

14011
117
3125u
TES/MEM

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

UTILIZANDO A VIBRAÇÃO MECÂNICA PARA MONITORAR O DESGASTE DAS
FERRAMENTAS DE CORTE E O ACABAMENTO SUPERFICIAL NO PROCESSO DE

FRESAMENTO

DIRBI/UFU



1000187019

Tese apresentada por Marcos Morais de Sousa à
Universidade Federal de Uberlândia como parte dos
requisitos para obtenção do título de Doutor em
Engenharia Mecânica.

Prof. Marcus Antônio Viana Duarte, Dr. Eng. (Orientador)
Prof. Álisson Rocha Machado, Dr. Eng. (Co-Orientador)

Uberlândia, 09 de julho de 1998

À minha esposa Doris, ao meu filho
Rafael e ao amigo Duarte.

Agradecimentos:

Aos professores Marcus Antônio Viana Duarte e Álisson Rocha Machado, pela orientação realizada neste trabalho.

Ao colega José Calderani Filho, por ter cedido a oportunidade de monitorar os testes de fresamento realizados em seu trabalho de doutoramento.

Ao técnico Reginaldo Ferreira de Sousa e ao colega de curso André Luis Belloni do Santos, pelo apoio técnico durante a realização dos testes de fresamento.

Aos professores, colegas e amigos do Departamento de Engenharia Mecânica que incentivaram e permitiram a realização deste trabalho.

UTILIZANDO A VIBRAÇÃO MECÂNICA PARA MONITORAR O DESGASTE DAS
FERRAMENTAS DE CORTE E O ACABAMENTO SUPERFICIAL NO PROCESSO DE
FRESAMENTO.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE SÍMBOLOS	XII
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSO DE FRESAMENTO E DA INTEGRIDADE SUPERFICIAL	8
2.1 - Fresamento	8
2.2 - Vida da Ferramenta de corte	14
2.3 - Critérios que definem tempo de vida de uma ferramenta	15
2.4 - Integridade Superficial	17
3 - TÉCNICAS DE ANÁLISE DE SINAIS	
3.1- Fundamentos de Análise de Sinais	20
3.2 - Análise no Domínio da Frequência	26
3.2.1 - A DFT e a FFT	29
3.2.2 - Análise de Sinais Periódicos	30
3.2.3 - Análise de Sinais Aleatórios	31

3.3 - Técnicas de Análise no Domínio do Tempo	33
3.3.1 - Médias no Domínio do Tempo	34
3.3.2 - Transformada de Hilbert	35
3.3.3 - Análise Cepstral	38
3.3.4 - Técnicas do Envelope	39
4 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DA FRESADORA	42
4.1 - Procedimento experimental de obtenção das FRF	44
5 - ANÁLISE DO DESGASTE E DO ACABAMENTO SUPERFICIAL NO DOMÍNIO DO TEMPO	56
5.1 - Metodologia utilizada nos ensaios	56
5.2 - Condições utilizadas nos ensaios de fresamento	58
5.3 - Resultados e análise	61
5.4 - Estimativa do acabamento superficial via vibração mecânica	70
6 - ANÁLISE DO DESGASTE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	76
6.1 - Análise espectral	76
6.2 - Análise espectral utilizando as Transformadas de Hilbert	80
6.3 - Análise espectral utilizando a Técnica do Envelope	83
6.4 - Análise Cepstral	85
6.5 - Análise espectral utilizando filtros de 1/3 de oitava	88
7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	91
8 - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
9 - ANEXO 1 - Estimativa das Funções Respostas em Frequência (FRF)	97
9.1 - Estimação das Funções Respostas em Frequência	98
9.2 - O estimador H1	100

de Sousa, M. M. ; "Utilizando a vibração mecânica para monitorar o desgaste das ferramentas de corte e o acabamento superficial", Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 1998, 103p.

Resumo: neste trabalho, é feito um estudo de viabilidade da aplicação dos sinais de vibração mecânica gerados durante o processo de fresamento, para relacioná-los à evolução do desgaste de flanco das ferramentas de corte e com o acabamento superficial da peça fresada. Portanto são apresentadas: as técnicas utilizadas para monitoramento em tempo real, algumas definições sobre o fresamento, acabamento superficial e as técnicas de análise de sinais no domínio do tempo e da frequência. Devido à fresadora apresentar variações nas suas propriedades vibracionais com a alteração da posição da mesa de trabalho e do eixo porta fresa durante o seu funcionamento, um estudo de sensibilidade dinâmica foi realizado no sentido de identificar os locais que apresentavam a menor sensibilidade a esta variação de geometria, e este estudo foi realizado com a aplicação das Funções Resposta em Frequência. Com os sinais obtidos do monitoramento durante os passes de fresamento sobre uma barra de aço ABNT- NB 1045, detectou-se que os parâmetros RMS, Pico e Kurtosis apresentaram bons resultados no sentido de quantificar a evolução do desgaste das ferramentas de corte com o nível de vibração. A correlação do acabamento superficial da peça com a vibração mecânica, foi obtida através da utilização de um polinômio de terceiro grau com seus coeficientes ajustados via Mínimos Quadrados Comuns. No domínio da frequência, pode-se detectar a evolução do desgaste das ferramentas de corte através da: análise espectral, análise Cepstral, análise espectral com a utilização das transformadas de Hilbert e através da utilização de filtros e 1/3 de oitava.

Palavras-Chaves: Monitoramento, Vibração mecânica, Desgaste de ferramenta e Acabamento superficial.

de Sousa, M. M. ; “ Using Mechanical Vibrations for the Monitoring of the Wear of Cutting Tools and of the Surface Finishing in the Milling Process”, Dissertation of doctorate, Federal University of Uberlândia, 1998. 103p.

Abstract: this work shows a study on the viability of the application of the mechanical vibration signals generated during the milling process to quantify the evolution of a cutting tool flank wear and to estimate the surface finish of a milling tool. It is presented: the techniques used for real time monitoring, some definitions on milling, surface finishing, and the signal analysis techniques in the domain of time and frequency. Due to the fact that the milling machine presents variations in its vibration properties with the modification of geometry during the work, a study on the dynamic sensitivity has been performed in order to identify regions with less sensitivity to this variation in geometry, and such study was accomplished with the application of Frequency Response Function. With the signals obtained during the monitoring of the milling passes on a AISI 1045 steel bar, it has been realized that the parameters RMS, peak and kurtosis show good results for the quantification of the evolution of the wear of the cutting tool with the level of vibration. The relation between work piece surface finish and mechanical vibration has been obtained by using a third degree polynomial with coefficients adjusted through common least squares. In the frequency domain, the evolution of the wear of the cutting tools can be detected through: spectral analysis, cepstral analysis, spectral analysis using Hilbert transforms and one third octave filters.

Key words: monitoring; mechanical vibration; wear in tools; surface finishing.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PAG.
2.1 - Movimento e direções para o fresamento tangencial	9
2.2 - Percurso da ferramenta no fresamento tangencial	10
2.3 - Grandezas de corte	12
2.4 - Profundidade de corte e espessura de penetração	12
2.5 - Nomenclatura utilizada numa ferramenta de corte	13
2.6 - Tipos de desgaste que podem ocorrer em uma ferramenta de corte A- desgaste de cratera; B - desgaste de flanco; C e D - desgaste de entalhe	14
2.7 - Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte	16
2.8 - Regiões do desgaste de flanco de uma ferramenta com o tempo	16
2.9 - Classificação da Integridade Superficial nos processos de usinagem	17
3.1 - Diagrama simples de instrumentação	19
3.2 - Exemplo de um processo aleatório estacionário	21
3.3 - Intervalo entre dois pontos para o cálculo da função de autocorrelação	23
3.4 - Representação das formas típicas de sinais no domínio do tempo (I) e no domínio da frequência (II)	28
3.5 - Efeito do alisamento sobre a DEP a) Sinal com alisamento; b) Sinal alisado	32
3.6 - Média no Domínio do Tempo	34
3.7 - Efeito da Média no Domínio do Tempo no sinais síncrono e assíncrono	35
3.8 - Esquema da Técnica do Envelope	40
4.1 - Locais da fresadora onde foram medidas as FRF	43
4.2 - Diagrama da Instrumentação para a obtenção das FRF	44
4.3 - Densidade Espectral de Potência da força de excitação	44
4.4 - FRF pontuais da fresa na banda de 500 a 4000 Hz (.....), posição de referência; (—), deslocamento da mesa de trabalho de 500 mm na direção longitudinal ; (—), deslocamento do porta fresa de 50 mm na direção vertical.	46

4.5	- FRF do mancal: (—), posição de referência; (·····), deslocamento da mesa de trabalho; e (-----), deslocamento do porta fresa	47
4.6	- FRF da tampa traseira: (—), posição de referência; (·····), deslocamento da mesa de trabalho; e (-----), deslocamento do porta fresa	48
4.7	- FRF da tampa frontal: (—), posição de referência; (·····), deslocamento da mesa de trabalho; e (-----), deslocamento do porta fresa	49
4.8	- FRF da mesa: (—), posição de referência; (·····), deslocamento da mesa de trabalho; e (-----), deslocamento do porta fresa	50
4.9	- FRF da Fresa: (—), posição de referência; (·····), deslocamento da mesa de trabalho; e (-----), deslocamento do porta fresa	51
4.10	- Nível RMS do teste de usinagem: (—) arestas novas; (·····) arestas consideravelmente desgastada (-----) arestas extremamente desgastada	54
5.1	- Locais de medição dos parâmetros RA e Rmax sobre a barra de aço	57
5.2	- Evolução de VBmax nas arestas de corte na condição 1	61
5.3	- Evolução de VBmax nas arestas de corte na condição 2	62
5.4	- Nível RMS da aceleração em [m/s ²] do local 01 em função do desgaste das arestas de corte	64
5.5	- Nível RMS da aceleração em [m/s ²] do local 20 em função do desgaste das arestas de corte	65
5.6	- Valores Pico em função do desgaste das arestas de corte do local 20	67
5.7	- Valores Pico em função do desgaste das arestas de corte do local 01	67
5.8	- Valores da Kurtosis do local 01 em função do desgaste das arestas de corte	68
5.9	- Valores da Kurtosis do local 20 em função do desgaste das arestas de corte	69
5.10	- Valores para a Ra medido (—) e Ra estimado (-----) para E1=7.77%	74
5.11	- Valores para a Ra medido (—) e Ra estimado (-----) para E3 = 1.03%	74
6.1	- Espectro em frequência para as ferramentas novas - local 01	78

6.2	- Espectro em frequência para as ferramentas gastas $VB_{max} \cong 1.0$ mm - local 01	78
6.3	- Espectro em frequência para as arestas novas - local 20	79
6.4	- Espectro em frequência para as arestas gastas $VB_{max} \cong 1.0$ mm - local 20	79
6.5	- Análise espectral utilizando Transformada de Hilbert	81
6.6	- Espectro da banda de [0 a 90] Hz sem utilizar a Transformada de Hilbert	81
6.7	- Espectro da banda de [0 a 90] Hz utilizando a Transformada de Hilbert	82
6.8	- Espectro na banda de [420 a 730] Hz para arestas novas - local 01	83
6.9	- Espectro na banda de [420 a 730] Hz para arestas gastas - local 01	84
6.10	- Espectro na banda de [420 a 730] Hz para arestas novas - local 20	84
6.11	- Espectro na banda de [420 a 730] Hz para arestas gastas - local 20	85
6.12	- Cepstrum obtido para arestas novas - local 01	86
6.13	- Cepstrum obtido para arestas gastas $VB_{max} \cong 1.0$ mm - local 01	86
6.14	- Cepstrum obtido para arestas novas - local 20	87
6.15	- Cepstrum obtido para arestas gastas $VB_{max} \cong 1.0$ mm - local 20	87
6.16	- Espectro em frequência em bandas de 1/3 de oitava do local 20 (-----) arestas novas e (——) arestas gastas	89
9.1	- Obtenção da FRF de um sistema com erro na entrada e na saída	98

LISTA DE TABELAS

TABELAS	PAG.
3.1 - Kurtosis e Crest como indicadores de Picos em um sinal	26
4.1 - Variação das frequências naturais em função das condições de ensaio	46
4.2 - Comparação dos níveis RMS de aceleração em $[m/s^2]$ para três condições de ferramentas	53
5.1 - Valores de VBmax em $[mm]$ para as 8 ferramentas de corte no teste de vida 7 com a condição 1 de usinagem	63
5.2 - Valores de VBmax em $[mm]$ para as 8 ferramentas de corte no teste de vida 7 com a condição 2 de usinagem	63
5.3 - Erros percentuais com o ajuste polinomial na banda de 0 a 2000 Hz	71
5.4 - Erros percentuais com o ajuste polinomial na banda de 0 a 250 Hz	72
5.5 - Erros percentuais com o ajuste polinomial na banda de 0 a 1000 Hz	72
5.6 - Erros percentuais com o ajuste polinomial na banda de 250 a 2000 Hz	72
5.7 - Erros percentuais com o ajuste polinomial na banda de 1000 a 2000 Hz	73

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos		Unidade
a_c	Espessura de penetração da ferramenta.	[mm]
a_f	Profundidade de avanço.	[mm]
a_p	Profundidade ou largura de usinagem.	[mm]
A_α	Superfície principal de folga.	*
A'_α	Superfície secundária de folga.	*
A_γ	Superfície de folga.	*
b	Desvio máximo de fase.	*
C_f	Fator de Crest.	*
$C(t)$	Cepstrum.	[dB]
DFT	Transformada Discreta de Fourier.	**
E	Erro percentual.	[μ m]
f	Avanço.	[mm/volta]
f_c	Avanço de corte.	[mm/volta]
f_e	Avanço efetivo de corte.	[mm/volta]
f_z	Avanço da ferramenta por dente.	**
f_0	Frequência da portadora.	[Hz]
$f(t)$	Frequência instantânea.	[Hz]
$F(\Omega)$	Força de excitação.	[N]
FFT	Transformada rápida de Fourier.	**
FRF	Função resposta em frequência.	[dB]
FRF(Ω)	Função resposta em frequência para uma determinada frequência.	
G_{xx}	Função auto densidade espectral da entrada.	[V ² /Hz]
G_{yy}	Função auto densidade espectral da saída.	[V ² /Hz]
$G_{xx}(f)$	Função auto densidade espectral.	[V ² /Hz]
H	Transformada de Hilbert.	**
j	Imaginário puro	*
$h(\tau)$	Função impulso unitário.	*
$H(f)$	Função Resposta em Frequência pontual.	[VdB]
$H(\omega)$	Função Resposta em Frequência.	[VdB]

H^{-1}	Transformada inversa de Hilbert.	**
IFT	Transformada Inversa de Fourier.	**
k	k-ésimo termo (índice de frequência).	*
KT	Profundidade máxima de cratera.	[mm]
L_c	Percurso de corte da ferramenta.	[mm]
L_e	Percurso de avanço da ferramenta.	[mm]
L_f	Percurso efetivo da ferramenta.	[mm]
mI	Média da variância amostral.	[V]
mcq	Momento central estatístico de ordem q.	#
mc2	Momento central estatístico de ordem 2	[V ²]
mq	Momento estatístico de ordem.	#
n	rotação por minuto.	[rpm]
N	Numero de pontos da amostra.	*
P_r	Período de repetição.	*
r_e	raio de ponta da ferramenta.	[mm]
Ra	Rugosidade média.	[μ m]
Re	Rugosidade estimada.	[μ m]
Rm	Rugosidade medida.	[μ m]
Rmax	Rugosidade máxima.	[μ m]
Rxx	Função de auto correlação.	[V/Hz]
RMS	Média quadrática.	[V/Hz]
S	Aresta principal de corte.	*
S'	Aresta secundária de corte.	*
$\tilde{S}(k)$	Função densidade espectral de potência para funções aleatórias alisadas.	[V ² /Hz]
$\hat{S}(k)$	Função densidade espectral de potência para sinais aleatórios.	
$S_{xx}(f)$	Função densidade espectral de potência.	[V ² /Hz]
T	Período de amostragem.	*
TDA	Média no domínio do tempo.	**
TDAT	Técnicas de análise no domínio do tempo.	**
VB	Desgaste de flanco médio.	[mm]

VBmax	Desgaste de flanco máximo.	[mm]
Vc	Velocidade de corte.	[m/min]
Ve	Velocidade efetiva.	[m/min]
Vf	Velocidade de avanço.	[mm/min]
Vm	Nível da aceleração medido.	[m/s ²]
VN	Desgaste de entalhe.	[mm]
W(k)	Janela amostral em frequência.	**
x _p	Sinal par.	**
x _i	Sinal ímpar.	**
x(t)	Sinal no domínio do tempo.	[V]
x _a (t)	Sinal analítico no domínio do tempo.	[V]
X(f)	Sinal no domínio da frequência.	[V/Hz]
X _R (f)	Parte real do sinal no domínio da frequência.	**
X _I (f)	Parte imaginária do sinal no domínio da frequência.	**
$\tilde{x}(t)$	Transformada de Hilbert.	**
x _v (t)	Excitação ou entrada real.	**
Xmax	Amplitude máxima do sinal.	**
X(ω)	Transformada de Fourier da entrada x(t).	**
X(Ω)	Nível de vibração em função da frequência.	[m/s ²]
y(t)	Função saída da integral de convolução.	**
Y(t)	Sinal modulado em frequência.	**
Y(ω)	Transformada de Fourier da saída y(t).	**
Y _a (t)	Sinal analítico modulado em frequência.	**
Y(iT)	Média do sinal no domínio do tempo.	[V]
Y _r (iT)	Média do sinal no domínio do tempo forma recursiva.	[V]
z	Número de dentes da ferramenta de corte.	*
β	Coefficiente de Kurtosis.	*
χ _v ²	Distribuição do qui-quadrado.	*
Δ(f)	Resolução em frequência.	[Hz]
Δ(t)	Intervalo de tempo.	*
γ	Coefficiente de Skewness.	*

η	Ângulo entre a direção de corte com a direção efetiva.	[graus]
φ	Ângulo entre o plano de trabalho e a direção de corte.	[graus]
$\varphi(t)$	Fase instantânea.	[rd/s]
$\mu_k(x)$	Média amostral.	[V]
ν	Graus de liberdade da distribuição do qui-quadrado.	*
σ	Desvio padrão da amostra.	[V]
σ^2	Variância amostral. com função dens. de prob. normal.	[V ²]
$\sigma_k^2(x)$	Variância amostral para um sinal estacionário e ergódico.	[V ²]
τ	Intervalo de tempo entre dois pontos.	*
Ω	Frequência.	[Hz]
$\psi_k^2(x)$	Média quadrática para um sinal estacionário e ergódico.	[V ²]

\otimes Indica operação de convolução.

\emptyset Indica diâmetro.

\mathfrak{F} Transformada de Fourier.

$| \quad |$ Indica módulo de um valor.

$(\quad)^t$ Indica transposta de uma matriz.

* - Parâmetros adimensionais.

** - Dimensões no próprio texto de definição.

- Dimensão em função da ordem do momento.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia industrial, o homem vem buscando cada vez mais aprimorar os processos de fabricação para obtenção de produtos com melhores qualidades a custos operacionais reduzidos.

No contexto mundial, a usinagem é reconhecida como sendo o processo de fabricação mais popular, mesmo apresentando dificuldades no sentido de modelagem matemática devido ser um processo bastante imprevisível (Trent, 1984).

Além das dificuldades de modelagem do processo (transferência de calor, mudança de fase, não linearidade), existe uma infinidade de fatores que afetam o mesmo, tais como: condições de corte, material da ferramenta, material a ser usinado e vibrações da máquina. Só a previsão dos níveis de vibração já é uma tarefa das mais complicadas, uma vez que a vibração, que é inerente a qualquer processo de usinagem, depende de uma série de fatores, tais como: heterogeneidade dos materiais, perturbações provocadas pelo movimento relativo da ferramenta de corte sobre a superfície da peça, evolução do desgaste das ferramentas de corte, cinemática do acionamento da máquina, perturbações oriundas de outras fontes externas, etc.

Hoje, normalmente as linhas de produção possuem máquinas operatrizes que estão ligadas a sistemas sofisticados como o CAD/CAM (Computer Aided Design Computer Aided Manufacturing), FMS (Flexible Manufacturing Systems), CBS (Computer Business Systems) e CIM (Computer Integrated Manufacturing), entre outros; sistemas que têm como característica comum a automatização visando minimizar falhas operacionais e aperfeiçoamento das várias etapas do processo produtivo.

Apesar de toda automatização envolvida nas linhas de produção, ainda existe, devido as

dificuldades de equacionamento, algumas questões que as limitam no sentido do controle do processo, como por exemplo:

- O acabamento superficial está dentro do limite esperado?
- A ferramenta de corte atingiu sua vida estimada?

O fim de vida da ferramenta é determinado quando o desgaste da ferramenta atinge valores previamente estabelecidos, que são normalmente baseados no limite de capacidade de produzir peças dentro dos padrões de qualidade (acabamento superficial e tolerância dimensional) determinados em projeto.

O desgaste das ferramentas pode ser medido diretamente, com o auxílio de um microscópio ferramenteiro ótico, ou estimado indiretamente, através da medição da rugosidade superficial por um rugosímetro ou ainda, através dos erros de forma com equipamentos específicos.

Estes são procedimentos, que apesar de serem bastante eficientes, apresentam inconvenientes para os processos automatizados, devido à necessidade da interrupção do processo de usinagem para fazer a medição da rugosidade, do erro de forma da peça ou da necessidade da retirada do suporte porta ferramenta para a medição do desgaste das ferramentas de corte. Isto acaba interferindo no tempo de operação e no custo final de produção.

Para minimizar as paradas das máquinas operatrizes, simples equações numéricas em conjunto com técnicas estatísticas têm sido utilizadas com o objetivo de estimar o tempo de vida das ferramentas. Silva (1994), mostra uma destas equações a qual indiretamente relaciona o acabamento superficial dos produtos usinados com a vida da ferramenta de corte. Porém, estas técnicas não prevêm possíveis quebras ou desgastes anormais da ferramenta que, quando ocorrem, acabam danificando a superfície da peça usinada, o suporte de fixação da ferramenta ou até mesmo a própria máquina operatriz.

Em função destes fatores, estudiosos do assunto como Groover (1987) e Du et al (1995), sugerem que as máquinas automatizadas deveriam ser capazes de realizar o controle do desgaste e

a troca das ferramentas, sem a interferência do homem. Para que isto ocorra torna-se necessário o desenvolvimento de técnicas de monitoramento do processo de usinagem em tempo real.

As técnicas de monitoramento em tempo real são fundamentadas na medição de parâmetros que direta ou indiretamente, estão relacionados com o desgaste da ferramenta e/ou o acabamento superficial do material usinado.

Estas técnicas, apresentam uma grande versatilidade de monitoramento porque elas podem ser aplicadas em qualquer tipo de máquina operatriz para monitorar em tempo real (*on line*), o processo, permitindo assim, numa maneira fácil e rápida, adquirir e atualizar dados para posterior processamento e análise.

As técnicas de monitoramento *on line* podem variar desde um simples monitoramento do nível RMS de um sinal, até procedimentos mais abrangentes, que utilizam várias técnicas associadas, em conjunto com vários tipos de sensores, conhecidas como técnicas de multisensoriamento (Dyan et al. 1995).

Estes procedimentos de controle para o acabamento superficial, desgaste das ferramentas de corte e ainda das condições operacionais das máquinas de usinagem, geram resultados que são armazenados em bancos de dados para fornecerem posteriormente informações características dos processos. Exemplo destes procedimentos são: o conceito das Figuras de Mérito (Stewart, 1977), o da Inteligência artificial (Targ et al, 1994) e das Redes Neurais (Lem et al, 1995).

As medições indiretas são, via de regra, fundamentadas no monitoramento das forças de usinagem, nas vibrações mecânicas do sistema, na emissão acústica ou ainda através da medição de algum outro parâmetro do processo (Graham, 1989).

Trabalhos como de Dan e Mathews (1990) e Braga (1992), relacionaram no torneamento a evolução do desgaste da ferramenta de corte através da medição da corrente elétrica do motor principal de acionamento da máquina. Nesta técnica de monitoramento, utiliza-se sensores de efeito *Hall* na fiação elétrica do motor de acionamento da máquina, que detecta a variação de

corrente elétrica com o aumento crescente das forças de atrito entre a ferramenta de corte com o cavaco e com a superfície usinada. Estes trabalhos mostram que a corrente elétrica do motor principal de acionamento tem grande sensibilidade ao aumento do desgaste das ferramentas de corte, podendo também ser utilizada para a detecção de quebra da ferramenta.

O monitoramento das componentes das forças de usinagem que agem na cunha cortante da ferramenta também pode ser utilizado para detectar a quebra da ferramenta de corte ou até mesmo o desgaste da ferramenta cortante (Braun e Lenz, 1986). Para o emprego desta técnica é necessário a utilização de medidores de força conhecidos por dinamômetros que são do tipo extensiométrico ou piezoelétrico. Estes sensores podem ser acoplados ao suporte porta ferramenta ou na própria mesa de trabalho da máquina ferramenta. As limitações desta técnica ficam em função das dimensões dos dinamômetros e do seu elevado custo.

A emissão acústica que até pouco tempo atrás era utilizada somente para a detecção e localização de trincas e fraturas em materiais vem sendo explorada para o monitoramento do desgaste da ferramenta de corte de processos de usinagem por fresamento (Diei e Dornfeld, 1987), e por torneamento (Diniz e Pigari, 1996).

O princípio físico desta técnica se resume na utilização do sinal acústico gerado durante o processo de usinagem que é propagado pelo material. A variação da intensidade de energia deste sinal é captado por um sensor piezoelétrico e posteriormente correlacionada com o processo em questão (Wadley et al. 1980).

O monitoramento através da emissão acústica não se resume simplesmente em analisar o sinal medido, mas sim em todo um procedimento matemático de análise de sinais, que em muitas vezes pode dificultar a interpretação dos mesmos, no sentido de correlacionar com as informações desejadas no processo de usinagem. Mas mesmo assim, esta técnica mostra-se eficiente e sensível para a investigação do desgaste das ferramentas de corte em diversos processos de usinagem.

A utilização da vibração mecânica como meio de monitoramento, apresentou bons resultados nos estudos feitos por Brawn et al (1982), El Wardany e Elbestawi (1996), para o processo de furação e por Bonifácio e Diniz, (1994) para o torneamento, visando caracterizar o desgaste das ferramentas de corte. Trabalhos como os de Jang et al (1996), também definem uma boa correlação do acabamento superficial com a vibração mecânica no processo de torneamento.

Neste tipo de monitoramento a vibração mecânica é captada por sensores piezoelétricos chamados de acelerômetros que são instalados no suporte porta ferramenta ou na estrutura da máquina ferramenta. Esta técnica de monitoramento tem várias vantagens, como o baixo custo sob o ponto de vista da instrumentação, tamanhos reduzidos dos sensores e ainda por apresentar técnicas simples de análise de sinais dinâmicos, tanto no domínio do tempo como no da frequência (Bendat e Piersol, 1986).

Quando se trabalha com vibração mecânica é interessante saber caracterizar quais são as fontes que geram os sinais de vibração. Estudos realizados por Crede (1961), apontam como principais fontes de geração de vibração a própria cinemática dos mecanismos das máquinas operatrizes e o próprio processo de usinagem. Assim, a identificação destas fontes é de fundamental importância para a utilização desta técnica de monitoramento.

Apesar de existirem trabalhos como de Choudhury e Mathews (1995), que apontam meios de minimizar os efeitos da vibração mecânicas durante o fresamento com a otimização do número das ferramentas de corte e dos estudos de Heisel e Milberg (1994), que relacionam a qualidade da superfície fresada com o comportamento dinâmico da fresadora, o potencial da análise de sinais de vibração ainda não foi aplicado ao fresamento no sentido de monitorar a evolução do desgaste das ferramentas de corte e para a estimativa do acabamento superficial das peças fresadas.

Assim, este trabalho tem como objetivo explorar as técnicas de manutenção preditiva através da análise de sinais no sentido de caracterizar a evolução do desgaste das ferramentas de corte e da estimativa do acabamento superficial no processo de fresamento utilizando para isto,

uma fresadora CNC modelo INTERACT 4 de 15 KW da ROMI, e será desenvolvido de acordo com os seguintes capítulos.

