que era a frequência de corte do filtro passa-baixa conectado ao sistema. A aquisição propriamente dita se dava ao disparar o sistema, o que era feito poucos segundos após a fresa tocar a peça, de tal maneira que, agora, nem o início nem o fim do corte de cada rasgo inteiro tinham seus dados coletados. Assim, somente a região intermediária da cada rasgo era amostrada.

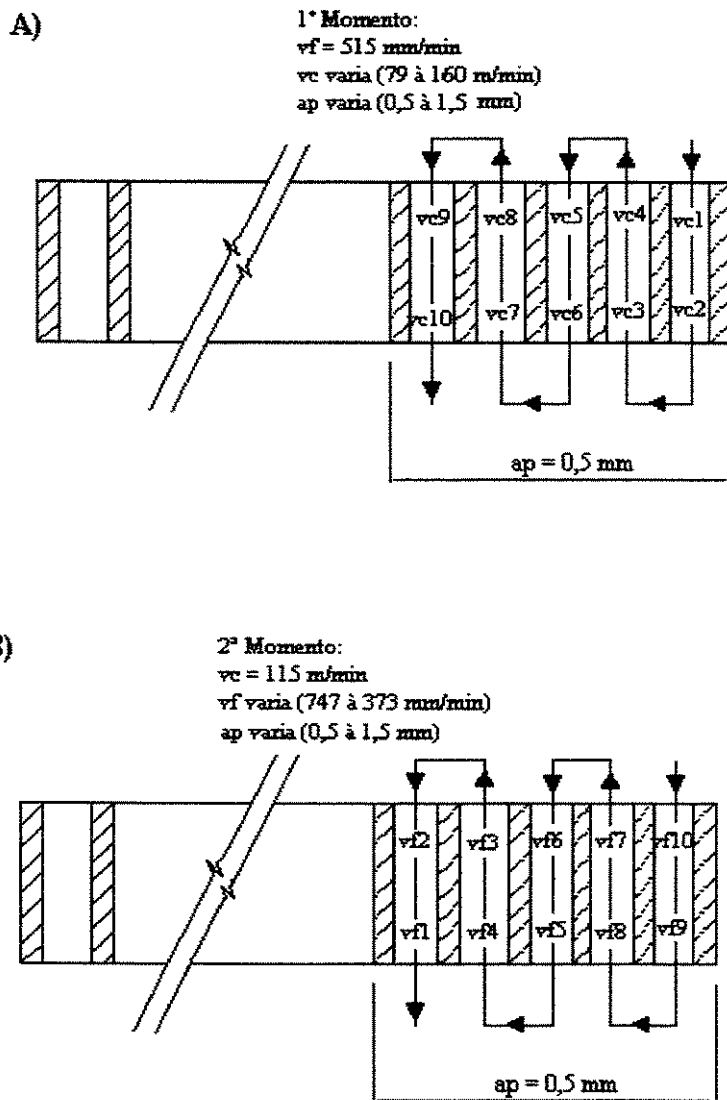


FIGURA 4.3 - Esquema de como os rasgos eram fresados durante a 1ª Bateria de Ensaio em dois momentos distintos: A)- Quando variava-se v_c ; B)- Quando variava-se v_f

Nesta 2ª parte dos ensaios a peça foi fixada a uma morsa e esta à mesa da fresadora. Em cada peça eram usinados apenas 11 rasgos em condições pré-estabelecidas e fixas (ou seja, agora sem a variação da velocidade de corte, da velocidade de avanço ou mesmo da profundidade de usinagem). O ensaio terminava quando se atingia um dos dois critérios de fim de vida adotados ($R_a > 1,25 \text{ } \mu\text{m}$ ou $V_B > 0,40 \text{ mm}$) ou então até se atingir o critério de estabelecimento de fim de ensaio (que era igual a 10 peças usinadas = 110 rasgos) caso os dois critérios anteriores não fossem obtidos.

Com relação aos ensaios de repetitividade, a taxa de amostragem utilizada para amostrar o sinal de vibração desejado foi para a fresa de Metal Duro de 50 Hz, onde agora o sinal adquirido não é mais para cada rasgo e sim do 2º rasgo até o 6º rasgo e depois do 7º até o 11º rasgo, até se atingir o fim de vida da ferramenta (os mesmos critérios adotados para os ensaios de vida foram utilizados para os ensaios de repetitividade para ambas as fresas). Para a fresa de Coronite a taxa de amostragem foi de 30 Hz, sendo agora o sinal adquirido ao longo da usinagem do 2º ao 4º rasgo, depois do 5º ao 7º rasgo e por último do 9º ao 11º rasgo, também até se atingir os critérios de fim de vida estabelecidos.

No Apêndice II estão listados os programas CNC utilizados para a realização de todos os ensaios em questão.

4.4)- O Corpo de Prova

Para a realização dos ensaios experimentais foi utilizado um único corpo de prova confeccionado de aço ABNT 1045 com dureza de 91,5 HR_B, seção quadrada de 88 mm, que após ser preparado para a usinagem tinha as dimensões finais conforme a FIG.4.4



FIGURA 4.4 – Dimensões do Corpo de Prova Utilizado nos Ensaios Experimentais

O comprimento de 440 mm foi escolhido em função das características do deslocamento da mesa do centro de usinagem, de modo a facilitar as operações de fixação e retirada do corpo de prova do mesmo.

A fixação do corpo à mesa do centro de usinagem foi feita, na 1ª bateria de ensaios, através de calços (vide FIG.4.5) e na 2ª bateria de ensaios, a peça com agora 145 mm de comprimento, foi presa a uma morsa e esta parafusada à mesa do centro de usinagem (vide FIG.4.6).

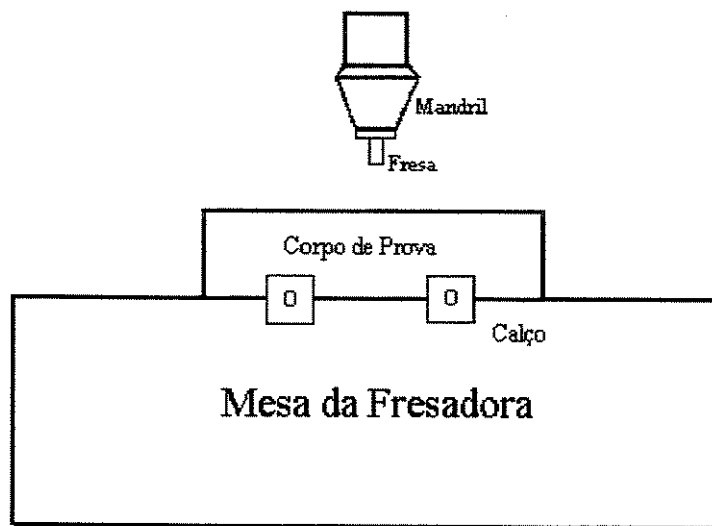


FIGURA 4.5 – Fixação do Corpo de Prova à Mesa do Centro de Usinagem feita na 1ª Bateria de Ensaaios



FIGURA 4.6 – Fixação do Corpo de Prova à Mesa do Centro de Usinagem feita na 2ª Bateria de Ensaaios

4.5)- Metodologia Aplicada aos Ensaio

Uma vez montado os sistemas de monitoramento, iniciou-se os experimentos que foram divididos em duas baterias de testes, a saber:

- 1ª Bateria:

{	* Parte A: Ensaio com variação da v_c e a_p mantendo-se v_f cte	{	Metal Duro
	Coronite		
	* Parte B: Ensaio com variação da v_f e a_p mantendo-se v_c cte	{	Metal Duro
	Coronite		

- 2ª Bateria:

{	* Parte A: Ensaio de vida utilizando-se 3 condições de usinagem distintas e diferentes para fresas de	{	Metal Duro
	Coronite		
	* Parte B: Ensaio de Repetitividade	{	Metal Duro
	Coronite		

As condições de usinagem utilizadas na 1ª bateria dos ensaios foram estimadas conforme a recomendação do fabricante da ferramenta (SANDVIK COROMANT, 1.997).

Tabela 4.1 – Valores Recomendados pelo Fabricante: (SANDVIK COROMANT, 1.997)

Tipo de Fresa :	v_c (velocidade de corte) m/min	v_f (velocidade de avanço) mm/min
Fresa de Coronite	80	390
Fresa de Metal Duro	150	640

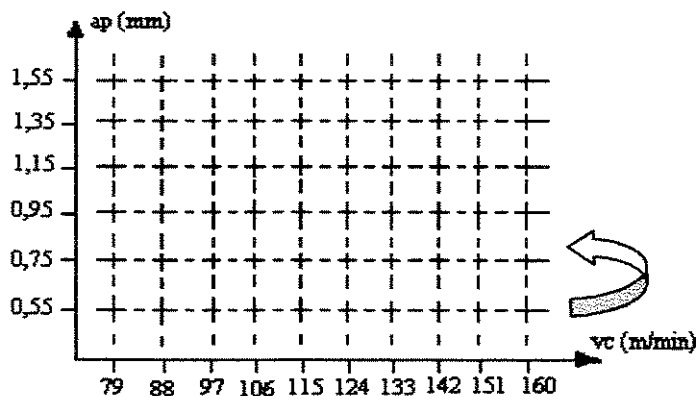
Esta 1ª bateria de ensaios teve como objetivo analisar a influência de parâmetros como v_c , v_f , e a_p no comportamento da rugosidade e consequentemente no acabamento superficial gerado na peça, bem como a influência destes na corrente elétrica consumida pelo motor da máquina.

Na Parte A desta 1ª bateria, variou-se a velocidade de corte e a profundidade de usinagem mantendo-se a velocidade de avanço constante. A velocidade de avanço utilizada foi um valor intermediário entre as recomendações para o Metal Duro e o Coronite. Monitorava-se a corrente elétrica durante a usinagem de cada meio rasgo efetuado pela fresa e posteriormente media-se a rugosidade (também em cada meio rasgo e em três pontos distintos). A cada meio rasgo fresado variava-se ou v_c ou a_p . Este ensaio foi feito utilizando-se primeiramente a fresa de Coronite e depois a fresa de Metal Duro. De tempo em tempo (ao final de mais ou menos 10 rasgos usinados) observava-se se havia ou não desgaste de flanco nas aresta das fresas. Caso isto ocorresse, a fresa era então substituída por uma nova, de modo a evitar que o mesmo viesse a influenciar nos resultados que seriam obtidos.

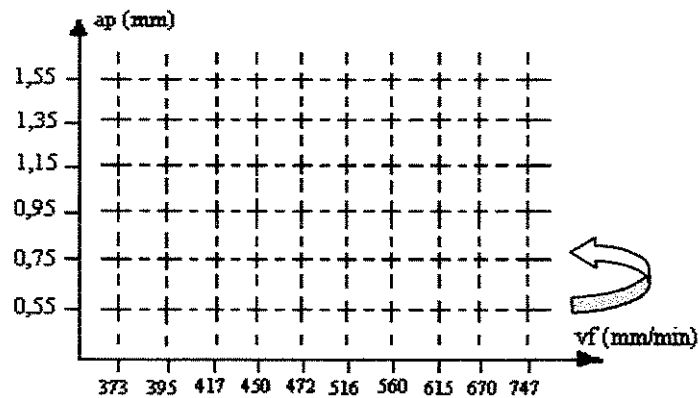
Na Parte B desta 1ª bateria, variou-se agora a velocidade de avanço e a profundidade de usinagem mantendo-se a velocidade de corte constante. A velocidade de corte utilizada foi também um valor intermediário entre as recomendações para o Metal Duro e o Coronite. As medições realizadas foram idênticas as do ensaio da Parte A.

As condições utilizadas na Parte A e B da 1ª Bateria de ensaios são mostradas a seguir:

- Parte A – Variando v_c e a_p com $v_f = \text{cte} = 515 \text{ mm/min}$



- Parte B – Variando v_f e a_p com $v_c = \text{cte} = 115 \text{ m/min}$



Terminada essa 1ª bateria de ensaios e com posterior análise dos resultados obtidos algumas decisões foram tomadas, a saber:

1ª)- decidiu-se fixar a profundidade em 0,95 mm para a 2ª bateria de ensaios

2ª)- com os valores de rugosidade obtidos nos ensaios variando-se v_c e v_f para ambas as ferramentas, e com a profundidade fixada em 0,95 mm tentou-se estabelecer uma equação da rugosidade em função do avanço/dente ($Ra=f(f_z)$), utilizando-se para isso o programa MATLAB. Foram então encontradas 4 equações a saber:

- Para v_c variando com $v_f = 515 \text{ mm/min}$:

Coronite: $Ra = -0,5842 + 57,9835 \cdot f_z - 491,6008 \cdot f_z^2 + 530,4062 \cdot f_z^3$

Metal Duro: $Ra = 0,3 - 2,8 \cdot f_z + 556,5 \cdot f_z^2 - 5141,7 \cdot f_z^3$

- Para v_f variando com $v_c = 115 \text{ m/min}$:

Coronite: $Ra = -3,3939 + 259,4723 \cdot f_z - 5352,8840 \cdot f_z^2 + 36744,6667 \cdot f_z^3$

Metal Duro: $Ra = 6,0614 - 296,6633 \cdot f_z + 5718,6963 \cdot f_z^2 - 36345,8602 \cdot f_z^3$

3ª)- Escolheu-se um valor de Ra igual a $0,95 \mu\text{m}$.

4ª)- Com o valor de Ra fixado e com as duas equações obtidas para cada situação foram encontrados 4 valores de f_z (um para cada equação)

5ª)- Com os valores dos 4 f_z 's obtidos foram calculadas duas velocidades de corte e duas velocidades de avanço.

Para tornar mais claro o que foi realizado é bom lembrar que:

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n = f_z \cdot z \cdot (1000 \cdot v_c) / (\pi \cdot d)$$

onde: v_f = velocidade de avanço (mm/min)

v_c = velocidade de corte (m/min)

f_z = avanço por dente (mm)

z = número de dentes

n = rotação do eixo-árvore (rpm)

d = diâmetro da fresa (mm)

Assim, quando se varia a rotação da fresa (ou a velocidade de corte) sem variar-se a velocidade de avanço da mesa, o avanço/dente varia de uma maneira inversa. Quando se varia a velocidade de avanço da mesa fresadora, sem variar-se a rotação da fresa, o avanço/dente varia de uma maneira diretamente proporcional.

6ª)- Para cada v_c e cada v_f encontrados seriam realizados os ensaios de vida.

Foram feitos então ensaios de vida preliminares com as fresas de Metal Duro e Coronite com a 1ª velocidade de corte encontrada ($v_c = 142$ m/min) e percebeu-se que com esta velocidade os ensaios se alongariam muito e os critérios adotados para o estabelecimento de fim de vida das ferramentas demorariam muito para serem atingidos. Então com uma velocidade de corte maior ($v_c = 240$ m/min) e utilizando a fresa de Coronite tentou-se realizar um ensaio de vida, porém a fresa teve suas arestas totalmente inutilizadas na usinagem do 3º rasgo.

Com base nestes fatos decidiu-se então adotar condições de usinagem diferentes das anteriores e diferentes entre si para as fresas de Coronite e Metal Duro. Também notou-se que, no tocante ao objetivo desta 1ª bateria, o monitoramento da corrente do motor principal da máquina não apresentava resultados interessantes, ficando decidido monitorar, agora para a 2ª bateria dos ensaios, a vibração do sistema.

A 2ª bateria de ensaios teve como objetivo analisar a influência de parâmetros como v_c , v_f e f_z (com a_p fixo) no comportamento da rugosidade e também no desgaste das ferramentas. Foram então escolhidas 3 condições de usinagem distintas para ambas as fresas. Cabe aqui ressaltar que, essas condições foram escolhidas de tal maneira que as mesmas pudessem ser comparadas entre si, ou seja, mantido um parâmetro constante, como por exemplo para a 1ª e

a 2ª condições, analisava-se a influência dos outros parâmetros não constantes no comportamento da rugosidade e como os mesmos poderiam influenciar na vida da ferramenta. E assim sucessivamente as condições foram sendo comparadas entre si.

As condições de corte, bem como os critérios adotados para estabelecimento de fim de vida, são apresentadas a seguir:

- Critérios Adotados para o estabelecimento do Fim de Vida da Ferramenta:

⇒ $R_a > 1,25 \text{ um}$

⇒ $V_B \text{ máx} \geq 0,40 \text{ mm}$

- Critério Adotado para o estabelecimento do Fim de Ensaio (no caso do fim de vida da ferramenta não ser atingido):

⇒ 10 peças usinadas perfazendo um comprimento de avanço igual a 9680 mm

- Condições de Corte:

	<u>1ª Cond.</u>	<u>2ªCond.</u>	<u>3ªCond.</u>
Metal Duro	$v_c = 240 \text{ m/min}$ $v_f = 870 \text{ mm/min}$ $f_z = 0,038 \text{ mm}$	$v_c = 300 \text{ m/min}$ $v_f = 870 \text{ mm/min}$ $f_z = 0,030 \text{ mm}$	$v_c = 300 \text{ m/min}$ $v_f = 1090 \text{ mm/min}$ $f_z = 0,038 \text{ mm}$
Coronite	$v_c = 172 \text{ m/min}$ $v_f = 624 \text{ mm/min}$ $f_z = 0,038 \text{ mm}$	$v_c = 215 \text{ m/min}$ $v_f = 624 \text{ mm/min}$ $f_z = 0,030 \text{ mm}$	$v_c = 215 \text{ m/min}$ $v_f = 780 \text{ mm/min}$ $f_z = 0,038 \text{ mm}$

Na Parte A desta 2ª bateria de ensaios, com a peça tendo um comprimento de 145 mm, eram usinados somente 11 rasgos na peça, com as condições acima estabelecidas. Interrompia-se o ensaio ao final de 11 rasgos fresados e levava-se a fresa e a peça para o laboratório para que a rugosidade e o desgaste da ferramenta pudessem ser medidos. Caso nenhum dos critérios adotados para se atingir o fim de vida da ferramenta tivesse sido atingido, voltava-se a fresa e a peça para o centro de usinagem e continuava-se o ensaio. O sinal de vibração era monitorado durante a realização dos ensaios para cada rasgo inteiro que era fresado. A medição da rugosidade agora era feita no 2º, 6º e 11º rasgos e não mais em todos os rasgos da peça. A

medição do desgaste de flanco era feita sempre no final de 11 rasgos fresados e sempre nas 3 arestas da fresa em 3 pontos distintos.

