

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE MULTI-RESOLUÇÃO NA DETERMINAÇÃO DO DESGASTE DE FERRAMENTAS EM TORNEAMENTO

Autor : ROBERTO FERNANDES TAVARES FILHO

Orientador: ANSELMO EDUARDO DINIZ

40/96

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR ROBERTO FERNANDES
TAVARES FILHO E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 20/09/96.
Anselmo Eduardo Diniz
ORIENTADOR

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

**ANÁLISE MULTI-RESOLUÇÃO NA DETERMINAÇÃO DO
DESGASTE DE FERRAMENTAS EM TORNEAMENTO**

Autor : ROBERTO FERNANDES TAVARES FILHO

Orientador: ANSELMO EDUARDO DINIZ

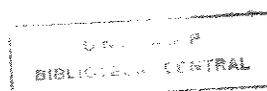
Curso: Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Tese de Doutorado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas, 1996

S.P. - Brasil



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA	T197a
V.	Ex.
TRABALHO	80/29005
PREÇO	667,96
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	22,00
DATA	05/11/96
N.º C.F.D.	

CM-00094588-7

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

T197a	<p>Tavares Filho, Roberto Fernandes</p> <p>Análise multi-resolução na determinação do desgaste de ferramentas em torneamento / Roberto Fernandes Tavares Filho.--Campinas, SP: [s.n.], 1996.</p> <p>Orientador: Anselmo Eduardo Diniz. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.</p> <p>1. Máquinas - Ferramenta - Monitoramento. 2. Processamento de sinais - Análise espectral. 3. Ondas (Física). I. Diniz, Anselmo Eduardo. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.</p>
-------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

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

Tese de Doutorado

ANÁLISE MULTI-RESOLUÇÃO NA DETERMINAÇÃO
DO DESGASTE DE FERRAMENTAS EM
TORNEAMENTO

Autor : ROBERTO FERNANDES TAVARES FILHO

Orientador: ANSELMO EDUARDO DINIZ



Prof. Dr. ANSELMO EDUARDO DINIZ, Presidente
UNICAMP



Prof. Dr. JOÃO FERNANDO GOMES DE OLIVEIRA



Prof. Dr. LOURIVAL BOËHS



Prof. Dr. OLÍVIO NOVASKI



Prof. Dr. ROBSON PEDERIVA

Campinas, 10 de agosto de 1996

Dedicatória:

Dedico este trabalho à minha esposa, indecifrável complexo de emoções e grande responsável pelo eterno otimismo que guia nossa vida.

Agradecimentos

Agradeço ao professor Anselmo Eduardo Diniz pela eficiente orientação e constante presença durante todo o decorrer desta pesquisa.

Agradeço à Fundação Centro Tecnológico Para Informática, na pessoa do meu chefe imediato, Rubens Campos Machado e do diretor do Instituto de Automação, Alberto Elfes, pela autorização e incentivo para a realização deste trabalho.

Aos meus colegas de trabalho, especialmente ao Marcelo Fernandes de Oliveira e ao Marcos R. Bonifácio, por toda ajuda durante o desenvolvimento e implementação do software e hardware e dos procedimentos de aquisição dos dados.

A meus filhos, Roberto, Tiago e Ana, por terem aceitado de forma tão consciente e madura, a diminuição de nossas horas conjuntas de lazer em função da execução deste trabalho, e por não terem me deixado extrapolar, acima dos limites razoáveis, as horas a ele dedicado.

Sumário

Introdução.....	12
Processamento de Sinais e Wavelets. Uma revisão da teoria..	18
A Monitorização da Usinagem.....	48
Procedimentos Experimentais.....	84
Resultados e Discussões.....	100
Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.....	140
Referências Bibliográficas.....	143
Apêndice 1.....	152
Apêndice 2.....	161
Apêndice 3.....	166
Apêndice 4.....	171
Apêndice 5.....	176

Lista de Figuras

Figura 2.1: Classificação dos sinais	24
Figura 2.2: Forma de onda para decomposição	29
Figura 2.3: Wavelet de Haar	30
Figura 2.4: Wavelet de Haar para os níveis 0,1 e 2	31
Figura 2.5a: Representação linear da decomposição de uma onda quadrada	39
Figura 2.5b: Representação em círculo de wavelets da decomposição de uma onda quadrada	40
Figura 2.6: Análise de um sinal bi-tonal I	42
Figura 2.7: Análise de um sinal bi-tonal II	43
Figura 2.8: FFT de sinais simples e com transiente	45
Figura 2.9: Wavelets de sinais simples e com transientes	46
Figura 2.10: Inversa da wavelet do nível 3	47
Figura 3.1: Sistema de Monitorização necessários em um FMS	50
Figura 3.2: Vida em Min para diversas velocidades de corte	58
Figura 3.3: Classificação dos principais sensores de desgaste	63
Figura 4.1. Posicionamento do acelerômetro	
Figura 4.2: Corpo de prova Tipo I.	89
Figura 4.3: Corpo de prova Tipo II.	89
Figura 4.4: Diagrama em blocos da aquisição de dados	90
Figura 4.5. Resposta em frequência do acelerômetro	91
Figura 4.6. Exemplo de aquisição com o perfil I de aquisição	95
Figura 5.1: $R_a \times L_c$ para $v_c = 200$ m/min e $f = 0.13$ mm/volta	103
Figura 5.2 $R_{max} \times L_c$ para $v_c = 200$ m/min e $f = 0.13$ mm/volta	103
Figura 5.3. RMS da aceleração para $v_c = 200$ m/min e $f = 0.13$ /volta	107
Figura 5.4.RMS da aceleração para $v_c = 300$ m/min e $f = 0.13$ mm/volta	108
Figura 5a Espectro de frequências para o início do corte	110
Figura 5b. Espectro de frequências para o 50% do corte	110
Figura 5c. Espectro de frequências para 90% do corte	11
Figura 5.5d Espectro de potência para . 100% do corte	11
Figura 5.6 Círculo de wavelets para $L_c =$ inicial	113
Figura 5.7 Círculo de Wavelet para $L_c = 50\%$ do comprimento de corte	113
Figura 5.8 Círculo de wavelets para $L_c = 90\%$ do comprimento de corte	114

Figura 5.10. RMS da velocidade para $v_c = 200$ m/min e $f = 0.13$ mm/volta	117
Figura 5.11a Espectro de potência da velocidade para $L_c = 0$	118
Figura 5.11b Espectro de potencia da velocidade para $L_c = 50\%$	118
Figura 5.11c Espectro de potência da velocidade para $L_c = 90\%$	119
Figura 5.11d Espectro de potência da velocidade para $L_c = 100$	119
Figura 5.12 Wavelet da velocidade $L_c = 0$	121
Figura 5.13 Wavelet da velocidade $L_c = 50\%$	121
Figura 5.14 Wavelet da velocidade $L_c = 90\%$	122
Figura 5.15 Wavelet da velocidade $L_c = 100\%$	122
Figura 5.16 RMS da inversa do nível 3 da wavelet de velocidade	123
Figura 5.17. RMS do deslocamento $v_c = 200$ m/min e $f = 0.13$ mm/volta	124
Figura 5.18. RMS do deslocamento para $v_c = 200$ m/min $f = 0.20$ mm/volta	1125
Figura 5.19. Variação do espectro de frequências do deslocamento para o ensaio $v_c = 200$ m/min e $f = 0.13$ mm/volta	126
Figura 5.20. RMS do inversa do nível 3 da wavelet deslocamento	127
Figura 5.21 Rugosidade R_a e RMS inversa wavelet $v_c = 200$ m/min $f = 0.13$ mm/volta	129
Figura 5.22 Rugosidade R_a e RMS inversa wavelet $v_c = 200$ m/min $f = 0.15$ mm/volta	130
Figura 5.23 Rugosidade R_a e RMS inversa wavelet $V_c = 225$ $f = 0.15$	131
Figura 5.24 Rugosidade R_a e RMS inversa wavelet $v_c = 275$ m/min $f = 0.15$ mm/volta	132
Figura 5.25 Rugosidade R_a e RMS inversa wavelet $v_c = 300$ m/min $f = 0.13$ mm/volta	133
Figura 5.26 Rugosidade R_a e RMS inversa wavelet $v_c = 300$ m/min e $f = 0.15$ mm/volta	134
Figura 8.1- $R_a \times L_c$ para $V_c = 200$ e $f = 0.15$	153
Figura 8.2- $R_{max} \times L_c$ para $V_c = 200$ $f = 0.15$	154
Figura 8.3- $R_a \times L_c$ para $V_c = 200$ e $f = 0.20$	155
Figura 8.4 - $R_{max} \times L_c$ para $V_c = 200$ e $f = 0.20$	156
Figura 8.5 $R_a \times L_c$ para $V_c = 225$ e $f = 0.15$	157
Figura 8.6 - $R_{max} \times L_c$ para $V_c = 225$ e $f = 0.15$	158
Figura 8.7. $R_a \times L_c$ para $V_c = 300$ e $f = 0.13$	159
Figura 8.8 - $R_{max} \times L_c$ para $V_c = 300$ e $f = 0.13$	159
Figura 8.9. $R_a \times L_c$ para $V_c = 300$ e $f = 0.2$	160
Figura 8.10. $R_{max} \times L_c$ para $V_c = 300$ e $f = 0.2$	160

Figura 9.1. RMS da aceleração para $V_c=200$ e $f=0.15$	162
Figura 9.2. RMS da aceleração para $V_c=200$ e $f=0.20$	163
Figura 9.3. RMS da aceleração para $V_c=225$ e $f=0.15$	164
Figura 9.4 .RMS da aceleração para $V_c=300$ e $f=0.15$	165
Figura 9.5 .RMS da aceleração para $V_c=300$ e $f=0.20$	165
Figura 10.1. RMS da velocidade para $V_c=200$ e $f=0.15$	167
Figura 10.2. RMS da velocidade para $V_c=200$ e $f=0.20$	167
Figura 10.3 RMS da velocidade para $V_c=225$ e $f=0.15$	168
Figura 10.4. RMS da velocidade para $V_c=300$ e $f=0.15$	169
Figura 10.5 RMS da velocidade para $V_c=300$ e $f=0.20$	170
Figura 11.1. RMS do deslocamento para $V_c=200$ e $f=0.15$	172
Figura 11.2. RMS do deslocamento para $V_c=200$ e $f=0.20$	172
Figura 11.3. RMS do deslocamento para $V_c=225$ e $f=0.15$	173
Figura 11.4. RMS do deslocamento para $V_c=300$ e $f=0.15$	174
Figura 11.5 RMS do deslocamento para $V_c=300$ e $f=0.20$	175
Figura 12.1. RMS da wavelet inversa para $V_c=200$ e $f=0.15$	177
Figura 12.2. RMS da wavelet inversa para $V_c=200$ e $f=0.20$	177
Figura 12.3. RMS da wavelet inversa para $V_c=225$ e $f=0.15$	178
Figura 12.4. RMS da wavelet inversa para $V_c=300$ e $f=0.15$	179
Figura 12.5 RMS da inversa da wavelet para $V_c=300$ e $f=0.20$	180

Lista de Tabelas

<i>Tabela 2.1: Número de multiplicações para as várias transformadas</i>	33
<i>Tabela 2.2: Código de cores dos valores dos coeficientes</i>	37
<i>Tabela 3.1: Vida de Ferramentas de Torneamento para diversos Avanços e Velocidades de Corte.</i>	55
<i>Tabela 3.2: Faixas de frequência de vibração sensíveis ao desgaste</i>	77
<i>Tabela 3.3: Fatores que influenciam vibração em processo de usinagem</i>	80
<i>Tabela 4.1:- Matriz de experimentos</i>	88
<i>Tabela 5.1:. Comprimento de corte para Ra= 3 μm</i>	106
<i>Tabela 5.2: Faixas de frequências de cada nível de wavelet</i>	115
<i>Tabela 5.3:. Comparação dos níveis de detecção de fim de vida por dois parâmetros</i>	136

Nomenclatura

τ	tempo de aquisição
Ψ	wavelet mãe
a	dilatações da wavelet
b	translações da wavelet
d	diâmetro em mm
f	avanço, em mm/volta
L_c	comprimento de corte
L_f	comprimento de avanço
n	rotação em r.p.m
R_a	rugosidade média
R_{max}	rugosidade max
ru	ruído
sd	sinal devido ao desgaste
sm	sinal devido às constantes de máquina
T	tempo de corte em minutos
T^{janf}	transformada de Fourier janelada
T^{wavf}	transformada de wavelet
v_c	velocidade de corte em m/min
V_{pp}	tensão pico a pico

Resumo

Tavares Filho, Roberto F. *Análise Multiresolução na Determinação do Desgaste de Ferramentas em Torneamento*. Faculdade de Eng. Mecânica. UNICAMP. 1996- 180 p. Tese.

O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados do desenvolvimento de uma técnica de determinação da rugosidade de peças que sofreram operações de torneamento em acabamento, com o fim de se estabelecer o fim da vida da ferramenta, já que o crescimento da rugosidade é fortemente dependente do desgaste da ferramenta nestas operações. A técnica aqui desenvolvida utiliza-se de transformações matemáticas, de implementação simples, exercidas sobre o sinal de aceleração capturado junto ao porta-ferramentas. Devido à simplicidade da técnica, é possível a operação em tempo real, atuando tanto no auxílio ao operador como na operação autônoma da máquina. O sistema baseia-se na transformação do sinal temporal correspondente ao comportamento da aceleração do porta-ferramentas, para o sinal de deslocamento correspondente e o subsequente mapeamento deste sinal para o domínio escala-tempo. Dentro do plano escala-tempo são selecionadas as escalas mais representativas da parcela do sinal correspondente ao desgaste da ferramenta (e por conseguinte, à rugosidade da peça). O sinal nesta escala é novamente convertido para o domínio do tempo e técnicas estatísticas (RMS) são empregadas para obter-se um índice associado ao desgaste. O software desenvolvido implementa, em linguagem C++, a transformada discreta de wavelet, Daubechies D4, assim como transformações temporais (integral e correção de nível médio) e procedimentos estatísticos simples. O sistema foi experimentado em várias condições de usinagem, no laboratório da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, apresentando excelente correlação entre o índice elaborado e o desgaste e rugosidades reais apresentado.

Abstract

Tavares Filho, Roberto F. *Multiresolution Analysis in Turning Tool Wear Determination*. Faculdade de Eng. Mecânica. UNICAMP. 1996- 180 p. Thesis.

The purpose of this work is to show the results of the developing of a technique aimed to determine the roughness in finished turned parts, in order to automatically establish the end of tool life. This technique uses simple mathematical transformations, applied on the accelerations signals got at the tool-holder. Due to the easy implementation, it is possible the operation in real time, just helping the operator or even in the case of unattended machining. The system is based in applying a transformation to the accelerating signal obtained in the tool- holder to get the correspondent displacement signal, and after this, mapping this time domain signal to the time-scale domain, using Daubechies wavelets. In the time-scale domain the most representatives scales (in respect to the tool wear sensibility, and, so, to the part roughness) are selected. These wavelets are inverted back to a time-representation and statistical methods (RMS) are used, making possible the determination of a index that is associate to the wear of the cutting tool. The software was developed in C++, implementing the discrete wavelet transform Daubechies D4, as all the temporal transformations (integral and mean factor correction), and all other simples statistical procedures. This system was experimented in different cutting conditions in turning operations in a Laboratory of the College of Mechanical Engineering (UNICAMP), showing excellent correlation between the real tool wear and the calculated one.

Capítulo 1

Introdução

A crescente tendência ao uso de sistemas de produção automatizados tem feito emergir um vasto leque de problemas, que devem ser enfrentados antes de que o conceito de "fábrica de luz apagada", (com um mínimo de intervenção humana) possa vir a se tornar realidade na área de produção metal-mecânica. Os problemas nos níveis de coordenação, gerenciamento (MRPII) e supervisão (SDCD) já são atendidos, ao menos em termos de necessidades básicas, pelos sistemas hoje disponíveis, porém o mesmo não se pode dizer de alguns tipos de controle em chão de fábrica, que são tradicionalmente um "reduto" do operador. Operações tais como a identificação do momento de troca da ferramenta e a sua troca propriamente dita, são operações difíceis de serem realizadas de forma automática, porém são indispensáveis de serem implementadas quando se deseja a completa automação do sistema produtivo.

Convencionalmente tem se utilizado de técnicas estatísticas para a determinação do momento de troca da ferramenta. Este procedimento, além de pouco eficiente devido às altas margens de segurança necessárias para cobrir a grande dispersão nos valores de vida de ferramenta, torna-se praticamente inútil quando as condições do uso da ferramenta apresentam grande variabilidade de peças, o que ocorre freqüentemente em células flexíveis de manufatura.

À medida que os recursos de hardware para processamento de sinais decrescem em custo e aumentam em potencial de processamento, torna-se possível implementar mais inteligência na máquina. Procedimentos que até pouco tempo eram restritos

aos laboratórios, tornam-se de uso rotineiro em indústrias, com aumento substancial da qualidade dos produtos. As técnicas de análise em si, no entanto, não apresentam a mesma taxa de desenvolvimento do que a apresentada pelo hardware, resultando em softwares que vem implementando cada vez mais rápido e com maior precisão, conceitos que foram desenvolvidos já no século passado (como por exemplo a transformada de Fourier). Embora confiáveis dentro de seus limites, os desafios oferecidos pelas novas necessidades de análise demandam o desenvolvimento de novos conceitos e dos softwares que os implementem, permitindo obter-se novas informações dos mesmos sinais de forma mais rápida, mais eficiente e segura.