No capítulo 2, serão apresentadas algumas definições e considerações sobre o processo de usinagem por fresamento e sobre a integridade superficial. Destacam-se os principais movimentos e direções relativos ao processo, parâmetros normalizados pela Norma ABNT 6162 (1989), para nomenclatura e geometria das ferramentas de corte, critérios que determinam a vida das ferramentas, tipos de desgastes que normalmente podem ocorrer nas ferramentas durante a usinagem e os parâmetros normalizados pela Norma ABNT 6405 (1985), para caracterização da superfície usinada.

No capítulo 3, serão apresentadas as técnicas de análise de sinais no domínio do Tempo e da Freqüência, além dos principais parâmetros utilizados em análise de sinais, os quais são: média, variância, média quadrática, função de auto correlação, parâmetros de forma de Skewness e Kurtosis, fator de Crest, média no domínio do tempo (TDA), Transformadas de Hilbert, Técnica do Envelope e análise Cepstral que são normalmente utilizados em manutenção preditiva.

No capítulo 4, é apresentado o estudo feito para caracterizar o comportamento dinâmico da fresadora, com a finalidade de determinar os locais da máquina cujas propriedades vibracionais possuem menor sensibilidade à variação geométrica durante o seu funcionamento, para a instalação dos acelerômetros para monitorarem o desgaste das ferramentas de corte e o acabamento superficial da peça fresada. Estudos preliminares (de Sousa et al, 1997) indicaram que a principal dificuldade encontrada na utilização dos sinais correspondentes às vibrações mecânicas para monitorar o processo de fresamento reside no fato de que este processo de usinagem é descontínuo, o que caracteriza vibrações livres de um sistema mecânico, tendo ainda propriedades vibracionais variantes com o tempo, devido ao movimento axial do eixo porta fresa e do deslocamento longitudinal da mesa de trabalho.

Este estudo foi fundamentado numa análise de sensibilidade do sistema dinâmico da

fresadora com a utilização das Funções Resposta em Frequência (FRF).

No capítulo 5 é apresentada a metodologia utilizada para a realização dos ensaios de monitoramento *on line* utilizando a vibração mecânica e os resultados obtidos no teste de monitoramento com a análise dos parâmetros estatísticos que se mostraram melhores para quantificar a evolução do desgaste das ferramentas de corte e do acabamento superficial com o nível de vibração.

No capítulo 6, serão apresentados os resultados referentes à utilização das técnicas de análise de sinal no domínio da frequência, onde se comparam os espectros obtidos nos testes de fresamento para ferramentas novas e para ferramentas gastas.

As técnicas estudadas foram: análise espectral, análise espectral utilizando a Transformada de Hilbert, análise espectral com a Técnica do Envelope, análise Cepstral e a análise espectral através do uso de filtros de 1/3 de oitava.

Os capítulos 7 e 8 apresentam as conclusões, sugestões e as referências bibliográficas, respectivamente.

CAPÍTULO 2

CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSO DE FRESAMENTO E DE INTEGRIDADE SUPERFICIAL

Alguns dos termos da Norma, ABNT NBR 6162/89 (1989) para a usinagem dos metais, ABNT NBR 6163/80 (1980) para nomenclatura e geometria das ferramentas de corte, e da Norma ABNT 6405/85 (1985), para o acabamento superficial, serão apresentados para um melhor entendimento do trabalho realizado.

2.1 - Fresamento

O processo de fresamento pode ser definido como sendo a usinagem mecânica em que uma ferramenta provida de elementos cortantes dispostos simetricamente em volta de um eixo rotatório remove material da peça através do movimento relativo do eixo girante com o movimento de alimentação da peça. A usinagem por fresamento possui característica de corte interrompido devido ao fato de que os elementos de corte estão dispostos simetricamente em torno de um eixo, e durante um giro, cada elemento cortante tem um tempo ativo e outro inativo de corte. Com relação a posição deste eixo, as fresadoras (máquinas operatrizes que realizam o fresamento) são caracterizadas em horizontais, verticais ou simplesmente universais (Ferraresi, 1972).

As ferramentas de corte utilizadas nas fresadoras são chamadas de fresa, que são sólidos de revolução cuja superfície apresenta arestas cortantes. A disposição destes elementos de corte ou das arestas cortantes na superfície cilíndrica define as fresas em tangenciais ou frontais. Geralmente o desempenho das fresas frontais é considerado sensivelmente superior ao das fresas tangenciais, devido aos ângulos de corte e de saída de material que estas fresas possuem (Rossi, 1970).

De acordo com a norma ABNT NBR 6162/89, os movimentos relativos entre a peça e a fresa que causam a saída de cavaco são definidos como sendo:

- *Movimento de Corte*: movimento entre a peça e a ferramenta, o qual sem o movimento de avanço origina somente uma única retirada de cavaco.

- *Movimento de Avanço*: movimento entre a peça e a ferramenta, o qual juntamente com o movimento de corte origina a retirada contínua de cavaco.

- *Movimento Efetivo*: movimento resultante dos movimentos de corte e de avanço ao mesmo tempo.

As direções associadas a estes movimentos são:

- *Direção de Corte*: direção instantânea do movimento de corte.

- *Direção de Avanço*: direção instantânea do movimento de avanço.

- *Direção Efetiva*: direção instantânea do movimento efetivo de corte.

A Figura 2.1. ilustra os movimentos de corte com suas respectivas direções numa fresa cilíndrica de fresamento tangencial.

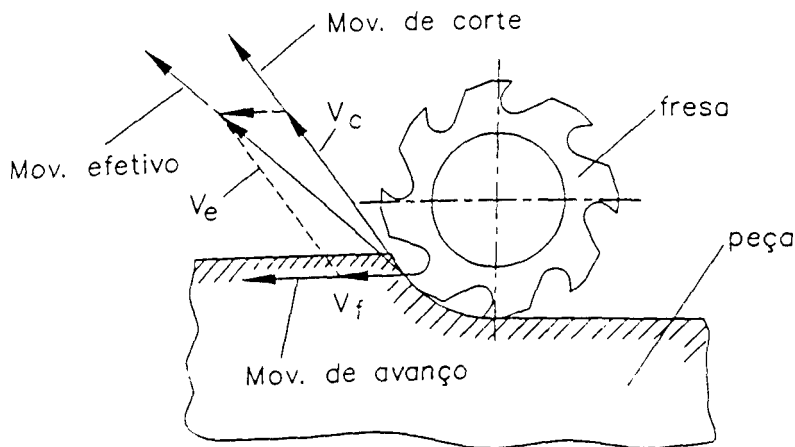


Fig. 2.1 - Movimentos e direções para o fresamento tangencial.

Norma ABNT NBR 6162/89

O deslocamento da ferramenta sobre a peça, define os seguintes percursos da ferramenta na peça:

- *Percurso de Corte* L_c : espaço percorrido pela aresta cortante sobre a peça segundo a direção de corte.

- *Percurso de Avanço* L_f : espaço percorrido pela fresa sobre a peça segundo a direção de avanço.

- *Percurso Efetivo* L_e : espaço percorrido pela aresta cortante sobre a peça segundo a direção efetiva do corte.

A Figura 2.2, mostra os percursos da ferramenta na peça.

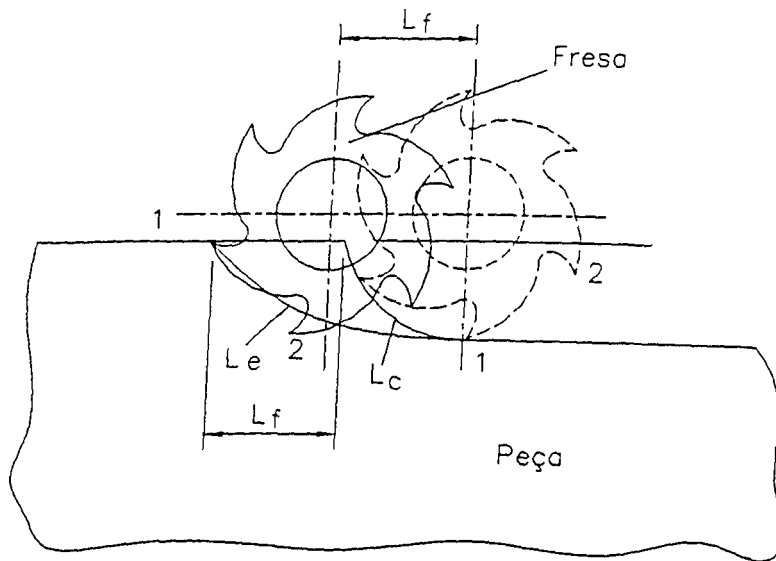


Fig. 2.2 - Percurso da ferramenta no fresamento tangencial.

Norma ABNT NBR 6162/89

Com relação ao parâmetro velocidade a Norma ABNT NBR 6162/89 (1989), define três tipos :

- *Velocidade de Corte* V_c : velocidade instantânea da aresta cortante segundo a direção e sentido de corte, calculada pela Equação 2.1.

$$V_c = \pi \cdot \varnothing \cdot n / 1000 \quad (\text{m/min}) \quad (2.1)$$

onde,

\varnothing = diâmetro da fresa em (mm).

n = rotações por minuto.

- *Velocidade de Avanço* V_f : velocidade instantânea da aresta cortante, segundo a direção e sentido de avanço, calculada pela Equação 2.2.

$$V_f = f \cdot n \quad (\text{mm/min}) \quad (2.2)$$

onde,

f = avanço em (mm/volta).

n = rotações por minuto.

- *Velocidade Efetiva de corte* V_e : velocidade instantânea da aresta cortante da ferramenta segundo a direção e o sentido efetivo do corte. Esta velocidade é a soma vetorial entre a velocidade de corte e velocidade de avanço apresentados na Figura 2.1.

Algumas grandezas de corte devem ser ajustadas na máquina e são as seguintes:

Avanço f : percurso de avanço da ferramenta em cada volta. No fresamento, este avanço deve ser ajustado em função do número de dentes da fresa, caracterizando o avanço por dente f_z , conforme mostrado na Equação 2.3.

$$f = f_z \cdot z \quad (2.3)$$

onde,

z = número de dentes da fresa.

O avanço por dente pode ser decomposto no avanço de corte f_c e no avanço efetivo de corte f_e . O *avanço de corte* f_c , é definido como sendo a distância entre duas superfícies consecutivas de usinagem medida na direção perpendicular a direção de corte no plano de trabalho (plano em que se realizam os movimentos responsáveis pela retirada de cavaco) e calculado conforme mostra a Equação 2.4.

$$f_c = f_z \cdot \text{sen}\varphi \quad (2.4)$$

onde φ , é o ângulo que a direção de avanço faz com a direção de corte, conforme mostra Figura 2.3.

O *avanço efetivo de corte* f_e , é a distância entre duas superfícies consecutivas de usinagem medida na direção efetiva de corte no plano de trabalho e é calculado pela Equação 2.5.

$$f_c = f_z \cdot \sin(\varphi - \eta) \quad (2.5)$$

onde η , é o ângulo que a direção efetiva faz com a direção de corte conforme, mostra Figura 2.3.

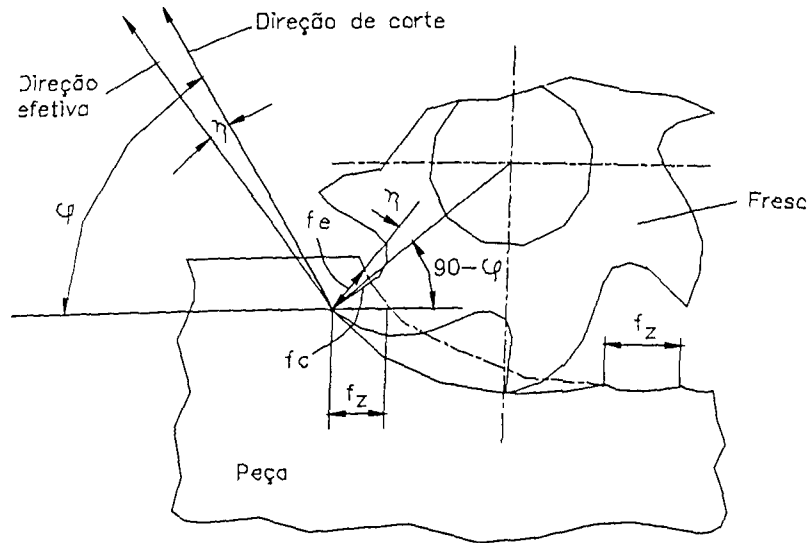


Fig. 2.3 - Grandezas de corte. Norma ABNT NBR 6162/89

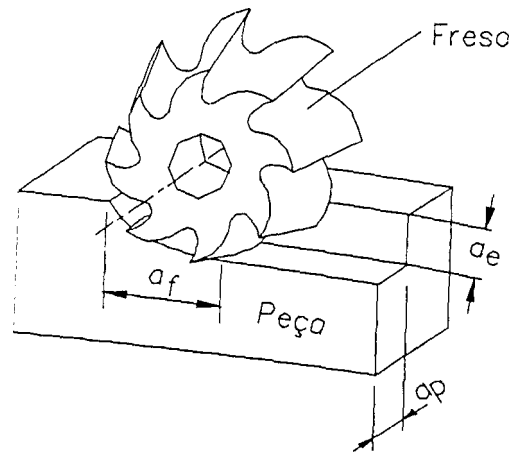


Fig. 2.4 - Profundidade de corte e espessura de penetração.

Norma ABNT NBR 6162/89

- *Profundidade ou Largura de Usinagem* a_p : é a quantidade de penetração da aresta de corte na peça, medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho.

- *Penetração de Trabalho* a_e : é a penetração da ferramenta em relação a peça, medida no plano de trabalho e numa direção perpendicular a direção de avanço.

- *Penetração de Avanço* a_f : é a grandeza de penetração da ferramenta, medida no plano de trabalho e na direção de avanço. Estas grandezas estão ilustradas na Figura 2.4.

A norma ABNT NBR 6163/80 (1980), que define parâmetros relacionados com a nomenclatura e geometria das ferramentas de corte, define as seguintes superfícies nas ferramentas de corte:

- *Superfície de saída* A_γ - superfície da cunha de corte sobre a qual o cavaco desliza.

- *Superfície de folga* - superfície que determina a folga entre a ferramenta e a superfície em usinagem. Distinguem-se a *superfície principal de folga* A_α e a *superfície secundária de folga* A'_α .

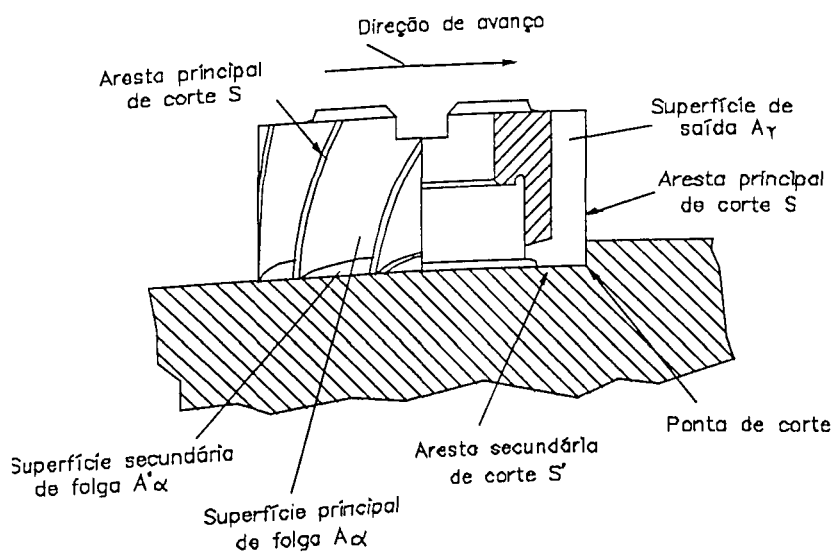


Fig. 2.5 - Nomenclatura utilizada numa ferramenta de corte.

Norma ABNT NBR 6162/89

Com relação as arestas cortante define as seguintes:

- *Aresta principal de corte* S : é a aresta de corte cuja cunha de corte, observada no

plano de trabalho e para um ângulo de direção de avanço $\phi = 90^{\circ}$, indica a direção de avanço.

- *Aresta secundária de corte S'* : é a aresta de corte cuja cunha de corte, observada no plano de trabalho, e para o ângulo da direção de avanço $\phi = 90^{\circ}$, indica a direção contrária a direção de avanço.

Na Figura 2.5, uma fresa cilíndrica para fresamento frontal é utilizada para ilustrar estas definições.

2.2 - Vida da Ferramenta de Corte.

A vida da ferramenta é definida como o tempo em que as ferramentas de corte trabalham efetivamente sem perder a capacidade de corte até que atinja um critério de fim de vida previamente estabelecido. O fim de vida de uma ferramenta de corte será definido pelo grau de desgaste pré-estabelecido. A quantificação deste desgaste irá depender de inúmeros fatores, tais como: acabamento superficial, tolerância dimensional, forças de corte, temperaturas na ferramenta e outros.

Portanto, através do controle de um destes fatores e adotando-se um critério de fim de vida, pode-se saber o momento mais apropriado para a substituição da ferramenta de corte.

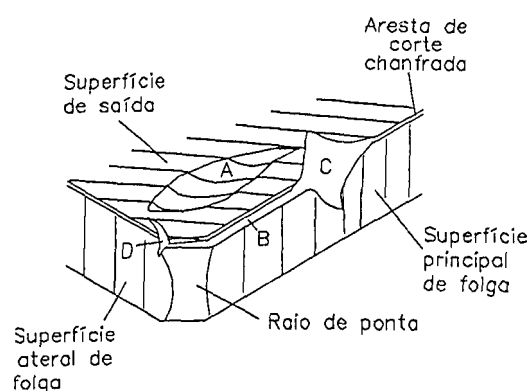


Fig. 2.6 - Tipos de desgaste que podem ocorrer em uma ferramenta de corte: A - desgaste de cratera, B - desgaste de flanco, C e D - desgaste de entalhe, Norma ISO 3685/77.

Sabe-se que o desgaste de flanco que ocorre na ferramenta durante a evolução do processo de usinagem contribui sempre no sentido de aumentar os esforços de corte. Este fato pode ser explicado pelo aumento da força de atrito diante do gradativo crescimento da área de

contato entre a peça e a ferramenta na superfície de folga da mesma, o que acaba acarretando um aumento do nível de vibração no processo de usinagem (Braga et al. 1993).

Wright e Biagchi (1981), e Dornley e Trent (1982), observaram que, normalmente o desgaste de cratera evolui menos que o desgaste de flanco podendo às vezes ocorrer um equilíbrio entre os dois tipos de desgastes, e que em qualquer situação sempre provocará uma elevação dos esforços de corte, que por sua vez elevará também o nível de vibração do processo. Os desgastes de cratera, de flanco e de entalhe estão ilustrados na Figura 2.6.

2.3 - Critérios que definem Tempo de Vida de uma Ferramenta.

Normalmente a vida de uma ferramenta pode ser expressa através do tempo total de trabalho; do percurso total de corte; do percurso total de avanço; do volume de material removido; do número de peças produzidas; da velocidade de corte para um determinado tempo de vida ou ainda por um critério, de acordo com a conveniência do processo.

Devido à inexistência de uma norma específica para a determinação de fim de vida das ferramentas multicortantes utilizadas no fresamento, este trabalho utilizará a norma ISO 3685/77 (1977), das ferramentas monocortantes que sugere a troca da ferramenta de aço rápido, metal duro ou cerâmicas quando um dos tipos de desgaste da ferramenta atingir os seguintes valores:

- *desgaste de flanco médio* (VB) atingir 0.3 mm.
- *desgaste de flanco máximo* (VB_{max}) atingir 0.7 mm.
- *profundidade máxima de cratera*, $KT = 0.06 + 0.3 f$, onde f é o avanço.
- se o *desgaste de entalhe* (VB_N) predominar, a norma recomenda a troca das ferramentas quando o VB_N atingir 1.0 mm.

O importante é salientar que estes valores são para testes de vida de ferramentas, e que em condições normais de usinagem, estes valores podem ser diferentes dos recomendados na Norma, pois eles dependem de vários fatores que variam para cada processo, tais como: rigidez da máquina ferramenta, tolerância dimensional requerida na peça, e do acabamento superficial desejado.

A Figura 2.7, ilustra os parâmetros utilizados para quantificar o desgaste em uma ferramenta de corte monocortante.

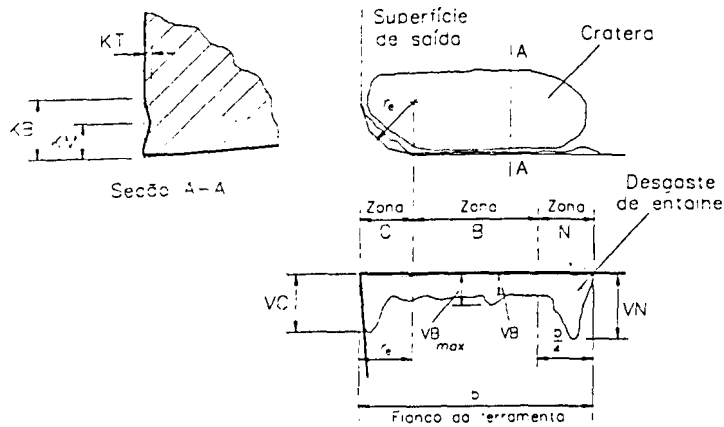


Fig. 2.7 - Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte.

Norma ISO 3685/77.

O desgaste das ferramentas cresce de uma maneira característica, como a curva da Figura 2.8, que apresenta a evolução do desgaste de flanco VB_{max} com o tempo de usinagem. Nesta curva é destacada a evolução do desgaste por regiões denominadas de região primária ou inicial, região secundária ou progressiva e a região terciária ou catastrófica, Smith (1987).

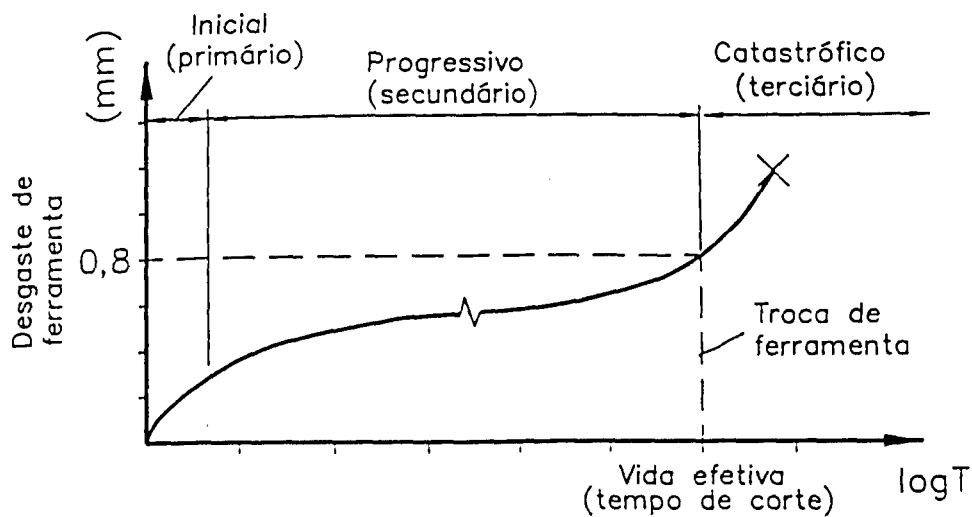


Fig. 2.8 - Regiões do desgaste de flanco de uma ferramenta com o tempo.

Smith(1989), apresentou uma justificativa para o surgimento destas regiões utilizando a própria evolução do desgaste das ferramentas de corte. Assim, região inicial é caracterizada pela fase de acerto das arestas cortantes ainda novas sobre a peça. Após um certo tempo de

usinagem o desgaste cresce rapidamente e entra na região secundária que tem uma evolução menos acentuada que a inicial justificada pela uniformidade que passa ter o contato das arestas cortante com a peça. Mas com o aumento do tempo de trabalho, o desgaste de flanco VBmax. torna a crescer gradativamente até atingir um valor próximo de 0.8 mm entrando assim, na região terciária que apresenta uma elevada taxa de crescimento do desgaste com o tempo, caracterizando a região denominada de catastrófica.

Nesta região, recomenda-se proceder a troca das ferramentas de corte devido estas apresentarem grandes possibilidades de quebra podendo danificar a peça usinada ou ainda acarretar grandes prejuízos na máquina de usinagem. Assim, dependendo do material a ser usinado ou do grau de dificuldade de usinabilidade da peça, é preferível realizar a troca das ferramentas antes mesmo de que elas atingem a região terciária ou catastrófica para a segurança do processo de usinagem.

2.4 - Integridade superficial.

A integridade superficial é utilizada para denotar as condições das superfícies usinadas e portanto ela descreve a qualidade dessas superfícies (Sousa, 1980). Na usinagem convencional a integridade superficial é o resultado da combinação do processo de deformação plástica e da propagação dos micro-sulcos (Sata, 1963 e Schaffer, 1988). A classificação de integridade superficial é apresentada na Figura 2.9. Norma ABNT 6405/85 (1985).

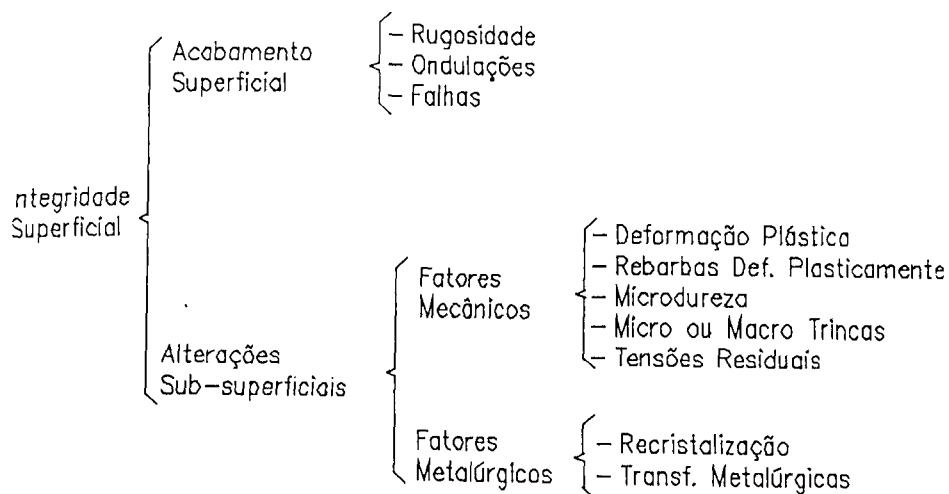


Fig. 2.9 - Classificação da Integridade Superficial nos processos de usinagem.

Estudos feitos por Nakayama et al (1966), relacionam o acabamento superficial de uma peça usinada com alguns parâmetros de usinagem: geometria da ferramenta de corte, geometria da peça, rigidez da máquina ferramenta e material da ferramenta. O elevado grau de desgaste numa ferramenta de corte contribui para o surgimento de lascamentos, quebras e trincas nas ferramentas que acabam comprometendo ainda mais o acabamento superficial da peça usinada, com o surgimento de sulcos indesejáveis ou até mesmo com o comprometimento da peça pela perda da tolerância dimensional (Machado e da Silva, 1988).

A Norma ABNT 6405/85 (1985), caracteriza o acabamento superficial através dos seguintes parâmetros:

- *parâmetros de amplitude* que relacionam os picos e os vales:

- *parâmetros de espaço* que relacionam o espaçamento com o desvio do perfil ao

longo da superfície:

- *parâmetros híbridos* que associa os dois parâmetros de amplitude e de espaço.

Entre os parâmetros normalizados (de Sousa, 1990), o mais utilizado para a determinação do estado da superfície é o parâmetro de amplitude que caracteriza o estado da superfície através da medição da rugosidade média (R_a) que mede os desvios dos picos e dos vales em relação a uma linha média e (R_{max}) que mede a altura máxima entre os picos e os vales das irregularidade.