Na Parte B desta 2ª bateria de ensaios foram repetidos os ensaios sob a 2ª condição para a fresa de Coronite (uma única vez) e sob a 1ª condição para a fresa de Metal Duro (duas vezes). As medições realizadas foram idênticas aos do ensaio da Parte A. O sinal de vibração continuou sendo adquirido durante a realização dos ensaios, porém não mais para cada rasgo inteiro usinado, mas agora ao longo da usinagem do 2º ao 6º rasgo e depois do 7º ao 11º rasgo para a fresa de Metal Duro, e para a fresa de Coronite este foi adquirido agora ao longo da usinagem do 2º ao 4º rasgo, depois do 5º ao 7º rasgo e por último do 9º até o 11º rasgo.

O objetivo desta Parte B da 2ª bateria de ensaios é comprovar a eficiência do sistema empregado, ou seja, seu grau de confiabilidade, uma vez que as condições de usinagem empregadas eram constantes.

Cabe também ressaltar que, tanto para a Parte A como a Parte B da 2ª bateria de ensaios, quando a fresa era levada até o microscópio para a medição do desgaste de flanco, o mesmo era fotografado de modo a registrar passo à passo o seu desenvolvimento. Além disso, para cada uma das três arestas da fresa, o desgaste de flanco era medido em três pontos distintos da aresta principal de corte e depois fazia-se a média aritmética para se obter um valor final para o desgaste.

Os resultados obtidos, tanto para a 1ª bateria como para a 2ª bateria de ensaios, encontram-se comentados no Capítulo 5, onde os gráficos referentes aos mesmos são apresentados, o que muito auxilia e complementa a interpretação dos objetivos propostos neste trabalho.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como visto no capítulo anterior, o presente trabalho se dividiu em duas partes. Na 1ª parte dos ensaios verificou-se a influência da variação da velocidade de corte (v_c), da velocidade de avanço (v_f) e da profundidade de usinagem (a_p) na rugosidade superficial da peça, quando a mesma era usinada com fresas de topo de materiais distintos (*Coronite e Metal Duro*). Já na 2ª parte dos ensaios foram escolhidas três condições de usinagem distintas, para ambas as fresas, de modo a analisar agora a influência de alguns parâmetros de usinagem (tais como velocidade de corte - v_c , velocidade de avanço - v_f , e avanço/dente - f_z), não só na rugosidade superficial da peça, mas também no desgaste e vida das ferramentas em questão. Para isso foram adotados critérios para o estabelecimento de fim de vida da ferramenta, que eram $Ra > 1,25 \mu m$ e $V_{B\max} \geq 0,40 mm$. O primeiro destes parâmetros que fosse atingido, caracterizaria o fim de vida da ferramenta. Além disso, também nesta 2ª parte dos ensaios, analisou-se o comportamento do sinal de vibração em função do comprimento usinado, de modo a tentar estabelecer automaticamente o fim de vida de ambas as ferramentas.

Neste capítulo serão mostrados os resultados experimentais obtidos, tanto na 1ª parte dos ensaios como na 2ª parte, conjuntamente com uma discussão destes resultados.

5.1) - Análise dos Resultados da 1ª Parte dos Ensaios

5.1.1)- Análise da Influência da Variação da Velocidade de Corte (v_c) na Rugosidade Aritmética Média (Ra) para a Fresa de CORONITE

Observando-se o gráfico “*Comportamento da Rugosidade (Ra) para Fresa de Coronite quando v_c varia*” (FIG. 5.1) pode-se constatar que a medida que o avanço/dente (f_z) aumenta (através da diminuição da velocidade de corte - v_c) os valores obtidos para a rugosidade também tendem a aumentar. Entretanto, percebe-se que não somente o avanço/dente (f_z) tem essa influência marcante na rugosidade, mas a profundidade de usinagem (a_p) também.

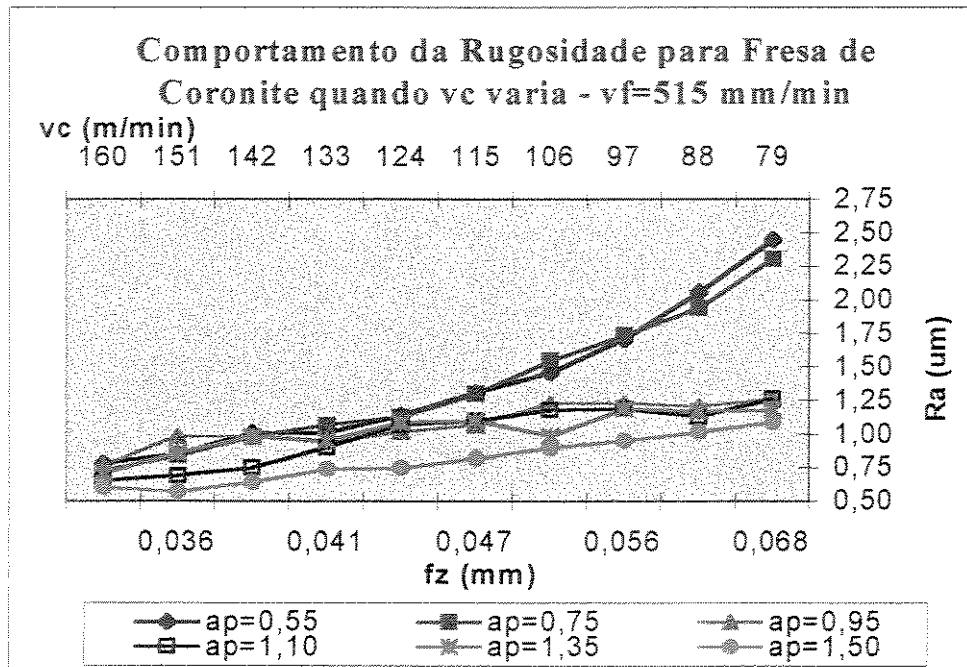


FIGURA 5.1 - Comportamento da Rugosidade (R_a) para a Fresa de Coronite quando v_c varia

Um exemplo disto pode ser visto neste mesmo gráfico, quando tem-se $f_z = 0,068$ mm (o que equivale a um $v_c = 79$ m/min). Nota-se que para as curvas de menores profundidades - a_p 's ($a_p=0,55$ mm e $a_p=0,75$ mm) os valores da rugosidade - R_a encontrados com este avanço/dente- f_z foram de $2,45 \mu\text{m}$ e $2,31 \mu\text{m}$ respectivamente. Já para a curva de maior profundidade ($a_p=1,50$ mm) (também para este mesmo valor de f_z), o valor da rugosidade (R_a) encontrado foi bem inferior aos anteriores ($R_a=1,09 \mu\text{m}$) o que resulta numa variação de 55% com relação ao $a_p=0,55$ mm e ao $a_p=0,75$ mm. Entretanto nota-se também que para pequenos avanços/dente ($f_z = 0,034$ mm à $0,041$ mm) mesmo com o aumento da profundidade, essa variação na rugosidade já não é tão significativa. (Exemplo: para $f_z = 0,034$ mm com $a_p=0,55$ mm o valor de $R_a = 0,78 \mu\text{m}$; para o mesmo $f_z = 0,034$ mm com $a_p=1,50$ mm o valor de $R_a = 0,60 \mu\text{m}$).

Desta forma conclui-se que a profundidade de usinagem (a_p) também tem sua cota de influência na rugosidade, principalmente quando se trabalha com avanços/dente (f_z) altos. Uma possível explicação para o fato de que com menores profundidades de usinagem (a_p 's) e maiores avanços/dente (f_z 's) foram obtidos valores de rugosidade (R_a) mais altos (do que para a_p 's maiores) pode residir no fato de que quando se trabalha com menores profundidades, a

possibilidade de deflexão da fresa é maior, assim como é maior também o seu balanço (ou seja, maior é a distância entre a superfície da peça e o cabeçote do fuso), podendo gerar desta forma vibrações indesejadas e maiores do que aquelas que são geradas quando se trabalha com profundidades maiores (pois as mesmas geram balanços menores) que se refletirão no acabamento superficial da peça.

5.1.2)- Análise da Influência da Variação da Velocidade de Avanço (v_f) na Rugosidade Aritmética Média (R_a) para a Fresa de CORONITE

Observando o gráfico “*Comportamento da Rugosidade (R_a) para a Fresa de Coronite quando v_f varia*” (FIG. 5.2), pode-se também constatar que a medida que o avanço/dente (f_z) aumenta (porém este aumento agora se deve ao aumento da velocidade de avanço (v_f) – sem alteração da velocidade de corte - v_c) os valores obtidos para a rugosidade também aumentam.

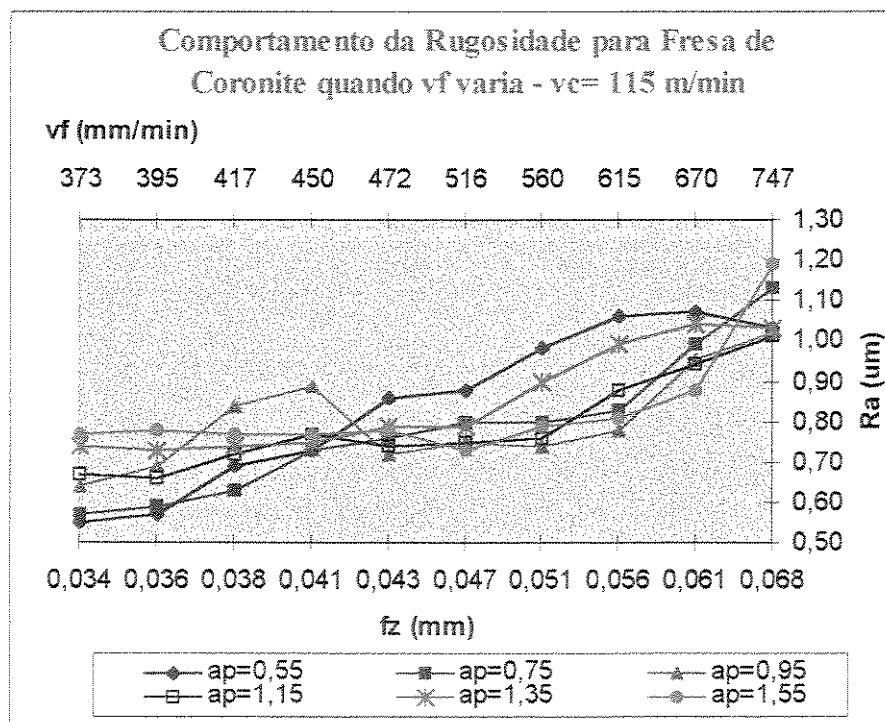


FIGURA 5.2 - Comportamento da Rugosidade (R_a) para Fresa de Coronite quando v_f varia

Entretanto, quando comparam-se os valores obtidos para a rugosidade (R_a) quando variou-se a v_f (FIG.5.2) aos valores obtidos para a rugosidade (R_a) quando variou-se a v_c (FIG. 5.1), para mesmos a_p 's e f_z 's, constata-se que os valores de rugosidade (quando varia-se v_f) são menores, principalmente quando se tem baixos a_p 's e altos f_z 's. Para valores baixos de f_z 's os valores obtidos para a rugosidade (R_a) estão na mesma faixa em ambas as figuras.

Uma possível explicação para esta situação, pode estar baseada no fato de que a contribuição do crescimento da pressão específica de corte – K_m (devido à diminuição da velocidade de corte) sobre a rugosidade (FIG. 5.1) foi mais marcante que a contribuição da queda do coeficiente de atrito (devido ao aumento da velocidade de avanço na FIG.5.2), ou seja, para um mesmo f_z , a influência do crescimento da pressão específica de corte pode ter sobreposto a influência da queda do coeficiente de atrito, gerando dessa forma valores de rugosidade mais altos (para o mesmo $f_z = 0,068$ mm o $R_{a_{v\text{cvariou}}} > R_{a_{v_f\text{variou}}}$).

Em outras palavras, na FIG. 5.1, quando f_z é pequeno significa dizer que a v_c é alta, o que contribuiu para fazer com que a pressão específica de corte (K_m) não fosse tão alta, apesar do valor da espessura média de corte (h_m) ser bem pequena. Isto fez com que os valores de rugosidade neste caso fossem da mesma ordem de grandeza daquelas da FIG. 5.2. Já para valores altos de f_z , tinha-se v_c 's baixas (na FIG. 5.1) com valor intermediário de v_f , e v_f 's altas na FIG.5.2 (com um valor intermediário de v_c). Como neste caso os valores da rugosidade (R_a) foram bem maiores na FIG. 5.1 do que na FIG. 5.2 (para mesmos valores de f_z), pode-se concluir que, com velocidades baixas e pressão específica de corte altas, a formação do cavaco fica prejudicada e a rugosidade cresce. Já na FIG.5.2, os avanços/dente (f_z 's) são altos quando as velocidades de avanço (v_f 's) também os são. Aqui então, a pressão específica de corte (K_m) não é tão alta (já que v_c tem um valor intermediário) e os atritos devem ser um pouco menores devido a maior velocidade de remoção do cavaco (maior v_f), gerando dessa forma valores menores de rugosidade.

Ainda analisando o gráfico “Comportamento da Rugosidade (R_a) para a Fresa de Coronite quando v_f varia” (FIG.5.2) percebe-se que a influência da profundidade de usinagem (a_p) sobre a rugosidade não se comporta de uma maneira única para os diversos f_z 's .

Exemplificando, para a profundidade $a_p = 1,55$ mm, tem-se o maior valor da rugosidade dentre todas as a_p 's quando f_z é igual a 0,034 mm, depois tem-se o menor valor de Ra quando o f_z é igual a 0,047 mm e de novo tem-se o maior valor de rugosidade quando o f_z é igual a 0,068 mm. Sendo assim, o comportamento da rugosidade com relação a profundidade de usinagem (a_p) não foi idêntico ao comportamento mostrado na FIG.5.1, quando f_z variava devido à variação da velocidade de corte.

5.1.3)- Análise da Influência da Variação da Velocidade de Corte (v_c) na Rugosidade Aritmética Média (Ra) para a Fresa de METAL DURO

Analisando-se o gráfico “*Comportamento da Rugosidade (Ra) para Fresa de Metal Duro quando v_c varia*” (FIG.5.3) pode-se observar que trabalhando com avanços/dente pequenos (ou seja, trabalhando-se na faixa de intervalo de $f_z = 0,034$ à 0,043 mm) e aumentando-os gradativamente simultaneamente com o aumento da profundidade de usinagem ($a_p = 0,50$ à 1,10 mm), constata-se que a influência do crescimento de ambos os fatores não altera os valores da rugosidade (a variação da rugosidade é mínima).

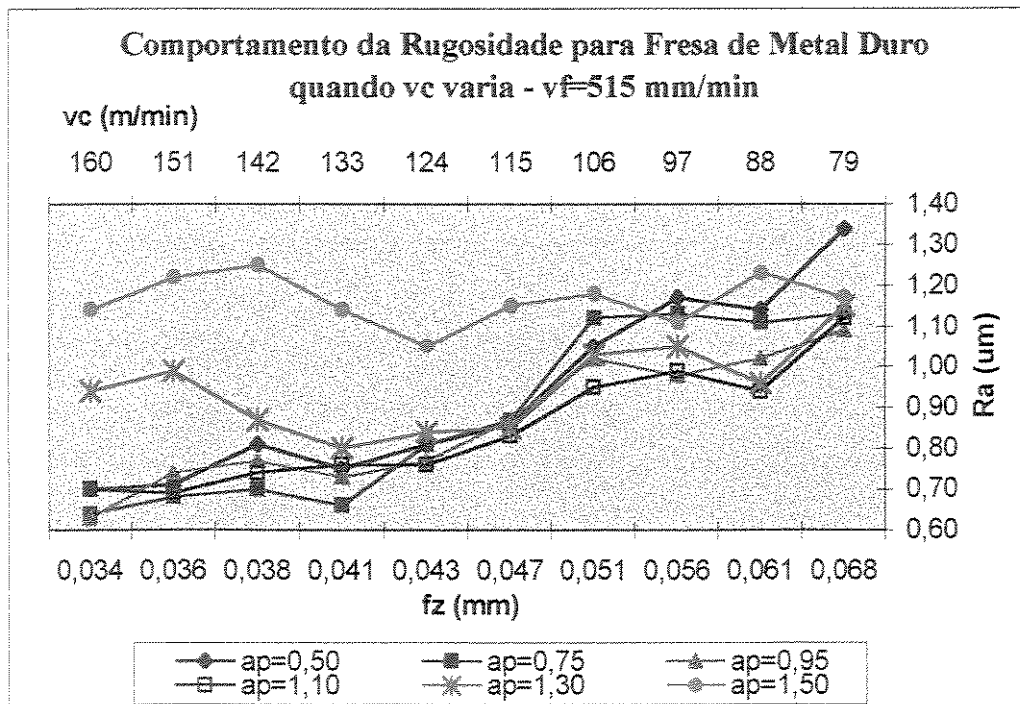


FIGURA 5.3 - Comportamento da Rugosidade (Ra) para a Fresa de Metal Duro quando v_c varia

Isto contraria a literatura (DINIZ, 1997) e (SANDVIK COROMANT, 1990) que afirma que a rugosidade deve crescer com o crescimento do avanço/dente (f_z). Além disso, é possível observar comportamentos diferentes para a rugosidade com a variação da profundidade de usinagem (a_p). Observa-se nesta figura (FIG.5.3) que na maioria das vezes a rugosidade (R_a) cresce com o crescimento de a_p , enquanto que na FIG.5.1 a rugosidade (R_a) no geral diminui com o crescimento de a_p e na FIG.5.2 o comportamento da rugosidade foi totalmente aleatório. Ainda observando a FIG.5.3, nota-se que para f_z 's maiores que 0,043 mm a rugosidade tem seus valores aumentados quando aumenta-se o avanço por dente, exceto para as profundidades de 1,30 e 1,50 mm. Para essas profundidades e mesmo aumentando-se o avanço/dente a rugosidade permaneceu quase que constante.

Quando compara-se o gráfico do “Comportamento da Rugosidade (R_a) para Fresa de Metal Duro quando v_c varia” (FIG.5.3) com o gráfico do “Comportamento da Rugosidade (R_a) para Fresa de Coronite quando v_c varia” (FIG.5.1), onde a variação da velocidade de corte foi igual para ambos os casos, mudando apenas o material da ferramenta, constata-se que quando se trabalha com avanços/dente na faixa de 0,047mm à 0,068mm e profundidades de usinagem na faixa de 0,95 mm à 1,50 mm, os valores obtidos para a rugosidade são bem parecidos (os valores de R_a variam em torno de 0,75 μ m à 1,30 μ m). Entretanto os valores obtidos para R_a para pequenos a_p 's ($a_p=0,55$ à 0,75mm) quando v_c varia para a fresa de Metal Duro se apresentaram bem mais baixos do que quando v_c variou para a fresa de Coronite.