A extração das informações úteis imersas dentro de um sinal composto de formas complexas e variantes no tempo, tem sido um problema sempre presente na análise de sinais. Ao longo do tempo várias técnicas têm sido desenvolvidas pelos pesquisadores com este objetivo. Técnicas no domínio do tempo, com a ajuda valiosa da estatística, já são de conhecimento amplo, assim como a análise no domínio da frequência, iniciada com Fourier e otimizada pelos pesquisadores que o seguiram.

Tanto a análise no domínio do tempo, quanto no domínio da frequência, no entanto, são apenas de parcial valia no caso de estudo de sinais não-estacionários. Estes sinais, que possuem conteúdo espectral variante no tempo, apresentam inúmeros empecilhos teórico-práticos quando submetidos às análises convencionais. Frequentemente se é forçado a assumir um comportamento estacionário, mesmo quando se sabe, a priori, que isto não é verdade. O resultado da análise passa então a ser um pouco subjetiva, sendo fortemente influenciada pela experiência do pesquisador.

Outra dificuldade apresentada pelas técnicas hoje utilizadas no domínio da frequência é que se decompõe o sinal em sinais senoidais puros, que retratam com dificuldade a real

forma dos sinais encontrados na prática, geralmente formas complexas e muitas vezes com comportamento fractal.

Este trabalho utiliza-se de uma terceira forma de análise, a análise escala-tempo. Sendo um tipo relativamente novo de análise, muito se tem ainda a descobrir sobre suas formas de aplicação na solução de problemas práticos de análise de sinal, seja de forma independente, seja combinado com procedimentos convencionais de análise.

A técnica aqui desenvolvida foi utilizada para a determinação do desgaste de ferramentas de corte em operações de acabamento em torneamento e, com isto, determinar o momento de troca da ferramenta. A partir da análise do sinal de aceleração obtido junto ao porta-ferramenta, aplica-se um conjunto de transformações matemáticas que implementam a análise escala tempo sobre um sinal proporcional ao deslocamento sofrido pelo porta-ferramenta. O resultado desta análise é um sinal proporcional ao desgaste da ferramenta de corte, que pode ser utilizado para comandar a troca da mesma, seja através de um aviso ao operador, seja de uma forma automática, através de um comando ao CNC de controle do torno.

A teoria aplicada neste trabalho, qual seja, a decomposição de um sinal em "wavelets", ou ondículas, é um desenvolvimento relativamente recente, de cerca de 12 anos. Embora os fundamentos necessários tenham sido descobertos há cerca de um século, foi só na década passada que todas teorias, desenvolvidas de uma forma dispersa e com pouca correlação conhecida entre elas, foram unificadas dentro de um conceito único que permitiu a elaboração da teoria hoje conhecida como "wavelets" .

Assim como a transformada de Fourier decompõe um sinal em senos e cossenos de fases e frequências diversas, a transformada de wavelets decompõe o sinal em ondículas, de

forma idêntica, porém de largura e posição temporal diferentes. A ondícula da transformada de wavelet, devido à sua natureza de construção (forma e localização temporal), pode ser feita de uma maneira muito mais semelhante ao sinal real que procura retratar do que o seno da transformada de Fourier, o que facilita a extração desta informação quando a mesma está imersa em outras informações que são consideradas como ruído para a análise em vista.

Deve-se considerar também a existência de algoritmos de cálculo da transformada de "wavelet" que apresentam uma eficiência computacional superior à transformada rápida de Fourier. Isto simplifica a sua implementação nas plataformas de hardware hoje existentes.

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de uma técnica aplicável à sinais não estacionários, especificamente a sinais de aceleração obtidos no porta-ferramentas de um torno em operações de acabamento, com o objetivo de identificar-se o momento adequado para substituição da ferramenta. Como condição de trabalho foram impostas a possibilidade de operação em tempo real, a aplicabilidade em situações reais de operação, com um mínimo de obstrução da área de trabalho e sistemas de aquisição e processamento de baixo custo, baseados em uso da plataforma 486 ou Pentium. Não se desejou modelar o complexo comportamento do desgaste de uma ferramenta, mas sim, através de uma comparação com um dado de referência, neste caso a medida da rugosidade da peça, associar o valor obtido no processamento do sinal com o desgaste da ferramenta, e assim estabelecer o momento de troca da mesma. Este método elimina a necessidade de análises sofisticadas dos processos físico-químicos envolvidos no desgaste e diminui o tratamento de erros aos procedimentos convencionais de calibração periódicos.

O desenvolvimento deste trabalho incluiu o desenvolvimento paralelo de um conjunto de subsistemas de hardware e software

necessários e que não foram encontrados no mercado. Estes subsistemas poderão ser reutilizados mesmo para outras operações além do torneamento. Todo o software foi desenvolvido em linguagem C (sistema de aquisição de dados) ou C++ (sistemas de processamento de sinais).

Entre os subsistemas desenvolvidos destacam-se:

- Sistema de transmissão de dados baseados em pulsos infravermelhos com a finalidade de desacoplar mecanicamente o ponto de aquisição de dados (o porta-ferramenta), do sistema de processamento de sinais (hardware e programas do sistema de aquisição).
- Sistema de aquisição de dados programável com capacidade de coletar as informações de uma forma segmentada ao longo do tempo, qual seja, permite a aquisição de "t segundos" pontos a uma taxa de amostragem de "t"segundos, espera por um atraso de "a" segundos e repete o procedimento por "v" vezes.
- Programa de análise de sinais "Waitzowi", que permite a análise de sinais no domínio do tempo, frequência e escala-tempo (wavelets) de uma forma visual e sem necessidade de programação em linguagem específica.
- Biblioteca de ligação dinâmica Windows (DLL) que implementa as transformações de análise de sinais de forma acessível a qualquer linguagem com acesso a bibliotecas dinâmicas no ambiente windows. O uso de DLL permite o compartilhamento destas rotinas por mais de um programa simultaneamente.
- Software que implementa o conjunto de procedimentos necessários para a identificação do desgaste da ferramenta, utilizando-se das DLL's acima.

O código do software desenvolvido e os esquemas dos sistemas de transmissão infravermelho e de aquisição de dados não foram incluídos neste trabalho, devido ao fato que representam instâncias em constante mutação, à medida que novos resultados sugerem alterações para aumento da eficiência ou mesmo correção de problemas não identificados nas operações anteriores. Maiores detalhes sobre as últimas versões do hardware e software desenvolvidos podem ser obtidos junto ao Departamento de Engenharia de Fabricação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp, através de anselmo@fem.unicamp.br, ou junto a Fundação Centro tecnológico para Informática, através de tavares@ia.cti.br, respectivamente o orientador e autor deste trabalho.

Esta mesma técnica, devido à sua generalidade, pode ser adaptada à outras máquinas, para a identificação de situações inadequadas de funcionamento, tais como quebra de dentes em fresas, desgaste em brocas, etc...

Este trabalho é dividido nos seguintes capítulos:

Capítulo 1- Introdução

Capítulo 2- Wavelets em processamento de sinais

Capítulo 3- Monitorização da usinagem

Capítulo 4- Materiais e procedimentos experimentais

Capítulo 5- Resultados e discussões

Capítulo 6- Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Capítulo 7- Referências bibliográficas

Apêndices

Capítulo 2

Processamento de sinais e Wavelets- Uma revisão da teoria

Este trabalho é voltado basicamente para a apresentação de novas técnicas de processamento de sinais. O objetivo do processamento de sinais é analisar com a maior precisão possível, codificar eficientemente, transmitir rapidamente e então reconstruir cuidadosamente no receptor as delicadas oscilações ou flutuações da função com o tempo. Isto é importante porque toda a informação contida no sinal é efetivamente apresentada e escondida nos complicados arabescos que aparecem na sua representação gráfica [Meyer, 1993]. Algumas vezes o sinal é gerado diretamente pela fonte original da informação, porém, na maior parte das vezes, se é obrigado a inferir dados a partir de medidas indiretas do processo que se deseja conhecer. Normalmente, o sinal que se consegue obter dos diversos sensores disponíveis é uma mistura complexa de vários sinais, correspondendo a diversos fenômenos físicos que ocorrem simultaneamente àquele que se deseja estudar. Torna-se necessário, então, aplicar-se algumas operações sobre o sinal obtido de forma a realçar a informação desejada. De forma análoga, quando se necessita transmitir ou armazenar o sinal, um pré-processamento executado de forma correta pode reduzir em muito as exigências de memória de armazenagem ou banda de passagem do canal de transmissão, sem reduzir em nada a informação desejada.

O primeiro passo na análise de um sinal é a sua segmentação [Cohen, 1986]. O sinal pode alterar suas características

drasticamente com o tempo. Porém, pode-se observá-lo, na prática, por somente uma janela temporal finita. Saber especificar o tamanho mínimo desta janela que possibilite a representatividade estatística dos dados é um conhecimento indispensável ao especialista em análise de sinais.

2.1 - Considerações sobre a conversão análogo-digital

A aquisição dos dados em si exige um planejamento a priori. Como no mundo real os dados são, em sua maioria, disponíveis em forma analógica, deve-se realizar uma conversão para a forma digital, permitindo o seu processamento por um computador. O processamento digital do sinal possui as vantagens de maior precisão, repetitividade, facilidade de implementação de novos algoritmo, além de outras. A conversão AD (analógico/digital), no entanto, exige certos cuidados, a dizer:

Em primeiro lugar, deve-se especificar a resolução (número de bits) com que a conversão deve ser realizada. Para se definir a resolução é necessário que se conheça a amplitude pico a pico do sinal que se deseja medir e o menor valor de tensão que se deseja ser capaz de determinar. A menor resolução possível de se usar pode ser obtida da seguinte forma [Ifeachor and Jervis, 1993:

$$n_{(\min)} = 3.32 * \log(V_{pp}/V_s) \quad (2.1)$$

Onde V_{pp} é a tensão pico a pico máxima que se espera do sinal e V_s , a menor tensão de pico que se deseja medir.

Deve-se observar que as resoluções padrões que se pode utilizar na prática são de 8, 10, 12 e 16 bits. Embora sejam disponíveis conversores de 24 bits eles são normalmente lentos e de custo muito alto para os sistemas utilizados na monitoração de usinagem. Conversores com resolução inferior a seis bits não fornecem informação suficiente para a maioria das análises que são realizadas nesta área.

Em segundo lugar deve-se especificar a frequência mínima de amostragem. A simplificação normalmente adotada, que consiste em fazer a frequência de amostragem igual a duas vezes a frequência de corte do filtro passa-baixa de entrada ou a duas vezes a frequência de corte do transdutor, leva freqüentemente a erros importantes, pois não está se levando em conta a curva de resposta do filtro ou do transdutor nem a resolução de conversão adotada. A frequência de aquisição deve ser calculada de forma que o erro devido a taxa de amostragem seja sempre inferior à 1 bit. De uma forma simplificada, pode-se utilizar da fórmula abaixo para especificar corretamente a menor frequência de amostragem possível de ser utilizada juntamente com a atenuação necessária do filtro passa-baixa de entrada [Ifeachor and Jervis, 1993].

$$A_{min} = 20 \log(\sqrt{15} * 2^{n+1}) \quad (2.2)$$

onde n = resolução do conversor (bits) e A_{min} = atenuação necessária para manter o erro de conversão dentro dos limites de 1 bit. Conhecendo-se a curva de resposta do filtro, a frequência mínima de amostragem é então obtida diretamente a partir de A_{min} , devendo ser duas vezes a frequência para a qual esta atenuação é atingida pelo sistema filtro/sensor.

Os efeitos do tempo de aquisição, com os dispositivos rápidos hoje disponíveis, praticamente não são uma fonte de erro importante, desde que sejam levados em consideração no momento de especificação do conversor. Este erro é devido ao fato de que é necessário um tempo finito para que o conversor possa realizar a amostragem do sinal analógico, isto é, o sinal analógico precisa estar presente na entrada do conversor por um tempo mínimo para que este possa realizar a conversão AD. Este tempo limita também o intervalo mínimo possível entre as aquisições. Para um dado conversor, a frequência máxima com que pode ser digitalizado um sinal é dada pela seguinte fórmula [Ifeachor and Jervis, 1993].

$$f_{max} = \frac{1}{\pi * 2^{n+1} * \tau} \quad (2.3)$$

onde τ = tempo de aquisição e n =resolução do conversor.

2.2 - Classificação do sinal

Uma vez assegurado que os dados convertidos representam de forma confiável o sinal original, o próximo passo é executar as transformações necessárias para extrair a informação desejada, que normalmente está contaminada por diversas outras informações, que são consideradas como ruído. O arcabouço de ferramentas hoje disponível para o processamento de dados é bastante vasto, porém existem restrições de aplicações que devem ser conhecidas, para que não se corra o risco de aplicar ferramentas inadequadas. Para isto, deve-se em primeiro lugar, classificar o sinal que se deseja processar, visto que existem ferramentas corretas para cada tipo de sinal a ser processado.

Os sinais são classificados em dois grupos [Cohen, 1986], o grupo dos sinais determinísticos e o grupo dos sinais aleatórios. Os sinais determinísticos são aqueles que podem ser descritos por relações matemáticas explícitas. Os sinais aleatórios não podem ser expressos exatamente, mas somente em termos de probabilidade e medidas estatísticas.

Adicionalmente, os sinais determinísticos podem ser divididos em dois grupos, o grupo dos periódicos e o grupo dos não-periódicos. Sinais periódicos são interessantes, pois basta um período do sinal para conter toda a informação necessária para sua análise. Os sinais periódicos são bem representados, no domínio da frequência, pela série de Fourier, que apresenta a componente fundamental e suas harmônicas. Já os sinais não periódicos são divididos em dois tipos. Os sinais quase-periódicos, que não são periódicos no sentido matemático do termo, porém possuem uma representação no domínio da frequência

que difere dos sinais verdadeiramente periódicos no fato das várias componentes não manterem uma relação harmônica entre si. O outro tipo corresponde aos sinais transientes.

Os sinais aleatórios são mais difíceis de serem analisados. Uma amostra de um sinal aleatório pode diferir completamente de outra amostra do mesmo sinal, porém suas características estatísticas permanecem as mesmas. Um sinal estacionário é um sinal aleatório no qual suas propriedades estatísticas não são uma função do tempo. Uma importante classe dos sinais aleatórios são os sinais ergódicos. Para estes sinais, a média estatística sobre todo o conjunto é igual à média no tempo de qualquer segmento amostrado.

Estacionaridade e ergodicidade são propriedades que permitem o uso de métodos convencionais de processamento de sinais. Um processo não estacionário é mais difícil de ser processado e exige técnicas mais sofisticadas para o seu estudo, ou exige que se assumam ergodicidade mesmo quando se sabe, a priori, que isto não é verdadeiro e, assim, se assumam o risco calculado dos erros possíveis de serem cometidos.

No caso dos sinais de vibração analisados neste trabalho, apresentam um comportamento do tipo aleatório, não estacionário, que pode ser determinado pela análise de Fourier em uma janela do sinal ao longo da vida da ferramenta. Observa-se uma variação do espectro ao longo do tempo e não foi possível a determinação de uma tendência clara de concentração em uma ou mais faixas de frequências. Esta constatação foi decisiva para a escolha correta das ferramentas adequadas a realização das análises, que tinham como objetivo básico determinar as influências do desgaste da ferramenta de corte

sobre o sinal de vibração obtido no porta-ferramenta. Na figura 2.1 apresenta-se um resumo da classificação descrita.

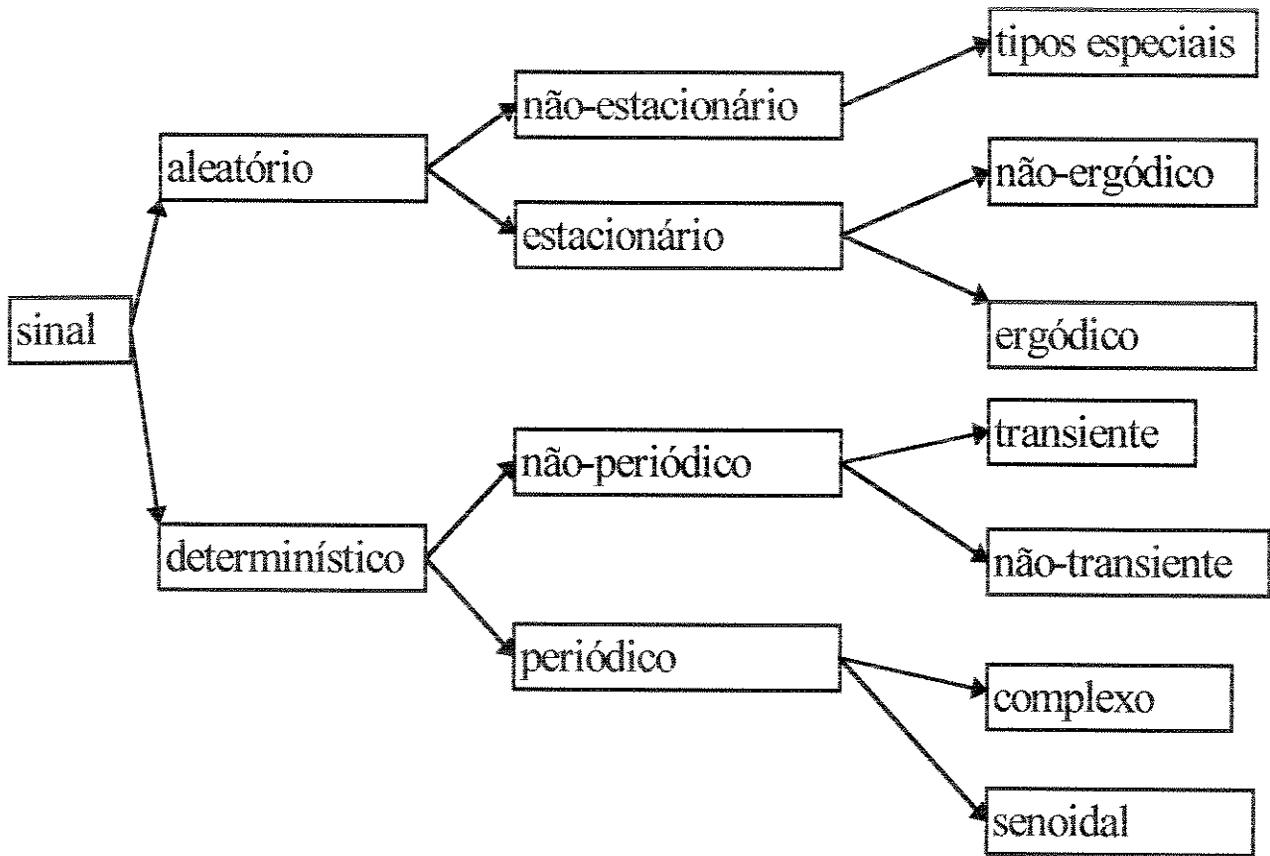


Figura 2.1 Classificação dos sinais

2.3 - Uma revisão das wavelets escala-tempo

A constatação, no item anterior, da não estacionaridade do sinal a ser analisado, obriga à utilização de técnicas que possam representar o comportamento do sinal levando-se em consideração o fator temporal. O estudo de sinais não estacionários, onde ocorrem eventos transientes que não podem ser preditos (mesmo estatisticamente, com um conhecimento do passado), necessita de técnicas diferentes da análise de Fourier. Estas técnicas, que são específicas para as não estacionaridades do sinal, incluem as wavelets do tipo tempo-freqüência e do tipo tempo-escala. As wavelets do tipo tempo-freqüência são mais adequadas à análise de sinais quase-estacionários, e as wavelets tempo-escala (que foram utilizadas neste trabalho) são adaptadas a sinais tendo uma estrutura fractal [Meyer, Y.1993].