CAPÍTULO 3

TÉCNICAS DE ANÁLISE DE SINAIS

A técnica de manutenção preditiva que utiliza a vibração mecânica oriunda do funcionamento da máquina para monitorar e caracterizar o seu estado, demonstra que na maioria das máquinas rotativas os defeitos implicam num aumento crescente dos níveis de vibrações das mesmas (Duarte, 1998) e que todos os níveis de vibração gerados estão intimamente relacionados com o histórico do processo da mesma, ou seja: pela análise destes sinais sempre pode-se obter informações a respeito do estado da máquina em estudo. Martin (1994).

A detecção dos níveis de vibração num processo de monitoramento qualquer é sempre feita através da utilização de sensores que podem ser do tipo piezoelétrico, ótico, indutivo, resistivo, entre outros, devidamente instalados no sistema monitorado conforme apresenta a Figura 3.1.

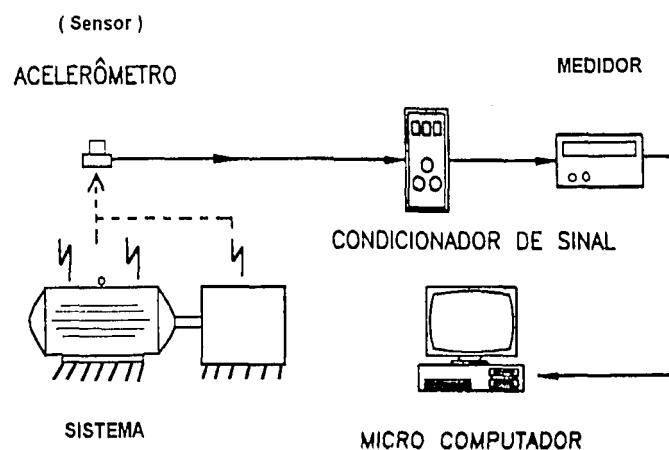


Fig. 3.1 - Diagrama simples de instrumentação.

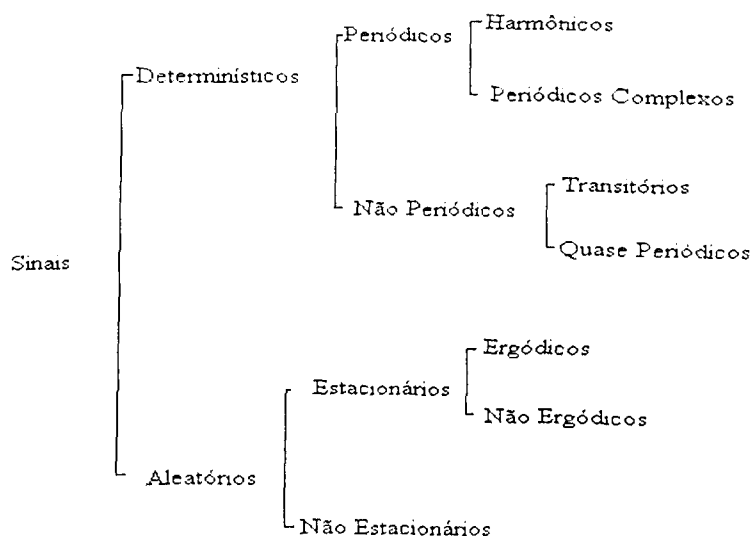
Geralmente os níveis de saída destes sensores são muito baixos (na ordem dos milivolts),

e contaminados por ruídos que são indesejáveis no processo de medição. Portanto para minimizar estes inconvenientes, os elementos sensores são acoplados aos chamados condicionadores de sinais, onde o sinal é amplificado, filtrado e calibrado. Somente após o condicionamento é que são enviados os sinais para os medidores que estão conectados aos sistemas de aquisição de dados para a armazenagem e análise dos mesmos.

3.1 - Fundamentos de Análise de Sinais.

A análise de um sinal pode ser feita tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência, sempre objetivando a estimativa de parâmetros estatísticos ou de características determinísticas associadas ao processo em questão (Fayolle, 1983).

Portanto, para proceder uma análise de um sinal deve-se primeiro determinar qual a melhor técnica a ser empregada e conhecer o tipo de sinal a ser analisado. No caso de fenômenos físicos com sinais dinâmicos os sinais podem ser classificados em:



Nesta classificação, os sinais determinísticos são aqueles que podem ser descritos completamente por relações matemáticas explícitas, podendo ser classificados em periódicos e

não periódicos. Posteriormente os sinais periódicos são classificados em harmônicos ou em periódicos complexos. Os sinais são ditos periódicos harmônicos quando estes podem ser definidos matematicamente por uma função variante do tempo.

Se os sinais, não podem ser descritos por uma relação matemática explícita, mas sim pela utilização de parâmetros ou de funções estatísticas, são chamados de aleatórios e estes podem ser Ergódicos e não Ergódicos. Entendendo-se por sinais aleatórios Ergódicos, aqueles em que o valor da média e o valor da função de auto-correlação calculados para amostras escolhidas arbitrariamente não apresentam valores com variações significativas.

Os parâmetros e as funções estatísticas mais utilizadas para representar um processo de sinais aleatórios são: média, média quadrática, variância, desvio padrão, coeficiente de Skewness, Kurtosis, fator de Crest, funções de densidade de probabilidade, funções de auto-correlação e as funções de densidade espectral, (Nassirpur e Wu, 1983 e Braun e Lenz, 1986).

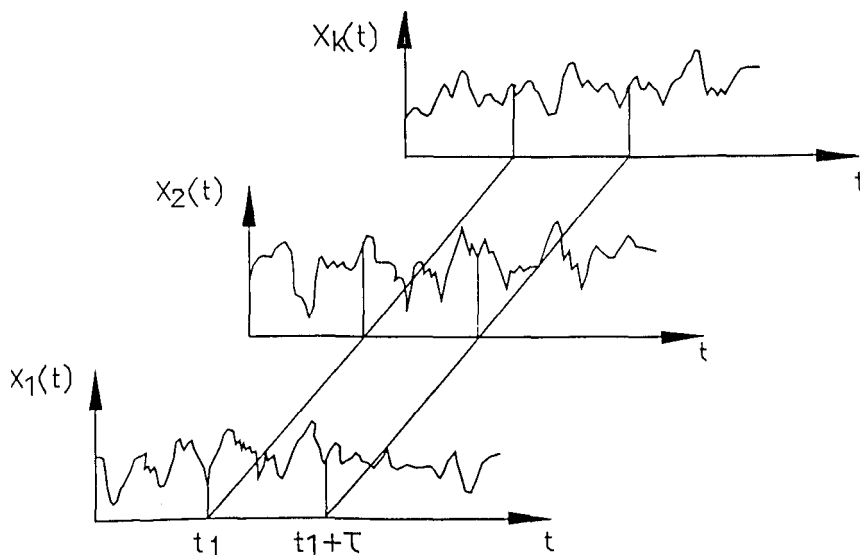


Fig. 3.2 - Exemplo de um processo aleatório estacionário.

Assim, o sinal aleatório é dito como sendo estacionário, se as propriedades estatísticas das amostras $x_1(t_1), x_2(t_1), \dots, x_k(t_1)$ com as amostras $x_1(t_1 + \tau), x_2(t_1 + \tau), \dots$

$x_k(t_1 + \tau)$ são invariantes com o tempo, conforme mostrado na Figura 3.2, ou seja: as propriedades estatísticas de x dependem apenas das amostras e de τ .

Mas, se ocorrer a invariância das propriedades estatísticas ao longo da própria amostra $x_k(t)$ dizemos que o processo é estacionário e ergódico e neste caso qualquer amostra pode ser usada para representar o processo (Bendat e Piersol, 1986).

Assim a média e a variância, calculadas pelas Equações 3.1 e 3.2 respectivamente, representam a tendência central e a dispersão da amostra.

$$\mu_k(x) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \int_0^N x(t) dt \quad (3.1)$$

$$\sigma_k^2(x) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N-1} \int_0^N (x_i - \mu_k(x))^2 dt \quad (3.2)$$

A média quadrática Equação 3.3, corresponde a uma indicação combinada da tendência central e da dispersão da amostra.

$$\psi_k^2(x) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k^2(t) \quad (3.3)$$

A periodicidade presente no sinal de uma amostra pode ser identificada através da função de auto-correlação Equação 3.4, a qual expressa a esperança do produto das amplitudes $x_k(t)$ associadas aos tempos t_1 e $t_{1-\tau}$ onde τ é o intervalo de tempo entre dois pontos da amostra conforme mostrado na Figura 3.3.

$$R_{xx}(t_1, t_{1+\tau}) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^N x_k(t_1) \cdot x_k(t_{1+\tau}) \quad (3.4)$$

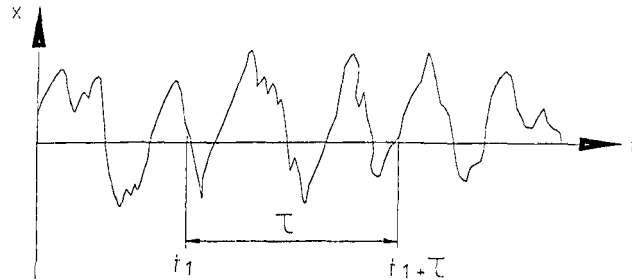


Fig. 3.3 - Intervalo entre dois pontos para o cálculo da função de auto-correlação.

Já a função de densidade espectral de potência, que indica a taxa de variação da média quadrática em função da periodicidade do sinal, é calculada pela aplicação da transformada de Fourier na função de auto-correlação e será abordada mais adiante no tópico sobre a análise espectral.

Para a definição dos parâmetros de Skewness e Kurtosis, que também são bons estimadores na análise de sinais aleatórios deve-se apresentar o conceito dos chamados momentos estatísticos de ordem q . Estes momentos são obtidos a partir da função de densidade de probabilidade da amostra e são calculados pela Equação 3.5 (Fayolle, 1983).

$$m_q = \int_{-\infty}^{\infty} x^q p(x) dx \quad (3.5)$$

O momento de ordem $q=1$ dado pela Equação 3.6, representa a média da variável aleatória x da amostra com função densidade de probabilidade $p(x)$.

$$m = m1 = \int_{-\infty}^{\infty} x p(x) dx \quad (3.6)$$

Com os momentos de ordem determinados, pode-se definir os momentos centrais de ordem q de acordo com a Equação 3.7.

$$mcq = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^q p(x) dx \quad (3.7)$$

Assim a variância da amostra pode ser determinada pela Equação 3.8, a qual corresponde ao momento central de ordem 2.

$$\sigma^2 = mc2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 p(x) dx \quad (3.8)$$

O desvio padrão do sinal da amostra é determinado pelo cálculo da raiz quadrada do momento central de ordem 2. Para amostras com média zero, o desvio padrão e o nível RMS são correlacionados pela Equação 3.9 (Braun, 1982).

$$\sigma^2 = RMS^2 - \mu^2 \quad \text{onde, } RMS = \sqrt{mc2} \quad (3.9)$$

Este parâmetro é usado para representar o desvio padrão das amplitudes em relação a amplitude média do sinal da amostragem.

Com os momentos centrais, podemos definir os chamados parâmetros de forma ou coeficientes de Skewness e de Kurtosis que são calculados a partir dos momentos centrais de ordem 2, 3 e 4. Estes parâmetros são representados pelas Equações 3.10 e 3.11.

$$\text{Skewness: } \gamma = \frac{mc^3}{(mc^2)^3} \quad (3.10)$$

$$\text{Kurtosis: } \beta = \frac{mc^4}{(mc^2)^4} \quad (3.11)$$

A função usada para relacionar os picos dos sinais no domínio do tempo com o nível de energia dos mesmos, é definida como sendo fator de Crest, dada pela Equação 3.12 (Braun, 1982).

$$Cf = \frac{X_{max}}{\sigma} \quad (3.12)$$

onde, X_{max} é o valor médio das amplitudes da amostra e σ é o desvio padrão da amostra.

De uma maneira geral, a distribuição de probabilidade de um sinal oriundo de um equipamento em bom estado de funcionamento tem uma distribuição normal (teorema do limite central) e o surgimento de uma falha incipiente pode ser caracterizada pelo surgimento de picos bem espaçados no histórico temporal do sinal, sendo que a frequência destes picos tende a aumentar com o aumento da gravidade da falha. Nestes casos, Kurtosis e o fator de Crest são bons indicadores da frequência de picos em um sinal. A Tabela 3.1 é utilizada para mostrar os valores de Kurtosis e de Crest para um sinal harmônico somado com um trem de pulsos com um período de repetição P_R .

Tabela 3.1 - Kurtosis e Crest como indicadores de picos em um sinal.

PERÍODO DE REPETIÇÃO: P_R	FUNÇÃO DE CREST	KURTOSIS
1	2	1.5
0,5	2	1
0,2	2,5	3,25
0,15	2,8	3,25
0,1	3,33	8,0
0,05	4,59	15,0
0,04	5,1	23,0

Em particular, demonstra-se que a Kurtosis de um sinal proveniente de uma máquina sem defeito se situa em torno do valor 3.0 (este valor é proveniente ao uso do teorema do limite central) e com o aparecimento de um defeito a Kurtosis tende a crescer, constituindo assim um bom parâmetro para se detectar defeitos ou falhas incipientes em máquinas rotativas (Martin, 1994). Portanto, com a aplicação da Kurtosis e do fator de Crest, pode-se determinar a existência da falha pontual, que ocasiona, por um curto período de tempo, um aumento dos níveis de vibração global no sistema.

3.2 - Análise no Domínio da Frequência

No domínio da frequência a análise dos sinais é feita através da utilização das chamadas funções de densidade espectrais (Braun, 1996). Estas funções são obtidas através da utilização da transformada de Fourier. Com estas funções, o espectro de frequência do sinal fica caracterizado podendo localizar as frequências naturais do sistema e as frequências associadas às partes girantes da máquina. Num sentido mais abrangente, esta aplicação em um sinal converte um

sinal do domínio do tempo $x(t)$, para o domínio da frequência $X(f)$ ou vice versa pela aplicação da Transformada Inversa de Fourier, tornando assim, mais fáceis os procedimentos de análise dos sinais no domínio do tempo ou no domínio da frequência.

Considerando que a função de auto-correlação $R_{xx}(f)$ exista, a determinação da função densidade espectral de potência $G_{xx}(f)$ é calculada a partir da Equação 3.13.

$$S_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(t) e^{-j 2 \pi f t} dt \quad (3.13)$$

Definindo $G_{xx}(f)$ como sendo $4 S_{xx}(f)$ no intervalo de $0 \leq f \leq \infty$ (Braun, 1996), obtêm-se a Equação 3.14, que traduz a função densidade espectral de potência.

$$G_{xx}(f) = 4 \int_0^{+\infty} R_{xx}(t) \cos 2 \pi f t dt \quad (3.14)$$

A análise espectral é provavelmente a técnica mais utilizada em análise de sinais porque além de traduzir a distribuição de energia do sinal com a frequência ela tem as seguintes características:

- Forte redução de dados. Por exemplo, uma função harmônica no domínio do tempo é representada por uma grande quantidade de pontos, enquanto que no domínio da frequência, bastam apenas três informações (a magnitude do termo cosseno, a magnitude do termo seno e a frequência).
- Algumas particularidades do mecanismo de geração do sinal são facilmente observáveis no domínio da frequência, tais como: frequências características dos mecanismos, ressonâncias do sistema mecânico, faixa de frequência na qual se concentra as vibrações, modulação do sinal em amplitude, etc. A Figura 3.4 mostra três formas típicas de sinais no tempo (I) e na frequência

(II), cujos mecanismos de geração são: a) choque em um sistema de um grau de liberdade; b) sinal quase harmônico com uma variação lenta de amplitude, decorrente de choques múltiplos ou batimento; e c) oscilação periódica e não harmônica, tipo de excitação comum em vários mecanismos, que resulta em picos nas frequências múltiplas de uma frequência fundamental.

- Relações entre entrada e saída podem ser facilmente avaliadas.
- Simples equipamentos de apoio como os geradores de sinais, filtros, analisadores espectrais e ferramentas matemáticas versáteis de análise de sinais.

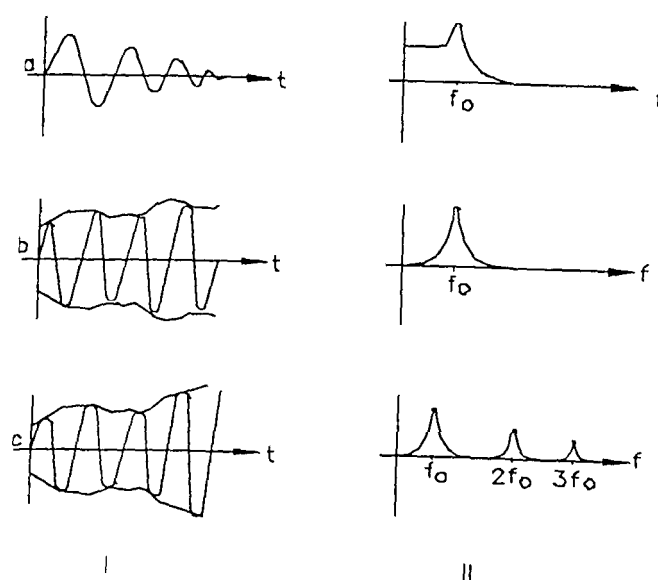


Figura 3.4 - Representação das formas típicas de sinais no:

(I) domínio do tempo e (II) domínio da frequência.

Apesar das múltiplas vantagens apresentadas pela análise no domínio da frequência, deve-se ter em mente que ao se utilizar a análise espectral trabalha-se, via de regra, com sinais finitos e que a transformação de sinais finitos para o domínio da frequência, decompõe o sinal em componentes que ocupam uma certa região de frequências, implicando numa incerteza sobre a frequência real do sinal analisado.

3.2.1 - A DFT e a FFT.

A grande maioria dos procedimentos de análise de sinais no domínio da frequência com sinais discretizados num conversor A/D, estão fundamentados na aplicação direta da transformada discreta de Fourier (DFT) com a aplicação da transformada rápida de Fourier (FFT). A FFT é um dos procedimentos computacionais mais eficientes para a avaliação da DFT de sinais digitais. Portanto quando trabalha-se com a DFT os mesmos cuidados básicos da aplicação da FFT devem ser tomados com relação ao número de pontos que estão incorporados no procedimento de cálculo da transformada direta.

O comprimento dos vetores $x(i)$ no domínio do tempo e $X(k)$ no domínio da frequência, são normalmente uma potência de 2, portanto sendo necessário, em alguns casos a adição de zeros no final do vetor para atender a esta exigência.

A frequência correspondente do índice k de $X(k)$ é dada por:

$$f = \frac{k-1}{T}$$

e, a resolução em frequência é dada por:

$$\Delta f = \frac{F_{\text{AMOSTRAGEM}}}{N} = \frac{1}{N \cdot \Delta t}$$

onde $N \cdot \Delta t$ é o tempo total de aquisição de dados.

Para o cálculo da FFT assume-se que o sinal representado na janela de amostragem é

periódico, com frequência fundamental igual a Δf , ou seja: o algoritmo da FFT na verdade calcula os $N/2$ ($\pm N/2$ na notação complexa) primeiros termos da série de Fourier do sinal periódico amostrado na janela.

A parte real de $X(k)$ é a metade da amplitude do k -ésimo termo em cosseno da série de Fourier do sinal $x(k)$, sendo que $X(1)$ é um valor real e que representa o valor médio do sinal (nível DC).

A parte imaginária de $X(k)$ é a metade da amplitude do k -ésimo termo em seno da série de Fourier do sinal $x(k)$.

Definindo, $x_p(-t) = x_p(t)$ como um sinal par e $x_i(-t) = -x_i(t)$ como sinal ímpar, pode-se representar o sinal $x(t)$ por uma soma de sinais pares e ímpares ou seja :

$x(t) = x_p(t) + x_i(t)$. Sabendo que a integral de um sinal periódico ímpar é nula e que o produto de um sinal par-ímpar é ímpar, par-par é par e ímpar-ímpar é ímpar, podemos concluir que a DFT de um sinal par será constituída apenas de termos cossenos (pois o cosseno é uma função par) e que a DFT de um sinal ímpar é composta por apenas termos imaginários, visto que a função seno é ímpar.

3.2.2 - Análise de Sinais Periódicos.

A maioria das aplicações das técnicas de análise de sinais, são feitas nas máquinas rotativas, devido ao fato dos sinais serem predominantemente periódicos.

Uma das principais características da análise via Fourier é a capacidade de identificar fenômenos oscilatórios mas, quando utilizamos a DFT para sinais periódicos, ocorre um problema devido ao fato de que a DFT de um sinal harmônico pode ser diferente de zero sobre a

maior parte do domínio da frequência, caracterizando assim o chamado vazamento ou *leakage* e isto acaba provocando uma redução de amplitude no espectro do sinal.

Este vazamento pode ser reduzido pela utilização de janelas temporais, que têm o efeito de anular o valor dos dados nos seus extremos para diminuir o efeito de descontinuidades no início e no final dos dados. Na realidade pode-se dizer que o vazamento está relacionado ao problema da baixa convergência da Série Fourier quando se tem existência de descontinuidade nos dados. A janela temporal mais popular é a janela Hanning que no domínio do tempo é dada pela Equação 3.15.

$$W_H(k) = \sin^2\left(\frac{i \cdot \pi}{N}\right) \quad (3.15)$$

3.2.3 - Análise de Sinais Aleatórios.

A aplicação das transformadas de Fourier nos sinais aleatórios possibilita utilizar a função Densidade Espectral de Potência (DEP) para a estimativa de parâmetros que descrevem os sinais aleatórios. A função usualmente utilizada para estimar a DEP, quando tem-se N amostras $x(i)$ de uma seqüência obtida de um sinal amostrado com período T de distribuição normal com média zero e variância σ é dada pela Equação 3.16 (Braun, 1996).

$$\hat{S}(k) = \frac{T}{N} |X(k)|^2 = (A^2 + B^2) \quad (3.16)$$

onde A e B , denotam as partes reais e imaginária de X que possui implícito o índice de frequência k , além de serem funções lineares de uma variável Gaussiana e conseqüentemente, tem uma

distribuição Gaussiana. Uma vez que as distribuições não são correlacionadas a sua soma irá ter uma distribuição qui-quadrado χ^2_v , onde v é o número de graus de liberdade da distribuição que é o único fator que influencia o desvio padrão da DEP e assim, a única maneira de aumentar o número de graus de liberdade v deste estimador é utilizar o recurso das janelas temporais e aumentar o número de médias espectrais.

O alisamento (*smoothing*) de sinais no domínio do tempo é obtido passando o sinal através de um filtro passa baixa apropriado ou, de maneira equivalente, através de uma convolução com a função resposta ao impulso unitário do filtro. O alisamento da DEP no domínio da frequência é feita de uma maneira similar ou através da convolução com uma função de alisamento apropriada no domínio da frequência. Estas funções são chamadas de janelas em frequência $W(k)$, e a operação discreta de alisamento é realizada com a Equação 3.17.

$$\tilde{S}(k) = \hat{S}(k) \otimes W(k) = \sum_1^k S(1).W(1-k) \quad (3.17)$$

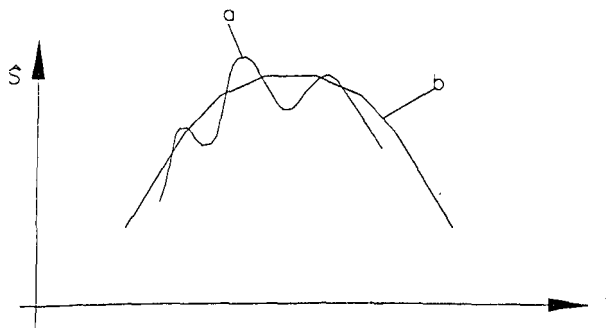


Fig. 3.5 - Efeito do alisamento sobre a DEP.

(a) Sinal sem alisamento e (b) sinal alisado

O alisamento em qualquer função sempre afeta a resolução do sinal resultante e este procedimento na função DEP irá implicar também num decréscimo da resolução em frequência do sinal. Um outro efeito indesejável do alisamento em um sinal pode ser observado na Figura 3.5, que é a polarização *bias* dos valores estimados, implicando em valores subestimados para os picos do espectro e valores superestimados para as regiões fora dos picos.

Uma das janelas mais utilizadas para alisamento de espectro é a janela conhecida por Tukey, dada pela Equação 3.18.

$$\tilde{S}(k) = 0.25\hat{S}(k - 1) + 0.5\hat{S}(k) + 0.25\hat{S}(k + 1) \quad (3.18)$$

3.3 - Técnicas de Análise no Domínio do Tempo.

Devido à semelhança dos sinais de vibração dos processos de usinagem aos sinais provocados por defeitos pontuais em máquinas rotativas, será utilizado o recurso das técnicas da análise no domínio do tempo de manutenção preditiva para caracterizar o monitoramento de usinagem por fresamento.

Geralmente, as fontes de vibração de uma máquina são produzidas quando um de seus componentes girantes possui uma falha pontual (rolamento estragado, dente de engrenagem desgastado, ferramentas quebradas, etc.). Observa-se que juntamente com o sinal oriundo do defeito, o sensor também capta ecos, ruídos e sinais provenientes de outras fontes de vibração. A combinação de todos estes fatores podem mascarar completamente o espectro de vibração, tornando necessário a utilização de técnicas de análise de sinais mais sofisticadas para que a fonte da vibração possa ser identificada. A técnica de análise no domínio do tempo (TADT) se

destaca, devido à sua capacidade de detectar os defeitos com características de periodicidade, comumente encontrados em máquinas e equipamentos rotativos.

3.3.1- Médias no Domínio do Tempo

A média no Domínio do Tempo (TDA) é calculada pela Equação 3.19 e consiste no cálculo da média de N segmentos de dados periódicos conforme apresentados na Figura 3.6.

$$y(iT) = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} x(iT - rNT) \quad (3.19)$$

Ou na forma recursiva, Equação 3.20

$$y_r(iT) = y_{r-1}(iT) + \frac{(x_r(iT) - y_{r-1}(iT))}{r} \quad (3.20)$$

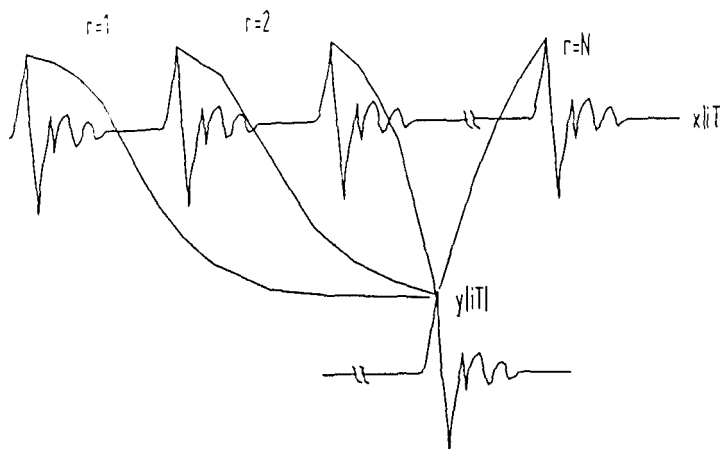


Fig. 3.6 - Média no domínio do tempo.

Assim, esta média no domínio do tempo pode ser vista como um filtro linear, onde N é a variável e Y a saída do sinal do filtro. A Figura 3.7 mostra o efeito ao utilizar a média no domínio do tempo em um sinal síncrono e em um sinal assíncrono.