Comparando-se agora o gráfico “Comportamento da Rugosidade (R_a) para Fresa de Metal Duro quando v_c varia” (FIG.5.3) com o gráfico “Comportamento da Rugosidade (R_a) para Fresa de Metal Duro quando v_f varia” (FIG.5.4), pode-se constatar que os valores obtidos para R_a quando variou-se a velocidade de corte, para mesmos a_p 's e f_z 's, são menores do que os valores obtidos para R_a quando variou-se a velocidade de avanço, exceto para avanços/dente (f_z) grandes ($f_z= 0,056$ à 0,068 mm). Um exemplo disto pode ser observado na tabela 5.1.

TABELA 5.1 – Comportamento da Rugosidade (Ra) para a Fresa de Metal Duro quando variam-se a v_c e a v_f

a_p (mm):	f_z (mm):	Quando v_c varia:	Quando v_f varia:
0,55	0,038	0,81	0,93
	0,047	0,86	0,95
	0,068	1,34	1,04
0,75	0,038	0,70	1,00
	0,047	0,87	0,96
	0,068	1,13	1,01
0,95	0,038	0,77	1,06
	0,047	0,87	0,97
	0,068	1,09	0,90

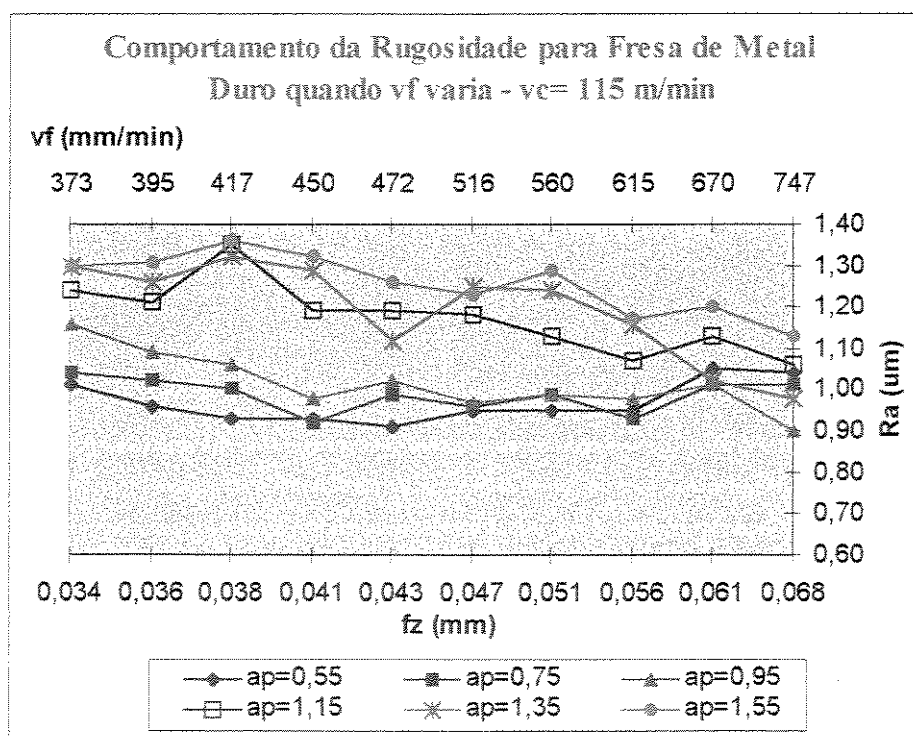


FIGURA 5.4 - Comportamento da Rugosidade (Ra) para a Fresa de Metal Duro quando v_f varia

Uma possível explicação para a situação observada pode estar baseada no fato de que, do mesmo modo que ocorreu com a fresa de Coronite, a contribuição do crescimento da

pressão específica de corte – K_m (devido à diminuição da velocidade de corte), foi mais marcante do que a contribuição geométrica do avanço para a rugosidade da peça (quando trabalhou-se com f_z 's altos). Em outras palavras, para a FIG. 5.3, quando tem-se f_z 's altos ($f_z = 0,068$ mm) é porque a velocidade de corte é baixa ($v_c = 79$ m/min). Assim os valores para a pressão específica de corte (K_m) da FIG.5.3 são maiores do que os valores da pressão específica de corte da FIG. 5.4 (para o mesmo f_z e agora com v_c maior e igual a 115 m/min). Consequentemente para valores mais altos de K_m obteve-se maiores valores de R_a .

5.1.4)- Análise da Influência da Variação da Velocidade de Avanço (v_f) na Rugosidade Superficial da Peça para a Fresa de METAL DURO

Analizando-se o gráfico “Comportamento da Rugosidade (R_a) para Fresa de Metal Duro quando v_f varia” (FIG.5.4) os seguintes pontos podem ser observados:

- Contrariando a literatura (DINIZ,1997) e (SANDVIK COROMANT,1990) para valores de profundidade maiores ou iguais a 1,15 mm, existe uma leve tendência de queda da rugosidade (R_a) com o crescimento do avanço/dente (f_z). Já para profundidades menores que 1,15mm a rugosidade (R_a) permanece quase que constante a medida que o avanço/dente (f_z) cresce.

- As curvas desta figura podem ser divididas em dois blocos distintos. O primeiro deles, quando se tem profundidades maiores que 1,15 mm, possui valores de R_a superiores ao segundo bloco (com $a_p < 1,15$ mm), principalmente quando o avanço/dente é baixo. Percebe-se então, que a tendência da rugosidade (R_a) é de crescimento a medida que a profundidade de usinagem (a_p) também cresce.

- Uma outra conclusão a que se pode chegar é que a influência da profundidade de usinagem (a_p) na rugosidade (R_a) (para o caso em questão) é bem mais marcante que a influência do avanço/dente (f_z).

Comparando-se o gráfico “Comportamento da Rugosidade (R_a) para Fresa de Metal Duro quando v_f varia” (FIG.5.4) com o gráfico “Comportamento da Rugosidade (R_a) para a Fresa de Coronite quando v_f varia” (FIG.5.2), onde se tem como única diferença o material da

fresa, constata-se que inicialmente (para avanços até 0,051mm), o comportamento das curvas são nitidamente opostos. Percebe-se que quando se utilizou fresas de Coronite obteve-se menores valores de rugosidade para pequenos f_z 's (f_z 's < 0,051mm). Para valores maiores que este, as rugosidades obtidas para o Coronite passam a se situar na mesma faixa (de 0,80 μm à 1,20 μm) que as obtidas para o Metal Duro. Isso provavelmente ocorreu devido ao pequeno tamanho do grão das partículas de Coronite, que proporcionam uma aresta de corte com raio de arredondamento menor. Essa geometria da aresta é preponderante quando a espessura do cavaco é pequena, e por isso nestes casos, a rugosidade da peça é menor que nas peças usinadas com fresas de Metal Duro.

5.1.5) - Conclusões Referentes aos Resultados da 1ª Parte dos Ensaio

➤ Em geral, a rugosidade (R_a) cresce com o avanço/dente. Isto só não aconteceu quando se utilizou ferramentas de Metal Duro e a variação do avanço/dente (f_z) foi causada pela variação da velocidade de avanço (v_f) (FIG.5.4).

➤ O comportamento da rugosidade (R_a) com a profundidade de usinagem é aleatório, não se conseguindo dessa forma detectar uma relação que pudesse ser generalizada.

➤ O material da ferramenta também não mostrou uma influência marcante na rugosidade (R_a). Ora as superfícies usinadas com Coronite apresentaram menores valores de rugosidade (R_a), ora aquelas usinadas com Metal Duro tiveram melhores acabamentos superficiais, e algumas vezes os acabamentos eram similares para ambas as fresas. Entretanto cabe aqui uma pequena observação: para valores pequenos de avanços/dente (f_z 's), a maior agudeza das arestas de Coronite proporcionaram, em geral, rugosidades (R_a 's) menores, gerando dessa forma acabamentos melhores.

➤ A velocidade de corte se mostrou importante para a rugosidade. Sempre que se tinha um avanço/dente (f_z) alto devido ao pequeno valor da velocidade de corte (v_c), obteve-se maiores rugosidades (R_a 's), do que quando se tinha os mesmos avanços/dente (f_z) altos devido agora a velocidades de avanço (v_f) altas.

5.2)- Análise dos Resultados da 2ª Parte dos Ensaios

Ensaios de Vida e de Repetitividade

5.2.1)- Fresa de Coronite

5.2.1.1)- Análise da Influência da Velocidade de Corte (v_c), da Velocidade de Avanço (v_f) e do Avanço por dente (f_z) na Rugosidade (R_a) da peça:

<u>1ª Condição:</u>	<u>2ª Condição:</u>	<u>3ª Condição:</u>
$v_c = 172 \text{ m/min}$	215 m/min	215 m/min
$v_f = 624 \text{ mm/min}$	624 mm/min	780 mm/min
$f_z = 0,038 \text{ mm}$	0,030 mm	0,038 mm

As exigências quanto ao acabamento (R_a) são, muitas vezes, um critério importante em fresamento. Sabe-se que no fresamento tangencial (com fresas cilíndricas) uma superfície ondulada é produzida. A altura desta ondulação define a rugosidade máxima teórica, que é calculada a partir do diâmetro da fresa e do avanço/dente (f_z). Esta rugosidade máxima teórica é dada pela equação $R_{\text{máx}} = f_z^2/4D$. Para o fresamento frontal, como o utilizado neste trabalho, não se tem uma equação para a rugosidade teórica, mas sabe-se que a rugosidade é fortemente influenciada pelo avanço/dente, devido à aspectos geométricos do corte (SANDVIK COROMANT, 1990). Sendo assim, teoricamente, a medida em que se diminui o avanço/dente (f_z), a rugosidade (R_a) também deveria diminuir. Entretanto, cabe aqui salientar que tais equações, somente consideram aspectos geométricos teóricos e não podem ser consideradas exatas. Logo, quando comparou-se a 1ª condição com a 2ª condição, observou-se através do gráfico *“Comportamento da Rugosidade (R_a) para Fresas de Coronite em Diferentes Condições de Usinagem”* (FIG.5.5) que para a 1ª condição ($f_z = 0,038\text{mm}$), a rugosidade inicialmente foi igual a $0,75 \mu\text{m}$. Para a 2ª condição ($f_z = 0,030\text{mm}$), a rugosidade (R_a) inicialmente foi igual a $0,52 \mu\text{m}$. Percebe-se então que com o aumento da v_c , houve uma diminuição do f_z , que gerou também uma diminuição na rugosidade.

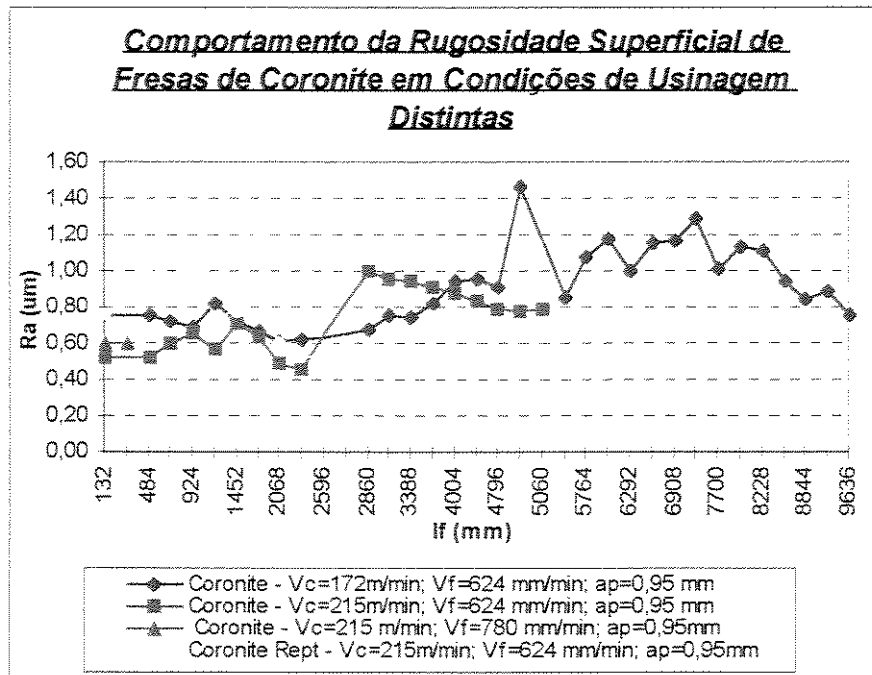


FIGURA 5.5 - Comportamento da Rugosidade (Ra) para Fresas de Coronite em Diferentes Condições de Usinagem

Comparando-se agora a 1ª condição com a 3ª condição, onde houve um aumento tanto da v_c quanto da v_f (mantendo-se porém o avanço/dente (f_z) igual para as duas condições), constatou-se que para a 1ª condição que possuía $v_c = 172$ m/min, obteve-se inicialmente um valor de rugosidade igual a $0,75 \mu\text{m}$, valor este, maior do que a rugosidade obtida para $v_c = 215$ m/min ($Ra = 0,60 \mu\text{m}$). Isto provavelmente ocorreu devido ao fato de que com o aumento da velocidade de corte, a pressão específica de corte (K_m) diminui, facilitando assim a formação do cavaco. Além disso com o aumento da velocidade de corte, há uma diminuição dos coeficientes de atrito tornando o corte mais dinâmico, melhorando dessa forma a rugosidade. Este resultado está de acordo com aquele obtido na 1ª parte deste trabalho.

Comparando-se a 2ª condição com ela mesma, ou seja, com o ensaio de repetitividade, nota-se no gráfico “Comportamento da Rugosidade (Ra) para Fresas de Coronite” (FIG.5.5) que para este mesmo ensaio há uma grande variação de Ra ($v_c = 215$ m/min; $v_f = 624$ mm/min; $a_p = 0,95$ mm ; $f_z = 0,030$ mm). Inicialmente para um comprimento de avanço $L_f = 132$ mm a rugosidade foi igual a $0,52 \mu\text{m}$. Repetindo-se este mesmo ensaio o valor encontrado inicialmente para a rugosidade foi de $0,75 \mu\text{m}$.

Uma possível explicação para esse comportamento aleatório da rugosidade (R_a) no ensaio de repetitividade pode ser devido a algum fenômeno microscópico que deve ter ocorrido na aresta secundária de corte, gerando valores mais altos de R_a .

Analisando-se também as curvas de $R_a \times L_f$ (FIG. 5.5) e de RMS da vibração $\times L_f$ (FIG. 5.6) isoladamente para este ensaio de vida ($v_c = 215$ m/min; $v_f = 624$ mm/min; $a_p = 0,95$ mm; $f_z = 0,030$ mm) nota-se que para um comprimento de avanço igual a $L_f = 2860$ mm houve um crescimento no valor da rugosidade que foi devido ao crescimento da vibração (FIG.5.6), que provavelmente aumentou devido ao desgaste de flanco de somente uma das três arestas da fresa (FIG.5.7) (mais precisamente da 3ª aresta onde houve um crescimento do V_B de aproximadamente 67% - ao final da usinagem de 22 rasgos o V_B foi igual a 0,251 mm e ao final, da usinagem de 33 rasgos o V_B passou para 0,351 mm).

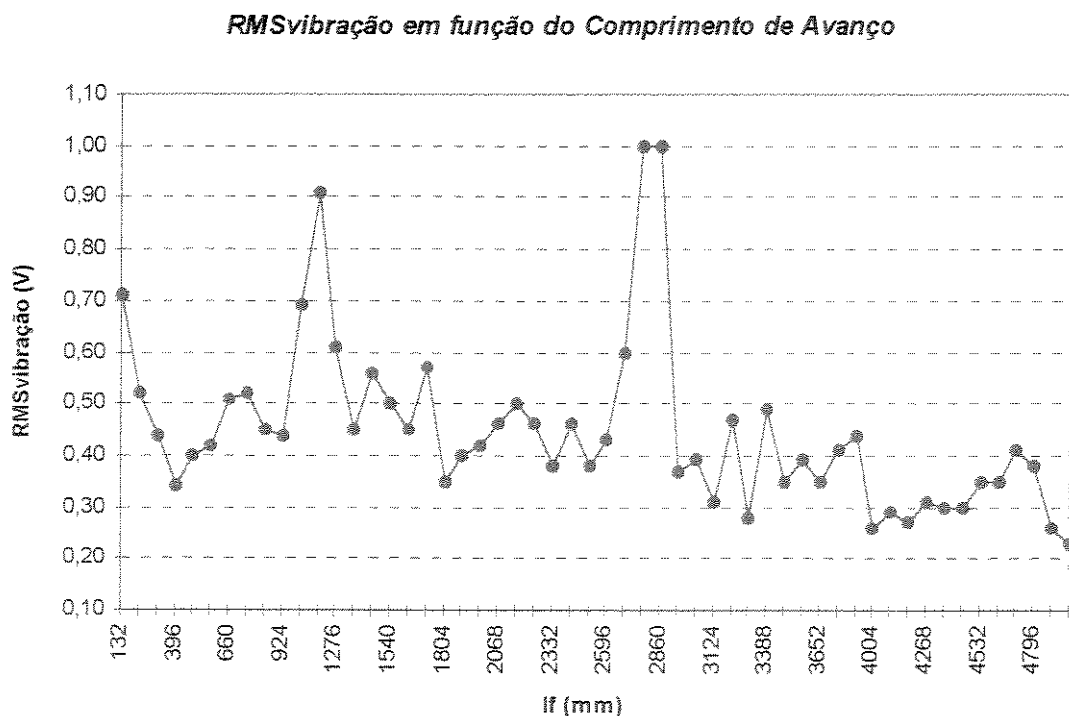


FIGURA 5.6 - RMSvibração em função do Comprimento de Avanço para Fresa de Coronite sob as seguintes condições: $v_c = 215$ m/min; $v_f = 624$ mm/min; $a_p = 0,95$ mm; $f_z = 0,030$ mm

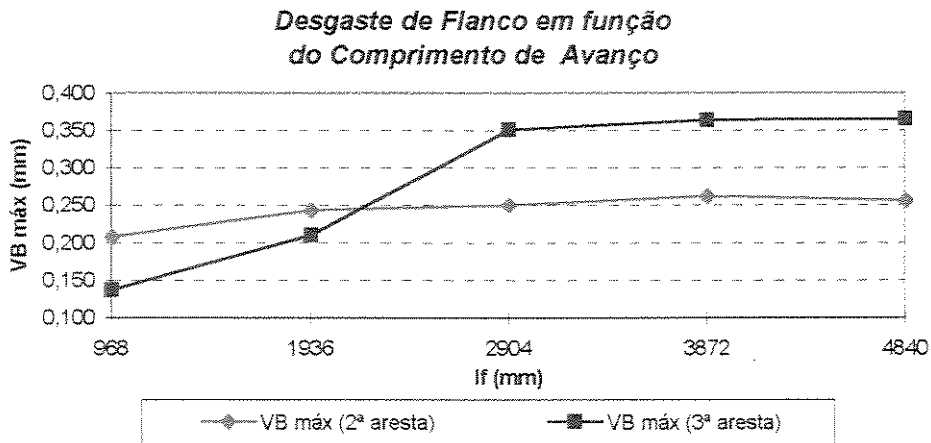


FIGURA 5.7- Desgaste de Flanco em função do Comprimento de Avanço para Fresa de Coronite sob as seguintes condições: $v_c = 215$ m/min; $v_f = 624$ mm/min; $a_p = 0,95$ mm; $f_z = 0,030$ mm

Analisando-se agora a 2ª condição com a 3ª condição, onde foi mantida constante a velocidade de corte (v_c) e variou-se a velocidade de avanço (v_f), variando-se assim o avanço/dente (f_z), pode-se notar que inicialmente o valor de Ra também cresceu (passou de $0,52 \mu\text{m}$ para $0,60 \mu\text{m}$). Porém quando se compara o ensaio de repetição desta 2ª condição com a 3ª condição, o inverso é observado, ou seja, mesmo com o aumento de f_z de $0,030$ mm para $0,038$ mm os valores iniciais de rugosidade (Ra) são maiores para o ensaio de repetição (para $f_z = 0,030$ mm, Ra foi igual a $0,75 \mu\text{m}$ contra $f_z = 0,038$ mm e Ra = $0,60 \mu\text{m}$) contradizendo o comportamento observado anteriormente. Sendo assim observando-se esse comportamento aleatório da rugosidade não é possível afirmar que para este caso em questão, exista um influência do avanço/dente na rugosidade.