O surgimento das wavelets é um desenvolvimento relativamente recente na matemática [Willians, J. nd Amaratunga.K., 1994]. O nome wavelet, ou ondícula, foi cunhado há cerca de 13 anos atrás por pesquisadores franceses, incluindo-se aí Morlet e Grossman, responsáveis também pelo desenvolvimento de wavelets que levam os seus nomes. Embora a existência de funções similares às wavelets já tenha sido conhecida desde o início do século, foi só recentemente que os conceitos disponíveis em forma esparsa foram reunidos em um arcabouço comum e que aplicações em engenharia começaram a ser efetivadas.

A transformada de wavelet é uma ferramenta que segmenta dados, funções ou operadores em diferentes componentes de freqüência, e, então, estuda cada componente com uma resolução

adequada a sua escala [Daubechies, 1992]. Ao contrário da análise de Fourier, que não consegue localizar no tempo a existência de um sinal de determinada frequência, a decomposição do sinal em wavelets permite que se observe o seu comportamento simultaneamente nos domínios do tempo e da escala ou frequência.

2.3.1 - Wavelets x Fourier

Sendo a transformada de Fourier de conhecimento geral, torna-se útil introduzir o estudo das wavelets a partir de suas comparações com a transformada de Fourier. Em muitas aplicações, dado um sinal $f(t)$, deseja-se determinar o seu conteúdo freqüencial localizado no tempo. Isto é similar, por exemplo, à notação musical, que diz ao músico quais as notas (informação de frequência) que devem ser tocadas em um dado instante [Daubechies, 1992]. A transformada de Fourier padrão,

$$(Ff)(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega t} f(t) dt \quad (2.4)$$

fornece a representação do conteúdo frequencial de f , mas a informação de tempo é perdida e pulsos de alta frequência e curta duração, que possam estar superpostos ao sinal tornam-se de difícil observação. Para simplificação, sempre que os limites da integral variarem entre menos infinito e mais infinito não serão explicitados nas formulas. A localização temporal pode ser obtida janelando-se o sinal f , de forma a isolar-se apenas um determinado trecho do sinal e obtendo-se a

transformada de Fourier do resultado. O janelamento pode ser expresso da seguinte maneira:

$$(T^{jan} f)(w, t) = \int f(s)g(s-t)e^{-iws} ds \quad (2.5)$$

Esta fórmula corresponde à transformada de Fourier janelada, que é técnica padrão para localização tempo-freqüência. É também utilizada freqüentemente na sua forma discreta, onde são atribuídos a t e w os valores regularmente espaçados $t = nt_0$ e $w = mw_0$, com m e n fixos e podendo variar sobre todo o \mathbb{Z} . A equação (2.5) então se torna:

$$T_{m,n}^{jan}(f) = \int f(s)g(s - nt_0)e^{-imw_0s} ds \quad (2.6)$$

A função de janelamento, g , pode assumir várias formas, dependendo do efeito que se deseja, mas todas as formas são normalmente bem concentradas em tempo e em freqüência. Desta forma (2.6) pode ser interpretada livremente como fornecendo a componente de freqüência w em torno do tempo t . Dito de outra forma, a equação (2.6) fornece a descrição de f no plano tempo-freqüência.

A transformada de wavelet provê uma descrição tempo-freqüência similar, porém com umas poucas e importantes diferenças. As fórmulas análogas a (2.5) e (2.6) são:

$$(T^{wav} f)(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int f(t)\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2.7)$$

$$T_{m,n}^{wav}(f) = a_0^{-\frac{m}{2}} \int f(t)\Psi(a_0^{-m} t - nb_0) dt \quad (2.8)$$

A similaridade de (2.7) e (2.8) com (2.5) e (2.6) é evidente. As funções $\Psi^{a,b}$ são chamadas de wavelets, com a função Ψ sendo chamada normalmente de "wavelet mãe". Observe que, a medida que o parâmetro "a" varia altera-se a escala da wavelet, permitindo que sejam cobertas altas frequências (correspondendo a pequenos valores de a) e baixas frequências (correspondendo a valores grandes de a). O parâmetro b permite alterar a posição temporal da wavelet. Desta forma, a equação (2,8) fornece uma descrição tempo-frequência de f , obtida ao se variar corretamente os parâmetros a e b.

A diferença básica entre a wavelet e a transformada de Fourier janelada está na forma da funções g e Ψ [Williams and Amaratunga, 1994]. As funções $g^{w,j}$ consistem da mesma envoltória, transladadas sobre o tempo. Todas estas funções, independente do valor de w , possuem a mesma largura. Em contraste, as funções $\Psi^{a,b}$ possuem suas durações no tempo adaptadas à sua frequência. As wavelets de alta frequência são mais estreitas do que as wavelets de baixa frequência. Desta forma, a transformada de wavelet é mais capaz de capturar transientes no sinal do que a transformada de Fourier janelada, permitindo uma melhor localização tempo-espectral das várias componentes do sinal. Esta capacidade faz com que uma das principais aplicações das wavelets em processamento de sinais seja a análise de sinais não estacionários, além da compressão de dados [Rioul and Vetterli, 1991].

2.3.2 - Fundamentos da decomposição por wavelets

A teoria que sustenta a decomposição por wavelets é sofisticada e bem abrangida em diversos textos [Mallat, 1989; Chui, 1992; Walter, 1992]. Neste capítulo será apresentado uma descrição, que embora não formal do ponto de vista matemático, permite que sejam explanados os princípios e formas de aplicação das wavelets tempo-escala em problemas práticos de engenharia, enfocando-se principalmente o processamento de sinais não-estacionários.

Observe-se o sinal na figura 2.2. Este sinal corresponde a uma amostragem de 8 pontos do sinal analógico correspondente.

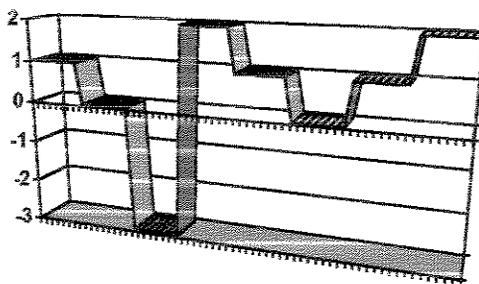


Figura 2.2 Forma de onda para decomposição

Uma das wavelets mais antigas (na realidade, esta wavelet já tem sido usada há cerca de oitenta anos, muito antes da teoria ter sido unificada) [Vidakovic, B and Müller, P., 1991], é a wavelet de Haar. Embora hoje em dia sejam conhecidas wavelets mais apropriadas para o trabalho de decomposição, a simplicidade desta wavelet a torna adequada para o uso como exemplo de decomposição. A wavelet de Haar corresponde à função degrau, que toma os valores 1 e -1 para $[0, 1/2)$ e $[1/2, 1)$,

respectivamente. O gráfico da função de Haar é apresentado na figura 2.3.

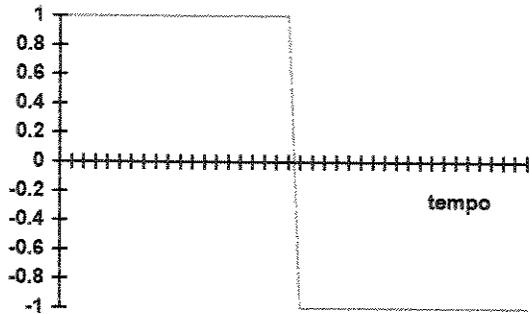


Figura 2.3. Wavelet de Haar

Fazendo-se dilatações e translações da wavelet de Haar podemos cobrir todo o espaço ocupado pelo sinal apresentado na figura 2.2. Para expressar estas dilatações e translações, pode se representar o conjunto de wavelets de Haar como:

$$\Psi_{ab}(x) = 2^{\frac{a}{2}} \Psi(2^a x - b) \quad (2.9)$$

onde a constante "a" corresponde as dilatações e "b" corresponde aos deslocamentos no tempo.

Para que a decomposição seja possível é necessário que a base representada por (2.9) seja ortogonal. Isto é fácil de ser verificado, pois :

$$\int \Psi_{ab} \bullet \Psi_{a1b1} dt = 0 \quad (2.10)$$

sempre que $a=a_1$ e $b=b_1$ não sejam satisfeitos simultaneamente. Uma visão gráfica do que foi dito em (2.9) e (2.10) é apresentada na figura 2.4.

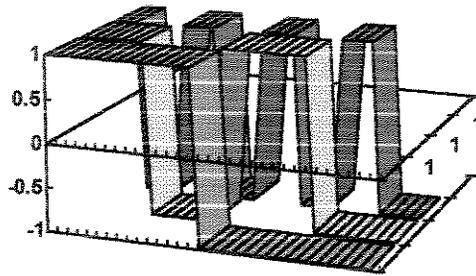


Figura 2.4 Wavelets de Haar para os níveis 0,1 e 2

A decomposição do sinal expresso na figura 2.2 em wavelets de Haar possui a forma:

$$f(x) = c_{00}\Phi(x) + \sum_{a=0}^{n-1} \sum_{b=0}^{2^v-1} d_{ab}\Psi_{ab}(x) \quad (2.11)$$

Expressando (2.11) na forma matricial, obtém-se a seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -3 \\ 2 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \sqrt{2} & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \sqrt{2} & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & -2 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 1 & -1 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{00} \\ d_{00} \\ d_{10} \\ d_{11} \\ d_{20} \\ d_{21} \\ d_{22} \\ d_{23} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

A solução de (2.12), que corresponde aos valores dos coeficientes das wavelets é:

$$\begin{bmatrix} c_{00} \\ d_{00} \\ d_{10} \\ d_{11} \\ d_{20} \\ d_{21} \\ d_{22} \\ d_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 \\ -1/2 \\ 1/2\sqrt{2} \\ -1/2\sqrt{2} \\ 1/4 \\ -5/4 \\ 1/4 \\ -1/4 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Ou, alternativamente, pode-se dizer que a função f original é decomposta, através da wavelet de Haar, da seguinte maneira:

$$f = \frac{1}{2}\phi - \frac{1}{2}\Psi_{00} + \frac{1}{2\sqrt{2}}\Psi_{10} - \frac{1}{2\sqrt{2}}\Psi_{11} + \frac{1}{4}\Psi_{20} - \frac{5}{4}\Psi_{21} + \frac{1}{4}\Psi_{22} - \frac{1}{2}\Psi_{23} \quad (2.14)$$

Obviamente, se a função original fosse composta de muitos pontos, tal método de se obter os coeficientes de wavelets se torna impraticável. No entanto, é útil este desenvolvimento para auxiliar na compreensão de como é realizada a decomposição de um sinal em suas wavelets. O termo ϕ deve ser adicionado para levar-se em consideração o valor médio do sinal, visto que um dos requisitos para a construção de wavelets é que elas possuam o valor médio igual a zero.

A função adotada como wavelet neste exemplo, a função degrau, é apenas uma de todo um universo de funções que poderiam ser utilizadas. As funções que serão empregadas neste trabalho serão as wavelets descobertas por Daubechies, visto serem wavelets de suporte compacto (possuem um número finito de coeficientes) e existirem algoritmos que permitem a sua implementação em computador de uma forma eficiente, sendo inclusive superior à implementação da transformada rápida de Fourier, em termos de velocidade de processamento, conforme pode ser visto na tabela 2.1.

Transformada de Fourier	Transformada rápida de Fourier	Wavelet
N^2	$N \log_2 N$	N

Tabela 2.1: Número de multiplicações para as várias transformadas

Daubechies descobriu [Cody, 1992] que a transformada de wavelet pode ser implementada com um par de filtros FIR (filtro de resposta finita ao impulso) chamados de filtros QMF (filtros de quadratura em espelho). Um filtro FIR realiza o produto escalar entre os coeficientes do filtro e as amostras discretas do sinal ao longo da linha de atraso do filtro. O ato de se passar um conjunto de amostras discretas, representando um sinal, através de um filtro FIR, corresponde a uma convolução do sinal com os coeficientes do filtro FIR. Os filtros QMF se destacam porque a resposta em frequência dos dois filtros (atuando em quadratura) separam as baixas e altas frequências

do sinal. O ponto de divisão é, usualmente, a metade do caminho entre 0 Hz e metade da taxa de amostragem.

As saídas dos filtros QMF são decimadas por um fator de dois, ou seja, mantem-se um valor de saída e descarta-se o seguinte. O resultado do filtro passa-baixa alimenta outro filtro em quadratura idêntico ao primeiro. Esta operação pode ser repetida recursivamente tomando a forma de uma árvore ou algoritmo piramidal, levando a um grupo de sinais que dividem o espectro do sinal original em oitavas.

A relação entre os coeficientes dos filtros e os coeficientes das wavelets foi demonstrada por Mallat em 1989. Mallat mostrou que o algoritmo piramidal pode ser aplicado à transformada de wavelet utilizando-se os coeficientes de wavelet como os coeficientes dos filtros QMF. O método utilizado por Daubechies leva a descoberta de uma família de wavelets, normalmente chamadas de D_2 , D_4 , ... D_n , onde n é correlacionado ao número de elementos utilizados para o cálculo do filtro (ordem do filtro). Quanto maior a ordem mais localizada em frequência se torna a wavelet. No caso deste trabalho, foram realizados vários experimentos com as wavelets D_2 a D_{20} , verificando-se a sensibilidade em relação ao desgaste da ferramenta, tendo-se concluído que a wavelet D_4 era a mais adequada para esta finalidade.

É importante aqui compreender a dualidade dos conceitos escala-frequência. Quando se pensa na decomposição da wavelets em termos de escala-tempo, visualiza-se a decomposição de uma forma de onda em várias outras formas de onda, todas com duração bem determinada e bem localizadas temporalmente. As amplitudes destas wavelets ("ondículas") serão tanto maiores quanto mais o sinal original, naquela posição em que está a

wavelet associada, possui uma forma similar à da wavelet. Neste sentido, as wavelets estão capturando "assinaturas" embebidas no sinal original e que podem passar despercebidas à análise visual. Diferentes tipos (ou formas) de wavelets serão capazes de capturar com maior ou menor precisão os detalhes que se deseja explicitar. Uma metodologia padronizada, que permita a seleção de uma dada wavelet em função da informação que se deseja extrair de um sinal, ainda está por ser desenvolvida.

Quando se pensa no uso de filtros em quadratura para modelagem da decomposição em wavelets, observa-se a decomposição do sinal em faixas de frequências cada vez menores, na direção das baixas frequências. A ordem dos filtros e a forma da curva de resposta irá determinar a sobreposição entre as várias saídas. Esta forma de decomposição fornece diretamente o conteúdo frequencial ao longo do tempo.

Ambas as formas de modelamento representam a mesma realidade. Pode-se inclusive, dentro do conceito escala-tempo, fazer-se a leitura das várias escalas como faixas que contém as componentes centrais de frequência das wavelets respectivas. É importante, no entanto, reconhecer que as wavelets podem possuir componentes de frequência que ultrapassam uma oitava, e portanto estariam sendo representadas na escala vizinha. Desta forma, a análise de wavelets de um sinal senoidal puro pode ter componentes (de menor amplitude) fora da escala em que se situa a frequência fundamental. Isto é devido ao fato de que, contrariamente ao Fourier, que localiza com precisão o conteúdo espectral de um sinal senoidal, a localização em frequência das wavelets é mais dispersa, o contrário ocorrendo com a localização temporal.

A partir deste ponto, neste trabalho, utilizar-se-á dos conceitos de escala-tempo para o uso das wavelets na análise de sinais. Esta escolha se deu em função dos objetivos da análise, qual seja, procurar extrair de um sinal aleatório correspondendo a vibração em um porta-ferramentas em um torno, componentes (em termos de ondículas) que sejam proporcionais ao desgaste de uma ferramenta de corte. Procura-se basicamente, pela existência de "assinaturas" impressas no sinal pela ação do desgaste na ponta da ferramenta.