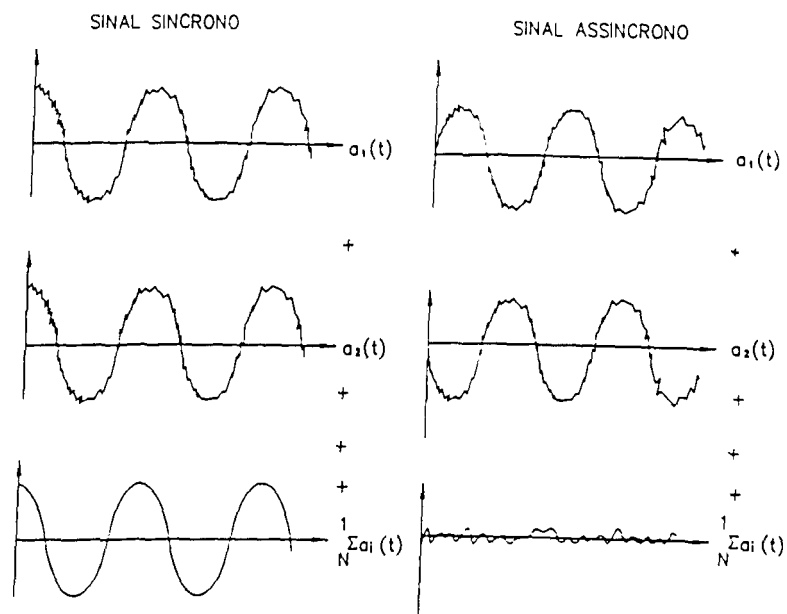


Fig. 3.7 - Efeito da média no domínio do tempo no sinal síncrono e no sinal assíncrono.

Assim, com a utilização das médias no domínio do tempo, este procedimento permite reduzir o nível de ruído nos sinais.

3.3.2 - Transformada de Hilbert.

Um sinal causal pode ser dividido em uma componente par e uma componente ímpar, as quais não são independentes. A relação existente entre estas componentes par e ímpar de um sinal causal é conhecida como uma transformada de Hilbert. Assim, para um sinal causal real, a componente real de sua transformada de Fourier é par e a componente imaginária é ímpar e portanto elas estão relacionadas por uma transformada de Hilbert.

A transformada de Hilbert é uma função que mapeia um espaço vetorial sobre ele mesmo (não há mudança de domínio) (Braun e Lenz, 1996). A transformada de Hilbert e sua inversa são definidas respectivamente pelas Equações 3.21 e 3.22.

$$H\{x(t)\} = \tilde{x}(t) = \frac{1}{\pi} x(t) \otimes \frac{1}{t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(t')}{t-t'} dt' \quad (3.21)$$

$$H^{-1}\{\tilde{x}(t)\} = x(t) = -\frac{1}{\pi} \tilde{x}(t) \otimes \frac{1}{t} = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\tilde{x}(t')}{t-t'} dt' \quad (3.22)$$

Ambas as funções são definidas do domínio do tempo.

A Equação 3.23 representa uma função que é chamada de sinal analítico, ou parte analítica de $x(t)$. Observa-se que um sinal analítico é complexo com sua parte imaginária sendo a transformada de Hilbert de sua parte real.

$$x_a(t) = x(t) + j\tilde{x}(t) \quad (3.23)$$

Dentre as propriedades da transformada de Hilbert, a de maior interesse é a propriedade que está relacionada com a modulação de sinais e um sinal modulado, pode ser expresso pela Equação 3.24:

$$y(t) = \text{Real}\{A(t)e^{j\omega t}\} \quad (3.24)$$

onde, a amplitude $A(t)$ e o ângulo de fase instantâneo $\varphi(t)$ são funções do tempo.

A frequência instantânea do sinal é definida pela Equação 3.25.

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \times \frac{d(\varphi t)}{dt} \quad (3.25)$$

Se $y(t)$ contém somente frequências positivas, ele será um sinal analítico (Bendat e Piersol, 1986). A expressão matemática para o sinal analítico correspondente a uma modulação de amplitude é dado pela Equação 3.26.

$$y_a(t) = \text{Real} \left\{ A(t) e^{j(2\pi f_0 t + b \sin(2\pi f_m t))} \right\} \quad (3.26)$$

onde: b é o desvio máximo da fase e f_0 é a frequência da portadora.

A fase instantânea é calculada pela Equação 3.27.

$$\varphi(t) = 2\pi f_0 t + \sin(2\pi f_m t) \quad (3.27)$$

Assim, a principal aplicação da transformada de Hilbert está na demodulação de sinais do tipo $A(t)e^{j\varphi(t)}$, que podem ser representados pela parte real de uma função analítica e um sinal modulado $x_a(t)$, a demodulação é feita de acordo com os seguintes passos:

1. Calcula-se a transformada de Hilbert.
2. Decompõe-se o sinal analítico em suas componentes, amplitude e fase.
3. Multiplica-se $x_a(t)$ por $e^{-j\varphi(t)}$ para remover a frequência da portadora f_0 . A fase resultante é a fase do sinal de modulação $\varphi_m(t)$.
4. Trabalhando com a equação 3.26 pode-se obter a frequência de modulação $f_m(t)$.

3.3.3 - Análise Cepstral

A análise Cepstral pode ser usada como ferramenta na detecção de periodicidade em um espectro como por exemplo: famílias de harmônicos com espaçamento uniforme. A utilização de uma escala logarítmica enfatiza a estrutura harmônica do espectro, reduzindo a influência dos diversos caminhos de transmissão (e respectivos ecos) existentes entre a fonte do sinal e o ponto de medição do mesmo. Existem várias maneiras de se definir o Cepstrum, mas a mais comum é a dada pela Equação 3.28.

$$C(t) = \left| \mathfrak{F} \left\{ \log_{10} F_{xx}(f) \right\} \right|^2 \quad (3.28)$$

onde, $F_{xx}(f)$ representa a função espectral de potencia e \mathfrak{F} a transformada de Fourier.

Defeitos típicos como os das engrenagens podem ser caracterizados por um espectro composto pelas frequências de engrenamento (e suas harmônicas) em conjunto com uma família de bandas laterais, provenientes de modulações de amplitude e frequência devido à pequenas

variações na linha de contato do engrenamento. Estas modulações tendem a resultar num espectro em frequência bastante rico.

O Cepstrum além de ser uma ferramenta que ajuda a interpretar o espectro em frequência, em particular com relação às famílias de bandas laterais de uma frequência central, possui a capacidade de detectar ecos ou batimentos (Braun e Lenz, 1986).

Devido ao fato de que a componente Cepstral de uma família de bandas laterais ser correspondente a uma média de todas as suas componentes sua aplicação é pouco afetada com respeito ao caminho de transmissão do sinal, visto que pequenas mudanças no posicionamento de um acelerômetro pode ter grande influência na função de transferência e, conseqüentemente, mascarar completamente o nível do sinal em uma dada frequência específica.

Assim, com a utilização da transformada de Hilbert ou com a análise Cepstral pode-se demodular o sinal composto, visto que o sinal captado pelo sensor é modulado pela resposta impulsiva do sistema, devido às características de transmissão e da periodicidade da falha. Assim, com a utilização da análise Cepstral, pode-se detectar e eliminar as reflexões múltiplas que resultam em ecos sobrepostos ao sinal principal.

3.3.4 -Técnica do Envelope.

A aplicação da técnica do envelope é feita com o propósito de detectar defeitos que se manifestam nos modos de ressonância nas altas frequências e sua aplicação é feita conforme mostra a Figura 3.8, do seguinte modo (Braun, 1996):

I - O sinal de vibração no tempo é medido na superfície de um mancal;

II - O espectro de frequência correspondente ao sinal do primeiro passo é obtido pelo uso da transformada de Fourier. O aumento do nível numa particular faixa de frequência, é detectada quando uma ressonância estrutural é excitada por uma falha.

III - O espectro de frequência é extraído por um filtro passa banda ao redor da faixa de frequência detectada no passo II. Este espectro contém a ressonância estrutural que pode ter sido excitada pelo impacto produzido por uma ou mais falhas internas do sistema.

IV - O sinal no tempo correspondente ao espectro do passo III é que contém as frequências de ressonância que são moduladas pela frequência de impactos.

V - O sinal do tempo do passo IV é então retificado $|x(t)|$ e abrandado por um detetor de nível RMS para produzir o envelope do sinal no tempo. Consequentemente, o envelope contém somente as componentes de frequência de baixa modulação relacionadas com as razões de impacto.

VI - A análise do espectro do envelope nas baixas frequências, determina as frequências de impacto.

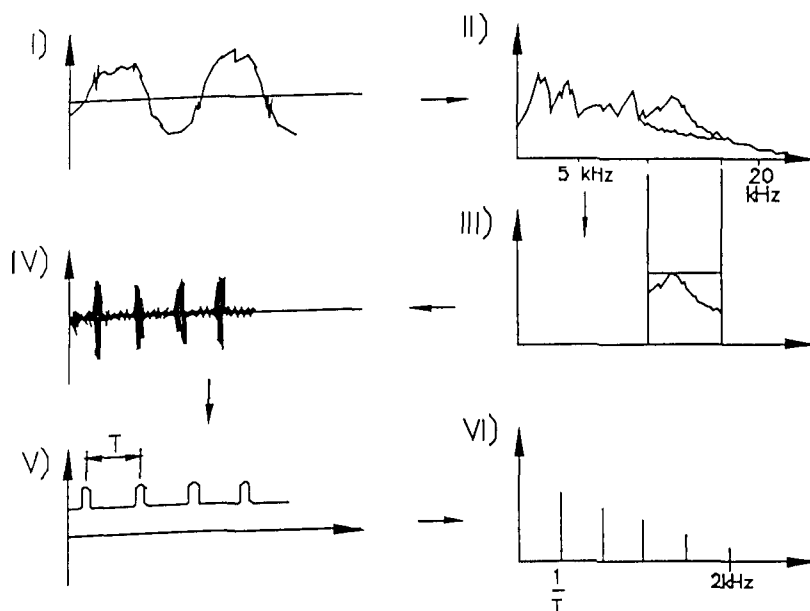


Fig. 3.8 - Esquema da Técnica do Envelope.

O único cuidado que se deve ter ao utilizar esta técnica é o fato de que a frequência do sinal na alta frequência dobra devido ao módulo aplicado sobre $x(t)$. portanto um filtro anti-aliasing deve ser aplicado ao procedimento.

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DA FRESADORA

A aplicação da vibração mecânica como meio de monitoramento na máquina fresadora CNC modelo INTERACT 4 de 15 KW da ROMI requer um conhecimento prévio do seu comportamento dinâmico para determinar os melhores locais para a instalação dos acelerômetros visto que esta máquina, apresenta um comportamento dinâmico bastante diferente das demais máquinas de usinagem, pois a variação da geometria física ou seja o deslocamento da mesa de trabalho e do eixo porta fresa durante o processo de usinagem alteram de maneira significativa as suas propriedades dinâmicas (de Sousa et al, 1997).

Este fato foi comprovado através de uma análise de sensibilidade realizada na estrutura mecânica da máquina fresadora, através da utilização de uma técnica experimental de análise de sinais SISO (Single Input and Single Output) (Ewins, 1984) no domínio da frequência.

A análise de sensibilidade foi baseada nas variações observadas nas curvas das Funções Resposta em Frequência (FRF) devido às variações na geometria da fresadora, ou seja: variações na altura do porta fresa e na posição longitudinal da mesa de trabalho. A excitação utilizada foi do tipo impulsiva e o ponto escolhido foi a fresa, visto que este ponto pode ser caracterizado como sendo o principal elemento gerador de vibrações mecânicas durante o processo de usinagem devido ao desgaste da ferramenta. As FRF foram estimadas utilizando o estimador H1 apresentado no Anexo.

Como não se conhecia, inicialmente, nada a respeito do comportamento dinâmico da máquina sob estudo, foi feito um mapeamento de 80 locais, respeitando a simetria da estrutura, dando-se prioridade aos locais de fácil acesso para a colocação dos acelerômetros. Após a

estimativa das Funções Respostas em Frequência (FRF), foi verificado que alguns locais mapeados apresentavam características bastante semelhantes, o que permitiu reduzir o número de locais analisados para os 29 locais de medição mostrados na Figura 4.1.

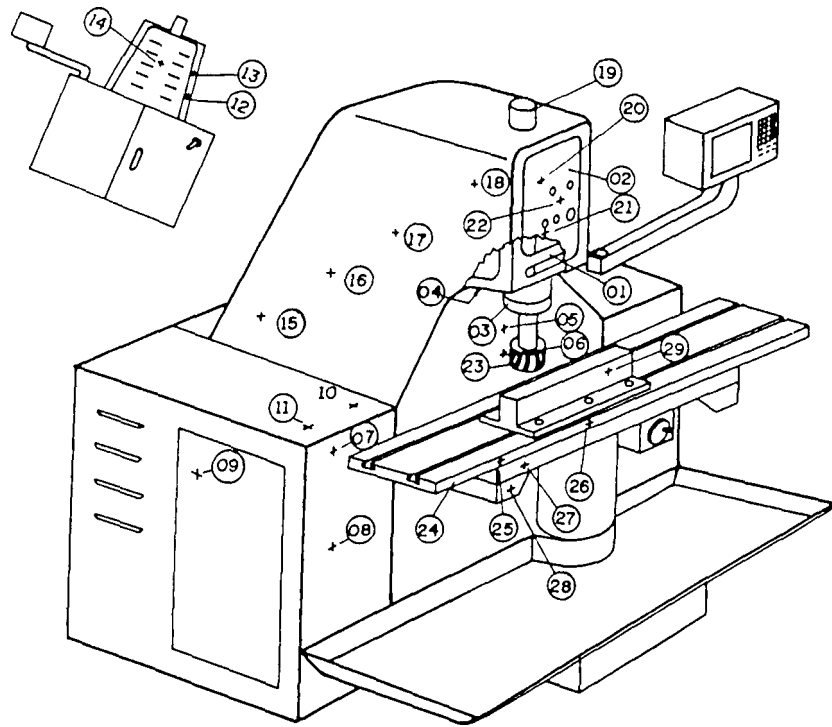


Fig. 4.1 - Locais na fresadora onde foram medidas as FRF.

4.1 - Procedimento experimental de obtenção das Funções Resposta em Frequência.

As Funções Resposta em Frequência utilizadas para o estudo do comportamento dinâmico da fresadora foram determinadas experimentalmente conforme mostrado na Figura 4.2, onde a instrumentação utilizada consistiu de: um excitador composto por um ariete de alumínio (100 mm de comprimento por 20 mm de diâmetro) com uma célula de força piezoelétrica 8200 da B&K, cinco acelerômetros piezoelétricos 4367 da B&K, seis pré-amplificadores (2635 da B&K) com filtros ajustados para delimitar a frequência de corte do

senal em 10 kHz. uma placa de aquisição de sinais e um microcomputador com aplicativos de análise de sinais.

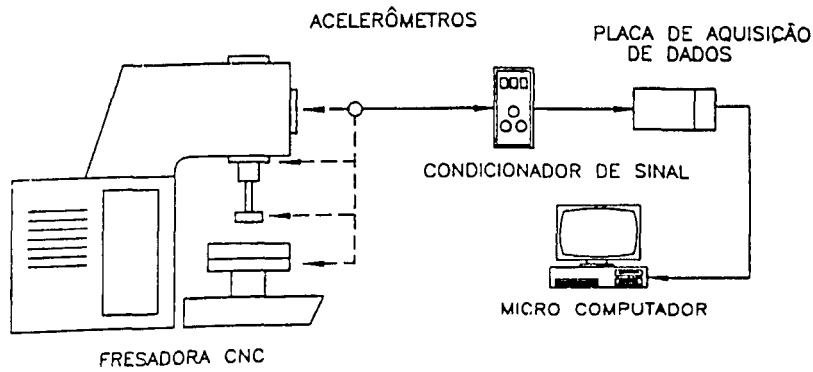


Fig. 4.2 - Diagrama da instrumentação para obtenção das FRF.

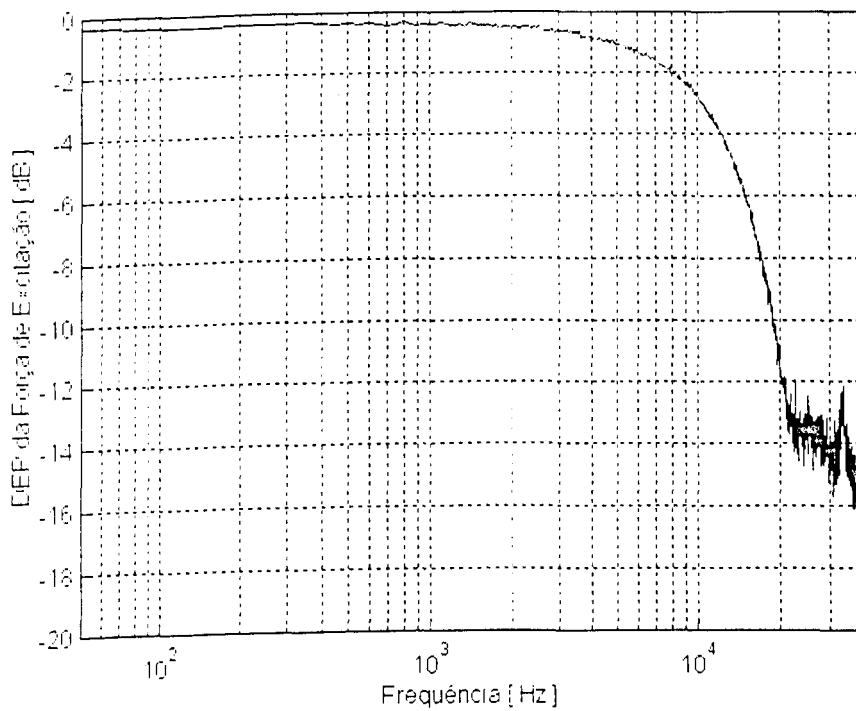


Fig. 4.3 - Densidade Espectral de Potência da força de excitação.

A Figura 4.3 mostra o espectro de potência da força de excitação onde pode-se observar que com o ariete consegue-se excitar a faixa de frequência sob análise (0 a 12 kHz).

Todas as FRF experimentais foram determinadas com a medições de 30 blocos com 4096 pontos cada de dados de aceleração com uma frequência de amostragem de 24 kHz.

Após a análise das curvas das Funções Respostas em Frequência dos 29 locais escolhidos, observou-se que as mesmas poderiam ser representadas pelas FRF dos locais (01), (14), (20), (23) e (24), devido apresentarem comportamentos semelhantes caracterizando assim, locais interessantes sob o aspecto da instalação dos acelerômetros para monitorarem o processo de fresamento.

A influência da posição da mesa de trabalho e do eixo porta fresa durante o monitoramento do fresamento, foi analisada através da obtenção de novas FRF com as alterações da posição da mesa de trabalho e do eixo porta fresa da fresadora. As alterações estudadas foram as seguintes: posição (A), mesa de trabalho na posição central da máquina e eixo porta fresa na posição mínima de avanço, posição considerada como de referência; posição (B), mesa de trabalho deslocada de 500 mm na direção longitudinal com o eixo porta fresa mantido na posição mínima de avanço e a posição (C), com a mesa de trabalho na posição central e com o eixo porta fresa 50 mm de avanço no sentido vertical.

A Figura 4.4 mostra as FRF (dB, ref. 1) pontuais da fresa, na banda de 500 a 4000 Hz, para as três condições estudadas: posição de referência (.....), deslocamento da mesa de trabalho de 500 mm na direção longitudinal (—) e deslocamento do porta fresa de 50 mm na direção vertical (——).

Observa-se na Figura 4.4 que as mudanças na geometria do sistema têm grande influência sobre as frequências naturais, os fatores de amortecimento modais e nos próprios modos de vibração do sistema, visto a grande variação observada nas amplitudes das FRF. A alteração observada nas nove primeiras frequências naturais da fresadora pode ser visualizada na Tabela 4.1, onde pode-se ver o quanto a alteração da mesa de trabalho mudou os valores das frequências naturais mais baixas (as 4 primeiras frequências naturais) e como que a alteração do eixo porta

fresa alterou os valores das frequências naturais mais altas do sistema.

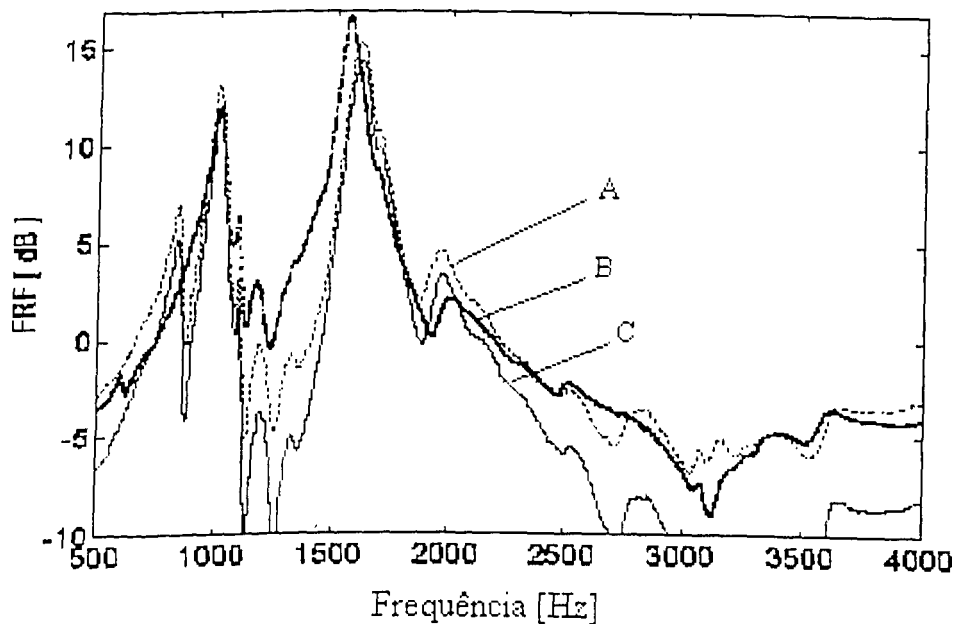


Fig. 4.4 - FRF pontuais da fresa na banda de 500 a 4000 Hz. (.....), posição de referência: (—), deslocamento da mesa de trabalho de 500 mm na direção longitudinal e (—), deslocamento do porta fresa de 50 mm na direção vertical.

Tabela 4.1 - Variação das frequências naturais em função das condições de ensaio.

Freq. (Hz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Posição (A)	829	1007	1194	1191	1613	1975	2816	3167	3377
Posição (B)	591	1016	1096	1179	1542	1987	2524	3062	3413
Posição (C)	841	1005	1095	1185	1320	1613	1963	2513	2828

Da análise da Figura 4.4 e da Tabela 4.1, pode-se observar a principal dificuldade da utilização dos sinais de vibração para o monitoramento do processo de fresamento. As modificações das FRF mostram que os níveis de vibração medidos num ponto da fresadora são fortemente dependentes da posição da mesa de trabalho e do porta fresa. Isto implica que podem ocorrer situações em que o aumento do desgaste das ferramentas resultem em níveis de vibrações

mais baixos, bastando para isto que os harmônicos da excitação coincidam ou não com as regiões de ressonância do sistema. Portanto, para estudar se os sinais de vibrações podem ser utilizados para fins de monitoramento torna-se necessário, primeiramente, identificar os pontos do sistema cujas FRF sejam menos sensíveis às modificações na geometria do sistema.

Para facilitar a comparação dos espectros de energia dos locais (01), (14), (20), (23) e (24), com relação à alteração da posição da mesa de trabalho e do eixo porta fresa, as FRF foram analisadas em banda de 1/3 de oitava.

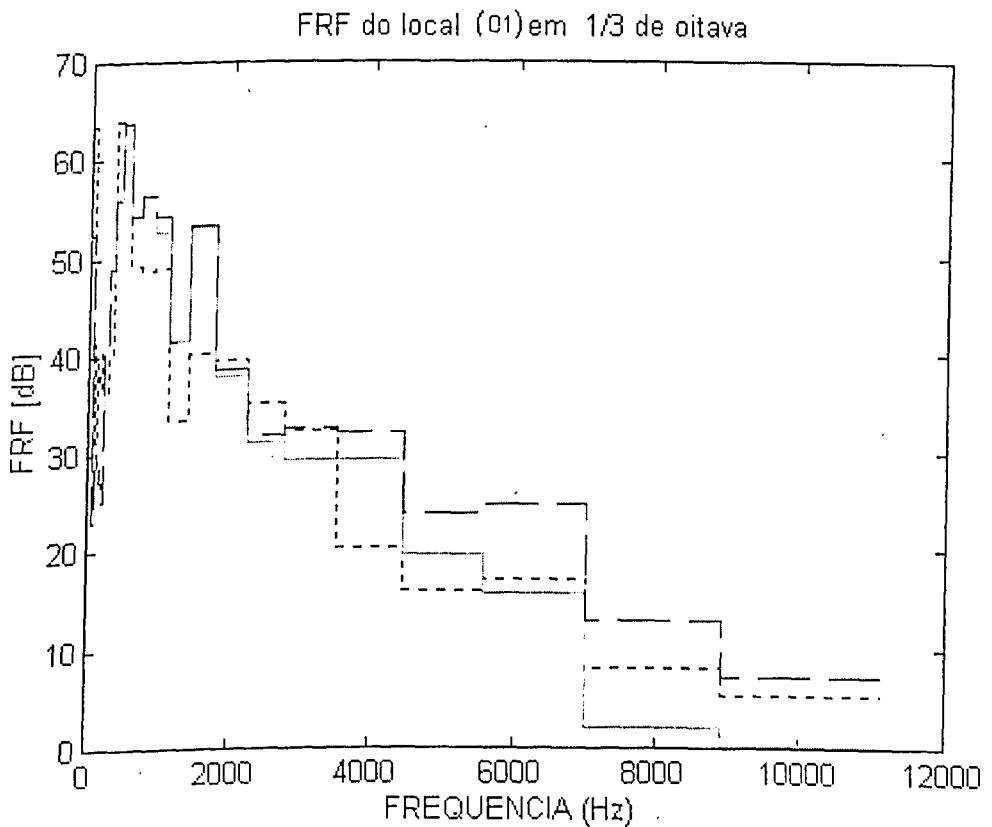


Fig. 4.5 - FRF do mancal: posição de referência (—), deslocamento da mesa de trabalho (····) e deslocamento do porta fresa (-·-·-).

A Figura 4.5, mostra o espectro em frequência do local (01) pertencente ao mancal inferior do eixo porta fresa. Uma vez que este ponto está localizado numa parte rígida da estrutura e está mais próximo da fresa, este tem uma maior sensibilidade às alterações da posição

do eixo porta fresa do que na alteração da posição da mesa de trabalho e isto pode ser visto nas frequências mais altas (a partir de 1800 Hz).

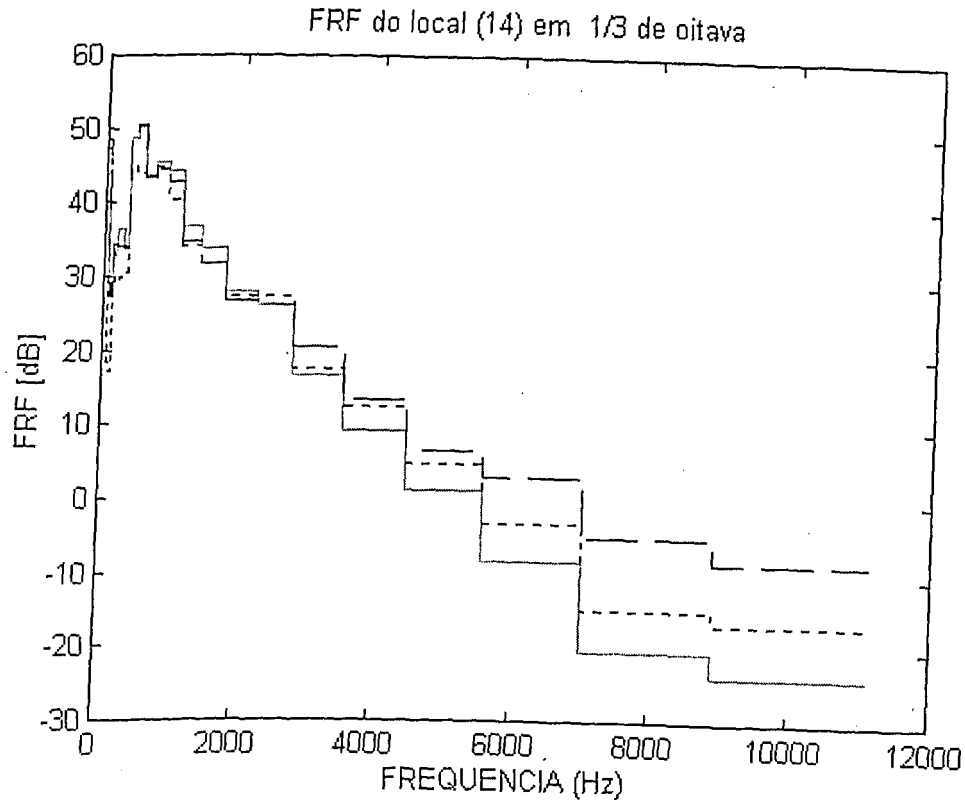


Fig. 4.6 - FRF da tampa traseira: posição de referência (—), deslocamento da mesa de trabalho (·····) e deslocamento do porta fresa (----).