Em todos os casos, pôde-se observar bastante aleatoriedade dos valores de Ra ao longo da vida da ferramenta. Baseado neste resultado, nos resultados da 1ª parte dos ensaios e também em resultados de outros trabalhos realizados pelos grupos de pesquisa em usinagem do DEF/FEM/UNICAMP, pode-se dizer que a rugosidade é uma característica da peça muito influenciada por mínimas variações do desgaste da ferramenta ou da vibração do sistema máquina-ferramenta dispositivo de fixação - peça, podendo crescer e diminuir abruptamente, devido a fenômenos que podem ser imperceptíveis para um observador. Assim, tentar estabelecer um padrão de comportamento da rugosidade é uma tarefa muito difícil.

5.2.1.2)- Análise da Influência da Velocidade de Corte (v_c), da Velocidade de Avanço (v_f) e do Avanço por dente (f_z) no Desgaste e na Vida da Ferramenta

Analisando-se a Tabela 5.2 e a FIG.5.8 “*VIDA PARA FRESAS DE CORONITE EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE USINAGEM*” pode-se afirmar que a vida da ferramenta é influenciada tanto pela velocidade de corte quanto pela velocidade de avanço. A Tabela 5.2 mostra esta variação quantitativamente. Cabe aqui ressaltar que o término da vida da ferramenta (para a 2ª e 3ª condições) não se deu pelos critérios estabelecidos anteriormente, mas pela destruição das arestas da fresa, como será mostrado posteriormente. Com velocidade de corte $v_c=172\text{m/min}$ (ensaio sob 1ª condição) o fim de vida da ferramenta também não ocorreu.

Tabela 5.2 - Vida da Ferramenta (min) de Fresamento para Diferentes v_f e v_c :

f_z (mm):	v_f (mm/min):	v_c (m/min):	L_f (mm):	T (min):
0,038	624	172	9680	-----
0,030	624	215	5060	24,6
0,030	624	215	5060	24,6
0,038	780	215	220	0,85

O comprimento usinado diminuiu em ~ 48%

A vida caiu em ~ 96,6 %

Pode-se observar que, quando aumentou-se a velocidade de avanço (mantendo-se v_c) a vida caiu em 96,6%. Pode-se constatar então uma forte influência da velocidade de avanço na vida da fresa de coronite e consequentemente no comprimento usinado.

Entretanto quando aumentou-se a velocidade de corte (v_c) na mesma proporção (mantendo-se a v_f) não foi possível precisar exatamente em quanto a vida da ferramenta diminuiu, pois em um dos ensaios não se chegou ao fim da vida. Porém, é possível afirmar que o comprimento usinado pela ferramenta diminuiu bastante com o crescimento da velocidade de corte.

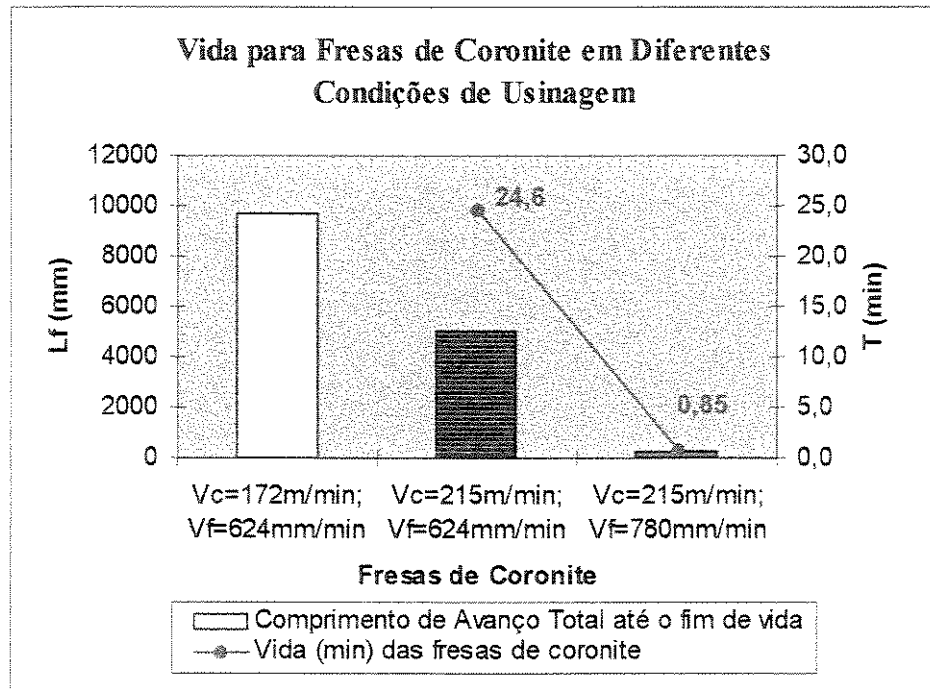


FIGURA 5.8 – Vida para Fresas de Coronite em Diferentes Condições de Usinagem

Quando se usinou a peça utilizando-se os dados da 1ª condição ($v_c = 172$ m/min; $v_f = 624$ mm/min; $f_z = 0,038$ mm; $a_p = 0,95$ mm), não foi possível estabelecer o fim de vida da fresa na mesma, pois o ensaio precisou ser interrompido ao final de 10 peças usinadas (o equivalente a 9680 mm de comprimento usinado), pois os critérios adotados para estabelecimento de fim de vida da ferramenta (que eram $Ra > 1,25$ μ m e $V_{B_{\max}} > 0,40$ mm) até então não tinham sido atingidos.

Entretanto observa-se que mesmo com aproximadamente quase 10 m de comprimento usinado, esta fresa apresentou desgaste de flanco ($V_{B_{\max}} = 0,111$ mm) (FIG.5.9) bem menor que as outras duas condições.

Quando passou-se a usinar com velocidades de corte um pouco mais altas ($v_c = 215$ m/min), o comprimento usinado diminuiu em aproximadamente 48% e o desgaste de flanco (a partir de $L_f = 2904$ mm) (FIG.5.9) teve seu valor aumentado em 73% (para $v_c = 172$ m/min - $V_B = 0,093$ mm contra $V_B = 0,351$ mm obtido com $v_c = 215$ m/min). Conclui-se então que ambos os fatores (tanto a velocidade de corte- v_c quanto a velocidade de avanço - v_f) tem uma forte influência no desgaste e na vida da ferramenta.

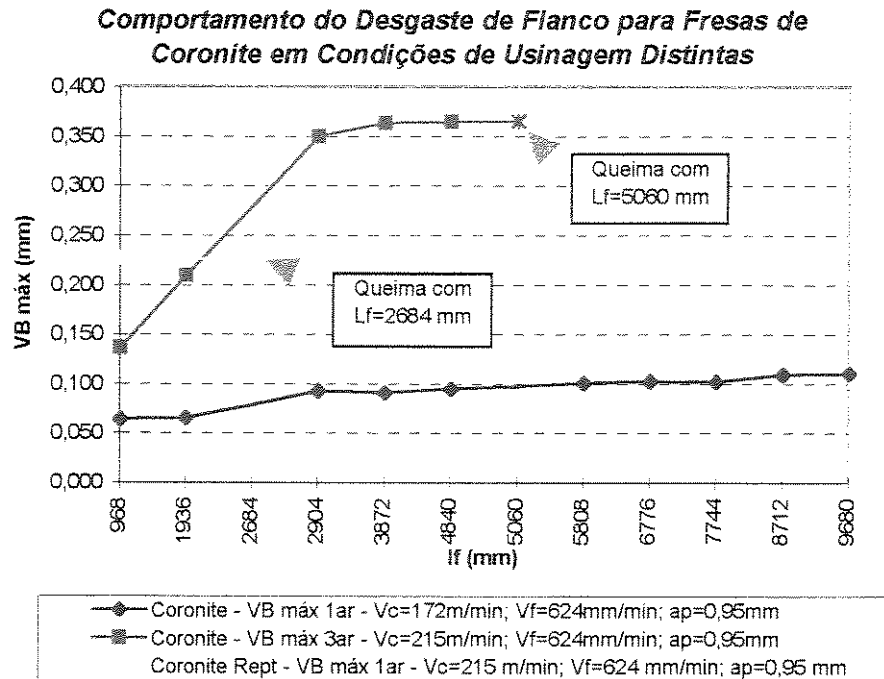


FIGURA 5.9 - Comportamento do Desgaste de Flanco para fresas de Coronite em Diferentes Condições de Usinagem

Analisando-se o gráfico “*Comportamento do Desgaste de Flanco para Fresas de Coronite em Diferentes Condições de Usinagem*” (FIG.5.9) para a 2ª condição ($v_c=215$ m/min; $v_f=624$ mm/min; $a_p=0,95$ mm; $f_z=0,030$ mm) e para a sua repetição, constata-se que há entre esses mesmos ensaios uma grande variação do desgaste de flanco (V_B), assim como também há uma grande diferença entre a vida da ferramenta. Quando feito pela 1ª vez a vida da ferramenta foi de 24,6 min (o que corresponde a um comprimento de avanço igual a 5060 mm). Quando feita a sua repetição, o desgaste se apresentou maior inicialmente ($V_B=0,23$ mm contra $V_B=0,14$ mm) (FIG.5.9) e a vida foi de 13,1 min ($L_f=2684$ mm). Além disso constata-se também que o desgaste de flanco não precisa ser alto para que a ferramenta possa se deteriorar. Quando feito pela 1ª vez o desgaste de flanco antes da queima foi de $\sim 0,37$ mm e quando feito na repetição o desgaste antes da queima foi de $\sim 0,23$ mm. Para a 3ª condição de ensaio ($v_c=215$ m/min; $v_f=780$ mm/min; $a_p=0,95$ mm; $f_z=0,038$ mm) não foi possível plotar a curva do desgaste de flanco em função do comprimento de avanço, pois a fresa teve suas arestas deterioradas quando a mesma usinava o 3º rasgo ($L_f=220$ mm) e o desgaste era sempre medido no final de 11 rasgos usinados ($L_f=968$ mm).

Cabe aqui um comentário sobre a vida obtida para a fresa de Coronite quando feito o ensaio de repetição. Se este valor (13,1 min) obtido para a vida fosse substituído na Tabela 5.2, os resultados encontrados seriam quantitativamente diferentes (veja Tabela 5.3), entretanto a forte influência de v_c e v_f na vida da ferramenta ainda permaneceria.

Tabela 5.3 - Vida da Ferramenta (min) de Fresamento para Diferentes v_f e v_c :

f_z (mm):	v_f (mm/min):	v_c (m/min):	L_f (mm):	T (min):
0,038	624	172	9680	----
0,030	624	215	2684	13,1
0,030	624	215	2684	13,1
0,038	780	215	220	0,85

O comprimento usinado diminui em ~ 72,3%

A vida caiu em ~ 93,5 %

Outro fato interessante que foi observado durante esses ensaios, foi o de que a rugosidade não tem o seu valor aumentado minutos antes da fresa se fundir junto ao material da peça. Para ambos os ensaios, os valores de R_a medidos no rasgo pouco antes da fresa se destruir completamente, foram de $R_a = 0,79 \mu m$ (quando da 1ª vez) e $R_a = 0,58 \mu m$ (quando da repetição), que eram valores que já vinham ocorrendo anteriormente nestes ensaios.

Ainda analisando o gráfico “*Comportamento do Desgaste de Flanco para Fresas de Coronite em Diferentes Condições de Usinagem*” (FIG.5.9) para agora a 1ª condição de ensaio ($v_c = 172$ m/min; $v_f = 624$ mm/min; $a_p = 0,95$ mm; $f_z = 0,038$ mm), pode-se notar que o desgaste de flanco se apresenta em níveis muito baixos e consequentemente o comprimento usinado pela ferramenta nestas condições é bem maior, chegando a um total de 9680 mm).

As FIG. 5.10 e 5.11 mostram as fotografias das superfícies de folga das fresas de Coronite quando utilizadas sob a 1ª e 2ª condições respectivamente. Na FIG. 5.10 é possível observar que o desgaste de flanco de uma das arestas da fresa, após a usinagem de 99 rasgos (o equivalente a um comprimento usinado igual a 8712 mm) ainda continua pequeno, não comprometendo dessa forma o acabamento (R_a) da peça (que foi ao longo da vida em média igual a $0,93 \mu m$).

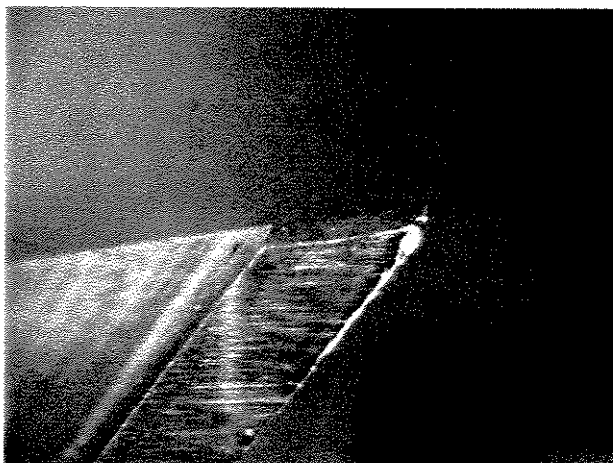


FIG.5.10 – Superfície de Folga de uma aresta da Fresa de Coronite com desgaste de flanco após usinagem de 99 rasgos ($L_f = 8712$ mm) - Condições: $v_c = 172$ m/min; $v_f = 624$ mm/min; $a_p = 0,95$ mm; $f_z = 0,038$ mm – Ampliação: 20x

Já na FIG.5.11 (onde foram usinadas apenas 55 rasgos - o equivalente a um comprimento usinado de ~ 5 m) o desgaste se apresenta visivelmente maior. Ao completar 57 rasgos a temperatura na interface peça-ferramenta se elevou de tal maneira que fez com que o material da fresa se deformasse plasticamente, fundindo-se ao material da peça, deixando dessa forma a aresta de corte totalmente inutilizada (FIG. 5.12).

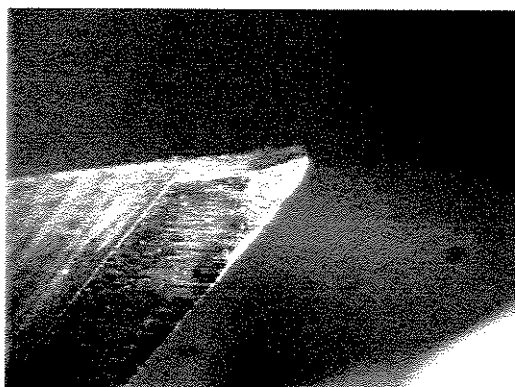


FIG.5.11 - Superfície de Folga de uma aresta da Fresa de Coronite com desgaste de Flanco após usinagem de 55 rasgos ($L_f = 4840$ mm) - Condições: $v_c = 215$ m/min; $v_f = 624$ mm/min; $a_p = 0,95$ mm; $f_z = 0,038$ mm – Ampliação: 16x

FIG.5.12 – Fresa de Coronite totalmente inutilizada após 57 rasgos usinados ($L_f = 5016$ mm)



5.2.1.3)- Comportamento do Sinal de Vibração em função do Comprimento de Avanço

<u>1ª Condição:</u>	<u>2ª Condição:</u>	<u>3ª Condição:</u>
$v_c = 172 \text{ m/min}$	215 m/min	215 m/min
$v_f = 624 \text{ mm/min}$	624 mm/min	780 mm/min
$f_z = 0,038 \text{ mm}$	$0,030 \text{ mm}$	$0,038 \text{ mm}$

Analisando-se os gráficos “*Comportamento do Sinal de Vibração para Fresas de Coronite em Diferentes Condições de Usinagem*” (FIG.5.13) e “*Comportamento da Rugosidade (R_a) para Fresas de Coronite em Diferentes Condições de Usinagem*” (FIG.5.5) percebe-se que, em geral, os picos de rugosidade não são acompanhados por picos de vibração.