2.3.3 - A representação das wavelets

A simples visualização dos coeficientes de wavelets pode fornecer muitas informações sobre o sinal. A representação dos diversos coeficientes, no entanto, esbarra em dificuldades práticas, pois se necessita representar um número de coeficientes igual ao número de pontos que existem no sinal original, divididos desigualmente entre as várias escalas. Assim, não se levando em consideração o nível médio (que é considerado como escala 1), ter-se-á que representar um coeficiente na escala 0, dois na escala -1, 4 na escala -2, 8 na escala -3 e assim por diante. Normalmente, estes coeficientes são representados de uma forma linear, através de retas paralelas, onde cada reta contém coeficientes de uma dada escala (figura 2.5a). Esta representação, embora de fácil implementação computacional e fácil interpretação, congestionava as escalas mais altas e não utiliza bem o espaço nas escalas mais baixas, onde os coeficientes ficam muito espaçados. Um outro método, detalhado em [Newland, 1993], atribui a cada coeficiente uma área no plano, utilizando também cores para

facilitar a identificação. A geração destes gráficos exige um razoável poder computacional, porém o resultado facilita a comparação de dois conjuntos distintos de coeficientes, comparado com o sistema de gráficos lineares.

Para solucionar-se o problema de fácil visualização aliada à facilidade de implementação computacional, propõe-se aqui uma representação que será denominada de Círculos de Wavelets. Consiste de uma seqüência de círculos concêntricos, onde cada círculo corresponde a uma escala. As escalas são representadas de dentro para fora, ou seja, o círculo inferior corresponderá à menor escala que se deseja apresentar, normalmente a escala zero. Como o perímetro de cada círculo aumenta a medida que aumenta o diâmetro, aumenta concorrentemente o espaço destinado ao traçado dos coeficientes.

No Círculo de Wavelets o valor do coeficiente é representado elevado ao quadrado. Desta forma associa-se o valor da energia daquela wavelet ao comprimento do segmento correspondente. Os valores são normalizados tomando-se como referência o valor do maior coeficiente, que passa a ser representado por um segmento de comprimento igual a 80% da distância entre os círculos. Para facilitar a visualização das diferenças entre os coeficientes, adotou-se uma convenção de cores, conforme pode ser visto na tabela 2.2

	100-75%	75-50%	50-25%	25-12.5%
	do valor máximo	do valor máximo	do valor máximo	do valor máximo
cor	vermelho	azul	verde	amarelo

Tabela 2.2 Código de cores dos valores dos coeficientes

Nesta representação, a localização temporal corresponde ao deslocamento angular, considerando-se o tempo $t=0$ (zero) (início de aquisição) como o ponto extremo direito de cada círculo. Deslocando-se no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio tem-se que a 90 graus corresponde $\frac{1}{4}$ do tempo, 180 graus a $\frac{1}{2}$ do tempo e assim por diante. O segmento, por si, é situado no início do setor circular correspondente à faixa de tempo que se deseja representar.

Esta representação não contempla o valor médio do sinal, que deve ser apresentado em forma não normalizada, fora do círculo de wavelets, para facilitar a comparação entre vários sinais.

Para fins de comparação, apresenta-se nas figuras 2.5a e 2.5b a representação da decomposição por wavelets de um sinal quadrado, amostrado com 128 pontos e com quatro ciclos completos durante o período de amostragem. A figura 2.5a mostra a representação linear hoje utilizada e a figura 2.5b mostra a representação em Círculo de Wavelets proposta.

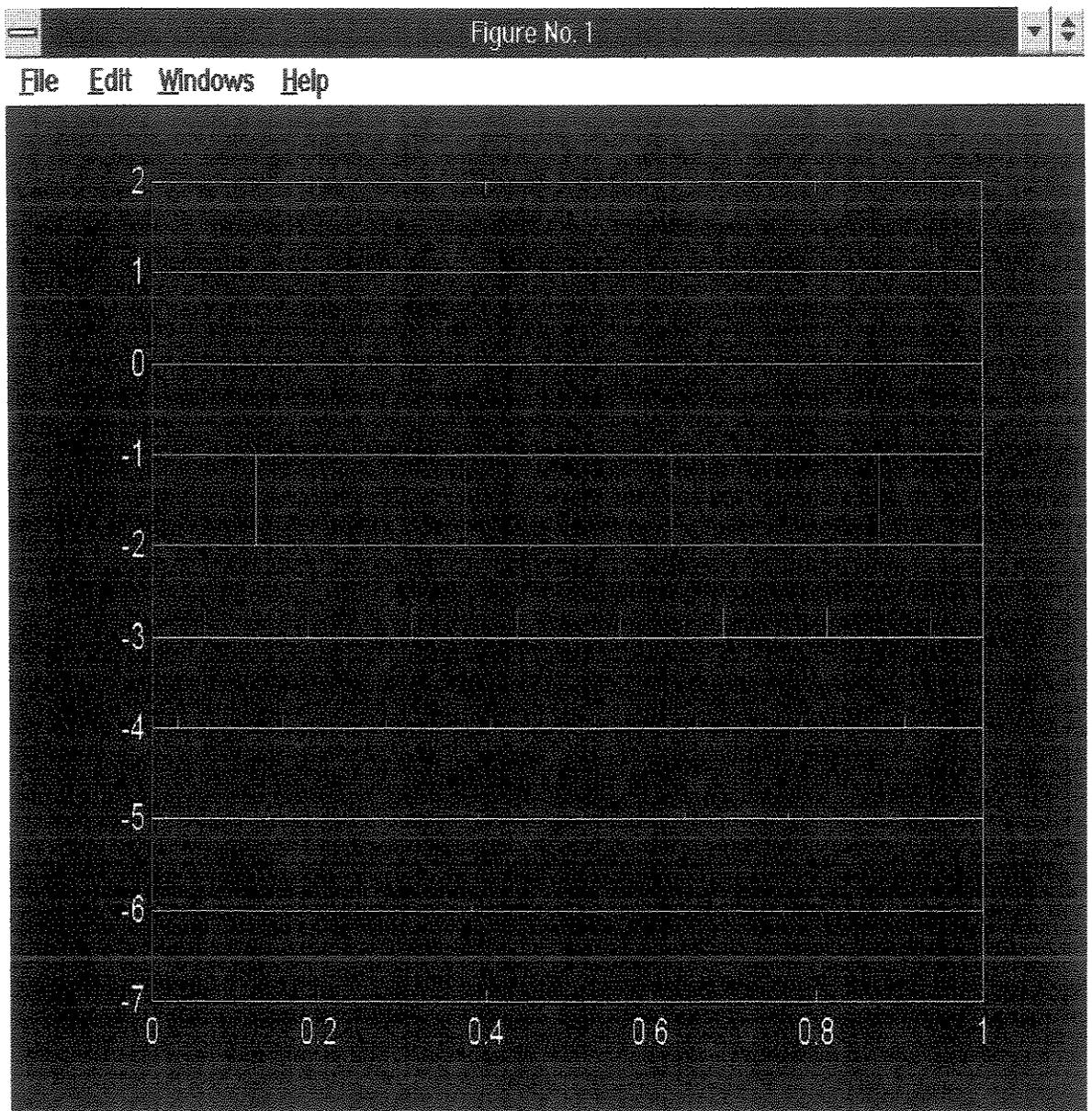


Figura 2.5a . Representação linear da decomposição de uma onda quadrada (quatro ciclos, 128 pontos amostrados)

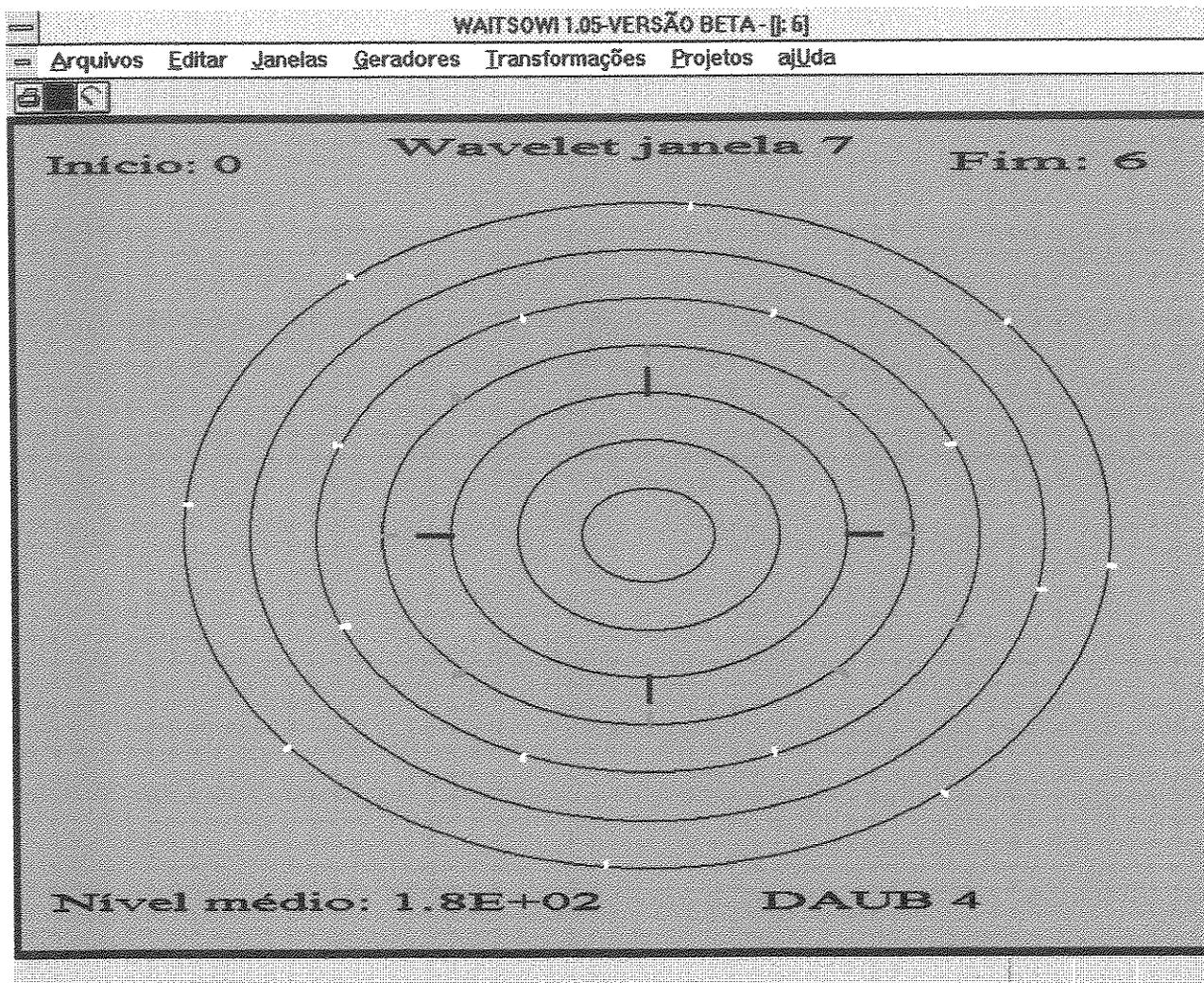


Figura 2.5b. Representação em Círculo de Wavelets da decomposição de uma onda quadrada (quatro ciclos, 128 pontos de amostragem)

2.4 - Aplicações práticas das wavelets em processamento de sinais

Conforme já foi dito nos capítulos anteriores, o uso de wavelets do tipo escala-tempo é bem adequada à sinais do tipo dos obtidos na monitoração da vibração das ferramentas de corte em operações de torneamento. Neste capítulo demonstrar-se-á, com exemplos práticos, da capacidade das wavelets de identificação de situações tipicamente encontradas em análise de sinais e que não são bem atendidas pelos outros métodos de análise.

Em primeiro lugar, observando-se a figura 2.6, no canto esquerdo, tem-se um sinal composto de dois sinais senoidais de frequências diferentes. Para fins de simplificação a passagem de uma frequência para a outra é feita no ponto de cruzamento por zero, de forma a não gerar outras frequências devido a mudança abrupta no nível do sinal. A análise de Fourier (janela superior no canto direito) mostra as duas frequências que compõe este sinal. Olhando-se para este gráfico não se consegue visualizar o fato de que são dois sinais diferentes em tempos diferentes. O mesmo espectro seria obtido se o sinal fosse periódico e composto de duas senóides. Já a análise de wavelets (Daubechies D4) mostra a uma distribuição diferenciada entre o segmento superior dos círculos, correspondente a primeira metade do sinal, e o setor circular inferior, correspondente a segunda metade do sinal.

Observando-se a figura 2.7, no canto esquerdo, nota-se o sinal da figura anterior com as mesmas componentes, porém invertidas no tempo. A análise de Fourier, conforme pode ser

vista na janela correspondente, não é capaz de detectar esta inversão. No entanto, ao se observar a distribuição dos coeficientes das wavelets, a inversão se torna explícita, permitindo a separação entre os dois sinais.

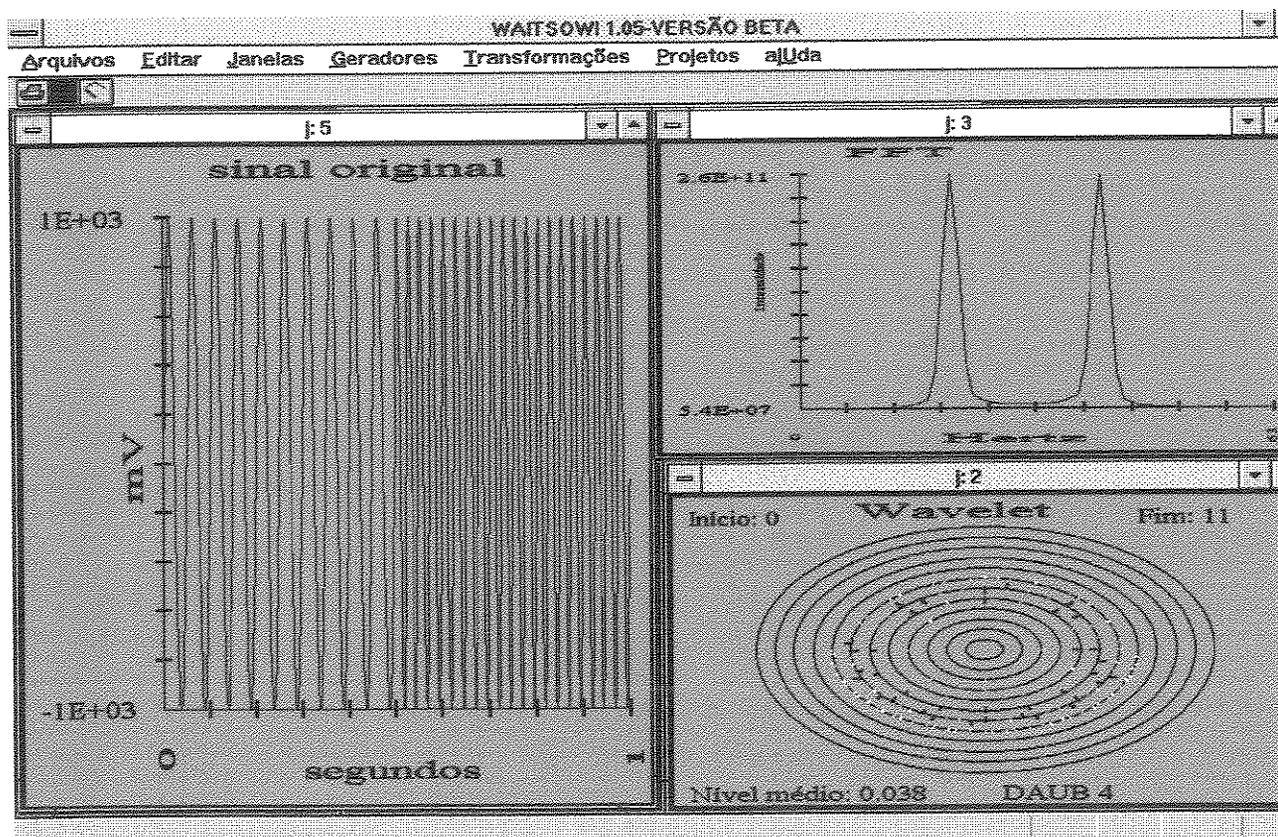


Figura 2.6 Analise de um sinal bi-tonal I

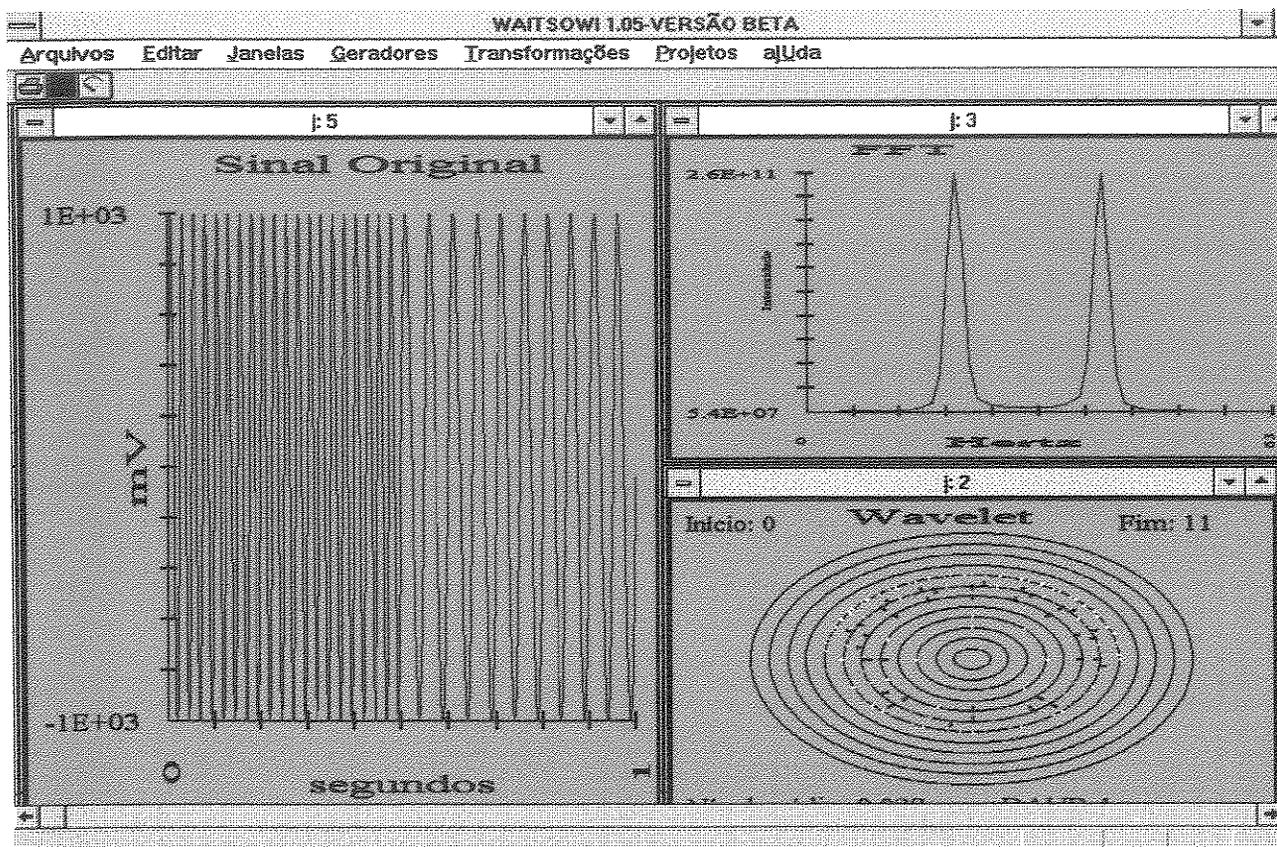


Figura 2.7 Análise de um sinal bi-tonal II

Certamente que, neste exemplo simples, a transformada de Fourier janelada seria capaz de detectar a variação temporal, embora com mais esforço computacional. No entanto, caso as diferenças de frequência fossem muito grandes (caso de transientes), mesmo a transformada de Fourier janelada não seria capaz de situar corretamente as componentes elevadas, devido ao fato das funções de janelamento possuírem sempre a mesma largura, independentemente do deslocamento temporal a que forem submetidas.