Na Figura 4.6, pode-se observar o espectro em frequência do local (14), situado na estrutura de proteção da máquina (tampa traseira), local que tem uma sensibilidade menor nas baixas e nas médias frequências (região de 65 Hz a 5000 Hz) tanto para a variação de posição da mesa de trabalho como também na posição do eixo porta fresa. Deve-se ressaltar, que estudos preliminares mostraram que a região do espectro mais sensível ao desgaste das ferramentas se situa entre 0 e 2000 Hz.

Mesmo apresentando pequena sensibilidade à variações da posição da mesa de trabalho e

do eixo porta fresa, condição que o tornaria ideal para colocação dos acelerômetros de monitoramento, este local não deve ser utilizado para fins de monitoramento devido ao fato de que este ponto apresenta pequena sensibilidade à variações da excitação na fresa. Isto pode ser justificado pela distância que este ponto se encontra da fresa somado ao fato de que este ponto e o ponto da excitação não fazem parte da mesma peça, existindo um grande número de conexões entre eles.

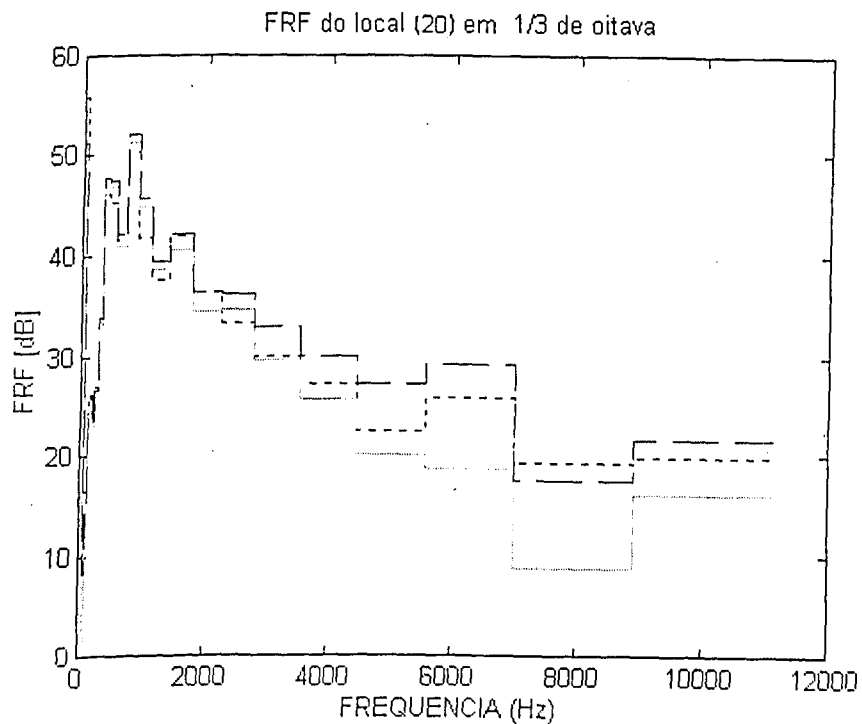


Fig. 4.7 - FRF da tampa frontal: posição de referência (—), deslocamento da mesa de trabalho (·····) e deslocamento do porta fresa (- - -).

A Figura 4.7 mostra o espectro em frequência do local (20) situado na tampa frontal do painel de controle da fresadora.

Através da análise da Figura 4.7, observa-se que a região de frequência superior a 1800 Hz o local 20, apresenta comportamento semelhante ao do local 01 mas devido estar

localizado sobre uma tampa de proteção, ele apresenta menor rigidez que o mancal. Assim, ele tem menor sensibilidade à variação na posição da mesa de trabalho e do eixo porta fresa nas frequências mais baixas.

A Figura 4.8, mostra o espectro em frequência do local (24), mesa de trabalho da fresadora, quando esta é submetida as três condições de variação de posição.

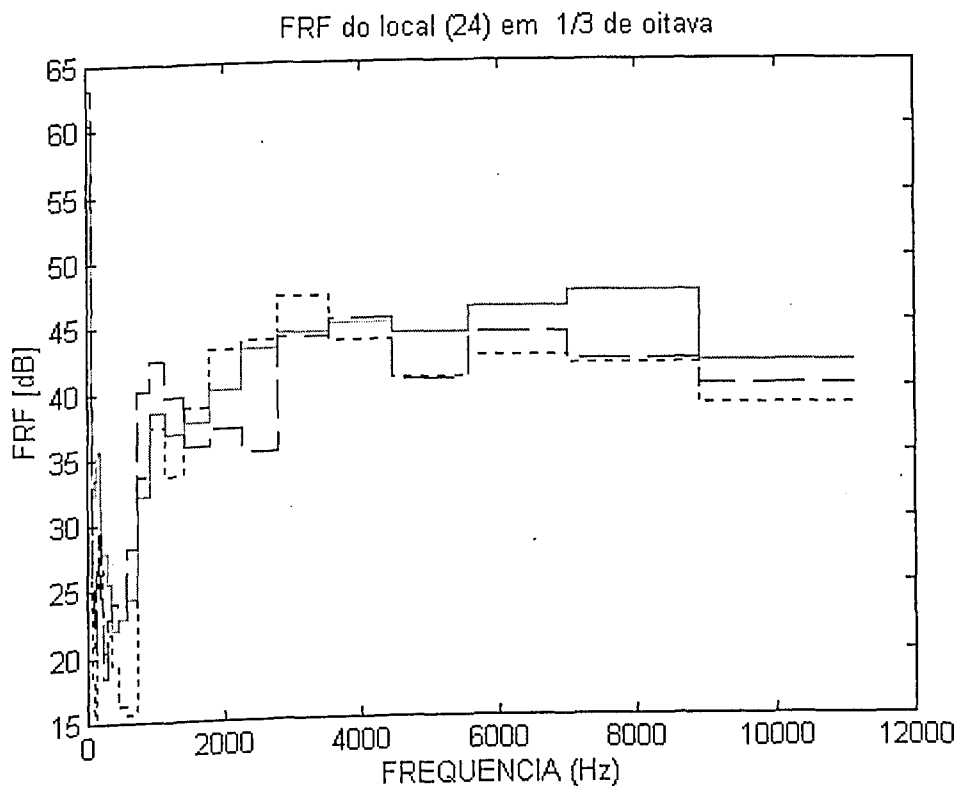


Fig. 4.8 - FRF da mesa de trabalho: posição de referência (—), deslocamento da mesa de trabalho (.....) e deslocamento do porta fresa (----).

Na Figura 4.8 é possível detectar que nas frequências mais baixas as FRF são mais sensíveis do que nas frequências acima de 800 Hz. Isto pode ser explicado pela grande massa inercial que a mesa de trabalho possui. Como era esperado, nos pontos sobre a mesa de trabalho as FRF são mais sensíveis às modificações geométricas do sistema, sendo pouco indicados para

fins de monitoramento de desgaste de ferramenta. Cabe ressaltar que para a obtenção das FRF dos pontos localizados na mesa de trabalho a excitação era aplicada na peça, de acordo com o princípio da ação e reação.

Na Figura 4.9 está mostrado o espectro em frequência da fresa, local (23), onde foi feita a excitação da estrutura mecânica fresadora para a obtenção das FRF da máquina sob estudo.

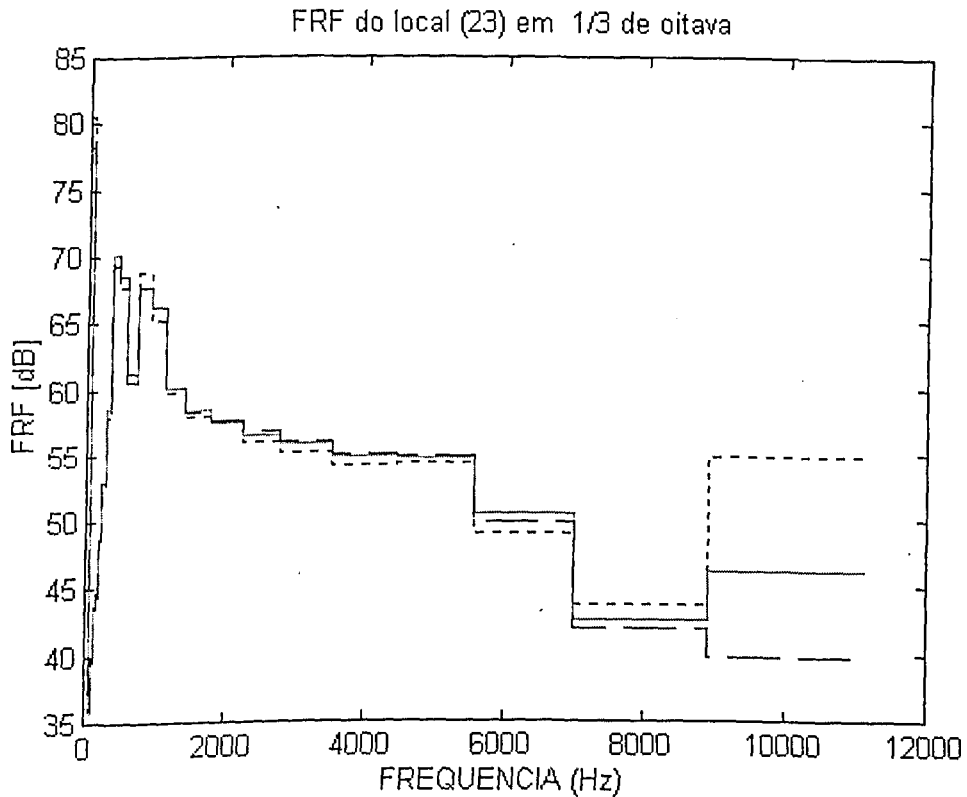


Fig. 4.9 - FRF da fresa: posição de referência (—), deslocamento da mesa de trabalho (·····) e deslocamento do porta fresa (----).

Da análise da Figura 4.9, pode-se ver que é o local que apresenta a menor sensibilidade em todas as regiões de frequência para as duas variações de posição impostas na fresadora, o que caracteriza este ponto como sendo o melhor local para ser instrumentado para fins de monitoramento do desgaste das ferramentas. Infelizmente, é inviável a colocação de algum tipo

de acelerômetro na fresa devido ao movimento de rotação da mesma.

Da análise de sensibilidade de todos os pontos mostrados na Figura 4.1, observou-se que as FRF das superfícies que não estão rigidamente fixados a estrutura da fresadora, tais como os locais (14) e (20), são menos sensíveis as variações geométricas do sistema sendo portanto, locais mais adequados para a instalação dos acelerômetros para o monitoramento das condições das ferramentas. Já as FRF dos locais situados nas superfícies estruturais local (01) mancal e o local (24) mesa de trabalho, são mais sensíveis com relação à variação da geometria da fresadora.

Com base na análise de sensibilidade da variação de geometria detectada nas FRF, definiu-se os locais (01), (14) e (20) para a instalação dos acelerômetros. O ponto 01 (mancal inferior do eixo porta fresa) foi escolhido devido à sua proximidade do ponto de excitação e devido ao fato de que mancais são pontos tradicionalmente escolhidos para fins de monitoramento de vibrações em máquinas e equipamentos.

Escolhidos os pontos para estudo, foi realizado um pré-teste de usinagem para verificar a eficácia destes locais no sentido de relacionar os níveis de vibração da fresadora com a evolução do desgaste das ferramentas de corte durante o processo de usinagem.

Neste pré-teste foi utilizado uma fresa de diâmetro \varnothing 80 mm composta de seis pastilhas de corte SEMN 1204 AZ classe P45-GC da Sandvik, uma barra de aço ABNT 8640 de seção quadrada de 110 mm por 490 mm de comprimento, com seguintes condições de usinagem:

- Rotação da fresa = 637 rpm;
- Velocidade de corte $V_c = 160$ m/mm;
- Velocidade de avanço $V_f = 358$ mm/min;
- Avanço por dente, $f_z = 0,1$ mm/ dente;
- Avanço $f = 0,6$ mm por volta ;
- Profundidade de corte $a_p = 1,5$ mm;

- Penetração de trabalho $a_e = 55 \text{ mm}$:

Os testes de monitoramento foram realizados de acordo com as etapas:

- Máquina operando em vazio (sem cortar);
- Usinando com ferramentas de corte com arestas novas;
- Usinando com ferramentas de corte com arestas consideravelmente desgastadas ($VB_{\max} \cong 0.7 \text{ mm}$);
- Usinando com ferramentas de corte com arestas extremamente desgastada ($VB_{\max} \cong 1.8 \text{ mm}$);

A Tabela 4.2. mostra os resultados do pré-teste de fresamento, comparando os valores RMS do nível de vibração em $[\text{m/s}^2]$, medidos nos locais (01), (14) e (20) para a três condições distintas de desgaste das ferramentas de corte. O nível RMS do sinal apresentado na Tabela 4.2. correspondente a uma média feita em 5 blocos de medidas com 50 amostras de 4096 pontos cada, adquiridas com uma frequência de 24 kHz.

Tabela 4.2 - Comparação dos níveis RMS de aceleração em $[\text{m/s}^2]$ para três condições de desgaste das ferramentas de corte.

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

Da análise dos resultados, apresentados na Tabela 4.1 e por motivos da relação sinal/ruído apresentado pelo local (20) ser menor do que o do local (14), a utilização do local (20) torna-se mais adequado para caracterizar o aumento do nível de vibração com o aumento do desgaste das ferramentas de corte.

A Figura 4.10 mostra, para o local (20), os espectros em frequência (banda de 1/3 de oitava) dos sinais das acelerações correspondentes ao fresamento para as três condições de desgastes. Nesta figura, pode-se observar como o local (20) é sensível ao desgaste na região das baixas e médias frequências, caracterizadas pela região de 65 Hz a 1800 Hz.

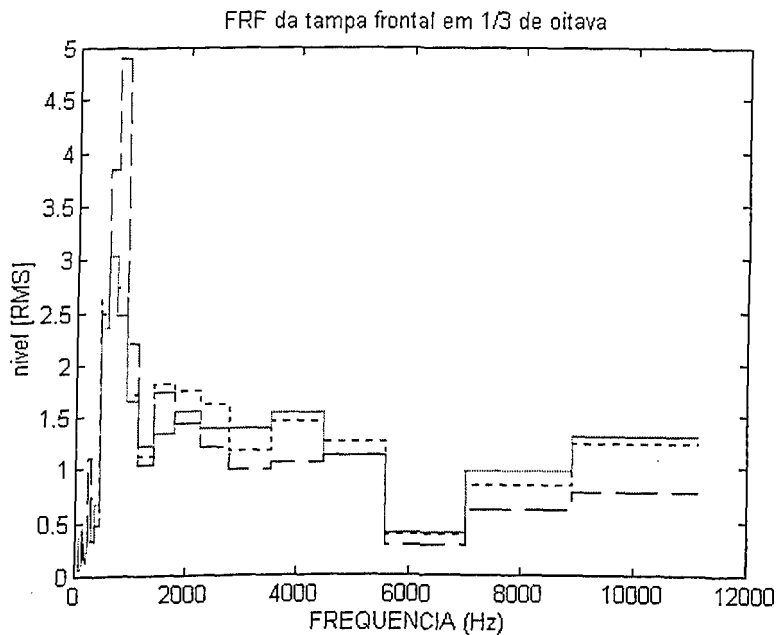


Fig. 4.10 - Nível RMS do local 20 do pré-teste de usinagem. Arestas novas (—); Arestas consideravelmente desgastadas (.....); Arestas extremamente desgastadas (-----).

As principais conclusões que puderam ser tiradas neste capítulo foram:

- O processo de usinagem por fresamento pode ser caracterizado na região das baixas frequências de 0 a 1000 Hz.
- Mesmo apresentando sensibilidade às alterações da posição do eixo porta fresa conforme apresentado na curva da FRF da Figura 4.6, o local (01), deverá ser utilizado para monitoramento. Devido ao fato deste local pertencente a um mancal e este são sempre indicados para monitoramento nas técnicas de manutenção preditiva.

- Os locais (01) e (20), serão utilizados para a instalação dos acelerômetros para detectar o aumento dos níveis RMS da vibração mecânica com o desgaste das ferramentas de corte.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DO DESGASTE E DO ACABAMENTO SUPERFICIAL NO DOMÍNIO DO TEMPO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos para caracterização da evolução do desgaste das arestas de corte e do acabamento superficial através dos níveis de vibração monitorados nos locais 01 e 20 da fresadora.

Os resultados aqui estudados, correspondem aos resultados obtidos durante o fresamento de barras de aço ABNT 1045 com condições distintas de usinagem.

Todos os resultados apresentados neste capítulo foram estudados através da utilização de arestas estatísticas do domínio do tempo como por exemplo: nível RMS, valor Pico, Kurtosis e fator de Crest todos em bandas de frequência para melhor caracterizá-los.

5.1 - Metodologia utilizada nos ensaios.

Com a instalação dos acelerômetros nos locais 01 e 20 da fresadora, procedeu-se o fresamento de barras de aço ABNT 1045, com uma fresa frontal de diâmetro \varnothing 125 mm composta de 08 pastilhas de corte SEMN 12 04 AZ classe P45 - GC da Sandvik.

Para acompanhar a evolução do desgaste das arestas de corte durante os testes de usinagem e do acabamento superficial da peça fresada, foram mantidos fixos a velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade de corte nos ensaios de fresamento.

Os ensaios se estendiam até que uma das 8 arestas de corte do conjunto atingisse o valor igual ou próximo de 1.0 mm para o parâmetro VBmax.

Apesar deste valor ser superior ao recomendado pela Norma ISO 3685 (1977), ele foi adotado para se ter uma melhor caracterização do sinal de vibração com o desgaste.

O acompanhamento da evolução do desgaste das arestas de corte através da medição do parâmetro VBmax foi feito através da utilização de um microscópio ferramenteiro ótico com adaptações para esta finalidade. A rugosidade superficial da peça foi determinada através da medição dos parâmetros Ra e Rmax por um rugosímetro SurfTest 211 da Mitutoyo.

As medições dos parâmetros VBmax, Ra e Rmax foram feitas inicialmente com a interrupção do processo de fresamento após 5 passadas da fresa, e de acordo com a taxa de desgaste apresentada, as medições passaram a ser feitas com intervalos variáveis de passes.

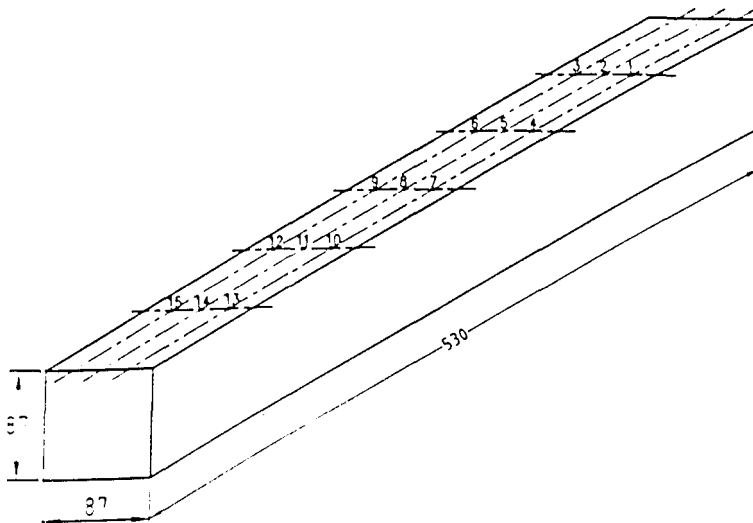


Fig. 5.1 - Locais de medição dos parâmetros Ra e Rmax sobre a barra de aço.

A Figura 5.1 mostra onde foram feitas as medições dos parâmetros Ra e Rmax sobre a superfície das barras de aço utilizadas nos testes. Os valores de Ra e Rmax representativos da superfície, correspondem a uma média aritmética dos 3 pontos transversais medidos, no sentido longitudinal da peça.

Nesta figura, os números de 1 a 15 indicam os locais onde foram feitas as medições dos parâmetros Ra e Rmax com o rugosímetro SurfTest 211 da Mitutoyo.

Após a aquisição dos sinais, foram calculados o nível RMS, o valor Pico, Kurtosis e o fator de Crest. Todos os sinais foram analisados no domínio do tempo nas seguintes bandas de frequência: 1) linear (0 a 2000 Hz), 2) com um filtro passa baixo (0 a 250 Hz), 3) com filtro passa baixo (0 a 1000 Hz), 4) com um filtro passa alta (acima de 250 Hz).

A utilização destes filtros foi devido ao fato de existir uma variação de sensibilidade das FRF, em função da variação de geometria da fresadora durante o seu funcionamento. Portanto a utilização deste filtros possibilita uma melhor visualização da influência do aumento do desgaste nas arestas de corte nos níveis de sinais em bandas de frequência.

5.2 - Condições utilizadas nos ensaios de fresamento.

O número de ensaios utilizados para validar experimentalmente a eficácia das técnicas de manutenção preditiva, para o monitoramento do desgaste das arestas de corte e da integridade superficial via vibração mecânica, totalizaram-se em 245 passes de fresamento em barras de aço ABNT 1045 de seção quadrada de 87 mm com 530 mm de comprimento com as seguintes condições de usinagem:

- Condição de usinagem 1:
 - Rotação da fresa = 612 rpm;
 - Velocidade de corte, $V_c = 240$ m/min;
 - Velocidade de Avanço, $V_f = 587$ mm/min;
 - Avanço por dente, $f_z = 0,12$ mm/dente;
 - Avanço, $f = 0,96$ mm/por volta;

- Profundidade de corte, $a_p = 1$ mm:
- Penetração de trabalho, $a_e = 87$ mm:

Nesta condição, foram realizados 7 testes de vida de ferramenta nos quais, a ferramenta de corte atingiu o limite de fim de vida pré-estabelecido para VBmax com 15, 13, 13, 16, 14, 16 e 15 passes de fresamento respectivamente, totalizando para esta condição de ensaio 102 passes de fresamento.

- Condição de usinagem 2:

- Rotação da fresa = 490 rpm:
- Velocidade de corte, $V_c = 193$ m/min:
- Velocidade de Avanço, $V_f = 587$ mm/min:
- Avanço por dente, $f_z = 0.15$ mm/dente:
- Avanço, $f = 1.20$ mm por volta:
- Profundidade de corte, $a_p = 1$ mm:
- Penetração de trabalho, $a_e = 87$ mm:

Nesta condição, foram realizados 3 testes de vida de ferramenta nos quais, a ferramenta de corte atingiu o limite de fim de vida pré-estabelecido para VBmax com 35, 38 e 37 passes de fresamento respectivamente, totalizando para esta condição de ensaio 110 passes de fresamento.

- Condição de usinagem 3:

- Rotação da fresa = 735 rpm:
- Velocidade de corte, $V_c = 288$ m/min:

- Velocidade de Avanço. $V_f = 587$ mm/min;
- Avanço por dente. $f_z = 0,10$ mm/dente;
- Avanço, $f = 0,80$ mm/por volta;
- Profundidade de corte. $a_p = 1$ mm;
- Penetração de trabalho. $a_e = 87$ mm;

Nesta condição, foi realizado 1 teste de vida de ferramenta no qual, a ferramenta de corte atingiu o limite de fim de vida pré-estabelecido para VBmax com 11 passes de fresamento.

- Condição de usinagem 4:

- Rotação da fresa = 735 rpm;
- Velocidade de corte. $V_c = 288$ m/min;
- Velocidade de Avanço. $V_f = 705$ mm/min;
- Avanço por dente. $f_z = 0,12$ mm/dente;
- Avanço, $f = 0,96$ mm/por volta;
- Profundidade de corte. $a_p = 1$ mm;
- Penetração de trabalho. $a_e = 87$ mm;

Nesta condição, foi realizado 1 teste de vida de ferramenta no qual, a ferramenta de corte atingiu o limite de fim de vida pré-estabelecido para VBmax com 14 passes de fresamento.

- Condição de usinagem 5:

- Rotação da fresa = 844 rpm;
- Velocidade de corte. $V_c = 331$ m/min;
- Velocidade de Avanço, $V_f = 810$ mm/min;
- Avanço por dente. $f_z = 0,12$ mm/dente;

- Avanço. $f = 0.96$ mm/por volta;
- Profundidade de corte. $a_p = 1$ mm;
- Penetração de trabalho. $a_e = 87$ mm;

Nesta condição de ensaio foi realizado 1 teste de vida de ferramenta onde a ferramenta de corte atingiu o limite de fim de vida pré-estabelecido para VBmax com 8 passes de fresamento.

5.3 - Resultados e análise

Com os valores medidos para o desgaste de flanco máximo (VBmax), nas arestas de corte durante os testes de vida das mesmas, pode-se observar que conforme aumenta o número de passes de fresamento, o desgaste torna-se mais acelerado.

Pelo fato desta tendência ter ocorrido em todos os testes de vida das arestas das 5 condições de usinagem e ainda, devido os testes de vida feitos nas condições 1 e 2 apresentarem uma maior quantidade de sinais para análise, estes serão utilizados para representar os resultados do método de monitoramento via vibração mecânica.

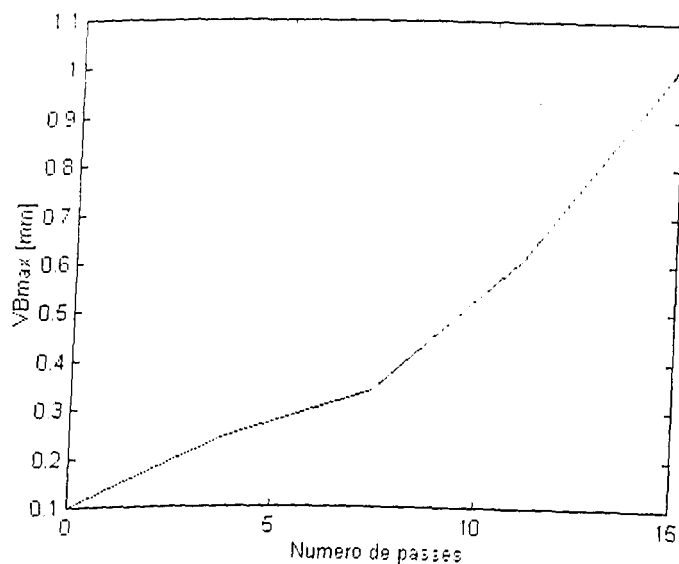


Fig. 5.2 - Evolução de VBmax na ferramenta de corte na condição 1.

A Figura 5.2, apresenta a evolução do desgaste de flanco de uma ferramenta que atingiu o valor de desgaste pré-estabelecido. Para exemplificar os testes realizados na condição 1 de usinagem, utilizaremos o 7º teste de vida de ferramenta, onde o valor de VB_{max} foi atingido com 15 passes de fresamento.

Já a Figura 5.3, apresenta a evolução do desgaste de flanco de uma ferramenta do 1º teste de vida da condição 2 de usinagem, onde o valor pré-estabelecido de VB_{max} foi atingido com 35 passes de fresamento.

Nesta condição, pode-se ver como a velocidade de corte influencia no tempo de vida da ferramenta de corte. Simplesmente com a diminuição da rotação da fresa a velocidade de corte diminui, aumentando o tempo de vida das arestas de corte.