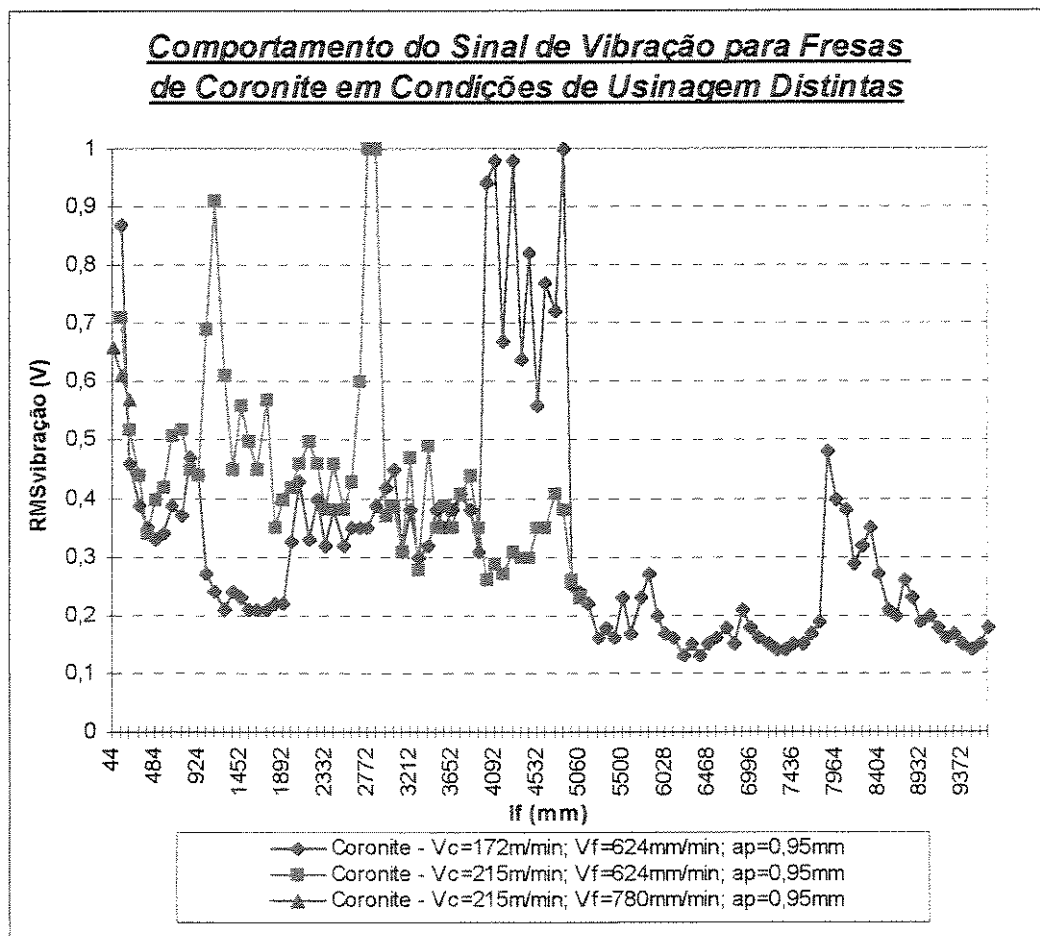


FIGURA5.13 - Comportamento do Sinal de Vibração para Fresas de Coronite em Diferentes Condições de Usinagem

Um exemplo disso pode ser mostrado no ensaio feito com a fresa de coronite sob as condições $v_c = 172$ m/min; $v_f = 624$ mm/min; $a_p = 0,95$ mm; $f_z = 0,038$ mm. Nota-se que na faixa de comprimento de avanço $L_f = 4972$ à 5764 mm, (o que corresponde a usinagem de 10 rasgos subsequentes, totalizando 66 rasgos no geral), o valor do RMS do sinal neste intervalo é baixo. Porém quando verifica-se os valores de R_a para o mesmo intervalo de comprimento de avanço, constata-se que os valores obtidos para R_a são altos. Analisando-se agora os valores de RMS e R_a para um intervalo de comprimento de avanço $L_f = 4004$ à 4796 mm, (ou seja, este novo intervalo equivale a usinagem dos 10 rasgos anteriores, totalizando 55 rasgos no geral), nota-se que há um comportamento inverso, ou seja, neste intervalo em questão o valor do RMS do sinal foi alto com valores de rugosidade (R_a) mais baixos.

Conclui-se então, que devido a esse comportamento um tanto quanto instável do RMS do sinal, algumas vezes o crescimento da rugosidade (R_a) é devido à vibração, outras vezes não.

Analizando-se ainda os gráficos “Comportamento do Sinal de Vibração para Fresas de Coronite em Diferentes Condições de Usinagem” (FIG.5.13) e “Comportamento do Desgaste de Flanco para Fresas de Coronite em Diferentes Condições de Usinagem” (FIG.5.9), percebe-se que o RMS do sinal de vibração não acompanhou também o desgaste de flanco (V_B).

Na faixa de comprimento de avanço (L_f) de 4000 à 4800 mm onde foram obtidos valores de RMS mais altos, para o ensaio de vida de coronite sob a 1ª condição, os valores obtidos para o desgaste de flanco nas três arestas da fresa, para a mesma faixa em questão apresentam-se bem baixos (vide Tabela 5.4)

TABELA 5.4 - Desgaste de Flanco das Três Arestas da Fresa de Coronite ao final de 55 rasgos
Condições: $v_c = 172$ m/min; $v_f = 624$ mm/min; $f_z = 0,038$ mm; $a_p = 0,95$ mm

Aresta:	V_B (mm):	V_B (mm):
1ª	0,098 - 0,094 - 0,094	0,095
2ª	0,049 - 0,054 - 0,049	0,050
3ª	0,072 - 0,076 - 0,076	0,075

Uma outra conclusão a que pode se chegar é que o sinal de vibração não detecta a queima da ferramenta antes dela ocorrer. Nos dois ensaios onde houve a queima da ferramenta (ensaios de vida com fresas de coronite sob a 2ª e 3ª condições de usinagem) os valores adquiridos para o RMS foram baixos, sendo que, no ensaio de vida sob a 2ª condição, minutos antes da fresa se deteriorar, o valor adquirido para o RMS foi o mais baixo durante todo o ensaio (para $L_f = 5060$ mm – $RMS_{vibração} = 0,23$ V), embora os valores de desgaste de flanco para este ensaio já se apresentassem bem maiores do que para o ensaio feito sob a 1ª condição.

Mesmo com estes resultados não se pode descartar de imediato a utilização dos sinais de vibração para monitoramento do desgaste e vida da fresa. Uma análise dos sinais no domínio da frequência deveria ser realizada para se verificar a existência de alguma faixa de frequências onde o crescimento da amplitude acompanha o crescimento do desgaste da ferramenta.

5.2.2)- Fresa de Metal Duro

5.2.2.1)- Análise da Influência da Velocidade de Corte (v_c), da Velocidade de Avanço (v_f) e do Avanço por dente (f_z) na Rugosidade (R_a) da peça:

<u>1ª Condição:</u>	<u>2ª Condição:</u>	<u>3ª Condição:</u>
$v_c = 240 \text{ m/min}$	300 m/min	300 m/min
$v_f = 870 \text{ mm/min}$	870 mm/min	1090 mm/min
$f_z = 0,038 \text{ mm}$	$0,030 \text{ mm}$	$0,038 \text{ mm}$

Analisando-se o gráfico “*Comportamento da Rugosidade (R_a) para Fresas de Metal Duro em Diferentes Condições de Usinagem*” (FIG.5.14), quando compara-se a 1ª condição com a 2ª condição, percebe-se que os valores obtidos para a rugosidade (R_a) para a 2ª condição ($v_c=300 \text{ m/min}$; $v_f= 870 \text{ mm/min}$; $f_z= 0,030 \text{ mm}$), no geral, são menores do que os obtidos para a 1ª condição. Observando o gráfico constata-se também que, os valores de R_a obtidos para a 2ª condição inicialmente ($L_f= 484\text{mm} - R_a= 1,17 \mu\text{m}$ e $L_f= 924\text{mm} - R_a= 1,44 \mu\text{m}$), são maiores do que os obtidos para a 1ª condição. Entretanto depois de um comprimento de avanço de aproximadamente 2860 mm, esses valores voltam a ser menores do que os obtidos para a 1ª condição, confirmando em parte o comportamento esperado de acordo com a teoria, que afirma que a medida que o avanço por dente diminui a rugosidade também deve diminuir.

Comparando-se agora a 1ª condição com a 3ª condição, onde houve um aumento tanto da v_c quanto da v_f (mantendo-se porém o f_z igual para as duas condições), constata-se que para a 1ª condição, que possuía $v_c=240\text{m/min}$ menor que a 3ª condição ($v_c=300 \text{ m/min}$), obteve-se inicialmente um valor de R_a igual a $1,40 \mu\text{m}$, valor este superior ao R_a obtido para a 3ª condição ($R_a= 0,73 \mu\text{m}$). Isso provavelmente ocorreu devido ao fato de que quando se aumenta a velocidade de corte, a tendência deste fator é diminuir a pressão específica de corte (K_m), diminuindo assim a deformação do cavaco que facilitará o corte. Além disso, o aumento tanto da v_c quanto da v_f faz com que o corte se torne mais dinâmico com conseqüente diminuição do coeficiente de atrito entre a ferramenta e a peça, melhorando dessa forma a rugosidade. Este resultado concorda com o que já foi citado anteriormente.

Comportamento da Rugosidade Superficial de Fresas de Metal Duro em Condições de Usinagem Distintas

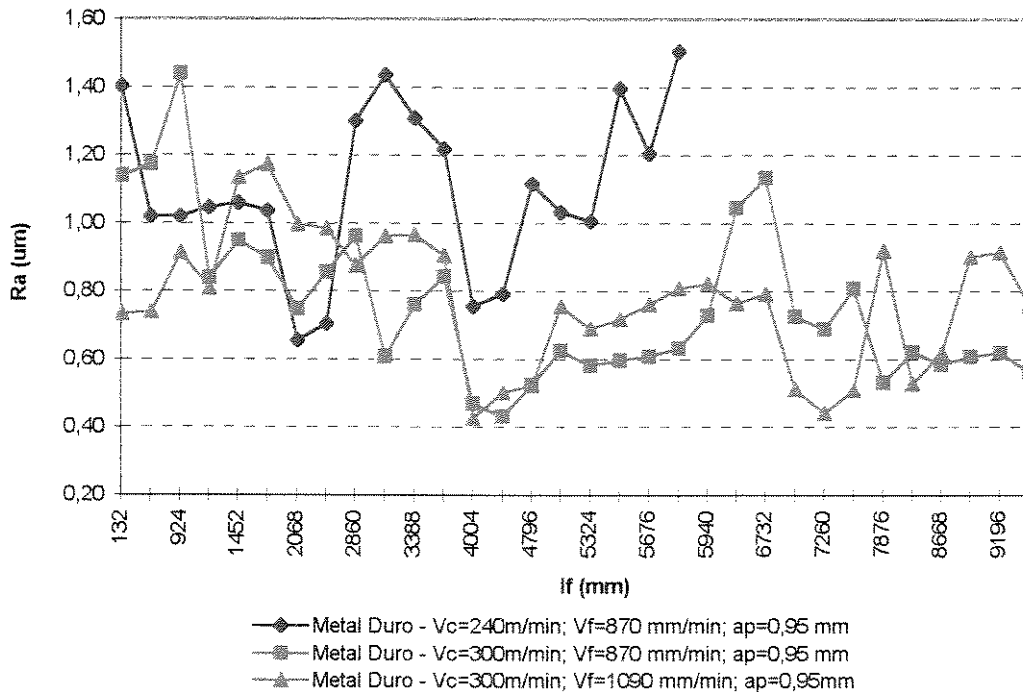


FIGURA 5.14 - Comportamento da Rugosidade (Ra) para Fresas de Metal Duro em Diferentes Condições de Usinagem

Um fato digno de nota na FIG.5.14 é o comportamento instável da rugosidade a medida que o comprimento de avanço cresce, confirmando o que já foi citado anteriormente, isto é, a rugosidade é muito sensível a fenômenos que ocorrem na ferramenta e na peça e que são imperceptíveis a um observador.

Comparando-se a 1ª condição com ela mesma, ou seja com seus ensaios de repetitividade, nota-se no gráfico “Comportamento da Rugosidade (Ra) para Fresas de Metal Duro – Ensaios de Repetitividade” (FIG.5.15), que o comportamento da rugosidade (Ra) em função do comprimento de avanço (Lf) é totalmente aleatório. Nota-se que há uma grande variação de Ra dentro do próprio ensaio. Um exemplo disso pode ser mostrado para um comprimento de avanço igual a 3036 mm, onde os valores obtidos para Ra são iguais a $1,44\mu\text{m}$, $0,89\mu\text{m}$ e $0,65\mu\text{m}$ quando feitos pela 1ª vez, na 1ª repetição e na 2ª repetição respectivamente. Observa-se ainda, analisando-se o gráfico “Comportamento do Desgaste de Flanco para Fresas de Metal Duro – Ensaios de

Repetitividade“ (FIG.5.16), que o comportamento da rugosidade não é diretamente relacionado com o desgaste de flanco da aresta principal de corte.

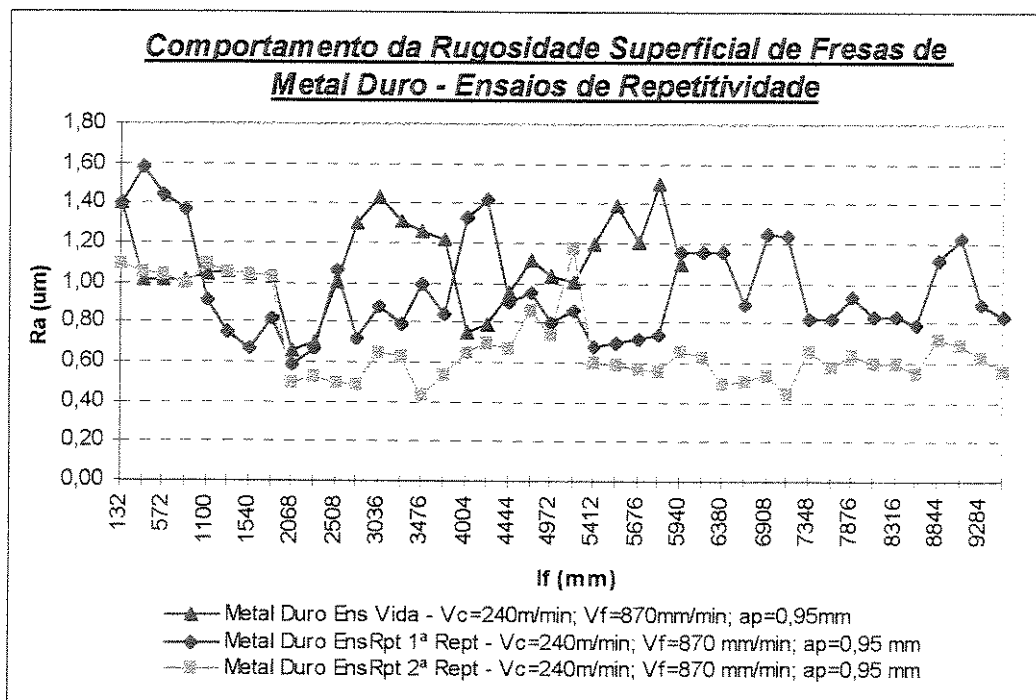


FIGURA 5.15 - Comportamento da Rugosidade (Ra) para Fresas de Metal Duro Ensaios de Repetitividade

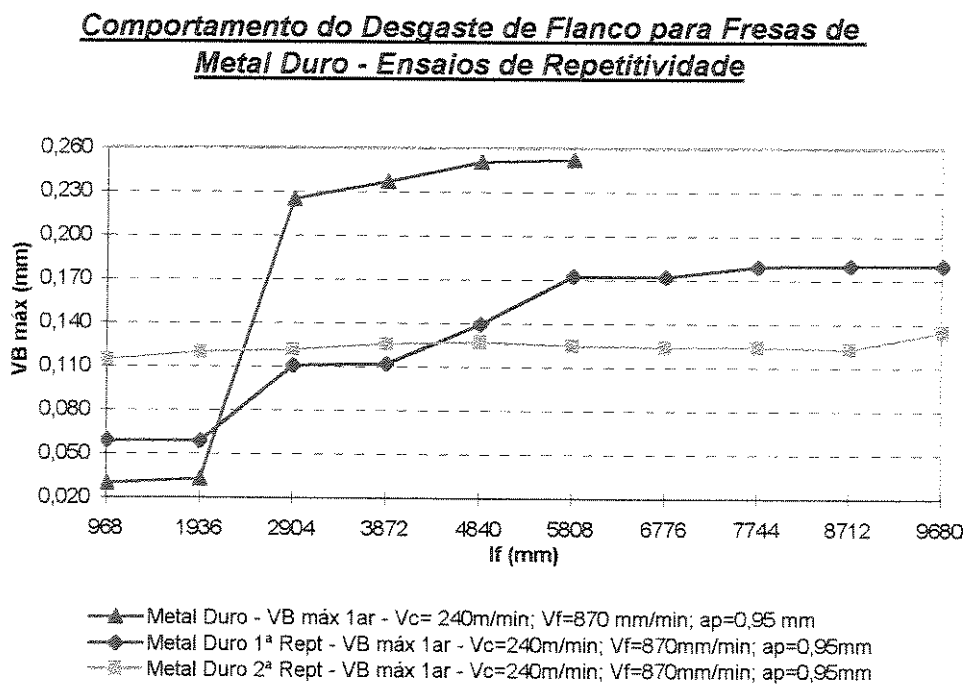


FIGURA 5.16 - Comportamento do Desgaste de Flanco para Fresas de Metal Duro Ensaios de Repetitividade

Analizando-se agora a 2ª condição com a 3ª condição (FIG. 5.14) onde foi mantida a velocidade de corte e variou-se a velocidade de avanço (variando-se dessa forma o avanço/dente) e consequentemente aumentando-se o volume de cavaco removido na unidade do tempo, constata-se inicialmente que os valores de Ra obtidos para a 2ª condição são maiores ($Ra = 1,14\mu m$) do que os obtidos para a 3ª condição ($Ra = 0,73\mu m$).

Teoricamente isso não poderia ocorrer, já que quando passa-se da 2ª condição para a 3ª condição, aumenta-se o f_z e consequentemente a rugosidade (Ra) também deveria aumentar. Entretanto o que se percebe durante os ensaios (tanto para a 2ª condição quanto para a 3ª condição), é que os valores de Ra se alternam (ora são obtidos mais altos, ora mais baixos para ambas as condições). Sendo assim, não é possível afirmar que o aumento do f_z influi diretamente na rugosidade (Ra) da peça.