Um segundo exemplo da capacidade das wavelets pode ser visto na figura 2.8. Neste caso observa-se um sinal senoidal

puro. A análise de Fourier mostra a representação correta do sinal no domínio da frequência. Na janela inferior apresenta-se o sinal adicionado a um transiente. Observa-se que a transformada de Fourier não é capaz de determinar este transiente. Na figura 2.9 apresenta na parte superior o mesmo sinal original da figura 2.8 e na parte inferior a decomposição em wavelets correspondente. Vê-se nesta decomposição que as wavelets não são eficientes no que diz respeito à localização no domínio da frequência, pois para um sinal correspondente à uma única frequência, a decomposição em wavelets apresenta coeficientes em várias escalas. Na análise por wavelets o coeficiente correspondente ao segmento temporal atingido pelo transiente aumenta de valor, que pode ser verificado pela alteração da cor amarela para verde. Neste caso a decomposição por wavelets foi capaz de extrair a informação correspondente ao transiente, objetivo não alcançado pela análise de Fourier.

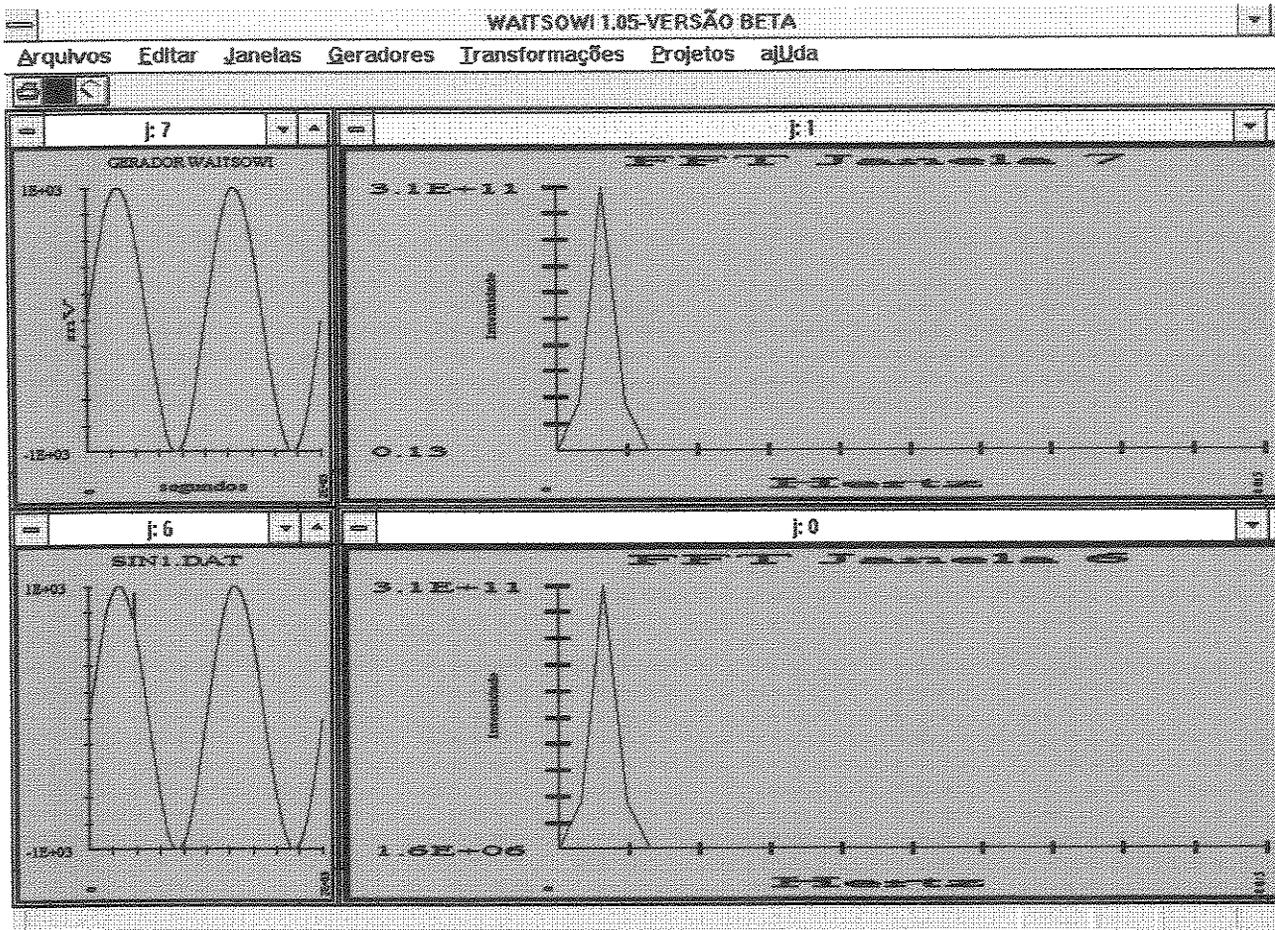


Figura 2.8 FFT de sinais simples e com transiente

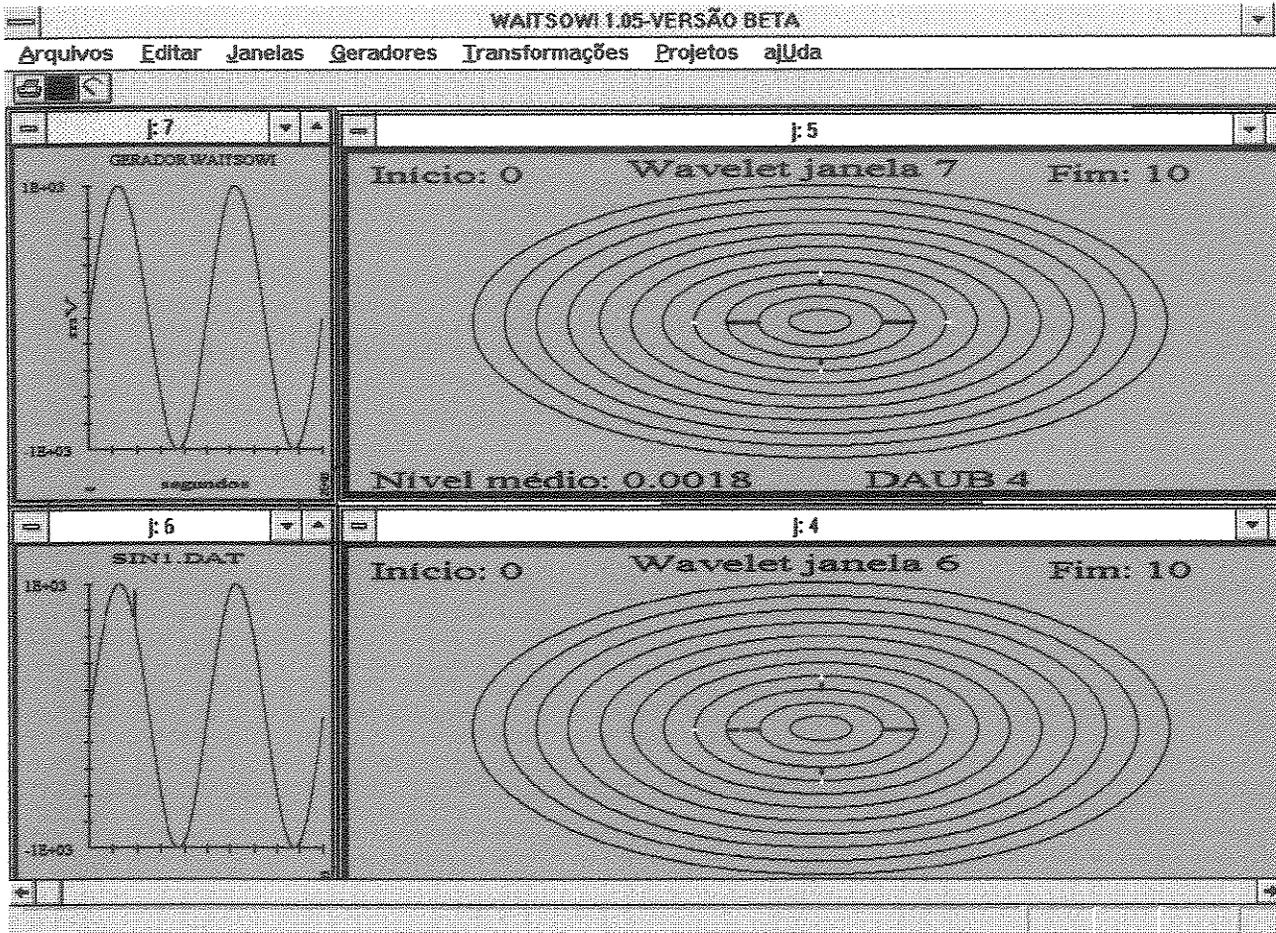


Figura 2.9 Wavelets de sinais simples e com transiente

Esta última situação permite que seja exemplificada uma outra forma de análise por wavelets. Devido ao fato que os coeficientes são ortogonais e que existe a inversa da wavelet, pode-se eliminar os coeficientes correspondentes ao níveis 0,1 e 2 nas figuras 2.8 e 2.9 e inverter os coeficientes restantes. O sinal obtido, que corresponde a variação temporal das inversas das waveletes dos níveis não zerados, é apresentado na

figura 2.10, com a janela superior correspondendo à forma de onda sem o transiente e a janela inferior correspondendo a forma de onda contaminada pelo transiente. A diferença entre ambas é visível, permitindo-se situar com precisão o transiente, em torno do tempo $t=2s$. Embora neste exemplo simplificado, a simples inspeção visual da forma de onda também fornecesse a informação sobre o transiente, em situações reais mais complexas onde os sinais estivessem imersos em combinações difíceis de serem isoladas diretamente no domínio do tempo, seriam também detectadas pela análise das wavelets no domínio escala-tempo. Este exemplo demonstra a capacidade de detecção de "assinaturas" pelas wavelets. É intuitivo que, quanto maior a semelhança entre o sinal que se quer determinar a assinatura e a forma de onda da wavelet, maior será esta capacidade de detecção.

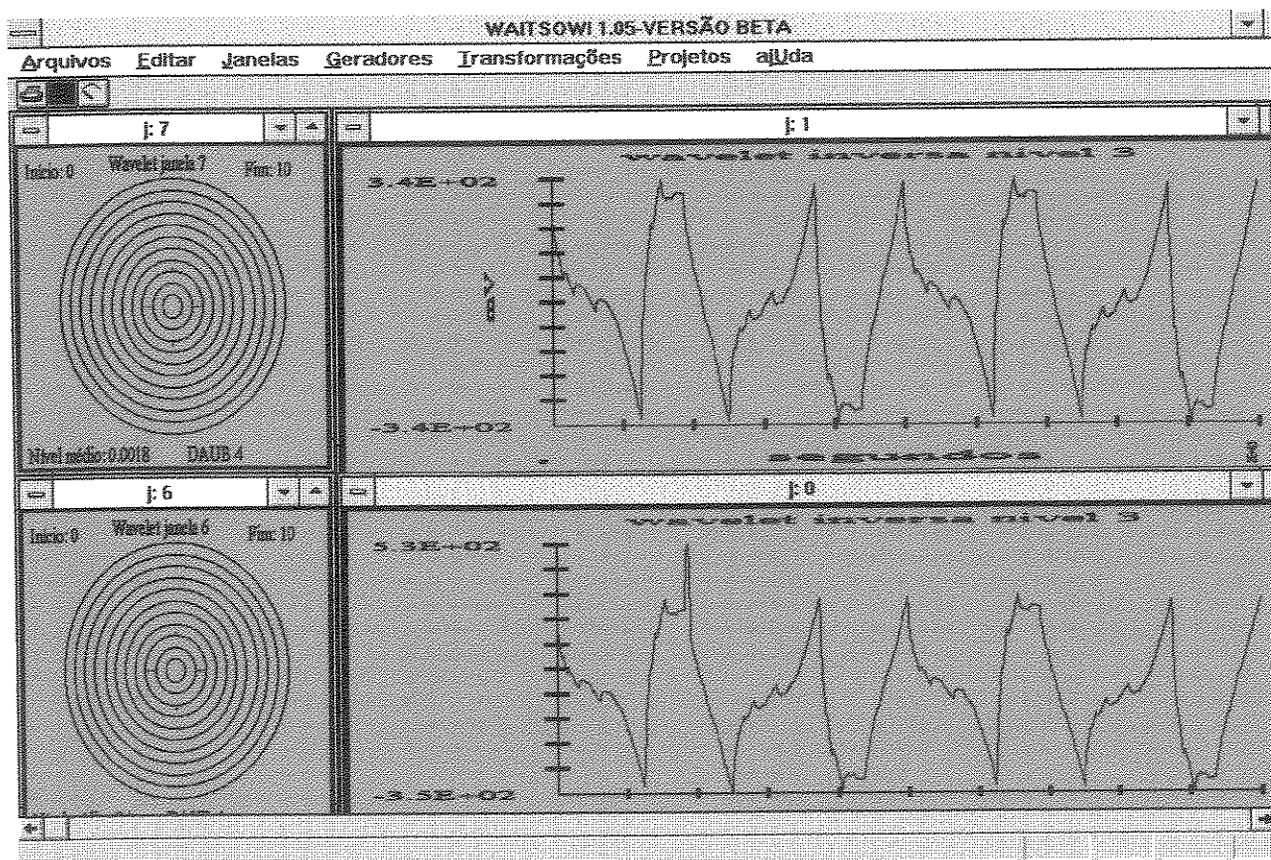


Figura 2.10 Inversa da wavelet do nível 3

Capítulo 3

A Monitorização da usinagem

3.1 - Principais problemas em operações automáticas

Quando máquinas-ferramentas são utilizadas em condições isoladas, invariavelmente um operador está presente, com o principal objetivo de monitorar as ferramentas e outras funções durante o processo de manufatura. Tipicamente o operador irá se assegurar que todos sistemas estão operando satisfatoriamente. As tarefas do operador relacionadas com monitorização da ferramenta podem ser classificadas em quatro grupos [Graham, 1989].

- Identificação da ferramenta
- Estabelecimento do zero da ferramenta
- Monitorização da vida da ferramenta
- Detecção da quebra da ferramenta

Similarmente, a monitorização da peça por um operador significa que ele deve ser capaz de:

- Identificar a peça a ser usinada
- Ajustar os dispositivos de fixação da peça
- Posicionar a peça com precisão nos dispositivos de fixação

- Posicionar a peça com a correta correlação com o programa de usinagem através do ajuste manual da peça ou do programa.

Outras ações realizadas pelo operador incluem:

- Monitorização da eficiência das ferramentas de corte através do som emitido e aspecto visual.
- Ajuste do programa quando a máquina atingir a temperatura de operação.
- Ajustar as velocidades e avanços para otimizar as melhores condições de corte durante o programa.

No entanto, quando se utiliza um sistema flexível de manufatura (FMS) isto implica que a operação com o mínimo de assistência humana é desejada, e portanto a ausência, mesmo que parcial, de um operador irá acarretar um número considerável de problemas que devem ser resolvidos para que o sistema opere satisfatoriamente. Em operações desassistidas encontradas no ambiente de um FMS, o sistema de monitorização deve prover a inteligência artificial necessária para replicar a experiência e habilidade de um operador, juntamente com o comportamento instintivo para situações imprevistas, que normalmente são associadas ao envolvimento humano.