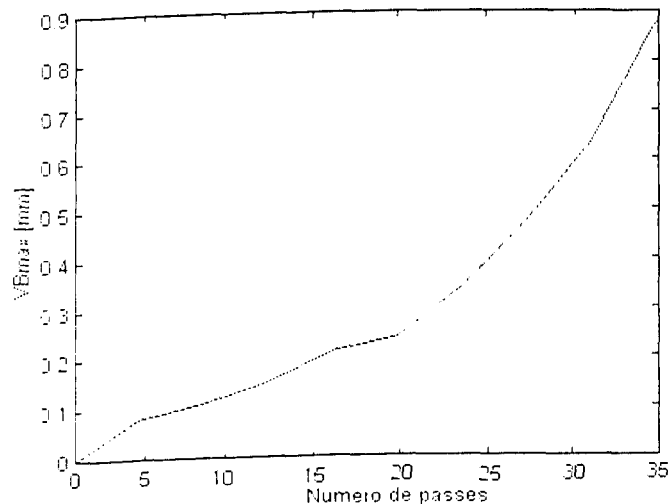


Fig. 5.3 - Evolução de VB_{max} nas arestas de corte na condição 2.

A curva apresentada na Figura 2.8 do capítulo 2, relativa à evolução do desgaste de flanco com o tempo de usinagem, justifica o comportamento quase que exponencial das curvas apresentadas nas Figuras 5.2 e 5.3 para as condições 1 e 2 de usinagem respectivamente.

A evolução do desgaste de flanco com o número de passes de fresamento das 8 arestas de corte utilizadas no 7^o teste da condição 1 e no 1^o teste da condição 2 serão apresentadas a seguir.

Tabela 5.1 - Valores de VBmax em [mm] para as 8 arestas de corte no teste de vida número 7 com a condição 1 de usinagem.

Número da aresta de corte								
Passes	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02
4	0.10	0.09	0.24	0.08	0.13	0.10	0.10	0.06
8	0.23	0.16	0.50	0.12	0.29	0.30	0.24	0.13
11	0.40	0.30	0.63	0.22	0.40	0.43	0.34	0.20
13	0.52	0.42	0.70	0.30	0.61	0.62	0.61	0.30
15	0.81	0.63	1.05	0.56	0.77	0.98	1.01	0.58

A Tabela 5.2. apresenta os valores medidos para VBmax das 8 arestas de corte utilizadas no 1^o teste de vida da condição 2 de usinagem onde o valor máximo de desgaste para a troca das arestas foi atingido em 35 passes nas arestas definidas como sendo 1, 3 e 7.

Tabela 5.2 - Valores de VBmax em [mm] para as 8 arestas de corte no teste de vida número 1 com a condição 2 de usinagem.

Número da arestas de corte								
Passes	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.04	0.02	0.03	0.04	0.01	0.06	0.05	0.02
3	0.11	0.06	0.09	0.08	0.06	0.07	0.08	0.04
7	0.14	0.12	0.19	0.11	0.09	0.11	0.11	0.08
11	0.23	0.17	0.27	0.15	0.18	0.13	0.15	0.12
15	0.28	0.20	0.34	0.16	0.20	0.14	0.21	0.12
19	0.35	0.22	0.47	0.17	0.24	0.19	0.24	0.15
23	0.54	0.24	0.54	0.17	0.40	0.27	0.34	0.21
27	0.62	0.27	0.58	0.19	0.46	0.42	0.47	0.27
31	0.69	0.40	0.77	0.30	0.73	0.50	0.63	0.38
35	0.87	0.58	0.86	0.45	0.73	0.65	0.87	0.53

Após o estudo do comportamento do desgaste das arestas de corte em função do número de passes, passou-se a analisar os sinais resultantes do monitoramento da vibração mecânica nos locais 01 e 20 da fresadora durante os ensaios de fresamento.

Para facilitar a visualização e a análise, os resultados foram colocados em gráficos normalizados pelo valor máximo do nível do sinal.

As figuras que serão apresentadas, são representativas dos ensaios realizados com a condição 1 e 2 de usinagem, que caracterizam também a tendência geral dos testes de vida realizados nas demais condições de usinagem.

Os parâmetros estatísticos utilizados para estudar o processo, são apresentados nas bandas de frequências que melhor caracterizaram os seus valores com a evolução do desgaste das arestas de corte.

A Figura 5.4, mostra o nível RMS da aceleração com o desgaste das arestas de corte para a banda linear e com o filtro passa alta de 1000 Hz no local de monitoramento 01.

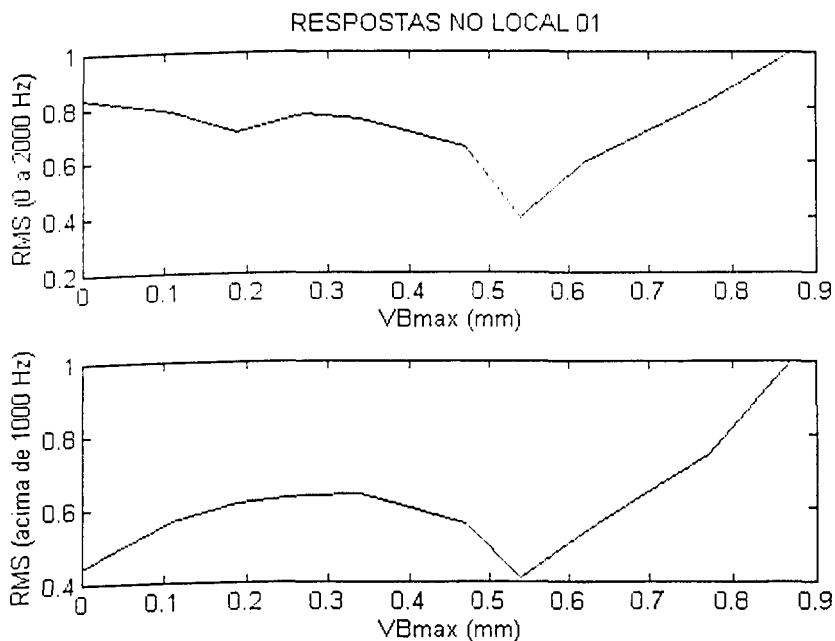


Fig. 5.4 - Nível RMS da aceleração em $[m/s^2]$ do local 01 em função do desgaste das arestas de corte.

De acordo com a Figura 5.4. o parâmetro RMS apresentou melhores resultados para a evolução do processo quando é estudado com a utilização de filtros acima de 1000 Hz. Isto pode ser justificado pelas características do próprio local de monitoramento, ou seja, pertencer a uma parte da fresadora de grande rigidez mecânica sendo portanto, mais sensível nas frequências mais altas.

A Figura 5.5. 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.

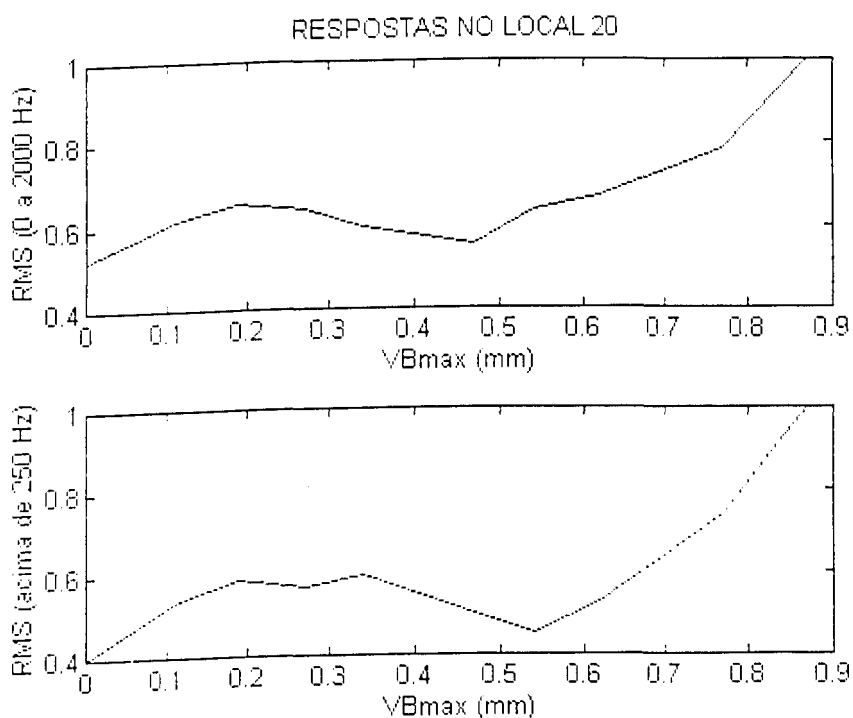


Fig. 5.5 - Nível RMS da aceleração em $[m s^{-2}]$ do local 20 em função do desgaste das arestas de corte.

Como o local 20 está localizado numa tampa de proteção da máquina e esta apresenta uma rigidez mecânica menor que a do local 01, a evolução do nível de vibração com o aumento

do desgaste das arestas de corte fica melhor caracterizado quando este parâmetro é estimado com a utilização de filtro de banda nas frequências mais baixas conforme pode ser visto na Figura 5.5.

O nível RMS da aceleração, como observado nas Figuras 5.4 e 5.5, não cresce continuamente com o aumento do desgaste. Inicialmente ele tem pouca variação, podendo até diminuir, apresentando um ponto de mínimo para VB_{max} em torno de 0.5 mm, para só então crescer consideravelmente. Este comportamento pode ser explicado da seguinte maneira. No início, pelo assentamento das arestas de corte na fresa e pela própria evolução do desgaste das mesmas, ou seja, a dificuldade de se obter a mesma altura nas oito arestas de corte durante o ajuste inicial de montagem da fresa acaba definindo alturas diferentes das mesmas em relação a peça, provocando portanto no início do processo de fresamento, cortes com profundidade diferentes. Normalmente, aceita-se uma variação de até 0.05 mm, mas no caso atual a maior variação foi de 0.04 mm. Este fato explica, também, a diferença do desenvolvimento do desgaste nas oito arestas de corte. As arestas mais protuberantes são mais exigidas, e portanto desenvolvem o desgaste mais rapidamente. Isto gera esforços menores do que quando todas as arestas de corte trabalham na mesma altura, e esforços menores implicam em nível de vibração menor durante o processo de fresamento. Mas na medida que se aumenta o número de passes, as arestas de corte vão se desgastando e a tendência é ajustar as alturas relativas a peça, provocando assim a estabilização do nível de vibração do sistema. Mesmo que não aconteça esse ajuste, o desgaste continua evoluir, de maneira desigual, aumentando os esforços de corte, que acarretam níveis de vibração maiores na fresadora. Nota-se nas Tabelas 5.1 e 5.2 que o desgaste evolui mais rapidamente nas arestas 3, 6 e 7 e 1, 3 e 7, respectivamente, mas as diferenças em relação as demais diminuem, para valores maiores de desgaste. Isto é uma indicação da proximidade do ajuste das alturas das arestas em relação a peça. Observa-se nestas tabelas também, que antes do desgaste atingir 0.5 / 0.55 mm na ferramenta mais desgastada, os

desgastes nas demais arestas são ainda muito pequenos, passando a ser considerável, (em torno de 0.2 mm), só a partir daí. Isto pode explicar os pontos de mínimos apresentados nas Figuras 5.4 e 5.5.

A Figura 5.6, mostra o comportamento do parâmetro valor Pico que no início do teste apresenta pequenas variações de amplitude. Mas com o aumento do desgaste das arestas de corte o seu comportamento passa a ser semelhante ao do nível RMS do sinal ou seja, a medida que o desgaste vai se acentuando ele tende a subir.

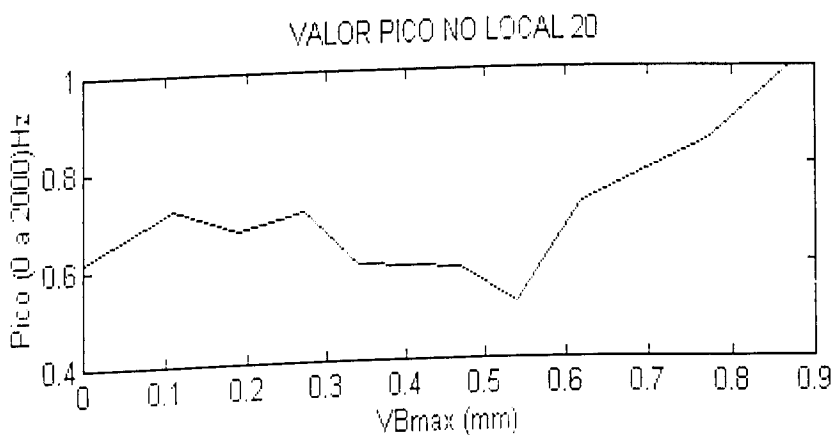


Fig. 5.6 - Valor Pico em função do desgaste das arestas de corte no local 20.

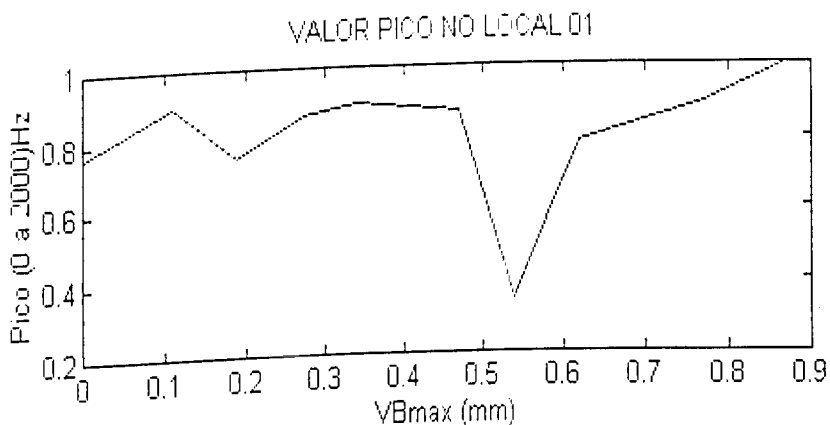


Fig. 5.7 - Valor Pico em função do desgaste das arestas de corte no local 01.

Na Figura 5.7. com o mesmo comportamento da Figura 5.6. pode-se observar que as variações de amplitude são maiores. e isto é justificado pelo fato do local 01. estar localizado no mancal inferior do eixo porta fresa onde as amplitudes de vibrações são maiores.

Do mesmo modo que no parâmetro RMS, a indicação do aumento do nível de vibração com o desgaste das arestas de corte é evidenciada com a utilização do filtro linear (0 a 2000 Hz) e o local 20. apresenta melhor o comportamento deste parâmetro.

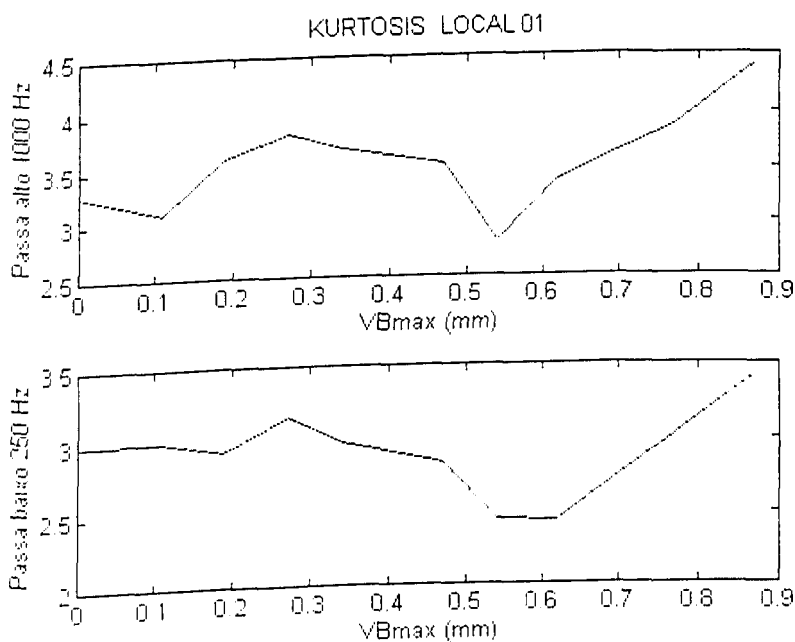


Fig. 5.8 - Valores da Kurtosis do local 01 em função do desgastes das arestas de corte.

O parâmetro estatístico Kurtosis exemplificados na Figuras 5.8 para o local 01 e Figura 5.9 para o local 20. resultou de um modo geral, valores próximos de 3 caracterizando assim, o processo de fresamento com a predominância de sinais aleatórios (com Distribuição Normal). Mas com o aumento do número de ensaios a curva da Kurtosis apresenta uma tendência a subir devido ao ajuste das arestas de corte sobre a superfície de trabalho. Mas, logo após este ajuste das arestas de corte sobre a superfície da peça, o desgaste começa a se acentuar provocando o

aparecimento de esforços não periódicos no sinal, produzindo então uma inflexão na curva da Kurtosis que volta a subir novamente com o aumento do desgaste nas arestas de corte.

Apesar da Kurtosis possuir várias informações sobre o processo ela não apresenta variações significativas o suficiente para servir de parâmetro de controle de fim de vida sugeridos nos critérios de desgaste de arestas.

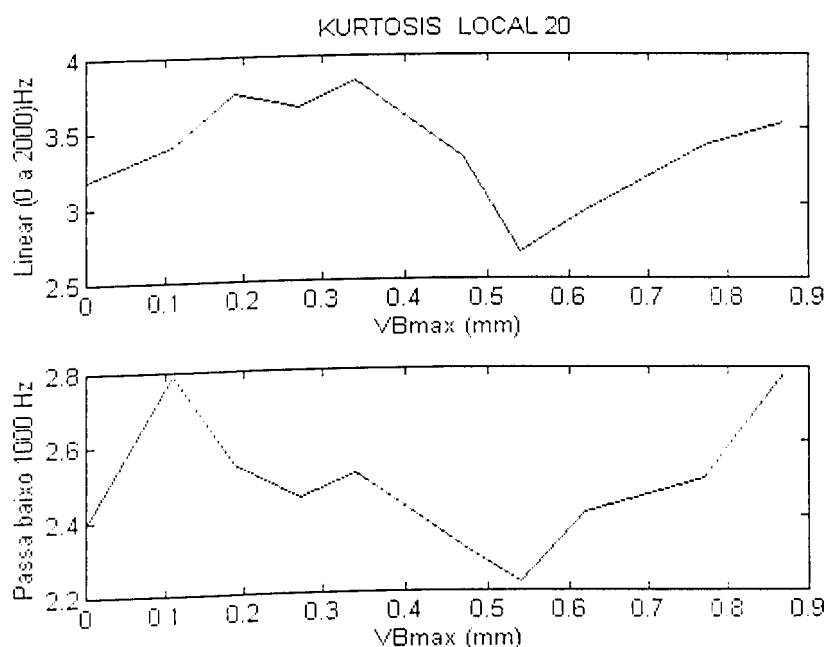


Fig. 5.9 - Valores da Kurtosis do local 20 em função do desgastes das arestas de corte.

Em todas as curvas apresentadas para o nível RMS, nível Pico e da Kurtosis existe uma queda de amplitude do sinal em torno da região de 0.55 mm para VBmax. Isto pode ser justificado pela própria evolução do desgaste nas arestas cortantes, que só após este valor, as demais arestas apresentam desgastes consideráveis (acima de 0.2 mm), quando o nível do sinal então aumenta.

Este fato, foi observado em todas as bandas de frequências utilizadas nas análises dos sinais correspondentes aos testes de fresamento monitorados nos locais 01 e 20 da fresadora.

O fator de Crest apesar de ser um bom indicador de anormalidade nas técnicas de manutenção preditiva, não apresentou nenhuma correlação satisfatória do desgaste das arestas de corte com a vibração em nenhuma banda de frequência analisada nos dois locais de monitoramento.

Assim, observando as Figuras 5.4 a 5.7, dos resultados representativos para o nível RMS e Pico monitorados nos locais (01) e (20) da fresadora, pode-se ver que em todas as curvas independentes das bandas de frequência analisadas, elas conseguem detectar o aumento do desgaste após este atingir proporções elevadas (acima de 0.75 mm), e como normalmente os critérios de fim de vida adotam valores superiores a este, conclui-se então, que qualquer um destes parâmetros pode ser utilizado para detectar o fim de vida das arestas de corte durante o processo de fresamento.

5.4 - Estimativa do acabamento superficial via vibração mecânica

A correspondência da aceleração medida (V_m) nos locais de medição 01 e 20 com os parâmetros R_a e R_{max} da rugosidade, foram feitas através do ajuste dos coeficientes (a_0, a_1, a_2, a_3) de um polinômio de terceira ordem via Mínimos Quadrados Comum para estimar a rugosidade R_e . Equação 5.1.

$$R_e = a_0 + V_m a_1 + V_m^2 a_2 + V_m^3 a_3 \quad (5.1)$$

A correspondência dos valores de rugosidade com a aceleração, foi feita pela utilização de um polinômio de terceira ordem pelo fato deste apresentar uma melhor estabilização da função erro.

Para efeito de análise foi calculado o erro médio quadrático normalizado percentual utilizando a Equação 5.2, em função dos valores da rugosidade medida R_m (R_a e R_{max}) com a rugosidade estimada R_e para R_a e R_{max} utilizando o polinômio de terceiro grau dado pela Equação 5.1.

$$E = 100 \times \frac{(R_e - R_m)' \times (R_e - R_m)}{(R_m' \times R_m)} \quad (5.2)$$

As tabelas 5.3 a 5.7, mostram os erros percentuais para a estimativa da rugosidade das superfícies usinadas ao utilizar um polinômio de terceira ordem. Os valores apresentados correspondem aos resultados de 6 testes de vida de ferramenta, sendo que cada teste define um ensaio e as condições de usinagem utilizados nestes testes são as mesmas da condição 1 de usinagem.

Para calcular E1, utilizou-se R_a estimado em função do nível RMS das acelerações. Para calcular E2, utilizou-se R_{max} estimado em função do nível RMS das acelerações. No cálculo de E3, utilizou-se R_a estimado como função do valor Pico das acelerações e finalmente, para calcular E4, utilizou-se R_{max} estimado com o valor Pico das acelerações.

Tabela 5.3 - Erros percentuais com o ajuste polinomial na banda de 0 a 2000 Hz

ENSAIO	ERROS [%]							
	PONTO 01 (MANCAL)				PONTO 20 (TAMPA)			
	E1	E2	E3	E4	E1	E2	E3	E4
01	4.29	7.76	3.93	9.22	3.50	5.25	3.53	8.85
02	3.62	3.35	3.71	3.16	3.74	3.08	4.49	3.76
03	2.73	2.74	10.77	8.76	2.04	1.76	6.84	5.55
04	8.65	7.20	8.58	7.35	6.12	4.95	5.71	4.93
05	6.39	4.83	7.27	5.15	6.86	4.74	5.82	4.07
06	2.15	2.77	2.45	4.57	3.04	6.07	3.53	5.33

Os valores dos erros percentuais para a estimativa da rugosidade foi feita com a utilização de filtros nas seguintes bandas de frequência: 0 a 2000 Hz (Tabela 5.3) 0 a 250 Hz (Tabela 5.4), 0 a 1000 Hz (Tabela 5.5), 250 a 2000 Hz (Tabela 5.6) e 1000 2000 Hz (Tabela 5.7). Estas bandas foram utilizadas com o objetivo de determinar em qual região do espectro existe uma melhor correlação entre rugosidade e vibração.

Tabela 5.4 - Erros percentuais com ajuste polinomial na banda de 0 a 250 Hz

ENSAIO	ERROS [%]							
	PONTO 01 (MANCAL)				PONTO 20 (TAMPA)			
	E1	E2	E3	E4	E1	E2	E3	E4
01	3.80	8.55	4.44	8.71	3.76	5.64	3.00	6.41
02	4.94	3.62	4.92	3.84	4.31	3.21	4.49	3.74
03	6.59	4.99	8.52	6.71	4.86	4.32	6.94	5.96
04	7.22	4.67	9.04	8.42	7.75	4.59	6.70	4.84
05	2.14	2.17	6.89	4.48	6.44	5.32	8.17	6.00
06	1.68	1.84	2.43	6.21	1.92	6.07	1.03	2.36

Tabela 5.5 - Erros percentuais com ajuste polinomial na banda de 0 a 1000 Hz

ENSAIO	ERROS [%]							
	PONTO 01 (MANCAL)				PONTO 20 (TAMPA)			
	E1	E2	E3	E4	E1	E2	E3	E4
01	4.29	7.84	3.55	5.87	3.62	5.78	4.50	9.48
02	3.70	3.01	3.40	2.98	3.38	3.11	4.58	3.32
03	2.80	2.77	9.78	7.61	2.71	2.05	7.82	7.05
04	8.78	7.31	9.59	8.43	5.33	4.13	6.62	5.87
05	6.49	4.88	7.27	4.56	6.05	3.61	6.86	5.08
06	2.17	2.89	2.51	3.86	2.90	5.18	3.19	6.80

Tabela 5.6 - Erros percentuais com ajuste polinomial na banda de 250 a 2000 Hz

ENSAIO	ERROS [%]							
	PONTO 01 (MANCAL)				PONTO 20 (TAMPA)			
	E1	E2	E3	E4	E1	E2	E3	E4
01	4.27	7.63	2.75	6.44	3.47	5.23	2.75	4.70
02	3.75	3.00	4.09	3.30	3.60	3.33	4.48	3.60
03	2.77	2.73	7.00	4.20	2.01	1.74	5.05	4.09
04	8.67	7.22	10.36	9.17	6.32	5.25	6.12	4.56
05	6.36	4.81	7.48	4.82	6.94	4.59	8.83	6.75
06	2.15	2.80	2.57	3.11	2.94	5.62	3.02	5.05

Tabela 5.7 - Erros percentuais com ajuste polinomial na banda de 1000 a 2000 Hz

ENSAIO	ERROS [%]							
	PONTO 01 (MANCAL)				PONTO 20 (TAMPA)			
	E1	E2	E3	E4	E1	E2	E3	E4
01	3.37	8.86	3.81	7.09	2.98	7.56	3.44	5.02
02	2.47	2.09	5.04	3.69	3.39	3.31	3.12	3.22
03	5.53	5.16	10.95	9.31	1.25	2.44	5.44	3.97
04	7.77	6.36	7.57	6.58	7.59	6.15	6.95	5.38
05	6.30	3.89	5.44	3.29	4.81	3.98	6.30	4.24
06	1.86	3.11	2.89	4.41	2.59	3.62	2.70	3.10

Através da análise dos resultados apresentados nas tabelas acima, pode-se ver que existe uma boa correlação entre os valores de rugosidade e os valores de vibrações medidos nos dois locais de monitoramento 01 e 20, em toda a região do espectro em frequência.

Entretanto os melhores resultados são observados para o local 20 devido estar localizado sob a tampa, cuja Função Resposta em Frequência demonstrou menor sensibilidade às variações geométricas da máquina durante o estudo do comportamento dinâmico da fresadora.

Utilizando o ensaio 06 da Tabela 5.4, que foi feito com o ajuste na banda de 0 a 250 Hz, tem-se um valor para a estimativa da rugosidade (R_e), em que o erro de estimação foi de 1,03 %, utilizando os valores Pico das acelerações para a estimativa da rugosidade superficial.

Mas através da análise destes resultados, pode-se também verificar que até para o valor de 7,77 % de erro encontrado no ensaio 04 da Tabela 5.7 ainda pode-se ter uma boa correlação da rugosidade com os níveis RMS da vibração.

Para se ter uma idéia da magnitude dos erros calculados pela equação 5.2, a Figura 5.10, apresenta as curvas dos valores da rugosidade medida (—) e rugosidade estimada (- - - -) em função do nível RMS de aceleração do local 01, ajuste considerado como sendo o pior (ensaio 4 com $E1 = 7,77$ %) mas ainda observa-se uma boa correlação existente entre os valores de vibração e a rugosidade média da superfície.