Fazendo-se agora uma análise estatística tanto para a 2ª condição quanto para a 3ª condição, obtém-se valores médios de rugosidade (ao longo da vida) igual a $Ra = 0,772\mu m$ (com desvio padrão igual a 0,238) e $Ra = 0,780\mu m$ (com desvio padrão igual a 0,201) respectivamente. Percebe-se então que, mesmo com o aumento de f_z (quando passa-se da 2ª para a 3ª condição), os valores médios de rugosidade para ambos os casos não se alteram. Entretanto, houve sim uma alteração na taxa de volume de cavaco removido na unidade do tempo (esta aumentou em aproximadamente 25% quando se passou da 2ª para a 3ª condição, para valores médios de rugosidade quase que idênticos).

5.2.2.2)- Análise da Influência da Velocidade de Corte (v_c), da Velocidade de Avanço (v_f) e do Avanço por dente (f_z) no Desgaste e na Vida da Ferramenta:

Analizando-se o gráfico “*Comportamento do Desgaste de Flanco para Fresas de Metal Duro – Ensaios de Repetitividade*” (FIG.5.16) para a 1ª condição e suas repetições ($v_c=240m/min$; $v_f=870mm/min$; $f_z=0,038mm$; $a_p=0,95mm$), constata-se que há entre esses mesmos ensaios, uma grande de variação do desgaste de flanco (V_B) assim como também há uma diferença entre o comprimento total usinado. Quando feito pela 1ª vez a vida da ferramenta foi de 20,0 minutos (veja FIG.5.17 - “*Comprimento Total Usinado para Fresas de Metal Duro em uma Única Condição de Usinagem – Ensaios de Repetitividade*”), o que corresponde a um comprimento usinado de 5808 mm , pois o

critério de fim de vida adotado ($Ra > 1,25 \mu m$) foi alcançado. Quando o ensaio foi repetido pela 1ª e 2ª vez não foi possível estimar a vida da ferramenta para ambas as repetições, pois nenhum dos dois critérios estabelecidos para o fim de vida da ferramenta (que eram $Ra > 1,25 \mu m$ e $V_B > 0,40 mm$) foram atingidos. Sendo assim, para ambas as repetições os ensaios tiveram que ser interrompidos quando se atingiu um total de 10 peças usinadas (o equivalente a um comprimento usinado de 9680 mm).

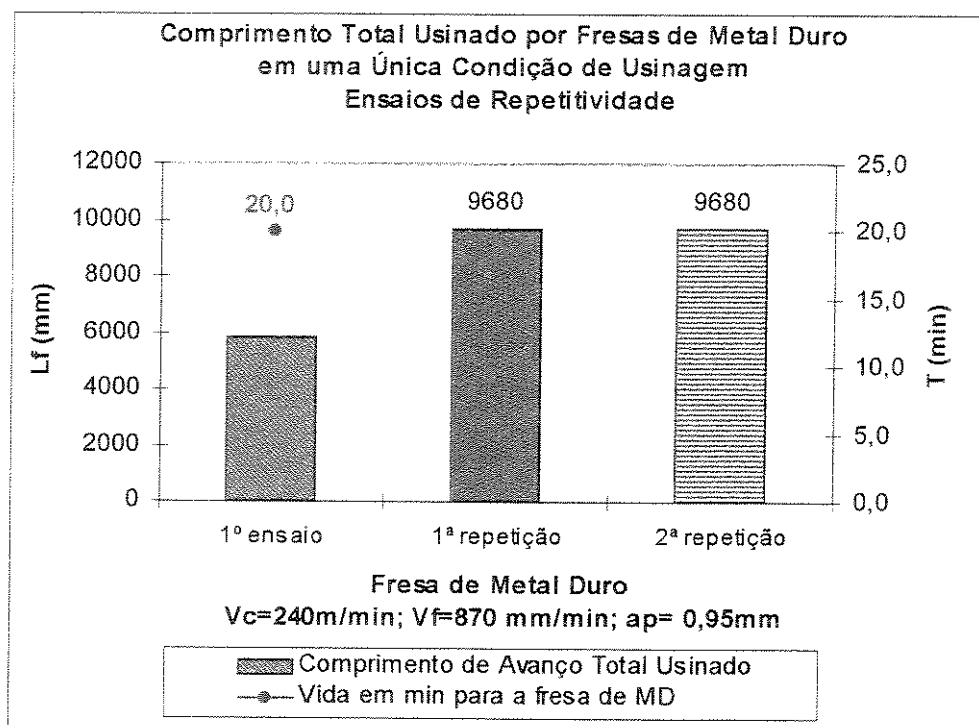


FIGURA 5.17 - Comprimento Total Usinado para Fresas de Metal Duro em uma Única Condição de Usinagem –Ensaio de Repetitividade

Entretanto, quando é feita a análise do desgaste de flanco para esses mesmos ensaios, nota-se uma variação grande dos valores obtidos entre eles (FIG.5.16). Quando feito pela 1ª vez, o valor inicial obtido para o desgaste de flanco foi de 0,030 mm e o final foi de 0,252 mm (variação de 88%). Quando da 1ª repetição os valores encontrados para V_B foram inicialmente de 0,059 mm, chegando à 0,180 mm (variação de 67%). Quando da 2ª repetição os valores encontrados para V_B permaneceram quase sem alteração nenhuma (variação de 14%). Para a comparação dos resultados obtidos nesta condição de usinagem com as demais, serão utilizados os valores obtidos na 1ª repetição, já que foi neste ensaio que se obteve valores intermediários de V_B ao fim da vida da ferramenta.

Analisando-se agora a Tabela 5.5 e a FIG.5.18 “Desgaste de Flanco Máximo para $L_f = 9680$ mm de Fresas de Metal Duro em Condições de Usinagem Distintas” é possível observar que o desgaste de flanco cresceu em aproximadamente 13,7% quando aumentou-se a velocidade de avanço em cerca de 25%. Já quando se aumentou a velocidade de corte em 25% o crescimento do desgaste foi muito pequeno. O resultado encontrado contraria a literatura (DINIZ, 1997) e (FERRARESI, 1977) que afirma que este tipo de desgaste é mais incentivado pelo aumento da velocidade de corte. Porém, dada a ordem de grandeza das variações de V_B e dada a imprecisão de medição do desgaste, pode-se afirmar que nem v_c , nem v_f influenciaram fortemente o desgaste da ferramenta, pelo menos nesta faixa de variação de v_c e v_f pesquisadas.

TABELA 5.5 - Desgaste de Flanco de Fresas de MD ao final de 110 rasgos usinados para Diferentes v_c e v_f :

f_z (mm):	v_f (mm/min):	v_c (m/min):	L_f (mm):	V_B ao final de 110 rasgos (mm):
0,038	870	240	9680	$V_{B\text{máx}}$ 1ª aresta = 0,18
0,030	870	300	9680	$V_{B\text{máx}}$ 1ª aresta = 0,19
0,030	870	300	9680	$V_{B\text{máx}}$ 1ª aresta = 0,19
0,038	1090	300	9680	$V_{B\text{máx}}$ 1ª aresta = 0,22

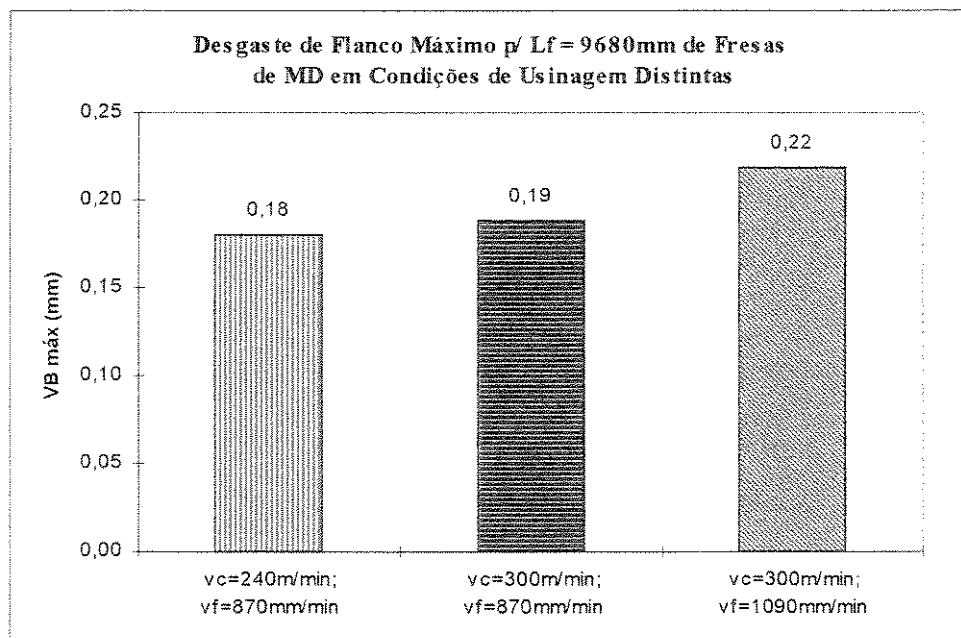


FIGURA 5.18 - Desgaste de Flanco Máximo para $L_f = 9680$ mm de Fresas de Metal Duro em Condições de Usinagem Distintas

Um fato interessante observado durante os ensaios onde a v_f foi mantida constante e a v_c variada, ou seja, quando passa-se da 1ª para a 2ª condição, foi que inicialmente (na usinagem dos primeiros 44 rasgos – $L_f = 3872$ mm) o desgaste de flanco quase que não existe, ou seja, a fresa apresentou apenas uma mancha preta na aresta de corte, como se a ferramenta estivesse queimada. A partir de 55 rasgos usinados, o desgaste de flanco já começa aparecer com valores em torno de 0,100 mm e vai crescendo gradualmente (FIG.5.19).

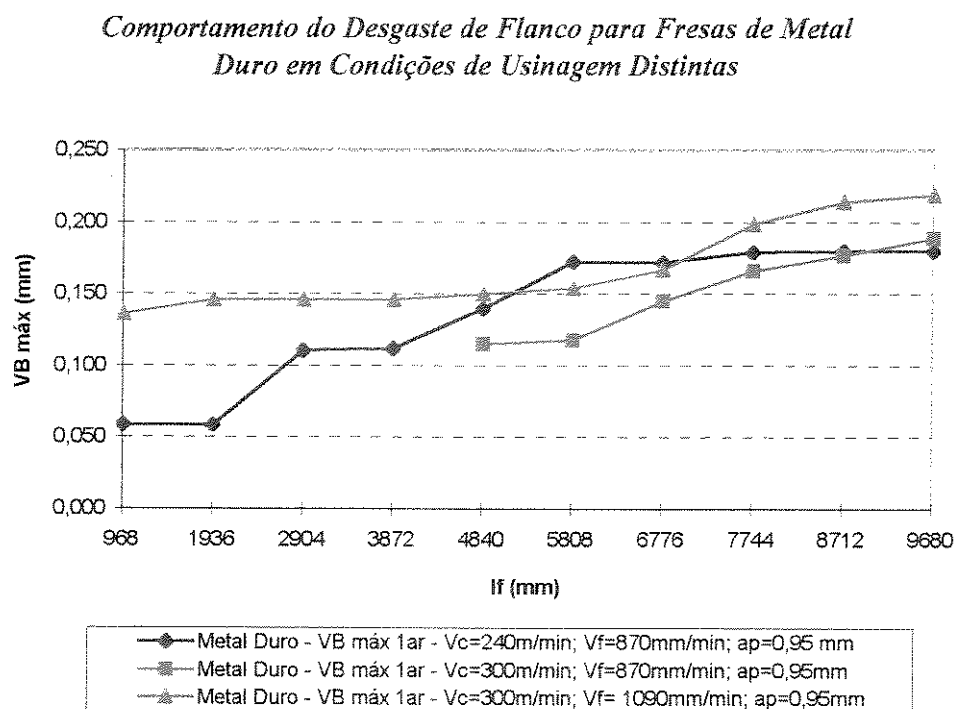


FIGURA 5.19 - Comportamento do Desgaste de Flanco para Fresas de Metal Duro em Condições de Usinagem Distintas

Já quando se aumenta a v_f e mantém-se a v_c , ou seja, quando passa-se da 2ª para a 3ª condição, o desgaste de flanco (com apenas 11 rasgos usinados – $L_f = 968$ mm) já é perceptível e um pouco maior que 0,140 mm. Seu crescimento é quase que constante, e ao final de 110 rasgos usinados ($L_f = 9680$ mm) seu valor é maior do que o valor obtido para o desgaste nas outras condições.

Durante os ensaios de vida para as fresas de metal duro sob as três diferentes condições de usinagem utilizadas, foi possível notar que ao final da cada ensaio, ou, seja,

ao final de aproximadamente 10m de comprimento usinado, o desgaste de flanco nas três arestas de corte de cada fresa em cada condição de usinagem, estavam bem próximos, ou seja, o desgaste de flanco nas três arestas de corte apresentaram-se de maneira bem similar e uniforme. Um exemplo disso pode ser visto nas tabelas 5.6 e 5.7:

TABELA 5.6 - Desgaste de Flanco das Três Arestas da Fresa de MD ao final de 110 Rasgos
Condições: $v_c=240$ m/min; $v_f=870$ mm/min; $a_p=0,95$ mm

Aresta:	V_B (mm):	V_B (mm):
1ª	0,188 - 0,174 - 0,178	0,180
2ª	0,187 - 0,173 - 0,181	0,180
3ª	0,209 - 0,181 - 0,194	0,195

TABELA 5.7 - Desgaste de Flanco das Três Arestas da Fresa de MD ao final de 110 Rasgos
Condições: $v_c=300$ m/min; $v_f=1090$ mm/min; $a_p=0,95$ mm

Aresta:	V_B (mm):	V_B (mm):
1ª	0,217 - 0,218 - 0,223	0,219
2ª	0,210 - 0,204 - 0,204	0,206
3ª	0,210 - 0,206 - 0,209	0,208

Outro fato interessante observado durante os ensaios de vida para as fresas de metal duro, é que estas são bem mais resistentes para uma velocidade de corte de 300 m/min (aproximadamente rotação do fuso igual a 9550 rpm). Esta velocidade rotacional pode ser considerada alta para a maioria das máquinas convencionais existentes ainda hoje em muitas indústrias brasileiras (sendo superior ao que essas máquinas conseguem suportar) e mesmo assim o desgaste de flanco ainda é baixo ($V_B=0,19$ mm para $v_c=300$ m/min com $v_f=870$ mm/min e $V_B=0,22$ mm para $v_c=300$ m/min com $v_f=1090$ mm/min) (FIG.5.19). Constata-se que, em ambos os casos o comprimento total usinado chega a quase 10 m e mesmo assim tanto V_B quanto R_a são baixos, se comparados a valores adotados por diversos autores ($V_B=0,80$ mm à 1,50 mm) para estabelecer critérios de fim de vida para as ferramentas.

5.2.2.3)- Comportamento do Sinal de Vibração em função do Comprimento de Avanço:

<u>1ª Condição:</u>	<u>2ª Condição:</u>	<u>3ª Condição:</u>
$v_c = 240 \text{ m/min}$	300 m/min	300 m/min
$v_f = 870 \text{ mm/min}$	870 mm/min	1090 mm/min
$f_z = 0,038 \text{ mm}$	$0,030 \text{ mm}$	$0,038 \text{ mm}$

Analisando-se em conjunto os gráficos “*Comportamento da Rugosidade Superficial para Fresas de Metal Duro em Diferentes Condições de Usinagem*” (FIG.5.14) e “*Comportamento do Sinal de Vibração para Fresas de Metal Duro em Diferentes Condições de Usinagem*” (FIG.5.20) para a 1ª condição, é possível perceber que alguns picos de rugosidade são acompanhados geralmente por picos de vibração. Exemplos disto são mostrados na Tabela 5.8:

Comportamento do Sinal de Vibração para Fresas de Metal Duro em Condições de Usinagem Distintas

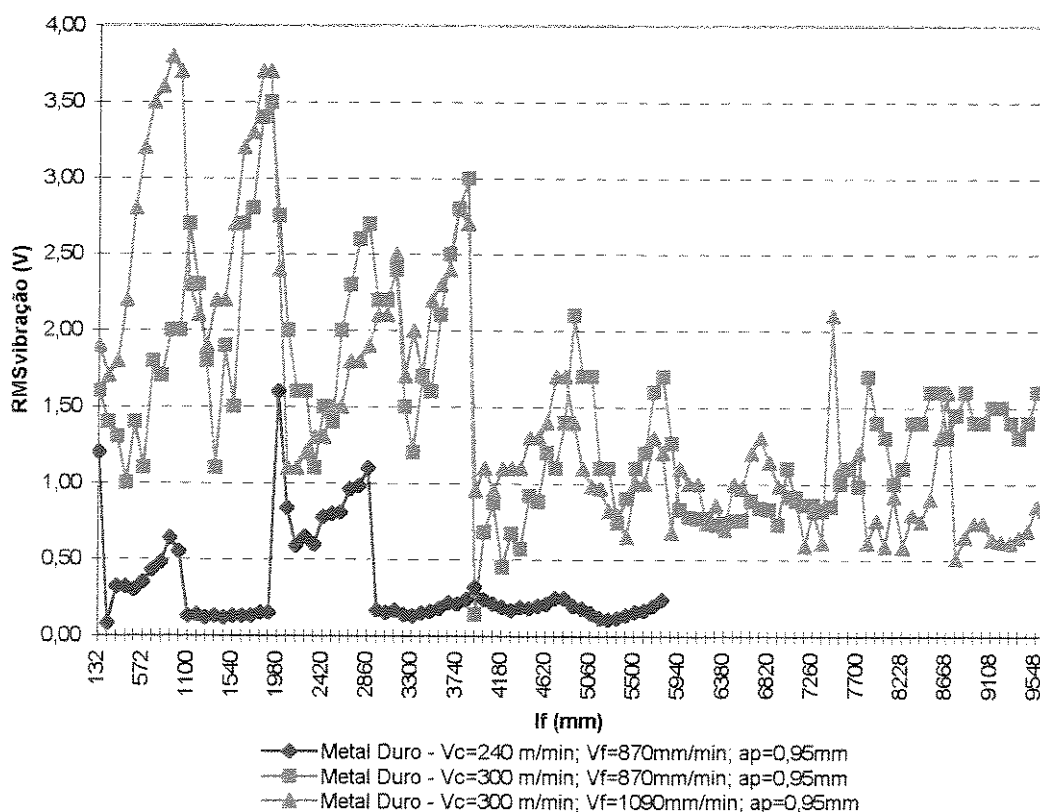


FIGURA 5.20 - Comportamento do Sinal de Vibração para Fresas de Metal Duro em Condições de Usinagem Distintas

TABELA 5.8 - Rugosidade Superficial e RMS do sinal da Fresa de Metal Duro para Diferentes Lf
Condições: $v_c=240$ m/min; $v_f= 870$ mm/min; $f_z= 0,038$ mm; $a_p= 0,95$ mm

Lf (mm):	Ra (μ m):	RMSvibr(Volts)
132	1,40	1,20
2860	1,30	1,10

Porém isto não é válido durante todo o ensaio. Existem certos momentos onde o contrário acontece, ou seja, nem sempre picos de rugosidade correspondem aos picos de vibração. Um exemplo contrário (durante o mesmo ensaio) pode ser visto na tabela 5.9, onde se tem valores altos de Ra e baixos de RMS da vibração.