Um FMS requer um considerável número de sistemas de monitorização para operar efetivamente. A figura 3.1 mostra os três tipos de monitorização, nominalmente: monitorização da peça, monitorização da ferramenta e monitorização da máquina. Divisões adicionais de cada sistema de monitorização ocorrem como mostrado na figura 3.1 [Graham, 1989].

Sistemas de monitoração em FMS

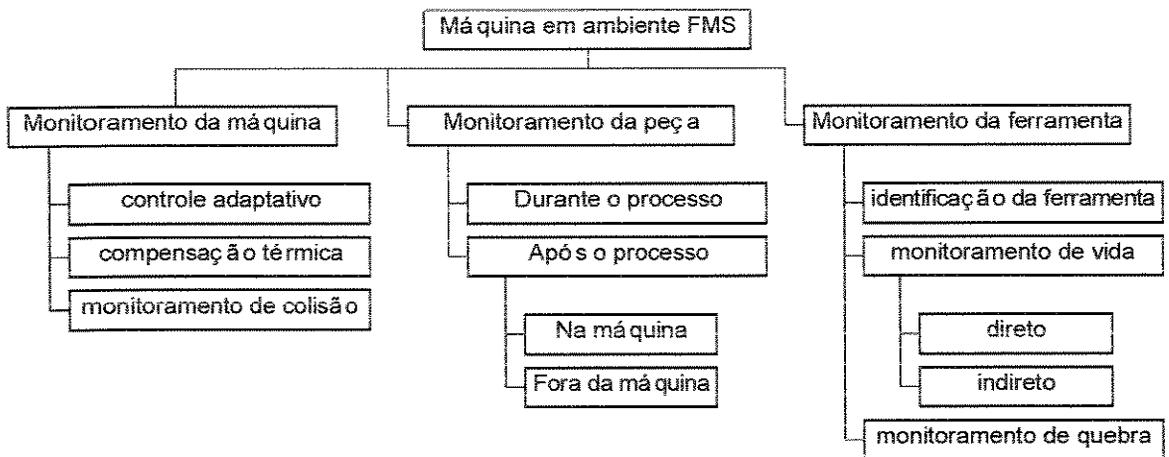


Figura 3.1 : Sistemas de monitorização necessários em um FMS
[Graham, 1989]

Algumas aplicações típicas dos sistemas apresentados anteriormente são:

Monitorar o correto carregamento da peça, corrigir qualquer desalinhamento do ajuste inicial e verificar a qualidade da peça.

- Verificar o uso correto da ferramenta, identificando e ajustando o zeramento da ferramenta, juntamente com a monitorização do desgaste e quebra, substituindo a ferramenta quando necessário.
- Ajustar velocidades e avanços quando necessário, e prover a compensação para os efeitos de desgaste de ferramenta, má-formação térmica e formação dos cavacos.

- Correção dos erros da máquina devidos à efeitos térmicos, falhas no programa e recuperação devido à falhas de operação.

Para uma operação eficiente de um FMS é necessário que todos os sistemas acima descritos sejam implementados. Este trabalho versa sobre o desenvolvimento de um sub-sistema destinado à identificar, em tempo real, o desgaste da ferramenta de corte em operações de torneamento, um item pequeno, porém de grande importância para a operação de um FMS.

3.2 - Considerações sobre fim de vida de ferramentas de usinagem

Conforme descrito no item anterior, a determinação do fim de vida da ferramenta de corte é fundamental em operações de usinagem automáticas. A vida de uma ferramenta de usinagem pode ser definida como o tempo que a mesma trabalha efetivamente (deduzido os tempos passivos), até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério pré-estabelecido. Atingido este tempo a ferramenta deve ser reafiada ou substituída [Ferraresi, 1977]. Uma forma alternativa de definição de vida correlaciona a vida em minutos de uma ferramenta ao percurso de avanço (L_f), de acordo com:

$$L_f = \frac{T * f * 1000 * v_c * n}{\pi * d} \quad (3.1)$$

e

onde T = tempo de corte em minutos

f = avanço, em mm/volta

V_c = velocidade de corte em metros/min

n = rotação em r.p.m.

d = diâmetro em mm

Os fatores que determinam a fixação de um valor limite de desgaste para o estabelecimento do fim da vida da ferramenta são basicamente os seguintes:

- Os desgastes assumem valores tão elevados que aumentam a probabilidade de quebra da ferramenta. Em situações onde a manutenção da rugosidade da peça em níveis estreitos não são importantes (operações de desbaste) este critério é apropriado.
- O desgaste assume valores onde não é mais possível a obtenção de tolerâncias apertadas e/ou acabamentos superficiais na peça. Esta condição é crítica no caso de operações de acabamento.
- O desgaste é tal que, devido ao aumento da temperatura de corte, ocorre a perda do fio de corte (a aresta de corte se decompõe). Isto é particularmente crítico em ferramentas de aço rápido, por suportarem menores temperaturas de operação.
- O desgaste chega a níveis em que o aumento correspondente da força de corte necessária interfere no funcionamento da máquina. Este fator, com as máquinas atuais, não é importante, pois normalmente os motores podem absorver com tranqüilidade o aumento de potência necessária [Ferraresi, 1977].

Em situações de usinagem de desbaste, a troca da ferramenta no momento mais econômico é de difícil realização

mesmo por operadores com boa capacitação técnica, devido à não existência de parâmetros bem definidos disponíveis ao operador, que acaba realizando esta troca dentro de um procedimento estatístico, baseado na experiência com usinagens anteriores. É comum nestes casos a troca de ferramentas ainda em bom estado, com reflexos no aumento do custo devido ao tempo parado e ao desperdício de ferramentas. A principal razão para isto é que o operador teme a quebra da ferramenta, que pode ter conseqüências negativas para a peça, para a própria ferramenta (porta-ferramenta e outras arestas da pastilha) e mesmo para a máquina. Assim, como ele não tem nenhum critério objetivo para saber quando o desgaste da ferramenta é tal que a quebra se aproxima, ele procede à troca, em geral, muito antes do momento adequado [Diniz, 1996].

Em situações de usinagem de acabamento, a determinação do fim de vida pode ser realizada pelo operador através de critérios mais bem definidos, tais como a tolerância dimensional das peças (neste caso o operador usa geralmente de um critério passa/ não passa). Isto exige um procedimento de medida em um grande número de peças para se acompanhar o desgaste e também pode levar à trocas no momento errado, pois a ferramenta ainda poderia ser aproveitada corrigindo-se a posição de sua ponta. Outro critério mais preciso, para operações de acabamento, seria a rugosidade da peça sendo usinada. Mesmo neste caso, os resultados a nível de chão de fábrica deixam a desejar, pois normalmente o operador não dispõe de instrumentação adequada para a medida de rugosidade e realiza esta medida de forma comparativa com uma peça padrão, utilizando somente o tato. O resultado é o extremo desperdício de ferramentas e tempo de máquina, pois dada a dificuldade experimentada pelo operador para esta comparação, a troca das ferramentas é feita com uma grande margem de segurança, para

não estragar a peça e não causar nenhum dano à produção [Diniz, 1989]. A solução deste problema é claramente a utilização de um método automático de monitorização do desgaste, que, de forma independente do operador, o mantenha informado sobre o momento exato da troca de ferramenta, ou mesmo realize esta troca automaticamente. A utilização deste sistema de monitorização, além de informar sobre o desgaste, torna-se também a única maneira eficiente de determinação da eminência de quebra da ferramenta de corte em tempo hábil para interromper o processo sem maiores danos à peça ou à máquina.

A determinação do desgaste das ferramentas de corte é dificultada pela sensibilidade apresentada à mudança das condições de operação. A progressão do desgaste é influenciada principalmente pela velocidade de corte, depois pelo avanço e por último pela profundidade de usinagem [Ferraresi, 1977; Shaw 1984]. A tabela 3.1 mostra alguns dados de vida para vários avanços e velocidades de corte [Bonifácio, 1993]. O critério para fim de vida neste caso foi a elevação da rugosidade superficial da peça. Pode-se constatar a maior influência da velocidade de corte em relação ao avanço. A profundidade de usinagem possui pouca influência sobre o desgaste, visto que não altera a energia destinada ao corte por unidade de área de cavaco removido. Os dados da tabela 3.1 correspondem à operação com profundidade de usinagem a_p de 1 mm, material da peça aço 4340, com a utilização da ferramenta de metal duro recoberto classe P35.

f (mm/volta)	v_c (m/min)	vida (m, em percurso de corte)
0.16	300	1450
0.20	300	1530
0.24	300	1550
0.20	250	2600
0.20	300	1530
0.20	350	650

Tabela 3.1 Vida de Ferramentas de Torneamento para diversos Avanços e Velocidades de Corte.

A utilização da rugosidade superficial da peça como indicador do momento de fim de vida da ferramenta de torneamento em acabamento tem sido proposta por vários autores [Diniz , 1989, Bonifácio, 1993]. Em condições teóricas, a rugosidade de uma peça torneada é dada por:

$$R_{\text{max teor}} = \frac{f^2}{8r} \quad (3.2)$$

ou, utilizando-se a rugosidade média [Shaw, 1984].

$$R_u = \frac{f^2}{31.3r} \quad (3.3)$$

Onde f = avanço e r raio de ponta da ferramenta . A equação 3.2 fornece a contribuição geométrica que o avanço e o raio de ponta dão à rugosidade da peça.. Além desta contribuição geométrica, diversos fatores influenciam a

rugosidade, como vibração, fluxo lateral de cavaco, comprimento do contato cavaco-ferramenta e ferramenta-peça, desgaste da ferramenta, etc... (Shaw , 1984). Por exemplo, segundo a equação 3.2, seria muito bom para a rugosidade que o raio de ponta fosse bem grande. Por outro lado, quanto maior o raio de ponta, maior o comprimento do contato ferramenta-peça e maior a vibração do conjunto. Assim, para que se obtenha um bom acabamento superficial da peça, o raio de ponta não deve ser muito pequeno, (que faria com que a contribuição geométrica - $R_{max} \cdot \theta$ - fosse muito grande) nem muito grande (que incentivaria a vibração do conjunto peça ferramenta).

O desgaste da ferramenta causa variação da forma da ponta da ferramenta (variação do raio de ponta), variando assim a rugosidade teórica. Em geral, a ponta da ferramenta fica com uma forma totalmente irregular devido ao desgaste, o que aumenta sua contribuição geométrica à rugosidade da peça. Além disso, o desgaste da ferramenta aumenta a área de contato ferramenta-peça, o que incentiva outros fenômenos como vibração e fluxo lateral de cavaco. Desgastes irregulares levam a comportamentos não monotônicos da curva da rugosidade versus tempo de corte, o que poderia afetar sistemas de detecção de desgaste que se utilizassem de um histórico dos valores anteriores para a análise da tendência de aumento no desgaste.

O desgaste de flanco e o de entalhe secundário são os dois tipos de desgaste que mais influenciam na rugosidade superficial da peça, assim como no aumento do fluxo lateral do cavaco. Sundaram e Lambert[1990] identificaram um comportamento típico da curva de rugosidade em função do desgaste, para ferramentas de metal duro no corte de um aço AISI 4140, mostrando que ocorre um aumento da amplitude da rugosidade no início da usinagem, um tendência a decréscimo no

período intermediário de corte e novamente uma tendência de crescimento no fim de vida da ferramenta. Um estudo da relação entre R_{max} , R_a e V_B pode ser encontrada em [Petropoulos, 1990], onde se determinou que o desgaste de flanco não é suficiente para modelagem da curva de rugosidade, exigindo também o conhecimento do desgaste de entalhe.

3.3 - A vida da Ferramenta

Uma forma estatística de se determinar o momento mais apropriado para a troca da ferramenta em função do desgaste pode ser implementado através da elaboração da curva de vida da ferramenta. A curva de vida é um ábaco que fornece a vida de ferramenta em função da velocidade de corte. Para execução desta curva, deve-se geralmente construir em primeiro lugar, gráficos auxiliares que forneçam o desgaste da ferramenta para diferentes velocidades e tempos de trabalho, em determinadas condições de usinagem do par ferramenta-peça (condições de avanço, profundidade de usinagem, geometria da ferramenta, etc...).

Um exemplo típico mostrando a vida em min para diversas velocidades de corte e um desgaste de flanco igual a 0.8mm, com a utilização de pastilhas de metal duro é apresentado na figura 3.2. [Diniz, 1996].

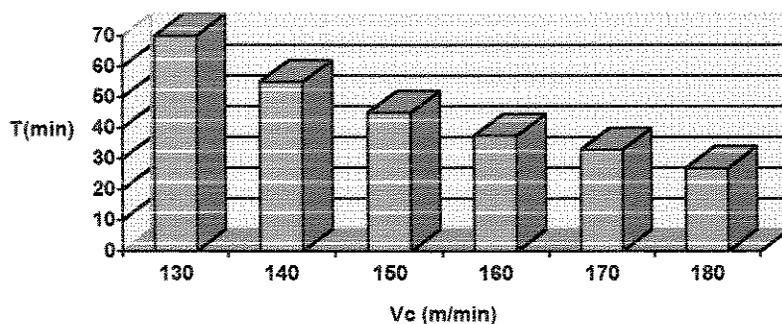


Figura 3.2. Vida em min para diversas velocidades de corte

É importante salientar que estas curvas apresentam uma dispersão muito grande [Diniz, 1989], dificultando o seu uso prático para a determinação do momento de troca. Sistemas de monitorização e determinação automática do momento de troca da ferramenta devem, portanto, basear suas conclusões na análise de dados individuais para cada ferramenta e condição de operação no instante do torneamento.

3.4 - Monitorização do desgaste de ferramenta

Em função dos requisitos de monitorização nos FMS, ou mesmo para o caso de utilização de sistemas com capacidade de informar ao operador sobre as condições de trabalho em tempo real, algumas formas de sensoriamento tem sido incluídas nos sistemas para detectar os problemas durante a operação, de forma que uma ação corretiva possa ser efetivada. Os sistemas atuais tem visado principalmente implementar capacidades de determinação de mal funcionamento nas máquinas em tempo de se tomar ação corretivas, sem a necessidade das manutenções

periódicas, que tem caracterizado os sistemas de manutenção nos últimos 10-15 anos [Martin, 1994].

Este trabalho enfatiza o aspecto de monitorização da ferramenta. Conforme pode ser visto na figura 3.1 a monitorização da ferramenta pode ser dividida em três partes, a dizer: a identificação da ferramenta, a detecção do desgaste da ferramenta e a detecção da quebra. A identificação automática das ferramentas apresenta hoje uma tendência em direção as chamadas "ferramentas inteligentes", que são ferramentas cujos suportes possuem microcircuitos eletrônicos com capacidade de até 512 bits de informação, o que é suficiente para a identificação das mais complexas combinações hoje existentes. Estes microcircuitos, que medem tipicamente 12 milímetros de diâmetro por 4 milímetros de comprimento, podem ser classificados de dispositivos a contato e dispositivos remotos, podendo adicionalmente serem dos tipos "somente para leitura" ou "para leitura-escrita".

Com os dispositivos remotos, os dados da ferramenta são lidos através de indução eletromagnética, com a transmissão ocorrendo dentro de 300 ms, podendo ocorrer um deslocamento relativo entre a cabeça de leitura e o dispositivo de 600 mm/s. A informação pode ser obtida ou escrita através de uma interface padrão RS232-C. Isto torna esta opção de armazenamento de dados extremamente flexível e segura.

Como cada conjunto ferramenta/suporte contém uma unidade eletrônica, isto significa que se pode armazenar, receber e enviar informações sobre a ferramenta, tanto no período de zeramento como na operação. Estes dados podem ser lidos por um CNC que identifica as ferramentas sem o auxílio de outro computador ou entrada manual de informação. Sistemas deste tipo

são uma forma precisa e segura de gerenciar e efetuar o controle das ferramentas.[Graham, 1989; Wells et al.,1992].

O outro aspecto a ser tocado, quando se fala em monitorização da ferramenta é o desgaste e a quebra. Inúmeras pesquisas tem sido realizadas neste setor, que levaram a uma certa padronização dos sensores utilizados, porém os procedimentos de análise de sinais ainda são muito diversificados, refletindo uma falta de um método que tenha se mostrado claramente superior aos outros, até o momento.

Esta variedade atual nos métodos de análise é devida à complexidade do problema. Em virtude das condições de operação (aqui consideradas de uma forma ampla) onde se observam muitos tipos diferentes de materiais, formas e composições diferentes de materiais nas ferramentas, qualidade da máquina, condições operacionais da máquina, condições de usinagem, etc, torna-se muito difícil isolar os efeitos do desgaste ou da quebra dentro de um sinal composto de uma combinação de inúmeros fenômenos físicos de difícil modelagem, em virtude de sua natureza aleatória e, em alguns casos, pouco conhecida.

3.5 - Tipos de sensores utilizados

Durante as pesquisas relacionadas à monitorização do desgaste da ferramenta de corte, vários sensores tem sido empregados, sozinhos ou em conjunto, numa tentativa de se obter o sinal desejado na forma mais isolada possível das

interferências dos mais variados tipos que ocorrem na operação normal do equipamento.

Baseado na pesquisa bibliográfica [Tlusty, J. et all, 1992; Moon.S.K. & Sutherland,J.W., 1992; Wildes D.G. et all,1987; Mathew J. & Li Dan, 1990] pode-se identificar que os sensores utilizados não tem sido muito alterados nesta última década, porém o processamento do sinal tem sido alvo de desenvolvimentos em várias linhas de pesquisa, devido ao fato de sistemas digitais de alta capacidade de processamento e baixo custo deixarem disponível aos pesquisadores, possibilidades de implementação de algoritmos e operação em tempo real, impossíveis de serem realizadas até alguns anos atrás.