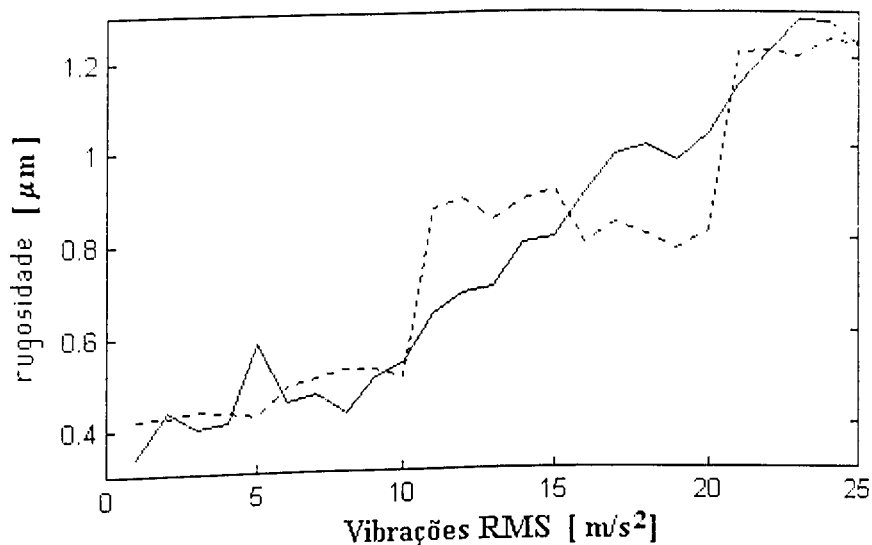


Fig. 5.10 - Valores para Ra medido (—) e Ra estimado (- - - -) para $E1=7.77\%$.

Já a Figura 5.11. mostra as curvas dos valores da rugosidade medida (—) e da rugosidade estimada (- - - -) em função do nível Pico da aceleração medido na tampa local 20 para o melhor ajuste (ensaio 6 para $E3=1.03\%$).

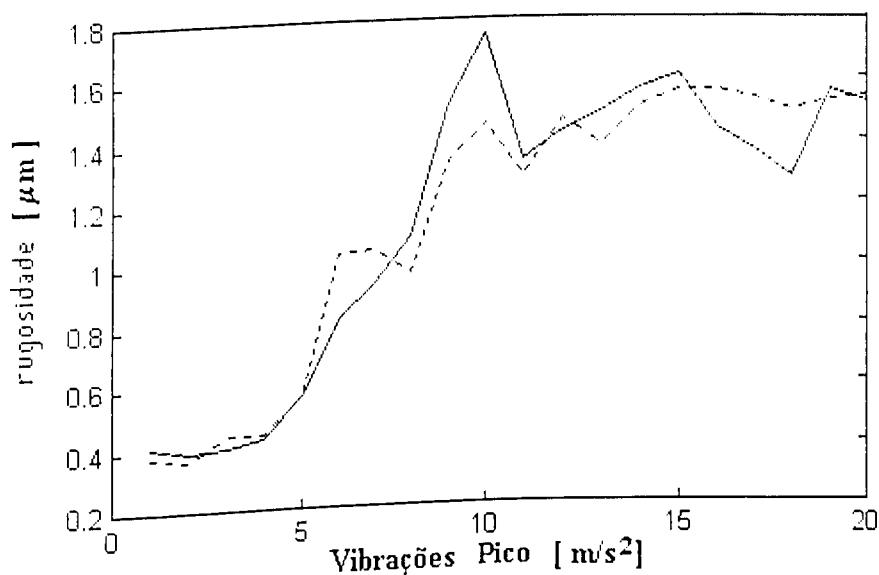


Fig. 5.11 - Valores para Ra medido (—) e Ra estimado (- - - -) para $E3=1.03\%$.

Em função dos valores determinado pela Equação 5.2. para a estimativa da rugosidade superficial com os sinais de vibração. conclui-se que a vibração mecânica apesar de ser indesejável ao processo de fabricação pode ser utilizada com sucesso para monitorar em tempo real o acabamento superficial.

CAPÍTULO 6

ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos pela utilização das técnicas de análise de sinais do domínio da frequência normalmente utilizadas em manutenção preditiva.

As técnicas de análise de sinais estudadas neste capítulo são: a análise Espectral, Transformada de Hilbert, Técnica do Envelope, análise Cepstral e a análise Espectral com a utilização dos filtros de 1/3 de oitava.

Para este estudo, foi utilizado um teste de vida de arestas para a condição 2 de usinagem, devido esta condição apresentar uma maior quantidade de sinais.

O estudo feito neste capítulo, se baseia na verificação de como o desgaste das arestas de corte se manifesta nos espectros em frequência do sinal, e estas verificações foram feitas através da comparação dos espectros em frequência da aceleração para as condições de arestas novas e para arestas consideradas como gastas ($VB_{max} \cong 1.0$ mm). A utilização de somente duas condições de desgaste para este estudo (arestas novas e arestas gastas), para a comparação dos espectros está na dificuldade de observar pequenas variações de amplitude nos espectros de energia durante a evolução do desgaste das arestas de corte.

6.1 - Análise espectral.

As técnicas de análise no domínio da frequência são normalmente feitas mediante a análise espectral, com a qual, pode-se obter as frequências predominantes nos sinais com suas

respectivas amplitudes de acelerações e ainda as bandas de frequência em que a evolução do desgaste das arestas se evidenciam.

Os resultados que serão apresentados neste capítulo provém da análise espectral dos sinais obtidos pelo monitoramento do local 20 e pelo local 01, dos ensaios de fresamento realizados com a fresa de diâmetro \varnothing 125 mm com 8 arestas de corte com as condições de usinagem 2, isto é :

- Rotação da fresa = 490 rpm (8.16 Hz):
- Velocidade de corte, $V_c = 193$ m/min:
- Velocidade de Avanço, $V_f = 587$ mm/min:
- Avanço por dente, $f_z = 0.15$ mm/dente:
- Avanço, $f = 1.20$ mm/por volta:
- Profundidade de corte, $a_p = 1$ mm:
- Penetração de trabalho, $a_e = 87$ mm:

Os ensaios terminaram com 35 passes devido o desgaste de flanco máximo nas arestas atingir o valor estabelecido para término dos testes de vida ($VB_{max} = 1.0$ mm).

Através da análise em frequência, procurou-se detectar a frequência de rotação do eixo porta fresa com suas harmônicas, a evolução do nível RMS da aceleração, a influência do desgaste das arestas de corte no espectro e a banda de frequência característica do processo de usinagem por fresamento.

Os espectros das Figuras 6.1 e 6.2 apresentam os resultados das medições do local 01 para as duas condições das arestas.

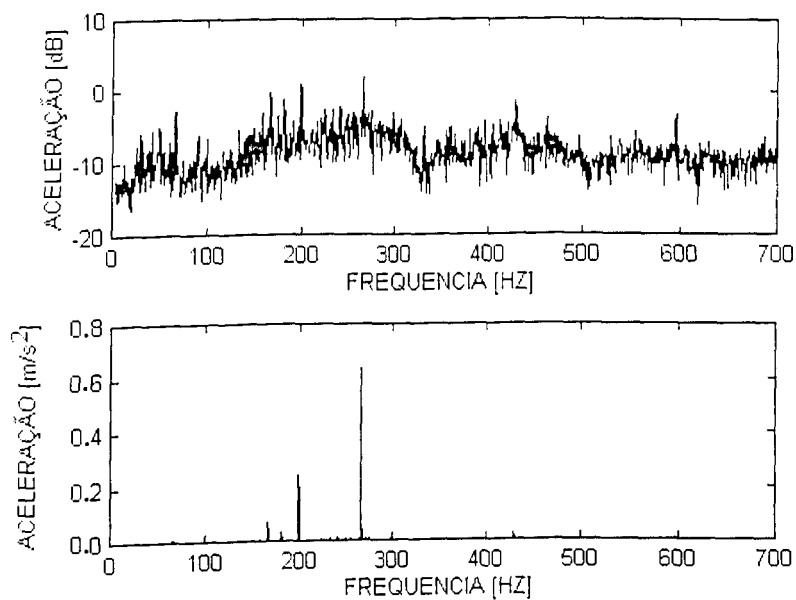


Fig. 6.1 - Espectro em frequência para arestas novas - local 01.

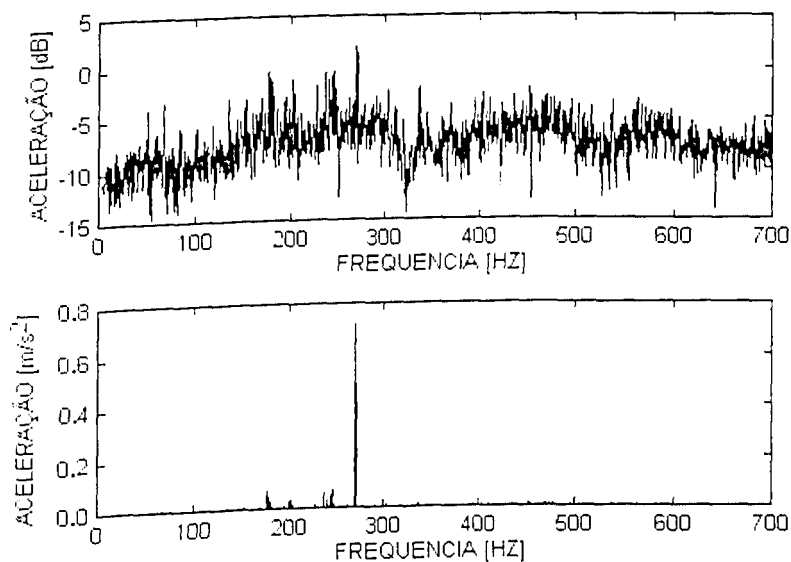


Fig. 6.2 - Espectro em frequência para arestas gastas $VB_{max} \cong 1.0$ mm - local 01.

Nas Figuras 6.3 e 6.4, estão apresentados respectivamente os espectros da aceleração para as arestas novas e para as arestas gastas monitoradas no local 20.

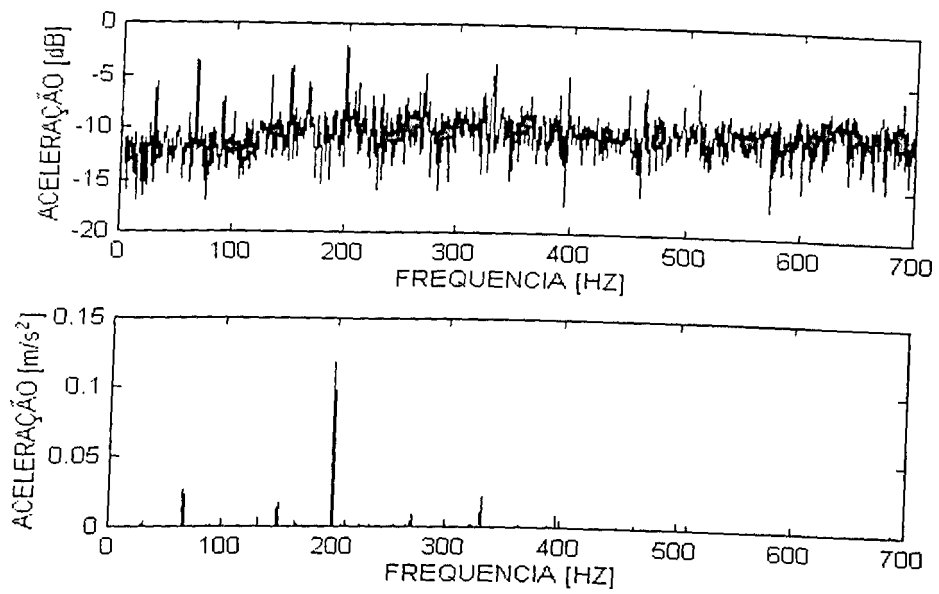


Fig. 6.3 - Espectro em frequência para arestas novas - local 20.

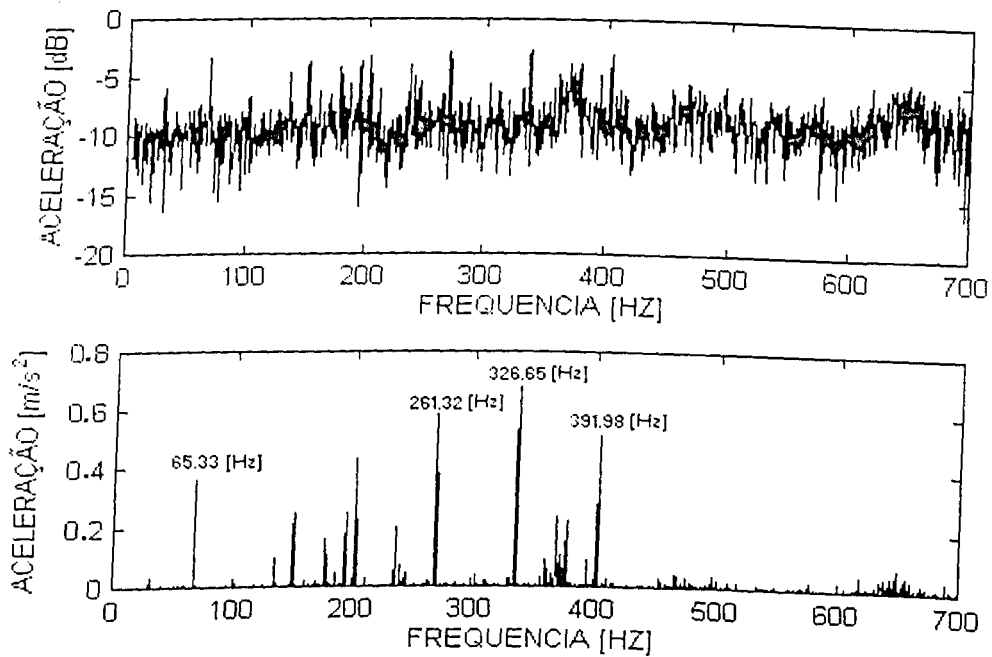


Fig. 6.4 - Espectro em frequência para arestas com $VB_{max} \cong 1,0$ mm - local 20.

Através dos espectros mostrados, o local 20 apresenta-se como mais adequado para monitoramento por que este mostra uma maior sensibilidade à detecção do aumento do nível de aceleração em função do aumento do desgaste das arestas de corte.

O espectro apresentado na Figura 6.4, mostra algumas frequências como: 65,33 Hz, 261,32 Hz, 326,65 Hz e 391,98 Hz que são frequências múltiplas da rotação da fresa vezes o número de arestas, que apresentaram aumento de amplitude da aceleração com o aumento do desgaste das arestas de corte.

Com estes resultados, pode-se observar a eficiência da análise espectral no sentido de obter informações de como o desgaste das arestas de corte influencia no nível de aceleração das frequências múltiplas da frequência de rotação. Mas é difícil quantificar a influência do desgaste das arestas de corte no nível global da vibração.

6.2 - Análise espectral utilizando a Transformada de Hilbert.

A utilização da transformada de Hilbert, permite remover a frequência portadora do sinal modulado e ainda determinar as amplitudes das frequências pela decomposição analítica do sinal.

A Figura 6.5, apresenta o espectro em frequência obtido no local 20 utilizando a Transformada de Hilbert para as arestas novas e para as arestas gastas ($VB_{max} \cong 1,0$ mm).

A utilização da Transformada de Hilbert nos dois espectros facilitou a visualização do aumento dos níveis das amplitudes das acelerações de um modo geral, inclusive ver que a evolução do desgaste VB_{max} das arestas de corte excitou a primeira frequência natural da fresadora de 591 Hz.

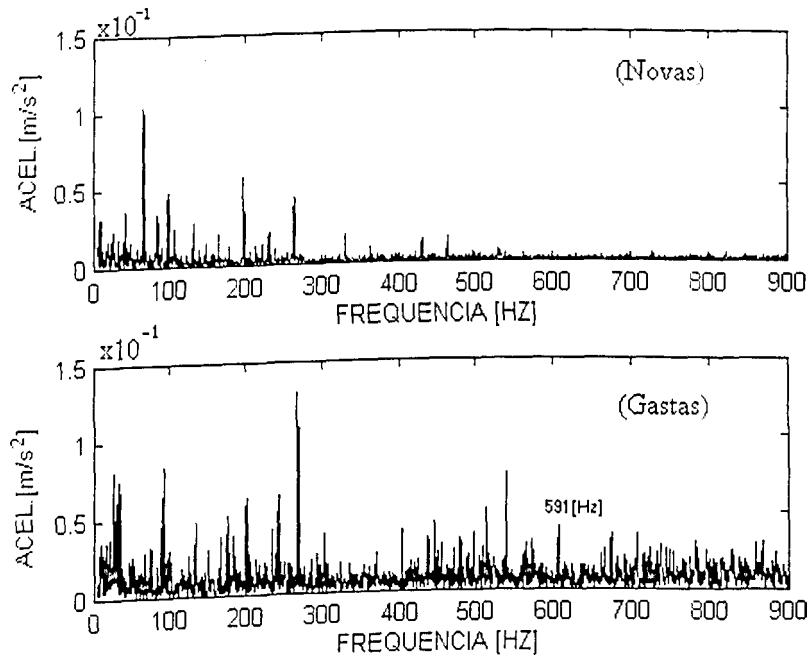


Fig. 6.5 - Análise espectral utilizando Transformada de Hilbert.

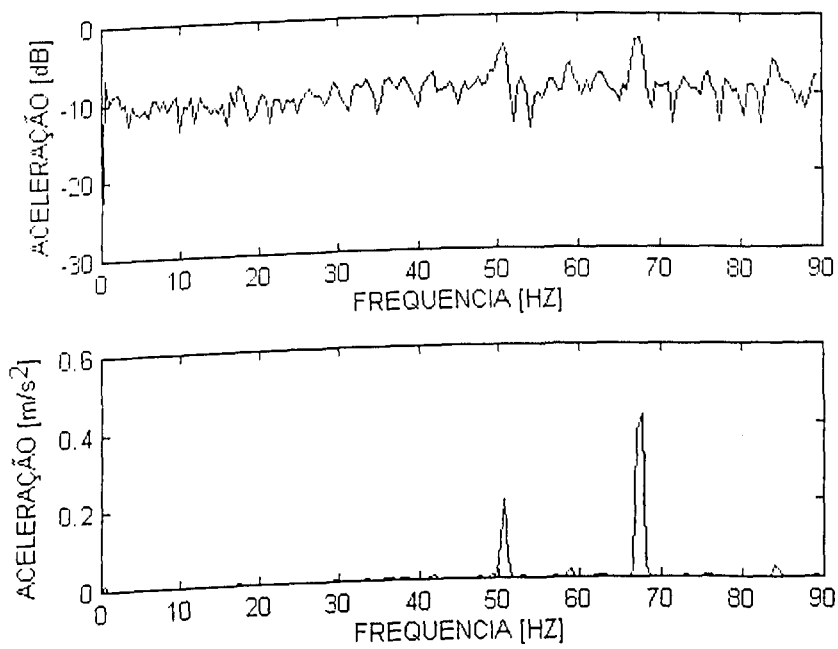


Fig. 6.6 - Espectro da banda de [0 a 90] Hz sem utilizar a Transformada de Hilbert.

A comparação dos espectros com e sem a utilização da transformada de Hilbert são apresentadas através das Figuras 6.6 e 6.7 respectivamente, as quais demonstram a versatilidade da análise espectral quando se utiliza a Transformada de Hilbert nos espectros obtidos pelo monitoramento do local 20 para a banda de [0 a 90] Hz dos testes feitos com as arestas de corte gastas ($VB_{max} \cong 1,0$ mm).

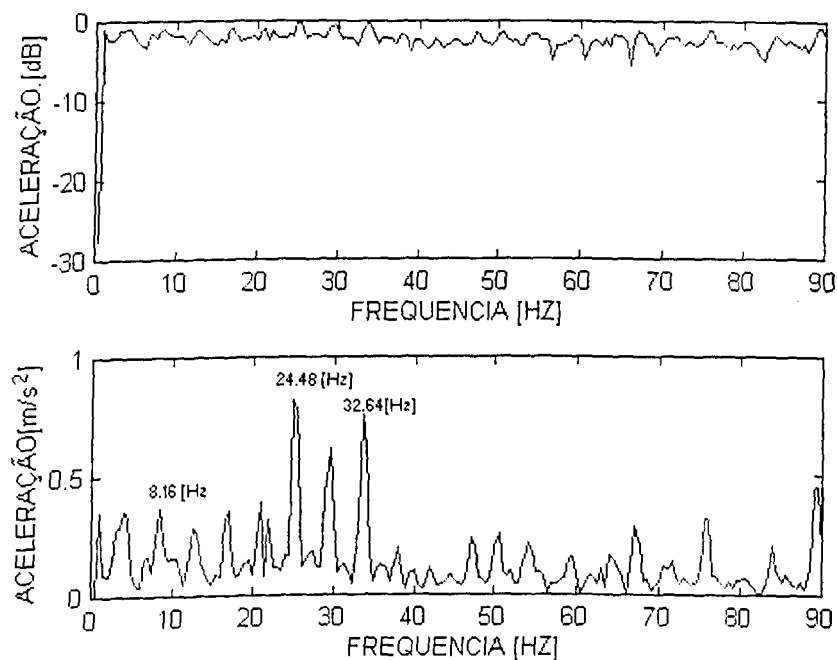


Fig. 6.7 - Espectro da banda de [0 a 90] Hz utilizando a Transformada de Hilbert.

A utilização da Transformada de Hilbert na análise dos sinais permite apresentar o espectro em frequência com maior quantidade de energia nas bandas de frequência mais baixas, mostrando eficácia na identificação das frequências, de 8,16 Hz (frequência de rotação da fresa) e como também nas frequências de 24,48 Hz e 32,64 Hz que são a primeira e segunda harmônica da rotação da fresa.

O aumento de energia detectado na análise espectral, com a utilização da Transformada de Hilbert, para a condição de arestas gastas pode ser o suficiente para se desenvolver um

procedimento no qual indicará o momento de troca das arestas de corte durante o monitoramento do fresamento.

6.3 - Análise espectral utilizando a Técnica do Envelope.

Utilizando a Técnica do Envelope associada a um filtro passa banda com frequência central ajustada nas frequências naturais da fresadora é possível identificar como o aumento do nível da aceleração se manifesta nestas frequências com a evolução do VBmax das arestas de corte.

A Figura 6.8 e 6.9, apresentam os espectros para a condição de arestas novas e gastas ($VB_{max} \cong 1,0$ mm), medido no local 01 quando utiliza-se um filtro passa banda de frequência central de 600 Hz (para caracterizar a primeira frequência natural da fresadora de 591 Hz).

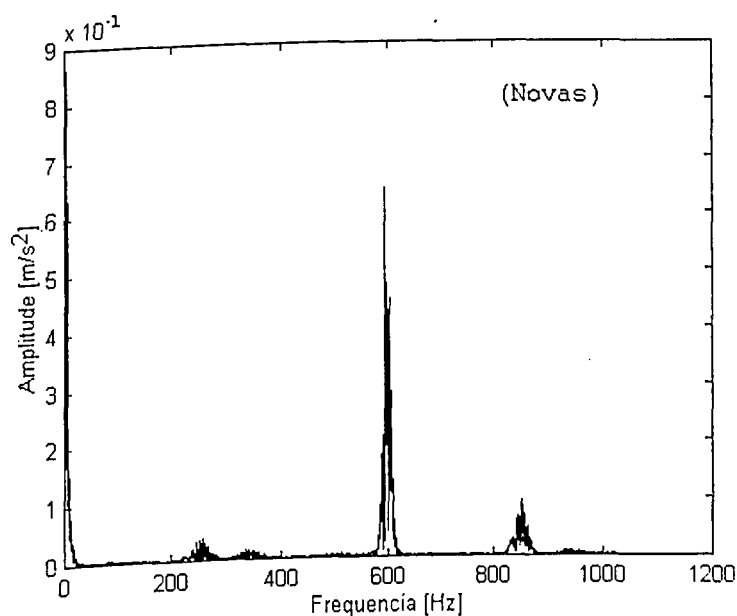


Fig. 6.8 - Espectro na banda de [420 a 730] Hz para arestas novas - local 01.

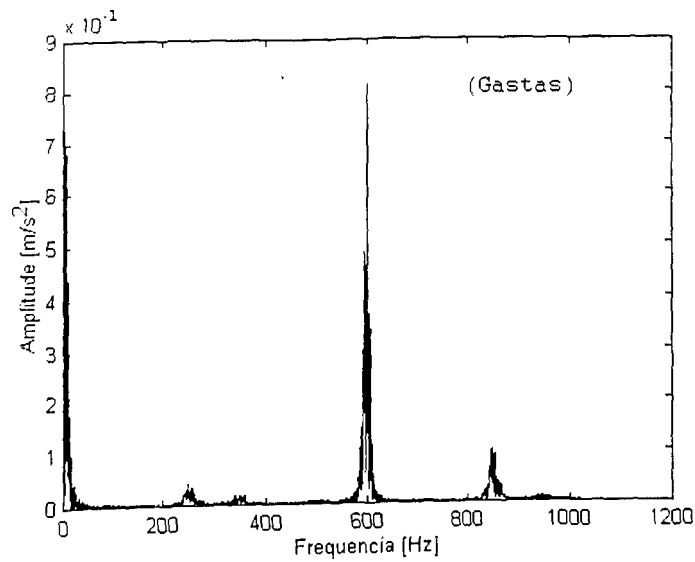


Fig. 6.9 -Espectro na banda de [420 a 730] Hz para arestas gastas - local 01.

Estas mesmas comparações foram realizadas com os sinais monitorados pelo local 20 e as Figuras 6.10 e 6.11 mostram estes espectros.

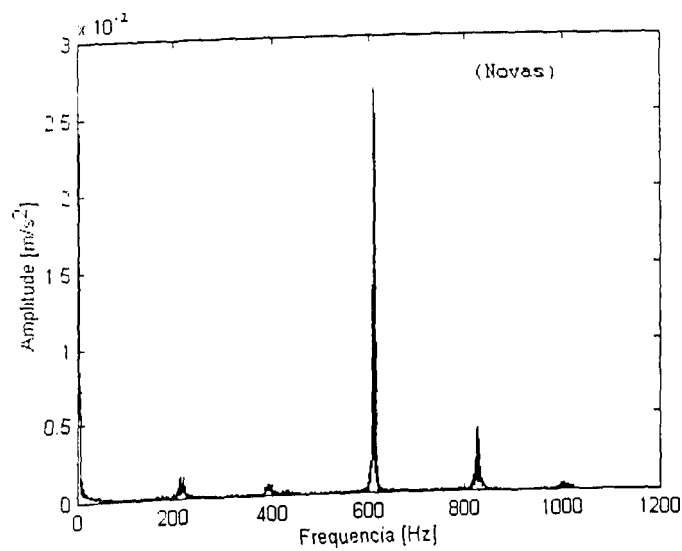


Fig. 6.10 -Espectro na banda de [420 a 730] Hz para arestas novas - local 20.

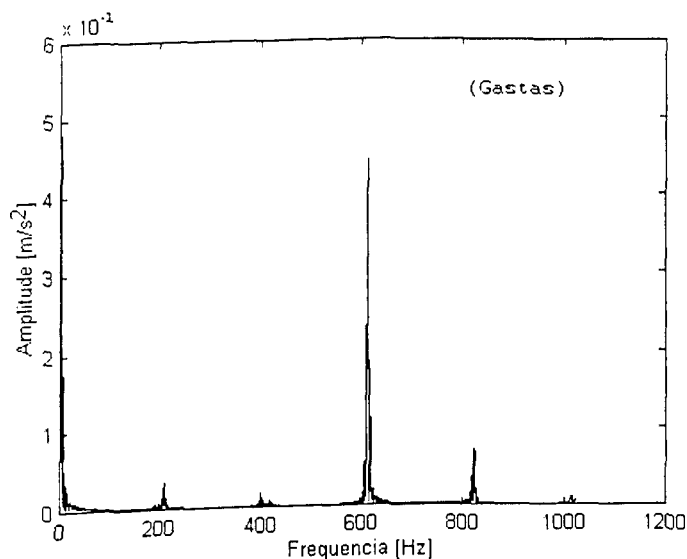


Fig. 6.11 -Espectro na banda de [420 a 730] Hz para arestas gastas - local 20.