TABELA 5.9 - Rugosidade Superficial e RMS do sinal da Fresa de Metal Duro para Diferentes Lf
Condições: $v_c=240$ m/min; $v_f= 870$ mm/min; $f_z= 0,038$ mm; $a_p= 0,95$ mm

Lf (mm):	Ra (μ m):	RMSvibr(Volts)
3036	1,44	0,15
5588	1,40	0,17

Outro fato interessante para este mesmo ensaio (1ª condição - $v_c= 240$ m/min; $v_f= 870$ mm/min; $a_p= 0,95$ mm) pode ser observado quando analisam-se em conjunto os gráficos “*Comportamento do Desgaste de Flanco para Fresas de Metal Duro - Ensaios de Repetitividade*” (FIG.5.16 - curva rosa) e “*Comportamento do Sinal de Vibração para Fresas de Metal Duro em Diferentes Condições de Usinagem*” (FIG.5.20). Pode-se notar que ao final de 22 rasgos ($L_f= 1936$ mm) o valor encontrado para V_B em uma das arestas é igual a 0,033mm. Analisando-se agora o gráfico “*Comportamento do Sinal de Vibração para Fresas de Metal Duro em Diferentes Condições de Usinagem*” (FIG.5.20) para o intervalo de $L_f= 1100$ à 1892 mm (que corresponde a usinagem do 13º canal ao 22º canal) os valores adquiridos para o RMS são baixos. Entretanto ao final de 33 rasgos ($L_f=2904$ mm) o desgaste de flanco cresce significativamente (FIG.5.16 - curva rosa), (aproximadamente 85% - $V_{B\ 33\ \text{rasgos}} = 0,225$ mm). Quando então analisa-se agora o intervalo de $L_f= 1980$ mm à 2860 mm (que corresponde aos 11 rasgos subsequentes totalizando 33 rasgos no geral), percebe-se que houve um aumento também significativo nos valores adquiridos para o sinal do RMS.

Uma possível explicação para o fato acima observado, reside no fato de que com o crescimento significativo do desgaste de flanco (aproximadamente 85%) em somente uma das arestas de corte houve uma variação nos esforços de corte de cada aresta, que fez com que a vibração também variasse, gerando assim valores mais altos para o RMS do sinal adquirido naquele período de tempo. A partir de um comprimento de avanço igual a 2948 mm os valores para o desgaste de flanco das arestas se tornaram bem próximos e não cresceram tanto, fazendo assim com que a vibração caísse.

Comparando-se agora a 1ª condição com a 2ª condição (FIG.5.20), onde foi mantida a v_f e aumentou-se a v_c , diminuindo assim o f_z , pode-se notar que os valores de RMS do sinal de vibração para a 2ª condição são bem superiores aos da 1ª condição. Sabe-se que quando aumenta-se a velocidade de corte, esta tende a diminuir a pressão específica de corte ($\uparrow v_c \Rightarrow \downarrow K_m$). Porém ao se aumentar a v_c (sem alterar a v_f) indiretamente está se diminuindo o avanço/dente. Consequentemente com a diminuição do f_z a tendência é o aumento de K_m ($\downarrow f_z \Rightarrow \uparrow K_m$). Percebe-se então que, ambos os fatores (tanto v_c quanto f_z) tem influência opostas sobre a pressão específica de corte. Desta forma, esta influência oposta deveria anular a ação sobre a força de corte (anulando também indiretamente a influência sobre a vibração) e também sobre a potência de corte, que deveria ser constante. Porém neste caso não foi isto que aconteceu. Prevaleceu uma maior influência do avanço/dente (f_z) sobre a pressão específica de corte (K_m) (ao invés da v_c), gerando assim forças de corte maiores, e com isso, sinais de vibração maiores foram adquiridos.

Comparando-se a 1ª condição com a 3ª condição (FIG.5.20), onde há um aumento tanto da v_c quanto da v_f (sem entretanto alterar o f_z), pode-se notar que os valores de RMS do sinal de vibração para a 3ª condição são bem superiores aos da 1ª condição, como era de se esperar. Sabe-se que quando aumenta-se a velocidade de corte (v_c), esta tende a diminuir a pressão específica de corte (K_m) ($\uparrow v_c \Rightarrow \downarrow K_m$). Porém ao se aumentar a v_f (sem alterar o valor do avanço/dente - f_z , mantendo-se o mesmo igual para a 1ª condição) o que está se alterando é o volume de cavaco removido na unidade de tempo, ou seja, há um maior volume de cavaco sendo removido, sendo necessário assim

um aumento na força de corte (F_c) para remover essa maior quantidade de material, aumentando também a potência de corte (P_c) necessária ao processo, e consequentemente aumentando a vibração.

Assim tem-se:

$$\text{Para } f_z \text{ cte e com } \begin{cases} \uparrow v_c \Rightarrow \downarrow K_m \\ \uparrow v_f \Rightarrow \uparrow f \Rightarrow \uparrow \text{Volume} \end{cases}$$

$$\text{Porém: } P_c = K_m * f * a_p \Rightarrow \uparrow F_c \Rightarrow \uparrow \text{Vibração}$$

onde: P_c = potência de corte ; F_c = força de corte

K_m = pressão específica de corte média ; f = avanço por volta

Analisando-se ainda os gráficos “Comportamento do Desgaste de Flanco para Fresas de Metal Duro em Diferentes Condições de Usinagem” (FIG.5.19) e “Comportamento do Sinal de Vibração para Fresas de Metal Duro em Diferentes Condições de Usinagem” (FIG.5.20) percebe-se que o RMS do sinal de vibração não acompanhou o crescimento do desgaste de flanco para as 2ª e 3ª condições. Na faixa de comprimento de avanço (L_f) de 132 mm à 3828 mm onde foram obtidos valores de RMS mais altos para ambas as condições, os respectivos valores de V_B mantiveram-se mais baixos e às vezes imperceptíveis (como é o caso da 2ª condição).

Entretanto o que mais chama a atenção numa análise mais detalhada da FIG.5.20 é a grande variação do RMS do sinal de vibração, principalmente para as curvas relativas às 2ª e 3ª condições. Acredita-se que parte dessa aleatoriedade é devida à fenômenos pertencentes ao processo de usinagem, como desgaste desigual das arestas e falta de rigidez da ferramenta, mas com certeza, parte dessa variação da vibração está ligada à fenômenos relativos à máquina ferramenta e/ou ao dispositivo de fixação da peça.

Também neste caso, deve-se proceder a uma análise do sinal de vibração no domínio da frequência para se verificar a existência de alguma faixa de frequências que acompanha o crescimento do desgaste da ferramenta e, assim, verificar se o sinal de vibração pode ser utilizado para o estabelecimento do fim de vida da ferramenta.

5.2.3)- Conclusões sobre o estudo Comparativo de Fresas de Metal Duro com Fresas de Coronite

Não foi possível utilizar as mesmas condições de usinagem para as duas ferramentas porque os ensaios de vida preliminares mostraram que se condições similares às que foram usadas para a fresa de Coronite fossem usadas para a fresa de Metal Duro, as vidas destas ferramentas seriam muito altas e os ensaios muito demorados, e que se as condições usadas para a fresa de Metal Duro fossem utilizadas para a fresa de Coronite, as vidas destas ferramentas seriam muito curtas.

Sendo assim, conclui-se que fresas de Metal Duro com este diâmetro (10 mm) devem ser usadas quando se tem máquinas com possibilidade de alta rotação (velocidade de corte da ordem de 300 m/min ou maiores) e fresas de Coronite (também com esse mesmo diâmetro) devem ser utilizadas quando se tem máquinas com rotações mais baixas (velocidades de corte entre 150 e 200 m/min), em substituição às atuais fresas de aço rápido e aço rápido com cobertura.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas todas as conclusões que foram possíveis de se detectar a partir do estudo efetuado neste trabalho. A partir destas conclusões são sugeridos alguns temas para que futuros trabalhos possam ser desenvolvidos a fim de se completar as informações aqui obtidas.

6.1)- Conclusões

Para condições similares às testadas na 1ª parte deste trabalho, pode-se concluir que:

- Em geral, a rugosidade (R_a) cresce com o aumento do avanço/dente (f_z)
- Com relação a profundidade de usinagem (a_p), o comportamento da rugosidade (R_a) é aleatório, não se conseguindo detectar uma relação que possa ser generalizada.
- A velocidade de corte (v_c) se mostrou um parâmetro importante para a rugosidade (R_a). Sempre que se tinha altos avanços/dente (f_z) devido à pequenos valores de velocidades de corte (v_c) foram obtidas maiores rugosidades (R_a), do que quando se tinha os mesmos avanços/dente (f_z) altos devido agora ao aumento das velocidades de avanço (v_f).
- O material da ferramenta também não mostrou uma influência marcante na rugosidade (R_a). Entretanto, cabe aqui salientar que, para pequenos valores de avanço/dente (f_z), a maior agudeza das arestas de *Coronite* proporcionaram, em geral, melhores acabamentos no material.

Para condições similares às testadas na 2ª parte deste trabalho, pode-se concluir que:

- Para a fresa de *Coronite*, tanto a variação da velocidade de corte (v_c) quanto à variação da velocidade de avanço (v_f) tem uma forte influência no desgaste e vida da ferramenta.
- Constatou-se também que, para essas mesmas fresas, o valor do desgaste de flanco não precisa ser alto para que a ferramenta possa se deteriorar, além do que, segundos antes da fresa se fundir junto ao material da peça, tanto o valor da rugosidade (R_a) encontrado, quanto o valor do RMS do sinal de vibração adquirido permaneceram baixos, não dando qualquer indício de que a fresa estaria prestes a se deteriorar.
- Fresas de *Coronite* trabalhando com velocidades de corte (v_c) em torno de 180 m/min, apresentam níveis de desgaste de flanco muito baixos e são bem resistentes a essa velocidade, chegando a usinar quase 10 m de comprimento.
- Para a fresa de *Metal Duro*, pode-se concluir que nem a velocidade de corte (v_c) nem a velocidade de avanço (v_f) influenciaram fortemente o desgaste da ferramenta (pelo menos para a faixa de v_c e v_f pesquisadas), dada a ordem de grandeza das variações de desgaste de flanco (V_B) encontradas.
- Ao final de aproximadamente 10 m de comprimento usinados, o desgaste de flanco (V_B) encontrado nas três arestas de corte de cada fresa de *Metal Duro*, utilizada sob suas respectivas condições de usinagem, tiveram seus valores bem próximos, ou seja, o desgaste de flanco (V_B) se deu de maneira uniforme nas três arestas de cada fresa de *Metal Duro* utilizadas, comportamento esse que não foi observado para as fresas de *Coronite*, onde o desgaste das arestas não ocorreu de maneira igual e uniforme.
- Fresas de *Metal Duro* trabalhando com velocidades de corte (v_c) em torno de 300 m/min, apresentam níveis de desgaste de flanco muito baixos e mostraram ser bem resistentes a essa velocidade, chegando a usinar quase 10 m de comprimento.
- Em quase todos os casos (para ambas as fresas), houve bastante aleatoriedade no comportamento da rugosidade (R_a), bem como no comportamento do RMS do sinal de vibração, ao longo da vida da ferramenta. Percebeu-se que, na maioria das vezes os picos

de rugosidade (R_a) não eram acompanhados por picos de vibração. Concluiu-se então que, devido à esse comportamento um tanto quanto instável do RMS do sinal de vibração, algumas vezes o crescimento da rugosidade (R_a) era devido à vibração, outras vezes não. Logo, tentar estabelecer um padrão de comportamento da rugosidade é uma tarefa muito difícil. Acredita-se também que, parte desta aleatoriedade do RMS do sinal de vibração esteja ligada à fenômenos relativos à máquina-ferramenta e/ou ao dispositivo de fixação da peça.

- Para ambas as fresas (*Metal Duro e Coronite*), percebeu-se que, em geral, o RMS do sinal de vibração não acompanhou o crescimento do desgaste de flanco (V_B). Sendo assim, para afirmar com certeza que o sinal de vibração pode ser utilizado para o estabelecimento do fim de vida da ferramenta, é necessário fazer uma análise do sinal de vibração no domínio da frequência.
- Fresas de *Metal Duro* com diâmetro igual a 10 mm, devem ser usadas quando se tem máquinas com possibilidade de altas rotações (velocidades de corte em torno de 300 m/min ou maiores).
- Fresas de *Coronite*, também com diâmetro igual a 10 mm, devem ser usadas quando se tem máquinas com rotações mais baixas (velocidades de corte de 150 à 200 m/min) em substituição às atuais fresas de aço rápido e aço rápido com cobertura.

6.2)- Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros e para continuação deste trabalho, os seguintes temas podem ser estudados:

- Verificar se o sinal de vibração pode ser utilizado para o estabelecimento do fim de vida de fresas de topo, procedendo-se para isso a uma análise destes sinais no domínio da frequência e no domínio do tempo/frequência (wavelets).

- Estudar e monitorar o comportamento de fresas de CBN no fresamento de aços endurecidos.
- Utilizar outros sistemas de monitoramento, como por exemplo emissão acústica e potência elétrica do motor, para monitorar os sinais obtidos no processo de fresamento.
- Estudar e monitorar o processo de fresamento de topo, utilizando-se para isso fresas de Metal Duro com velocidades de corte e velocidades de avanço mais altas do que as testadas neste trabalho, a fim de se entender como se comporta o desgaste da ferramenta e a qualidade superficial da peça usinada.

Referências Bibliográficas

- AGOSTINHO, O. L. , RODRIGUES, A. C., LIRANI, J. PRINCÍPIOS DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO MECÂNICA – PROCESSOS DE FABRICAÇÃO. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – EESC-USP, 1981, v.2, p.141- 180.
- BHATIA, S.M., PANDEY, P.C. , SHAN, H.S. THE THERMAL CONDITION OF THE TOOL CUTTING EDGE IN INTERMITTENT CUTTING. Wear, v.61, p.21-30, 1980.
- BLUM, T. , INASAKI, I. A STUDY ON ACOUSTIC EMISSION FROM THE ORTHOGONAL CUTTING PROCESS. Journal of Engineering for Industry, v.112, p.203-211, August 1990.
- BONIFÁCIO, M. E. R. MONITORAMENTO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO DE ACABAMENTO VIA SINAIS DE VIBRAÇÃO. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP, 1993. 103 p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica)
- CALDERANI FILHO, J. ESTUDO E MONITORAMENTO DO PROCESSO DE FRESAMENTO FRONTAL COM FRESAS DE INSERTOS INTERCAMBIÁVEIS. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP, 1998. 149 p. (Tese, Doutorado em Engenharia Mecânica)
- COSTA, C.E. MONITORAMENTO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO DE DESBASTE VIA CORRENTE ELÉTRICA DO MOTOR PRINCIPAL DA MÁQUINA E VIA VIBRAÇÃO DA FERRAMENTA. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP, 1995. 108 p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica)
- DIEL, E.N. , DORNFELD, D.A . ACOUSTIC EMISSION FROM THE FACE MILLING PROCESS - THE EFFECTS OF PROCESS VARIABLES. Journal of Engineering for Industry, v.109, p.92-99, May 1987 A.
- DIEL, E.N. , DORNFELD, D.A . ACOUSTIC EMISSION SENSING OF TOOL WEAR IN FACE MILLING. Journal of Engineering for Industry, v.109, p.234 -240, August 1987 B.
- DIN 8589, Fertigungs - Verfahren - Fräsen. Teil 3. Berlin, Beuth Verlag, 1989.
- DINIZ, A . E. TÓPICOS EM USINAGEM DOS METAIS: MONITORAMENTO E CONTROLE DO PROCESSO DE USINAGEM. Campinas: FEM, DEF, 1994 (notas de aula).

DINIZ, A .E. , COSTA, C.E. A CORRENTE ELÉTRICA DO MOTOR DA MÁQUINA MOSTRA O FIM DE VIDA DA FERRAMENTA. Máquinas & Metais, n.354, p.41-52, 1995.

DINIZ, A . E. USINAGEM DOS METAIS. Campinas: FEM, DEF, 1997. (notas de aula)

ESP - a new tool material. Metal Powder Report, v.46, n.12, p.24 -29, 1991.

FERRARESI, D. FUNDAMENTOS DA USINAGEM DOS METAIS. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1977, 751p.

FERRARESI, D. USINAGEM DOS METAIS: furação, alargamento, fresamento e processos não convencionais. São Paulo: ABM, 1973.

KIM, J., KANG, Y.H. HIGH-SPEED MACHINING OF ALUMINIUM USING A DIAMOND ENDMILLS. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.37, p.1155-1165, August 1997.

KISTLER INSTRUMENT CORPORATION. Operations Instrumentions, 1995, New York, USA, 31p.

KLUFT, W. MONITORANDO A FERRAMENTA E VISUALIZANDO O PROCESSO DE CORTE MELHORA-SE A PRODUÇÃO. Máquinas & Metais, p.20-49, Julho 1997.

LEE, J.M., CHOI, D.K., KIM, J. , CHU, C.N. REAL-TIME TOOL BREAKAGE MONITORING FOR NC MILLING PROCESS. CIRP ANNALS - Manufacturing Technology, v.44, p.59-62, 1995.

LEFÈBVRE, M. , CRAPART, J.C. et al. FRESAS REVESTIDAS POR PVD SÃO DUAS VEZES MAIS DURÁVEIS. Máquinas & Metais, n.292, p.34 -36, maio 1990.

LIN, S.C. , YANG, R.J., FORCE-MODEL BASED FOR TOOL WEAR MONITORING IN FACE MILLING. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.35, p.1201-1211, September 1995.