O sensoriamento do desgaste de ferramentas pode ser classificado em duas grandes categorias:

- direto: onde o desgaste é medido diretamente sobre a ferramenta.
- indireto: onde um parâmetro correlacionado ao desgaste é medido.

Embora o sensoriamento direto seja, ao menos em princípio, o menos sujeito a erros de medição, por diminuir o número de conversões realizadas, os métodos atualmente disponíveis para esta medida são de difícil utilização em condições de chão de fábrica. Os métodos indiretos, normalmente, podem ser feitos de forma menos intrusiva e sem alterar o espaço de trabalho e forma de operação a que estavam acostumados os operadores. Além disto, os métodos de sensoriamento direto não são, em geral, utilizados em tempo real.

A figura 3.2 apresenta os principais métodos de medida de desgaste de ferramentas em operação de torneamento, classificados nos sub-grupos de medição direta e indireta [Mathew & Dan, 1990]

	Procedimento	Medida	Transdutor
Direto	<p>ótico</p> <p>partículas do desgaste e radioatividade</p> <p>resistência peça ferramenta</p> <p>tamanho da peça</p> <p>distância ferramenta/peça</p>	<p>forma ou posição da borda</p> <p>tamanho da partícula e concentração</p> <p>alteração na resistência da junção</p> <p>dimensão da peça sendo usinada</p> <p>distância entre ferramenta ou suporte à peça</p>	<p>Câmera de TV</p> <p>transdutor ótico</p> <p>espectrofotômetro</p> <p>cintilador</p> <p>ohmímetro</p> <p>micrometro, transdutores eletromagnéticos</p> <p>ultrasônicos, óticos</p> <p>micrômetro, medidor de deslocamento</p>
Indireto	<p>força de corte</p> <p>emissão acústica</p> <p>som</p> <p>vibração</p> <p>temperatura</p> <p>potência</p> <p>rugosidade</p>	<p>alterações na força de corte</p> <p>energia de ondas de stress</p> <p>ondas acústicas</p> <p>vibração da ferramenta/porta ferramentas</p> <p>variação da temperatura do ponto de corte</p> <p>corrente ou consumo de potência do motor de avanço</p> <p>rugosidade da peça</p>	<p>dinamômetros</p> <p>transdutor AE (piezelétrico)</p> <p>microfone</p> <p>acelerômetro</p> <p>pirômetro, termopar</p> <p>amperímetro</p> <p>agulha mecânica, transdutor ótico</p>

Figura 3.3 : Classificação dos principais sensores de desgaste. [Mathew & Dan, 1990]

3.5.1 - Métodos diretos de sensoriamento

3.5.1.1 - Medidas óticas

O desgaste de uma ferramenta pode ser visto claramente por dispositivos óticos devido ao fato que a reflexividade de uma seção desgastada é consideravelmente maior que a de uma seção não desgastada. Dispositivos óticos podem ser utilizados para esta análise quando a ferramenta não está em contato com a peça. Este sistema possui como vantagem o fato de ser não invasivo e portanto a sua interferência com o uso normal da máquina é mantida a um mínimo. O uso de câmaras de vídeo acopladas com sistemas óticos de aumento e iluminação e o uso de fibras óticas na captura da imagem tem sido descritas [Mathew & Dan,1990; Sawai et all, 1995]. Técnicas de reconhecimento de padrões baseadas em redes neurais tem sido utilizadas, assim como a transformada de Fourier bidimensional [Shiraish. 1988] e o custo do software associado tem decrescido, porém o mesmo não tem acontecido com a velocidade que se desejava com o hardware ótico. Como principal desvantagem desta técnica, tem-se que o sistema exige a colocação da ferramenta fora do contato da peça em uma posição pré-determinada (a medida não é realizada em tempo real) e pode ser confundido com a deposição de metal sobre a ferramenta, que "esconde" o desgaste real ocorrido.

3.5.1.2 - Partículas do desgaste e análise de radioatividade

É fato conhecido que muitas das partículas oriundas do desgaste são levadas para longe da região de corte pelos cavacos. Portanto, a análise química dos mesmos é uma informação sobre o desgaste da ferramenta. É um método que funciona melhor para partículas relativamente grandes e não é adequado para detecção a curto prazo do desgaste.

De forma complementar, o uso de material radioativo na ferramenta e a monitorização do desaparecimento da radioatividade tem sido utilizado. É pouco prático e exige cuidados adicionais para se evitar o escape de radiação, além de exigir pastilhas previamente processadas [Mathew & Dan, 1990].

3.5.1.3 - Resistência elétrica da junção ferramenta/peça

À medida que ocorre o desgaste, aumenta a área de contato entre a ferramenta e a peça sendo usinada. Isto provoca uma diminuição da resistência elétrica entre estes pontos. Infelizmente a força de contato ferramenta/peça, que é influenciada por um grande número de fatores, também tem influência sobre a resistência, o que torna difícil a análise do desgaste por este método de uma forma isolada, sendo mais adequado para uso em sistemas multi-sensores. Este método tem sido praticamente abandonado nas pesquisas mais recentes, em

favor de outros que se mostraram mais eficientes [Mathew & Dan,1990].

3.5.1.4 - Alteração no tamanho da peça.

As dimensões da peça em usinagem são modificadas à medida que ocorre o desgaste da ferramenta. Vários sensores (tanto sensores que exigem o contato com a peça como sistemas sem contato) tem sido desenvolvidos, baseados principalmente em laser e princípios eletromagnéticos. Embora estes sistemas se mostrem bastante precisos, apresentando resoluções da ordem de 0.001mm, podendo ser manipulados por robôs, não são capazes de diagnosticar a proximidade de uma falha. Os sistemas mais sofisticados podem fazer a medição mesmo durante a operação de torneamento [Novak & Colding, 1981].

3.5.1.5 - Distância porta-ferramenta à peça

Durante a operação de torneamento, a distância entre um ponto fixo do porta-ferramentas e a peça decresce à medida que a ferramenta se desgasta. Esta distância pode ser medida diretamente utilizando-se técnicas tais como micrômetros eletrônicos, ondas ultra-sônicas refletidas, sistemas pneumáticos e dispositivos de indução. No entanto, a precisão da medida é afetada pela variação de temperatura, qualidade da superfície, fluidos de corte e diâmetro da peça.

Este método exige também o ajuste de um dispositivo de medida sobre cada peça a ser usinada, o que dificulta as operações em chão de fábrica [Mathew & Dan,1990]..

3.5.2 - Métodos Indiretos de monitorização

3.5.2.1 - Força de corte

É um parâmetro que pode ser medido com relativa facilidade, porém o custo do instrumento de medida confiável (dinamômetro) é relativamente alto, além de ser intrusivo ao processo. A força de corte tem sido objeto de inúmeros estudos, sendo que resultados contraditórios tem sido obtidos pelos vários autores. Pode-se concluir destes estudos, que os mecanismos que causam o desgaste e falha possuem uma relação complexa com as forças de corte, sendo também dependentes por exemplo, das propriedades do material da ferramenta e da peça sendo trabalhada, assim como das condições do corte (velocidade de corte, profundidade de usinagem, etc..) . Para o caso da quebra da ferramenta, todos os estudos geralmente apontam para um aumento abrupto da força. Porém, algumas situações de desgaste suave não são facilmente detectados por esta técnica [[Mathew & Dan,1990; Elbestawi et all, 1991].

3.5.2.2 - Emissão acústica

A emissão acústica (EA) pode ser definida como ondas de tensão elásticas geradas como resultado da liberação rápida da energia de deformação dentro de um material submetido a um estímulo externo, devido ao rearranjo de sua estrutura [Beattle, 1983]. A emissão acústica pode ser correlacionada ao tamanho do grão, densidade de deslocamento e distribuição de partículas de segunda fase em materiais cristalinos e é observado durante a deformação destes materiais. No processo de corte de metais, EA é atribuída a muitas fontes, tais como deformações elásticas e plásticas tanto da peça como da ferramenta, atrito, fratura da peça, quebra do cavaco, desgaste e falha na ferramenta de corte [Blum & Inasaki, 1990; Kannatey-Asibu & Dornfeld, 1981].

A emissão acústica é um meio sensível de monitorar tanto o desgaste como a fratura de uma ferramenta. O transdutor utilizado, piezelétrico, é de custo relativamente baixo. No entanto, devido às faixas de frequências consideradas importantes para a análise, entre 100Khz a 1 Mhz, a armazenagem dos dados em bruto é um pouco dificultada, assim como o processamento do sinal concorrentemente à aquisição. Este ponto tende a deixar de ser um problema, à medida que novos dispositivos de aquisição e processamento se tornam disponíveis a um custo adequado.

Atualmente tem-se utilizado da energia média do sinal (RMS), obtido através de conversores de hardware, para diminuir os requisitos de taxa de amostragem e memória necessária para

armazenagem dos dados. Embora esta solução permita diminuir a taxa de amostragem para cerca de 2 khz, ao invés dos 2 Mhz do sinal em bruto, apenas a informação de energia é armazenada, perdendo-se nesta transformação, detalhes do sinal que poderiam servir para melhor identificar a informação pertinente ao desgaste.

Os trabalhos consultados mostram que a emissão acústica parece ter uma maior sensibilidade do que a força ou a vibração, no que se refere à detecção da variação da geometria da ferramenta ou antecipação do momento da quebra, embora não exista ainda uma conclusão definitiva a respeito desta afirmação [Kerkyras et all, 1991; Susic, E. & Grabec, I.; Diniz e Pigari, 1995].

3.5.2.3 - Som

O som que se pode captar perto da região de corte em um torno contém uma grande variedade de informações. Algumas componentes deste som podem ser utilizadas para monitorar as condições da aresta de corte [Weller et all, 1969]. Infelizmente, devido à natureza não direcional do som gerado e os múltiplos caminhos que podem ser seguidos, além da interferência com o ruído ambiente, este método não tem encontrado aplicação prática na indústria. No entanto, à medida que técnicas mais sofisticadas de análise se tornem disponíveis, que eventualmente venham a facilitar o isolamento da informação útil, este tipo de monitorização poderá se tornar uma opção viável, pois é de baixo custo e possui um mínimo de

intrusividade. Tendências no sentido de se utilizar redes neurais para esta finalidade tem aparecido na literatura especializada [Ahn et all, 1994].

3.5.2.4 - Corrente ou potência do motor.

Durante o procedimento de corte, a corrente (e a potência) do motor é relacionada ao torque e, portanto, à componente tangencial da força de corte. Uma ferramenta mais afiada exige menos torque e consome menos potência do motor.

O sensoriamento da corrente é realizada com sensores simples e de baixo custo, tais como os de efeito Hall ou transformadores de corrente. Uma grande vantagem deste processo é que a instalação dos sensores e eletrônica associada pode ser feita fora da área de usinagem, não alterando em nada a operação normal da máquina.

Para condições agressivas de operação ou quebra de ferramenta, este é um procedimento que tem se mostrado adequado. No entanto, sua sensibilidade ao desgaste é pequena, não podendo ser utilizado em condições normais de operação para a identificação contínua do desgaste [Braga et all, 1993]. Como um indicador grosseiro de limiar do desgaste, no entanto, tem sido utilizado já em equipamentos comerciais.

A pouca sensibilidade da medida de corrente é devida a dois fatores principais. Em primeiro lugar, a diferença de potência necessária ao corte com uma ferramenta afiada ou com

uma ferramenta gasta é pequena e pode passar despercebida se o motor da máquina tiver uma potência muito grande. Em segundo lugar, a variação de corrente é amortecida pelas indutâncias presentes no circuito, o que impossibilita a detecção de variações rápidas por este processo. Devido à estas deficiências básicas do método, é improvável que mesmo com o uso de técnicas mais sofisticadas de extração de características, a informação de corrente seja utilizada para uso na detecção de desgaste e eminência de quebra em condições variadas e reais de operação.

Deve-se salientar, no entanto, que Diniz e Costa [1995], realizaram experimentos torneando peças de aço 4340 com ferramentas de metal duro recoberto e concluíram que, devido ao comportamento deste tipo de material de ferramenta, a corrente elétrica passa a ser um parâmetro viável para o estabelecimento do fim da vida da ferramenta. Devido à grande resistência ao desgaste das camadas de cobertura da ferramenta, esta se desgasta inicialmente bem lentamente. Depois de algum tempo de corte (tempo este dependente das condições de corte), o desgaste atinge o substrato da ferramenta, que é muito menos resistente e, por isso, a ferramenta passa a se desgastar muito rapidamente. Quando isto acontece, é chegado o momento de se substituir a ferramenta. A corrente elétrica do motor principal da máquina é, segundo estes autores, capaz de detectar esta mudança brusca da taxa de desgaste da ferramenta e, assim, capaz de estabelecer o fim da vida da mesma.

3.5.2.5 - Temperatura do corte

A medida da temperatura na região de corte é afetada pelo estado da ferramenta. Vários tipos de sensoriamentos tem sido utilizados para esta medida, utilizando-se termopares, medidas de tensão termoelétrica, medida do calor irradiado e reações termoquímicas. O método mais utilizado hoje utiliza-se de termopares na ferramenta.

Alguns resultados experimentais sugerem uma relação linear entre a temperatura e a superfície do desgaste, porém a relação exata é influenciada pelo tipo de material da peça e da ferramenta de corte.

Uma dificuldade para uso prático deste método é que o termopar deve ser integrado à pastilha para se obter melhores resultados, visto que a colocação de um termopar padrão sobre uma pastilha convencional, seria difícil de ser realizada por operadores em chão de fábrica. Isto exige pastilhas especiais, o que limita a utilização em condições industriais. Além disto, a transmissão do sinal capturado neste transdutor para a eletrônica de condicionamento é dificultada para o caso de tornos, pois o sinal obtido de um termopar é de pequena intensidade, o que exige muita amplificação numa região susceptível à captura de ruídos.

Tintas térmicas tem sido também experimentadas, porém só podem informar sobre o calor superficial e são lentas na determinação da variação de temperatura, além de ser difícil enviar esta informação (sutis variações de cores) para o processamento em computador. Pirômetros óticos e detetores

infravermelhos, juntamente com técnicas sofisticadas de modelamento foram utilizados em trabalhos experimentais, obtendo-se uma medida a distância com boa precisão. Porém mesmo neste caso, devido ao fato dos detetores infravermelho apresentar uma forte seletividade em termos do comprimento de onda a que são sensíveis, é necessário recobrir a peça a ser torneada com uma tinta de comportamento emissivo conhecido e constante, o que dificulta o uso em condições normais de operação [Adewuya & Agba,1996].

3.5.2.6 - Medidas de rugosidade

É um fato bem conhecido que a medida de rugosidade é influenciada pelo estado da ferramenta de corte [Graham, 1989]. Este fenômeno pode ser utilizado para a monitorização da ferramenta de corte, seja em tempo real ou num sistema "off-line".

Sistemas de medida em tempo real da rugosidade são dispendiosos e de difícil operação a nível de chão de fábrica. Utiliza-se normalmente da reflexão de emissões laser, o que permite uma indicação de rugosidade entre 1 a 3 μm .

A medida da rugosidade a partir do uso de rugosímetros é simples de ser realizada em laboratório, porém é lenta e não adequada para uso em produção, podendo no entanto ser utilizada dentro de um controle estatístico de qualidade como um parâmetro adicional para a verificação da funcionalidade dos sistemas de controle de desgaste em tempo real.

Embora a utilização da rugosidade da peça como elemento indicador de desgaste não seja um processo prático em condições de chão de fábrica, o uso deste parâmetro em experimentos de medida do desgaste é extremamente interessante, pois é na realidade, o parâmetro final que se deseja controlar em operações de acabamento.

3.5.2.7 - Combinação de sensores

Esta forma de operação tornou-se viável economicamente devido à queda de custo e aumento da capacidade computacional dos sistemas de aquisição e controle. É interessante o seu uso porque aumenta a faixa de operação confiável do sistema, ao atribuir um maior peso ao sinal advindo do sensor mais adequado à cada situação de operação. O uso de sistemas multi-sensores, baseados em redes neurais para a fusão dos sinais, tem sido muito relatado atualmente [Choi et al, 1990; Rangwala & Dornfeld, 1990; Dornfeld, 1990] . Esta técnica utiliza-se do fato de cada sensor ser mais sensível à uma determinada situação e da capacidade da rede neural de ser treinada para identificar as correlações entre os vários sinais como indicativos do desgaste. As redes neurais são paradigmas de programação em que o programa é treinado a reconhecer determinadas situações, sem que o programador seja obrigado a conhecer profundamente o modelo do sistema sendo analisado. Esta técnica se mostra mais atrativa à medida que novos programas para a implementação de redes neurais se tornem disponíveis no mercado. De uma forma alternativa, a lógica

fuzzy, que opera sobre variáveis que podem assumir infinitos valores (ao contrário da lógica booleana convencional, que só possui dois estados) também tem sido utilizada na fusão de sensores [Du et al, 1992]. Os sensores que tem se mostrado até agora como os mais promissores para a multifusão tem sido o de aceleração, força e emissão acústica. Uma outra forma de multifusão que também tem sido relatada na literatura, baseia-se num sistema de votação entre os dados obtidos entre os diversos sensores para a tomada de decisão [Sutherland & Moon, 1992].

3.5.2.8 - Vibração

À medida que ocorre o processo de corte da peça, os atritos entre os cavacos e a ferramenta ou entre a peça e a ferramenta produzem vibrações que podem ser monitoradas, podendo ser esta informação utilizada para detecção de tanto do desgaste como da quebra [Bonifácio e Diniz, 1994 a,b].