Comparando, os valores das amplitudes das acelerações na primeira frequência natural da fresadora, encontradas com a utilização da técnica do Envelope associada a um filtro passa banda de frequência central de 600 Hz, pode-se notar um aumento de 21% no nível da aceleração para a condição de arestas gastas quando os testes são monitorados pelo local 01 e de 42% no nível de aceleração quando os testes são monitorados no local 20.

Técnica que apresenta grande versatilidade no sentido de caracterizar a evolução do desgaste das arestas de corte usando para isto o aumento da magnitude do sinal de aceleração das frequências naturais da fresadora conforme mostrado nas Figuras 6.8 a 6.11.

6.4 - Análise Cepstral.

A análise Cepstral é uma ferramenta matemática que auxilia a interpretação do espectro quando se diz a respeito às bandas laterais de uma frequência central e também prover informações bastantes eficiente em relação à detecção da periodicidade e do aumento das amplitudes das frequências que são excitadas pelo desgaste das arestas de corte.

As Figuras 6.12 e 6.13, mostram os Cepstrum obtidos para as condições de arestas novas e gastas $VB_{max} \cong 1.0$ mm, para os sinais monitorados pelo local 01.

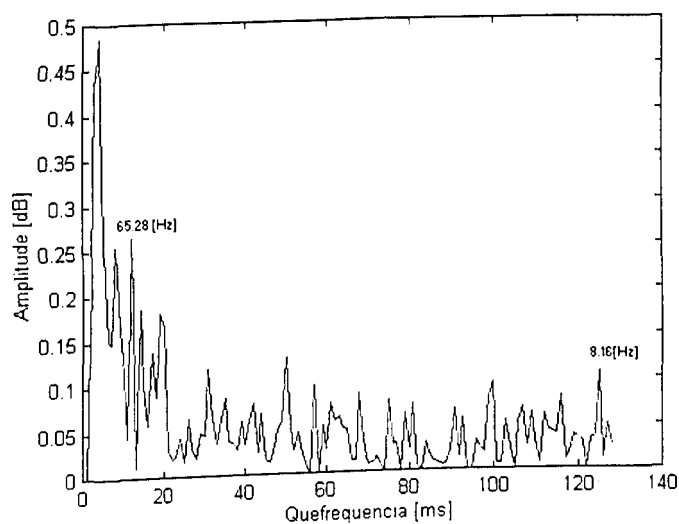


Fig. 6.12 - Cepstrum obtido para arestas novas - local 01.

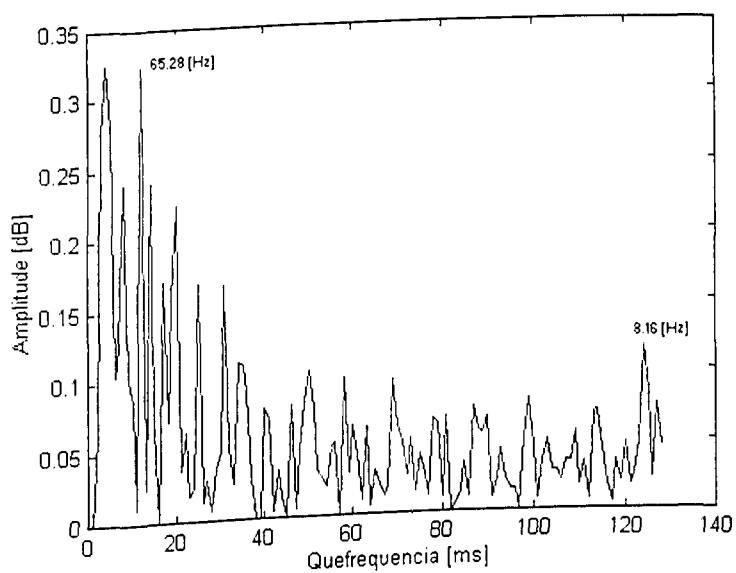


Fig. 6.13 - Cepstrum obtido para arestas gastas $VB_{max} \cong 1.0$ mm - local 01.

Já as Figuras 6.14 e 6.15 apresentam a mesma análise para os sinais monitorados para o local 20.

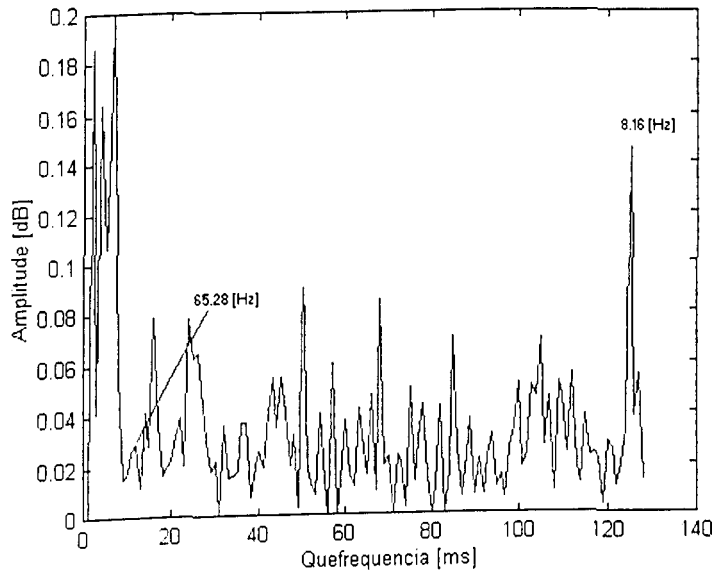


Fig. 6.14 - Cepstrum obtido para arestas novas - local 20.

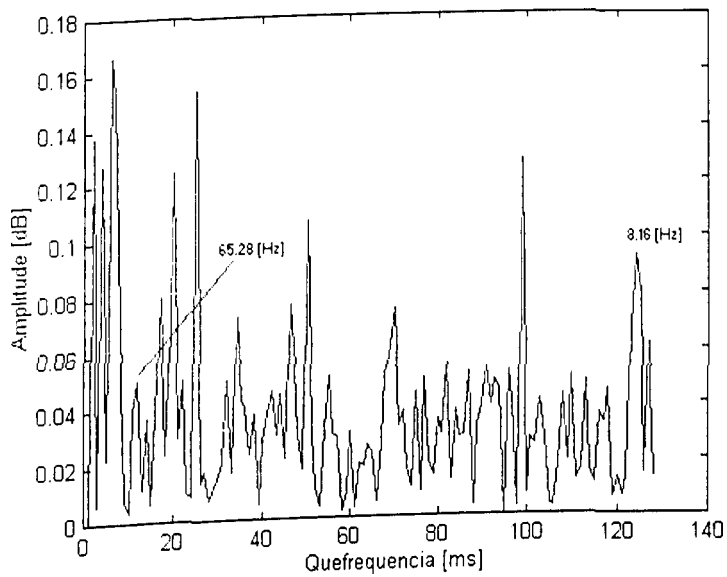


Fig. 6.15 - Cepstrum obtido para arestas gastas $VB_{max} \cong 1.0$ mm - local 20.

Com os Cepstrum obtidos dos sinais monitorados pelo local 01, Figuras 6.12 e 6.13, detectou-se um aumento de 4.0×10^{-3} dB na amplitude da frequência correspondente à rotação da fresa 8.16 Hz e de 9.0×10^{-2} dB na frequência de 65.28 Hz, correspondente à frequência de rotação da fresa vezes o número de arestas de corte.

Já sua aplicação nos sinais monitorados pelo local 20, Figuras 6.14 e 6.15, só pode ser detectado um aumento de 2.5×10^{-2} dB na frequência de 65.28 Hz.

Comparando os Cepstrum dos sinais obtidos do monitoramento no local 01 e local 20, mostrados pelas Figuras 6.12, 6.13 e 6.14, 6.15 respectivamente, pode-se observar que neste caso, que a análise Cepstral é também eficiente no sentido de detectar o aumento do nível de vibração com a evolução do desgaste nas arestas de corte.

6.5 - Análise espectral utilizando filtros de 1/3 de oitava.

Os filtros utilizados para esta análise correspondem aos filtros de 1/3 oitava e a sua aplicação permite caracterizar as sinais em bandas de frequência. Assim as bandas em frequências mais influenciadas pelo desgaste das arestas de corte podem ser determinadas mais facilmente.

Os resultados obtidos pela aplicação destes filtros na análises espectral nos testes realizados, demonstraram que as bandas compreendidas pelas frequências centrais de 80 Hz, 100 Hz, 316 Hz, 400 Hz e 631 Hz foram as que se destacaram com o aumento do nível RMS da vibração devido ao desgaste nas arestas de corte.

Para exemplificar a utilização dos filtros de 1/3 de oitava nos sinais monitorados, a Figura 6.16, mostra uma comparação de dois espectros obtidos para a condição de arestas novas e gastas em bandas de 1/3 de oitava para os resultados monitorados no local 20.

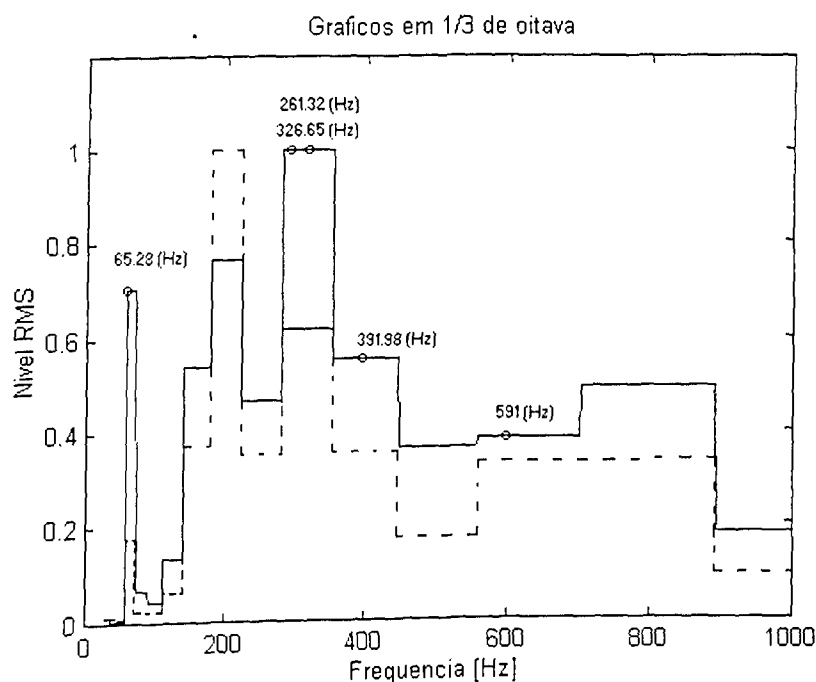


Fig. 6.16 - Espectro de frequência em bandas de 1/3 de oitava do local 20. (-----) Espectro das arestas novas; (—) Espectro das arestas gastas.

No espectro correspondente a das arestas gastas se destacam a frequência de 65.28 Hz (frequência de rotação da fresa vezes o número de arestas de corte) na banda de frequência central de 80 Hz e nas demais bandas as frequências de 261.32 Hz, 326.65 Hz e 391.98 Hz que são frequências múltiplas da rotação da fresa vezes o número de arestas.

Já na banda de frequência central 631 Hz, pode-se ver a influencia do desgaste da ferramenta de corte na primeira frequência natural da fresadora que é 591 Hz.

Com os resultados obtidos neste capítulo, pode-se considerar que todas as arestas de análise de sinal no domínio da frequência utilizadas para analisar os sinais provenientes dos testes de fresamento foram eficientes, no sentido de detectar a evolução do desgaste das arestas de corte e no sentido de caracterizar as frequências do processo de fresamento.

Mas o sucesso da aplicação destas técnicas está intimamente ligado com o conhecimento prévio do comportamento dinâmico da máquina ferramenta, ou seja, o conhecimento dos locais ideais de instalação dos acelerômetros para monitorarem o processo de usinagem.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

As principais conclusões que podem ser tiradas deste trabalho são:

- Apesar do processo de usinagem por fresamento apresentar um elevado grau de complexidade sob o ponto de vista de equacionamento matemático, ele pode ser caracterizado experimentalmente através da medição *on line* da vibração mecânica gerada durante o processo de usinagem, desde que se conheça os locais ideais para a instalação dos acelerômetros na estrutura da máquina fresadora.
- Uma análise de sensibilidade fundamentada nas Funções Respostas em Frequência, demonstrou ser bastante eficiente para identificar os locais ideais para a instalações dos acelerômetros para monitorarem as máquinas ferramentas que possuem um alto grau de complexidade de trabalho.
- O parâmetro estatístico Kurtosis demonstrou ser eficiente no sentido de fornecer informações sobre a evolução do desgaste das ferramentas de corte. Mas, não apresentou variações significativas para servir de parâmetro de controle de fim de vida das ferramentas de corte.
- O nível Pico e o nível RMS do sinal, foram os parâmetros que apresentaram uma melhor correlação do desgaste das ferramentas de corte com o nível de vibração monitorados durante os testes de fresamento.
- A correlação entre o acabamento superficial da peça usinada com os níveis RMS ou Pico dos sinais de vibração mecânica gerada durante o processo de fresamento, pode ser estimada satisfatoriamente por uma função polinomial de terceiro grau, devido os valores

estimados apresentarem um erro aceitável quando comparados com o parâmetro Ra medido por um rugosímetro.

- De um modo geral, as técnicas no domínio da frequência normalmente utilizadas em manutenção preditiva, são também boas para a análise dos sinais de vibração gerados durante processo de usinagem por fresamento e de acordo com os resultados obtidos nos estudos no domínio do tempo e no domínio da frequência, a técnica de monitoramento *on line*, via vibração mecânica é ideal para ser aplicada tanto no controle de vida das ferramentas de corte da fresa como também para a estimativa do acabamento superficial de uma peça fresada.

Como sugestão para trabalhos posteriores tem-se:

- Fazer um estudo mais específico, visando encontrar mais dados para justificar a razão da queda do sinal de vibração com VB_{max} próximo de 0,5 / 0,55 mm.

- Em função dos resultados obtidos da análise em frequência, sugere-se um estudo mais abrangente no sentido de desenvolver uma metodologia capaz de quantificar valores para definir o momento de troca das ferramentas e ainda de identificar possíveis falhas das ferramentas de corte durante o processo de fresamento.

- Fazer um estudo sobre a viabilização da utilização das Redes Neurais para estimar o acabamento superficial da peça fresada, utilizando para isto os próprios sinais de vibração gerados durante o processo de usinagem com os parâmetros de corte definidos para proceder o fresamento.

CAPÍTULO 8

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bendat, J. S. and Piersol, A. G., 1986, "Random Data Analysis and Measurement Procedures", Interciencia, New York.
- Bonifácio, M. E. R. and Diniz, E. A., 1994, "Monitoring the Tool Life in Finish Turning Using Vibration Signals", J. of the Braz. Soc. Mechanical Sciences Vol. XVI, pp 58-71.
- Braga, D. V., 1992, "Monitoramento do processo de Torneamento via Parâmetros Elétricos do Motor da Máquina", Tese de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, SP.
- Braga, D. V., Diniz, E. A. e Cupini, N. L., 1993, "Monitoramento Indireto da Vida da Ferramenta de Torneamento usando Parâmetros Elétricos da Máquina Ferramenta", J. of the Braz. Soc. Mechanical Sciences Vol. XV, pp 210-220.
- Braun, S. and Lenz, E., 1996, "Mechanical Signature Analyses", Academic Press Ed. S. Braun, pp 321-342.
- Braun, S. Lenz, E. and Wu, C., 1982, "Signature analyses applied to drilling", Trans. ASME, J. Mech. Design Vol. 104, pp 268-276.
- Crede, C. and E. Haris., 1961, "Shock and Vibration Handboock", Mc Graw-Hill Book Company.
- Choudhury, S. K. and Mathew, J., 1995, "Investigations of effect of Non Uniformes insert Pitch on Vibration dynamic Face Milling", Int. Mach. Tools Manufact. Vol. 35, pp 1435-1449.
- Dan, L. and Mathew, J., 1990, " Tool Wear and Failure Monitoring Techiques for Turning Review", Int. Journal Mach. Tools Manufact. Vol. 30, pp 579-598.
- Dearnly, P. A. and Trent, E. M., 1982, "Wear Mechanisms of Coated Carbides Tools, Metals Technology", Vol 9, pp 60-75.
- Diei, E. N. and Dornfeld, D. A., 1987, "Acoustic Emission Sensing of Tool Wear in face Milling", Transactions of the ASME Vol.109, pp 234-240.
- Diyan, El Warnady, T. I. and Elbestawi, M. A., 1995, "A Multi-sensor Stratygy for Tools Failure Detection in Milling" Int. Mach. Tools Manufact, Vol. 35, pp 383- 398.
- Diniz, A. E. e Pigari, A., 1996, "Monitoramento do Desgaste da Ferramenta no processo de Torneamento usando Emissão Acústica", RBCM J.of Braz. Soc. Mechanical Sciences Vol.XVIII pp 227-238.

- Du, R., Elbestawi, M. A. and Wu, S. M., 1995, "Automated Monitoring of Manufacturing Processes Part I, Monitoring Methods", *Journal of Engineering for Industry* Vol 117, pp 121-131.
- Duarte, M. A., 1997, "Manutenção Preditiva via Monitoramento da Vibração", Universidade Federal de Uberlândia, 85 pp.
- Ewins, D. J., 1984, "Modal Testing Theory and Practics", Research Studies Ltd.
- EL Wardany, G. D., and Elbestawi, M. A., 1996, "Tool Condition Monitoring in Drilling Using Vibration Signature Analysis", *Int. J. Machine Tools Manufacturing* Vol. 36 pp 687-711.
- Fayolle, C., 1983, "Analyse Statistique de la Topographie des Surfaces", These de Docteur, L'ecole Centrale de Lyon, France.
- Ferraresi, D., 1972, "Fundamentos da Usinagem dos Metais", Ed. Edgard Blucher Ltda, São Paulo.
- Groover, M. P., 1987, "Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing", Prentice Hall Int, Ed., Usa.
- Heisel, U. and Milberg, J., 1994, "Vibrations and Surface Geration in Slab Milling", *Annals of the CIRP* Vol. 43, pp 337-340.
- Jang, D. Y., Choi, Y, Kim, H. G. and Hsiao, A., 1996, "Study of the Correlation Between Surface Roughness and Cutting Vibrations to Develop an on-line Roughness Measuring Technique in Hard Turning", *Int. J. Mach. Manufact.* Vol. 36, pp 453-464.
- Lem, C. S, Dornfeld, D. A. and Dreyfus, S. E., 1995. "A Customized Neural Network for Sensor Fusion in On -Line Monitoring of Cutting Tool Wear". *Transactions of ASME* Vol. 117, pp 152-159.
- Machado. A. R. e da Silva, B.M., 1998, "Usinagem dos Metais", Editora Universidade Federal de Ubelândia. 171 pp.
- Martin, K. F., 1994, "A Review by Discussion of Condition Monitoring and Fault Diagnosis in Machine", *Tools Int. J. Mach Manufact.* Vol. 34, pp 527-551.
- Nassipour, F., and WU, S. M., 1977, "Statistical Evaluation of Surfaces Finish and its Relation to Cutting Parameters in Turning", *Int. J. Mach. Tool. Des. Res.* vol 17, pp 197-208.
- Nakayama, K, SHAW, M. C., and BREWER, R. C., 1966, "Relationship Between Cutting Forces, Temperature, Built-up Edge and Surface Finish", *Annals of CIRP*, vol 14, pp 213-223.
- Norma ABNT NBR 6162, 1989, "Movimentos e Relações Geométricas na Usinagem dos Metais - Terminologia."

- Norma ABNT NBR 6163, 1980, "Conceitos das Técnicas de Usinagem - Geometria da Cunha Cortante- Terminologia."
- Norma ISO 3685, 1977, "Tool Life Testing With Single-Point Turning Tools."
- Norma ABNT 6405, 1985, "Rugosidade das Superfícies."
- Rossi, M, 1970, "Máquinas Operatrizes Modernas", Vol. I e II, Editora Científica-Médica.
- Sata, T., 1963, "Surface Finish in Metal Cutting", Annals of the CIRP, vol 12, pp 190-197.
- Schffer, G. H., 1988, "The Many Faces of Surface Texture", American Machinist and Automated Manufacturing, pp 61-68.
- Shaw, M. C., 1986, "Metal Cutting Principles", Oxford University Press, New York. USA.
- da Silva, D. A., 1994, "Uma Metodologia para Otimização Automática de Parâmetros de Usinagem", Tese de Doutorado UFSC, Florianópolis SC.
- Smith, T. Graham., 1989, "Advanced Machining - The handbook of Cutting Technology", IFS Publications Ltd.
- Sousa, S. D. P.. 1980, "Estudo das Superfícies Técnicas", Ed. Nobel.
- de Sousa, M. M., 1990, "Desenvolvimento de um Microscópio Mecânico de Varredura Controlado por um Computador". Tese de Mestrado UFU, Uberlândia MG.
- de Sousa, M. M., Duarte, M. A. V. and Machado, A. R., 1997, "Vibration Sensitivity Analysis of a Milling Machine for Tool Wear Monitoring Purpose", Diname 97, pp 208-210.
- de Sousa, M. M., Duarte, M. A. V. and Machado, A. R., 1997, "Monitoramento do Desgaste de ferramentas de Corte de uma fresadora". III Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Havana, Cuba. Anais em CD. paper num. 4182.
- de Sousa, M. M., Duarte, M.A.V. e Machado, A.R., 1997, "Monitoramento do Acabamento Superficial no Fresamento via Vibrações". XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Bauru, SP. Anais em CD Room. paper num. 674.
- Targ, Y. S, Hseih, Y. W. and Hwang G. S. T., 1994, "Sensing Tool Breakage in Face Milling with A Neural Network" - Int. J. Mach. Tools Manufact Vol. 34, pp, 341- 350.
- Trent, E. M., 1984, "Metal Cutting", 2nd Edition Butterwords.
- Stewart, R. M., 1977, "Some Useful Data Analysis Techniques for Gearbox Diagnostics" Proc. of. Meeting on Applications of Time Series Analysis", ISVR, pp 19.
- Wadley, H. N. G, SCRUBY, B. and SPEAKE, J. H., 1980, "Acoustic Emission for Physical Examination of Metals International Metals Reviews", pp 41 - 64.

Wright, P.K., and BIAGCHI, A., 1981, "Wear Mechanisms that Dominates Tool-Life in Machining". Journal Applied Metal Working, ASM, Vol 1, pp 15-23.

CAPÍTULO 9

ANEXO 1

ESTIMATIVA DAS FUNÇÕES RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA (FRF)

Todo sistema linear de parâmetros constantes, fisicamente realizável e estável pode ter suas características dinâmicas descritas por uma Função Resposta em Frequência - $H(\omega)$, que é definida pela transformada de Fourier da Função ao Impulso unitário - $h(\tau)$, dada pela Equação 9.1.

$$H(\omega) = \int_0^{\infty} h(\tau) \cdot e^{-j(2\pi\nu\tau)} d\tau \quad (9.1)$$

Para este sistema, a FRF pode substituir a Função de Transferência sem que ocorra perda de informações úteis. Em sistemas estáveis e fisicamente realizáveis a resposta ou saída $y(t)$ decorrente de uma entrada, é dada pela conhecida Integral de Duhammel ou Teorema da Convolução (Bendat e Piersol, 1986).

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)x(t - \tau)d\tau \quad (9.2)$$

Aplicando-se a Transformada de Fourier em ambos os lados da Equação 9.2 têm-se:

$$Y(\omega) = H(\omega)X(\omega) \quad (9.3)$$

A Equação 9.3, indica que é possível caracterizar dinamicamente um sistema relacionado-se sua entrada com sua saída no domínio da frequência, reduzindo a integral de convolução a uma simples expressão algébrica, onde $X(\omega)$ e $Y(\omega)$ são Transformadas de Fourier de $x(t)$ e $y(t)$ respectivamente.

A obtenção das Funções Respostas em Frequência é um dos elementos mais importantes para a execução de um procedimento de análise modal bem sucedido de caracterização de sistemas dinâmicos, daí a menção a este assunto dentro deste trabalho.

9.1 - Estimação das FRFs.

Considerando o sistema mostrado na Figura 9.1, onde $x_v(t)$ é a força de excitação e $y_v(t)$ a saída, sendo ambas contaminadas por fontes de ruído branco, $w(t)$ e $n(t)$ respectivamente.

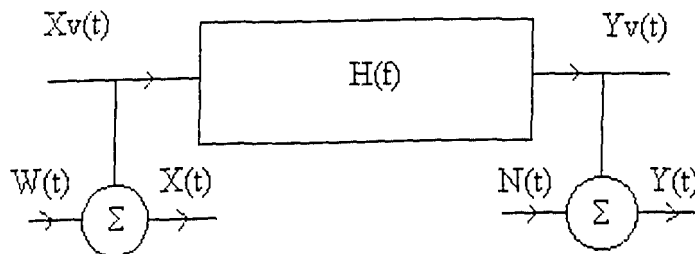


Fig. 9.1 - Obtenção da FRF de um sistema com erro na entrada e na saída.

A Função Resposta em Frequência para o sistema demonstrado na Figura 9.1, é definida, em cada ponto, pela Equação 9.4.

$$H(f) = Y(f)/X(f) \quad (9.4)$$

Na prática $w(t)$ e $n(t)$ são diferentes de zero, logo alguma forma de média deve ser realizada para se reduzir os efeitos dos mesmos. Se um número "N" de diferentes seqüências de dados forem consideradas, a influencia dos ruídos nos auto-espectros envolvendo os sinais de entrada e saída, necessários para estimar as FRFs pode ser observada nas Equações 9.5 e 9.6.

$$G_{XX} = \frac{\bar{X}_v^H \bar{X} + \bar{X}_v^H \bar{N} + \bar{N}^H \bar{X}_v + \bar{W}^H \bar{W}}{N} \quad (9.5)$$

$$G_{YY} = \frac{\bar{Y}_v^H \bar{Y} + \bar{Y}_v^H \bar{N} + \bar{N}^H \bar{Y}_v + \bar{N}^H \bar{N}}{N} \quad (9.6)$$

Devido a característica apresentada pelos ruídos, tem-se que os termos $\bar{X}_v^H \bar{W}$ e $\bar{Y}_v^H \bar{N}$, das Equações 9.5 e 9.6 tendem a zero, ao se reduzir um grande número de médias (Bendat e Piersol, 1986).

Os auto-espectros apresentam-se polarizados em decorrência dos ruídos existentes, o que pode ser notado no termos $\bar{N}^H \bar{N}$ e $\bar{W}^H \bar{W}$, presentes no lado esquerdo das Equações 9.5 e 9.6, respectivamente.

A Equação 9.4 pode ser escrita, ignorando-se os ruídos, como:

$$\begin{bmatrix} X_1(\omega) \\ \vdots \\ X_N(\omega) \end{bmatrix} H(\omega) = \begin{bmatrix} Y_1(\omega) \\ \vdots \\ Y_N(\omega) \end{bmatrix} \quad (9.7)$$

ou na forma resumida:

$$\bar{X}(\omega)H = \bar{Y}(\omega) \quad (9.8)$$

9.2 - O estimador H1

Considerando a não ocorrência de ruído na entrada do sistema expressa-se a Equação 9.8

como:

$$\bar{Y} = \bar{X}H + \bar{N} \quad (9.9)$$

Minimizando a função $\bar{N}^H \bar{N}$, estima-se o melhor valor para H1 como sendo:

$$H1(\omega) = \frac{\bar{X}^H \bar{Y}}{\bar{X}^H \bar{X}} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i^* Y_i}{\sum_{i=1}^N X_i^* X_i} \quad (9.10)$$

Observando o numerador e o denominador da Equação 9.10, verifica-se que não existem tendências estatísticas causadas por ruídos presentes na saída. Entretanto, as mesmas ocorrerão devido aos ruídos presentes na entrada, fato evidenciado nos termos $X_i^* X_j$.

Por não contabilizar o erro na saída, este estimador apresenta resultados acurados nas regiões de anti-ressonância, onde a necessidade de um grande sinal de entrada para gerar algum sinal de saída, logo a existência de ruído do sistema, mesmo que de intensidade relativamente baixa, resultará em estimativas incorretas para a FRF.