MACHADO, A . R. , BHATTACHARYYA, S.K. et al. USINAGEM DE AÇOS COM FRESAS DE FACEAR E INSERTOS DE CARBETO. Máquinas & Metais, n.301, p.94 - 103, fevereiro 1991.

MANNAN, M. A ., BROMS, S. MONITORING AND ADAPTIVE CONTROL OF CUTTING PROCESS BY MEANS OF MOTOR POWER AND CURRENT MEASUREMENTS. CIRP ANNALS - Manufacturing Technology, v.38, p.347-350, 1989.

- MICHELETTI, G. F. , KONIG, W. , VICTOR, R.H. IN PROCESS TOOL WEAR SENSORS FOR CUTTING OPERATIONS . CIRP ANNALS - Manufacturing Technology, v.25, p.483-496, 1976 *apud* DINIZ, A . E. TÓPICOS EM USINAGEM DOS METAIS: MONITORAMENTO E CONTROLE DO PROCESSO DE USINAGEM. Campinas: FEM, DEF, 1994 (notas de aula).
- OSKARSSON, R. , VON HOLST, P. SANDVICK CORONITE - A NEW COMPOUND MATERIAL FOR END MILLS. Metal Powder Report, v.44, n.12, p.819-821, 1989.
- PALMAI, Z. CUTTING TEMPERATURE IN INTERMITTENT CUTTING. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.27, p.261- 274, 1987.
- PEYRE, J.P. , VINTERHOLLER, O . REVESTIDAS POR CVD ou PVD AS FERRAMENTAS TEM VIDA MELHOR. Máquinas & Metais, n.344, p.68 -79, setembro 1994.
- PIRES, J.R., DINIZ, A . E. EVITANDO O DESPERDÍCIO DE FERRAMENTAS DE TORNEAR: UMA APLICAÇÃO EM CHÃO DE FÁBRICA. Máquinas & Metais, n.370, p.73-85, novembro 1996.
- SANDVIK COROMANT, São Paulo. MANUAL DO FRESAMENTO. AB Sandvik Coromant, São Paulo, 1990, 74p.
- SANDVIK COROMANT, São Paulo. FERRAMENTAS PARA MATRIZARIA. AB Sandvik Coromant, São Paulo, 1992, 47p.
- SANDVIK COROMANT, Sweden. MODERN METAL CUTTING ; a practical handbook. 1 ed, AB Sandvik Coromant, Sandviken, Sweden, 1994, 843 p.
- SANDVIK COROMANT, São Paulo. FERRAMENTAS ROTATIVAS. AB Sandvik Coromant, São Paulo, Janeiro 1997, 504p.
- SHAW, M. C. METAL CUTTING PRINCIPLES. Oxford University Press, New York, 1984, 594 p.
- SHAW, M. C. METAL CUTTING PRINCIPLES. Oxford University Press, New York, 1984, 594 p. *apud* DINIZ, A . E. USINAGEM DOS METAIS. Campinas: FEM, DEF, 1997. (notas de aula)
- SOUZA, M. M., DUARTE, M. A . V., MACHADO, A . R. , UTILIZANDO A VIBRAÇÃO MECÂNICA PARA MONITORAR A USINAGEM POR FRESAMENTO. Máquinas & Metais, n.379, p.102-105, agosto 1997.

- SOUZA, M. M. UTILIZANDO A VIBRAÇÃO MECÂNICA PARA MONITORAR O DESGASTE DAS FERRAMENTAS DE CORTE E O ACABAMENTO SUPERFICIAL NO PROCESSO DE FRESAMENTO. Uberlândia: Centro de Ciências Exatas e Tecnologia - UFU, 1998. 101 p. (Tese, Doutorado em Engenharia Mecânica)
- STROLBERG, J. É BOM RECICLAR OS CONHECIMENTOS SOBRE OS PRINCÍPIOS DO PROCESSO. Máquinas & Metais, n.341, p.36 -54, junho 1994.
- TANGUY, J.C. MONITORAÇÃO AUTOMÁTICA DA USINAGEM: COMO E POR QUÊ. Máquinas & Metais, n.325, p.78-91, fevereiro 1993.
- USER'S MANUAL, PC-LABCARD – Placa Analógica-Digital PCL-818, ADVANTECH, fevereiro 1993.
- WALLACE, S. ELIMINATION VIBRATION-INDUCED MACHINE TOOL DAMAGE. Aerospace Engineering, p.23-25, May 1997.
- WILCOX, S.J. , REUBEN, R.S., SOUQUET, P. THE USE OF CUTTING FORCE AND ACOUSTIC EMISSION SIGNALS FOR THE MONITORING OF TOOL INSERT GEOMETRY DURING ROUGH FACE MILLING. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.37, p.481- 494, April 1997.

Bibliografia Consultada

- FERRAMENTAS mais duras: chegou o nitreto de titânio. Máquinas & Metais, n.243, p.58 - 64, janeiro/fevereiro 1986.
- FRANÇA, J. L. et al. MANUAL PARA A NORMALIZAÇÃO DE PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS. 2 ed. Belo Horizonte: UFMG, 1992. 196p.
- GIRONDI, A . C., BOEHS, L. FRESAMENTO FRONTAL: COMO SELECIONAR A FERRAMENTA. Máquinas & Metais, n.262, p.24 -35, outubro 1987.
- WERTHEIM, R. , SATRAN, A . MODIFICATIONS OF THE CUTTING EDGE GEOMETRY AND CHIP FORMATION IN MILLING. CIRP ANNALS - Manufacturing Technology, v.43, p63 -68, january 1994.

APÊNDICES

Apêndice I – Diagramas e Configurações do Programa de Aquisição de Dados

A .1 – Diagrama:

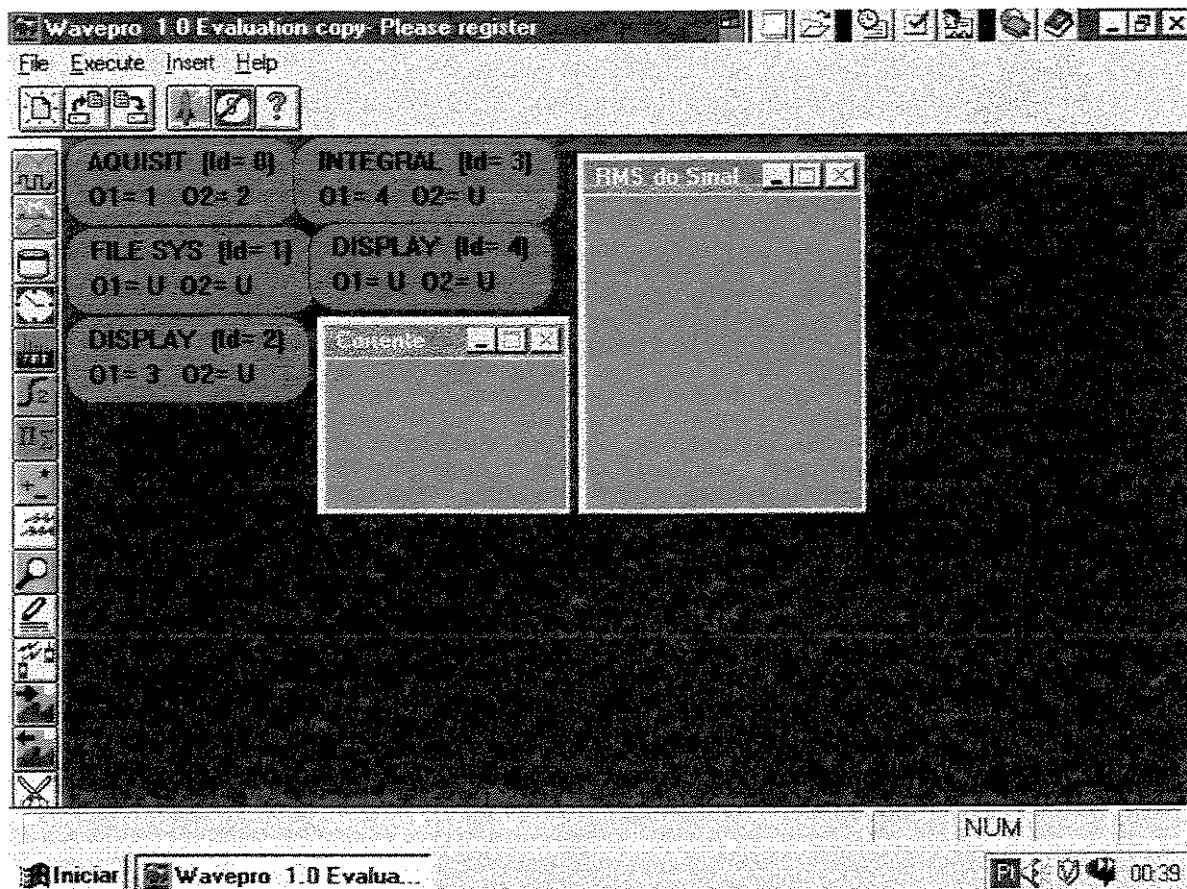


FIG.II.1 – Diagrama do Programa de Aquisição de Dados usado na 1ª Parte dos Ensaios

A .2 – Configuração:

AQUISIT Id0

Start canal: 0
Stop canal: 0
Output link 1: 1
Output link 2: 2
Taxa de amostragem: 2000 Hz
Conversão: 1024 pontos
Canal 0 : ± 10 Volts

FILE SYS Id1

write/automatic/ASCII
Output link 1: -1
Output link 2: -1
C:\WAVEPRO\ALES
Name prefix: _____

INTEGRAL Id3

time constant: 1024
canal 0 / RMS
Output: 4

DISPLAY Id2

Graph title: *CORRENTE*
Output: 3

DISPLAY Id4

Graph title: *RMS do Sinal*
Output: -1

B.1 – Diagrama:

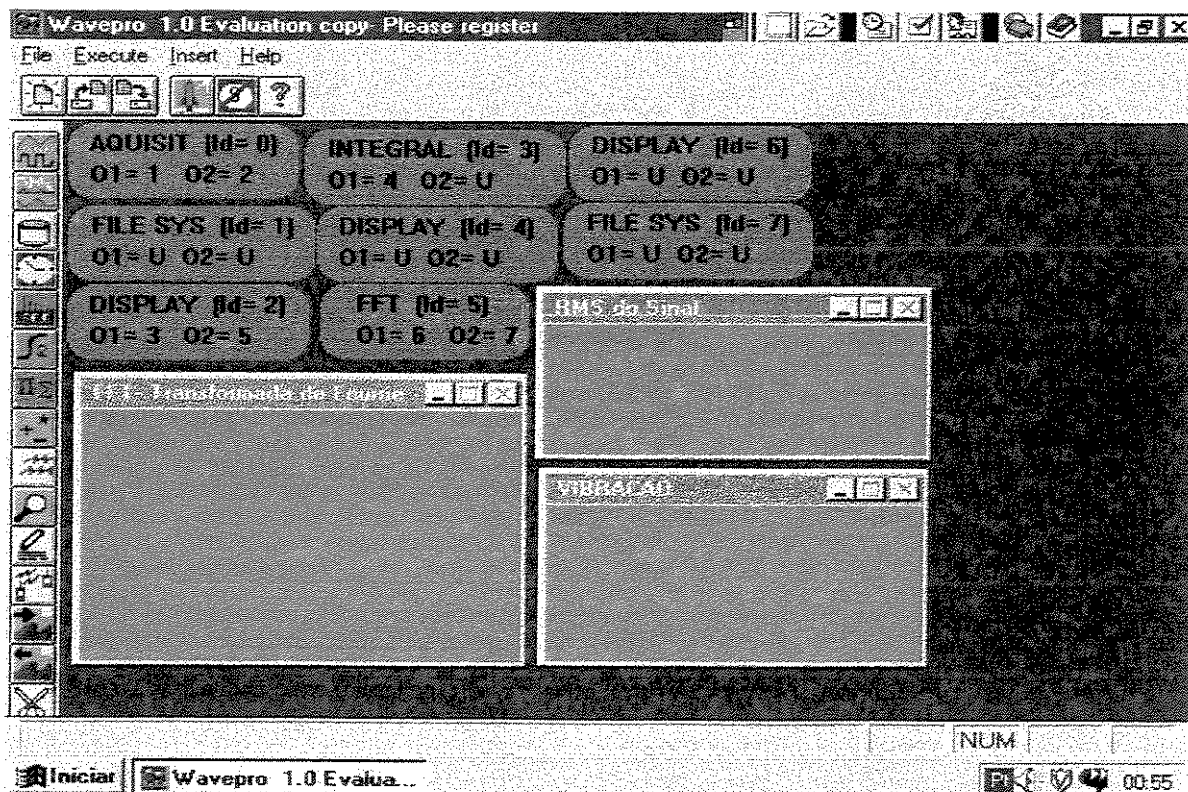


FIG.II.2 – Diagrama do Programa de Aquisição de Dados usado nos Ensaios de Vida

B.2 – Configuração:

AQUISIT Id0

Start canal: 0
 Stop canal: 0
 Output link 1: 1
 Output link 2: 2
 Taxa de amostragem: 30000 Hz
 Conversão: 4096 pontos
 Canal 0 : $\pm 2,5$ Volts

FILE SYS Id1

write/automatic/ASCII
 Output link 1: -1
 Output link 2: -1
 C:\WAVEPRO\ALES
 Name prefix: _____

FILE SYS Id7

write/automatic/ASCII
 Output link 1: -1
 Output link 2: -1
 C:\WAVEPRO\ALES
 Name prefix: _____

DISPLAY Id2

Graph title: *Vibração*
 Output : 3
 Output : 5

DISPLAY Id4

Graph title: *RMS do Sinal*
 Output: -1
 Output: -1

DISPLAY Id6

Graph title: *Transf. de Fourier*
 Output: -1
 Output: -1

FFT Id5:

Hanning/ Canal 0
 Output: 6
 Output: 7

RMS Id3:

time constant: 4096 / Canal 0/ RMS
 Output: 4
 Output: -1

C.1 – Diagrama:



FIG.II.3 – Diagrama do Programa de Aquisição de Dados usado nos Ensaio de Repetitividade

C.2 – Configuração:

AQUISIT Id0

Start canal: 0
 Stop canal: 0
 Output link 1: 1
 Output link 2: 2
 Canal 0 : $\pm 2,5$ Volts
 Taxa de amostragem: MD= 50 Hz
 CO= 30 Hz
 Conversão: MD = 1800 pontos
 CO = 950 pontos

FILE SYS Id1

write/automatic/ASCII
 Output link 1: -1
 Output link 2: -
 C:\WAVEPRO\ALES
 Name prefix: _____

DISPLAY Id2

Graph title: *Sinal Bruto*
 Output link 1: -1
 Output link 2: -1

Apêndice II – Programas CNC

Programa I – Utilizado quando variava-se a velocidade de corte (v_c) e a profundidade de usinagem (a_p) e mantinha-se a velocidade de avanço ($v_f = 515$ mm/min) constante.

O0300 (ALE = v_c varia – v_f cte)

G91 G00 G28 Z0. ;	S4520 M03;
G91 G28 X0.;Y0.;	G01 Y10.0;
T2;	G00 X-60.0;
M06;	M00;
G90 G00 G54;	S4806 M00;
G43 H2 Z -----;	G01 Y-42.0
G00 X-8.0 Y10.;	G04 X0.25;
M00;	M00;
S2515 M03;	S5093 M03;
G01 Y-42.0 F515;	G01 Y-94.0;
G04 X0.25;	G91 G28 Z0. M09;
M00;	G00 X-80.0 Y260.0;
S2801 M03;	M30;
G01 Y-94.0;	%
G00 X-21.0;	
M00;	
S3088 M03;	
G01 Y-42.0;	
G04 X0.25;	
M00;	
S3374 M03;	
G01 Y10.0;	
G00 X-34.0;	
M00;	
S3660 M03;	
G01 Y-42.0;	
G04 X0.25;	
M00;	
S3947 M03;	
G01 Y-94.0;	
G00 X-47.0;	
M00;	
S4233 M03;	
G01 Y-42.0;	
G04 X0.25;	
M00;	

Programa 2– Utilizado quando variava-se a velocidade de avanço (v_f) e a profundidade de usinagem (a_p) e mantinha-se a velocidade de corte ($v_c=115$ m/min) constante.

O0400 (ALE = v_f varia – v_c cte)

G91 G00 G28 Z0. ;
 G91 G28 X0.;Y0.;
 T2;
 M06;
 G90 G00 G54;
 G43 H2 Z ----;
 G00 X-8.0 Y10.;
 M00;
 S3661 M03;
 G01 Y-42.0 F747;
 G04 X0.25;
 M00;
 S3661 M03;
 G01 Y-94.0 F670;
 G00 X-21.0;
 M00;
 S3661 M03;
 G01 Y-42.0 F615;
 G04 X0.25;
 M00;
 S3661 M03;
 G01 Y10.0 F560;
 G00 X-34.0;
 M00;
 S3661 M03;
 G01 Y-42.0 F516;
 G04 X0.25;
 M00;
 S3661 M03;
 G01 Y-94.0 F472;
 G00 X-47.0;
 M00;
 S3661 M03;
 G01 Y-42.0 F450;
 G04 X0.25;
 M00;

S3661 M03;
 G01 Y10.0 F417;
 G00 X-60.0;
 M00;
 S3661 M00;
 G01 Y-42.0 F395;
 G04 X0.25;
 M00;
 S3661 M03;
 G01 Y-94.0 F373;
 G91 G28 Z0. M09;
 G00 X-80.0 Y260.0;
 M30;
 %

Programa 3– Utilizado para a realização dos Ensaio de Vida com profundidade de usinagem ($a_p = 0,95$ mm) fixa.

O0250 (Ensaio de Vida - ALE)

G91 G00 G28 Z0.;

G91 G28 X0.;Y0.;

T2;

G90 G00 G54;

G43 H2 Z -0.95;

G00 X-8.0 Y10.;

S _____ M03;

G01 Y-95.0 F _____;

G00 X -16.0;

G01 Y10.0 F _____;

G00 X-24.0;

G01 Y-95.0 F _____;

G00 X-32.0;

G01 Y10.0 F _____;

G00 X-40.0;

G01 Y-95.0 F _____;

G00 X-48.0;

G01 Y10.0 F _____;

G00 X-56.0;

G01 Y-95.0 F _____;

G00 X-72.0;

G01 Y-95.0 F _____;

G00 X-80.0;

G01 Y10.0 F _____;

G00 X-88.0;

G01 Y-95.0 F _____;

G00 X-96.0;

G01 Y10.0 F _____;

G91 G00 G28 Z0.;

M30;

%