O transdutor é normalmente do tipo piezelétrico, com faixa de frequência de trabalho entre 100Hz a 10Khz, sendo de tamanho pequeno e de baixo custo. A eletrônica de condicionamento do sinal gerado é razoavelmente simples, sendo disponível com facilidade no mercado. Devido à relativamente baixa taxa de amostragem necessária, os requisitos de memória e velocidade de processamento estão bem adequados aos sistemas de microcomputadores hoje disponíveis no mercado.

Uma dificuldade do uso da vibração como parâmetro de medida é a separação da informação de desgaste dos outros processos físicos que também provocam vibrações, pois ocorre uma superposição das frequências geradas. A correspondência entre o sinal de aceleração (na realidade o sensor de vibração mede a aceleração instantânea do ponto em que está conectado) e o desgaste só é claramente visível em condições de trabalho mais agressivas à ferramenta. Além disto, as frequências devidas ao desgaste não são constantes para todos os sistemas máquina-ferramentas-dispositivo-peça e nem ao longo do processo, o que dificulta a elaboração de um filtro passa-banda que poderia ser sintonizado na frequência do sinal de desgaste, facilitando a extração da informação desejada. Este fato é detectado na literatura quando se compara a diferença entre as faixas de frequência mais sensíveis ao desgaste encontradas pelos diversos autores, como pode ser percebido na tabela 3.2.

Autor	Faixa de freqüência mais sensível ao desgaste
Xu & Jiang, 1987	0-117Hz 510Hz
Rao, 1986	1850Hz 3200-4800Hz
Akihito & Fujita, 1989	500-800Hz
Pandit & Kashou, 1982	4300-4700Hz
Weller et all, 1969	0-400Hz
Sokolowski & Kosmol, 1991	0-600Hz 5000-6000Hz
Martin et all, 1974	2000-2500Hz
Fang et all, 1991	0-150Hz 2000-2500Hz

Tabela 3.2 Faixas de freqüência de vibração sensíveis ao desgaste

Outro ponto que merece atenção é que o sinal que se obtém a partir do sensor de aceleração, chamado genericamente nos textos técnicos de "vibração", corresponde na realidade à aceleração sofrida pelo ponto onde o sensor está colocado, normalmente no porta-ferramentas, o mais próximo possível da ferramenta propriamente dita. Outras grandezas físicas podem ser então extraídas deste sinal, tal como a velocidade de deslocamento (resultante da primeira integração do sinal) ou a curva do deslocamento em função do tempo (resultante da segunda integração do sinal). Neste trabalho, demonstrar-se-á nos próximos capítulos que a curva do deslocamento é bem menos contaminada por fatores alheios ao desgaste do que o sinal de aceleração. Isto provavelmente se dá devido ao fato de que a integração dupla reforça as baixas freqüências em detrimento

das altas, sendo que a informação de desgaste está melhor representada nestas baixas frequências.

A aceleração também é um indicador da quebra da ferramenta. Observou-se nos experimentos iniciais, num caso em que ocorreu a quebra da ferramenta, que a amplitude do sinal cresce de forma abrupta logo antes do rompimento. Embora não tão sensível como a emissão acústica para a previsão da quebra, é adequada para o uso em operação industrial.

Em função da comparação realizada entre os vários tipos de sensores e métodos de monitorização, aliada ao baixo custo dos sensores e da eletrônica associada à monitorização de vibração, decidiu-se pela seleção deste parâmetro para a presente pesquisa.

As vibrações em um processo de usinagem [Shaw, 1984] podem ser divididas em dois tipos, a vibração forçada e a vibração por auto-excitação. No caso da vibração forçada, esta é induzida por efeitos cíclicos que estão fora da frequência de ressonância. Este tipo de vibração pode ser reduzida [Jacobsen & Ayre, 1956] através da eliminação das forças excitantes cíclicas, deslocando-se a frequência natural do sistema da frequência da força excitante, do aumento da rigidez e do amortecimento das peças sobre ação da força vibratória.

Desta forma, pode-se identificar algumas fontes típicas de vibrações forçadas em torneamento, a dizer:

- desbalanceamento dos eixos
- Folga dos mancais e rolamentos
- Má lubrificação do equipamento
- Quebra de dentes de engrenagem

- Ultrapassagem da capacidade operacional do equipamento

A outra forma de vibração, a auto excitada, acontece quando mais energia é absorvida do que desprendida durante um ciclo simples. Para que ocorra a vibração auto-excitada basta um choque na ferramenta (causada por uma batida ou incrustação mais dura no material da peça, por exemplo). Também são sugeridas como fonte de vibração auto-excitada [Shaw,1984] a usinagem descontínua, espessura variável de cavaco e atrito, dentre outras. Este trabalho se interessa, principalmente, em detectar a vibração auto-excitada do processo, gerada pelo desgaste da ferramenta. Seu grande desafio é separar esta fonte de vibração de outras.

Com o desgaste da ferramenta, as forças de usinagem aumentam, causando maior vibração da ferramenta. Porém, a vibração resultante não depende apenas deste desgaste e também da velocidade de corte, do avanço, das condições da aresta de corte (forma, afiação, etc...) , da geometria e do material da ferramenta e da peça. De uma forma geral as considerações citadas na tabela 3.3 podem ser estabelecidas [Arshinov & Alekseev, 1970; Bonifácio & Diniz, 1994b]:

fatores que aumentam a vibração	fatores que diminuem a vibração
maior raio de ponta	aumento da dureza e limite de resistência do material
em velocidades baixas, crescimento da velocidade de corte	a partir de uma certa velocidade, decresce com a velocidade de corte
profundidade de usinagem	ferramentas chanfradas

Tabela 3.3 - Fatores que influenciam a vibração em um processo de usinagem

3.6 - Técnicas de análise dos sinais aplicadas à vibração no processo de usinagem

Os sinais obtidos pelos vários métodos e processos descritos anteriormente, contém, normalmente, muita informação adicional à informação pertinente ao desgaste da ferramenta propriamente dito, o que mascara o efeito proporcional ao desgaste. Várias técnicas tem sido propostas para a extração das características desejadas, variando desde técnicas simples a opções sofisticadas de processamento. O processamento em si pode ser realizado diretamente sobre o sinal de aceleração ou sobre suas variantes, como sobre o sinal de velocidade e deslocamento sofrido pelo ponto onde está situado o sensor [Sokolowski. & Kosmol, 1991].

Um dos caminhos pesquisados tem sido a elaboração de modelos de média móvel auto-regressivo (ARMA - Auto Regressive

Moving Average,) ou simplesmente auto-regressivos AR(Auto Regressive), implementados a partir dos dados de vibração [Nicolescu et al, 1995]. Como os modelos ARMA podem levar em consideração as características de alteração do espectro de frequências dependentes do tempo (por fazerem parte da entrada do modelo as entradas e saídas passadas), podem ser utilizados para a comparação entre o valor teórico (dado pelo modelo) e o valor real (adquirido num dado instante). A diferença entre os dois valores representa um desvio em relação ao esperado e que pode ser atribuído, por exemplo, a um crescimento do desgaste da ferramenta de corte. Este procedimento, entretanto, torna-se de difícil implementação prática devido à complexidade do fenômeno sendo modelado. Uma alternativa ao modelamento explícito é o uso de redes neurais, combinadas ou não com outras técnicas de extração de características, como as wavelets ou FFT [McLaughlin et al, 1995] [Grabec & Susic, 1995], ou da lógica "fuzzy", utilizada em conjunto com a fusão de sensores [Li et al, 1992].

Outro método que tem se mostrado mais simples em termos de implementação, tem sido a comparação de uma dada característica do sinal ao longo do comprimento de corte com o valor obtido com a ferramenta nova. Este método possui uma grande adaptabilidade à variação das condições de operação, tendo sido utilizado em vários trabalhos, como por exemplo [Bonifácio, 1993]. Procedimentos comparativos possuem também uma vantagem adicional de atenuarem os erros devidos à amostragem ou pré-processamento do sinal, pois os erros tendem a ser aproximadamente os mesmos em todas as condições. A comparação pode ser realizada em três domínios, a dizer, no domínio do tempo, da frequência e no domínio da frequência-tempo ou escala-tempo.

As técnicas baseadas no domínio do tempo são fundamentalmente a extração do valor médio quadrático (proporcional à energia do sinal), a verificação do valor de pico do sinal em bruto e a contagem de picos acima de um determinado limiar. Para os casos de sinal pobres em informações, tais como o sinal de corrente, este processamento é normalmente adequado, porém perde-se muita informação útil quando o sinal é mais complexo, onde a informação pode estar contida em outra forma além da energia.

Técnicas no domínio da frequência normalmente utilizam-se de filtros e da análise de Fourier para detectar as frequências no qual a característica desejada se apresenta de forma mais realçada. Este caminho tem sido até agora o mais utilizado pelos pesquisadores da área, devido à simplicidade de utilização e facilidade de interpretação dos resultados. No entanto, quando os sinais sendo analisados são não estacionários (a definição de um sinal não estacionário encontra-se no capítulo 2), a análise de Fourier pode levar à interpretações errôneas do comportamento do sinal, por mascarar variações locais de importância, que podem passar completamente despercebidas. Além do mais, sinais formados por combinações complexas de outros sinais com superposição de frequências, não são separáveis por filtros ou por FFT, o que dificulta o isolamento da informação desejada. Este fato é refletido nos resultados díspares obtidos pelos diversos autores na detecção da faixa de frequências ótima em termos de sensibilidade ao desgaste, conforme foi visto na tabela 3.2.

Técnicas no domínio escala-tempo ou frequência-tempo tem sido empregadas recentemente pelos pesquisadores como uma alternativa às deficiências apresentadas pela análise de Fourier. Estas técnicas, desenvolvidas recentemente, permitem

que os sinais sejam analisados respeitando-se a sua não estacionaridade, sendo que algoritmos que permitem a sua aplicação em tempo real já estão disponíveis [Tadao et al,1994; Kasashima et al, 1994, Newland, 1994]..

Neste trabalho adotar-se-á uma combinação de técnicas do domínio escala-tempo (wavelets) juntamente com técnicas de análise temporal (RMS, integração). Esta combinação se mostrou eficaz na extração da informação de desgaste a partir do sinal de aceleração.

Capítulo 4

Procedimentos experimentais

4.1 - Premissas básicas do sistema:

Os procedimentos experimentais foram idealizados tendo em vista que a migração do laboratório para a planta industrial fosse realizada de uma forma mais segura possível, considerando-se que um dos objetivos deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema de detecção de desgaste e fim de vida de ferramentas de torneamento que pudesse ser utilizado em condições normais de operação em chão de fábrica.

Assim, foram desenvolvidos sistemas eletrônicos e programas de aquisição e processamento de sinais que permitissem a utilização da metodologia desenvolvida em condições de operação em tempo real. Isto obrigou o desenvolvimento de hardware quando não disponível comercialmente, como o caso dos acopladores óticos lineares para a transmissão de sinal entre o transdutor e o sistema de aquisição de dados e o desenvolvimento de software para aquisição e processamento de sinais. O uso de pacotes já existentes no mercado (do tipo do MATLAB) foi descartado devido ao seu alto custo e dificuldade de integração com um sistema operando necessariamente em tempo real e a não adequabilidade das especificações, no caso de sistemas de aquisição de dados.

Considerando-se este objetivo, o seguinte conjunto de premissas foi estabelecido:

- O conjunto de sensoriamento não deveria atrapalhar a operação normal do torno.
- Os equipamentos eletrônicos deveriam ser robustos o suficiente para suportar as condições adversas de operação normalmente encontradas em plantas industriais.
- Os algoritmos desenvolvidos deveriam ser rápidos e pequenos, de forma a permitirem a identificação do desgaste da ferramenta de corte em tempo real e possibilitarem a sua implementação em sistemas computacionais de pouca capacidade, viabilizando a sua integração com o controle numérico já associado ao torno.
- A linguagem de implementação do algoritmo de estabelecimento do fim de vida da ferramenta deveria ser de uso geral, de forma a facilitar a migração entre várias plataformas e facilitar a manutenção do software.
- O sistema deveria ser integrado ao comando do torno, permitindo desta maneira o controle automático do mesmo.
- Custo o mais baixo o possível.

Do ponto de vista de hardware, estas condições poderiam ser atendidas projetando-se um sistema de transmissão sem fios entre o ponto de coleta da informação (onde o sensor está localizado, próximo à ferramenta de corte) e o sistema de aquisição de sinais. A transmissão sem fios do sinal, através de um acoplador ótico, desacopla mecanicamente o sensor da eletrônica de condicionamento de sinal, o que elimina os problemas de quebra de cabos que forçosamente iriam ocorrer se esta transmissão fosse efetuada com fios, devido ao movimento giratório da torre quando da troca de ferramentas. Decidiu-se, por considerações de economia de espaço, não descrever o desenvolvimento e construção deste acoplador neste trabalho,

porém para maiores detalhes pode-se consultar [Tavares et al., 1995].

O uso de conversores AD em placas para o barramento IBM-PC é uma solução efetiva em termos de custo para o caso de protótipos ou pequenas séries, assim como a utilização de microcomputadores desta família na versão industrial. Para o caso de grandes séries, a integração deste sistema com o controle numérico é mais adequado. Assim foram escolhidas as seguintes opções no presente projeto:

- micro computador interligado ao controle numérico através da interface RS232C como a solução mais eficiente em termos de custo/desempenho para o protótipo,
- uso da linguagem C++ como linguagem de programação dos algoritmos
- sistemas operacionais WINDOWS 3.11 para a interface homem máquina e DOS para os programas de aquisição em tempo real.

Em virtude da inexistência de softwares de mercado que implementassem o algoritmo da transformada de wavelet D4 para aplicações em tempo real, desenvolveu-se um sistema de análise de sinais (denominado "Waitsowi"), que de uma forma visual, permite a análise nos domínios do tempo, da frequência e realiza também a transformada de daubechies. Este programa de análise de sinal foi indispensável para que pudessem ser realizados todos os testes necessários sobre as várias condições de análise. As rotinas utilizadas pelo programa foram desenvolvidas num formato em que podem ser utilizadas por outros programas sem alteração na codificação, permitindo-se com isto a sua utilização em sistemas automáticos de determinação de desgaste operando em tempo real.

Por razões já apontadas no capítulo três foi escolhido a medida da vibração no suporte da ferramenta, na direção de

corte, como um indicador de desgaste da ferramenta de corte, conforme pode ser visto na figura 4.1.

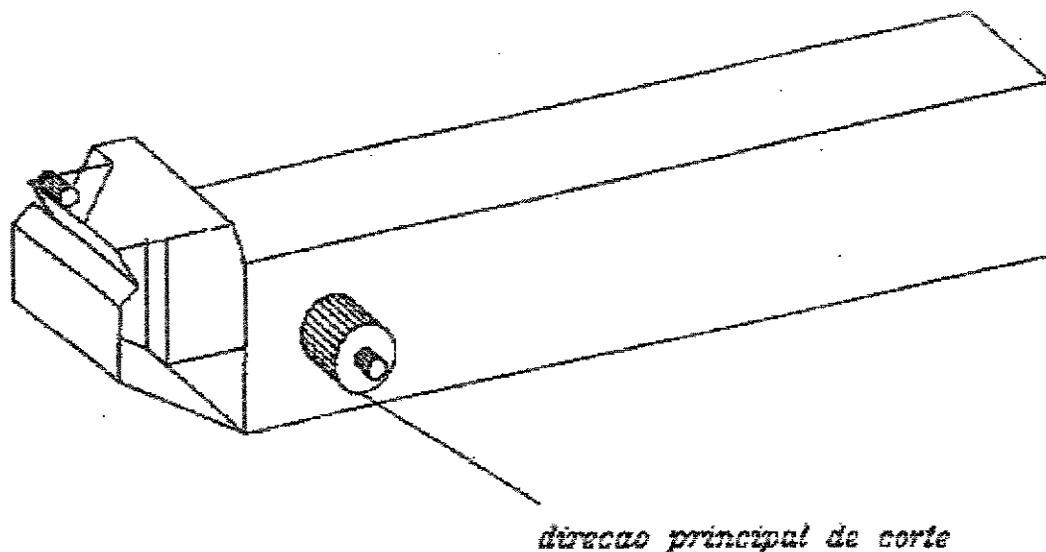


Figura 4.1. Posicionamento do acelerômetro

4.2 - Ensaios preliminares

4.2.1 - Pré-identificação das características do sinal:

Visando uma pré-identificação das características do sinal que permitisse o projeto do hardware e a especificação das condições de aquisição de dados, realizou-se um experimento que permitisse o levantamento das seguintes condições:

- 1- Faixa de frequência em que o sinal possui componentes.
- 2- Variação da amplitude do sinal para as várias condições de corte, examinando-se a possibilidade de eventual saturação do sensor.

3- Contaminação do sinal pelo ruído de fundo (valores do sinal com a ferramenta avançando, mas sem cortar).

Este levantamento foi realizado para situações de torneamento em acabamento, utilizando-se a ferramenta de metal duro recoberto ISO TNMG 16 04 04-61 GC-435 da Sandvik. As condições de usinagem utilizadas, mostradas na tabela 4.1, foram especificadas com base nas recomendações do catálogo do fabricante. Para todas estas condições utilizou-se uma profundidade de usinagem a_p de 1 mm.

Velocidade de corte V_c (m/min)	Avanço f (mm/volta)
300	0.1
300	0.15
300	0.2
275	0.15
250	0.13
250	0.15
250	0.2
225	0.15
200	0.13
200	0.15
200	0.20

Tabela 4.1- Matriz de experimentos

Foram construídos inicialmente dois corpos de prova. O primeiro corpo, de formato convencional, foi construído em aço 4340, forma cilíndrica com diâmetro externo inicial de 60 mm e comprimento total de 120 mm. Foi feito um rasgo no centro

do corpo de forma a permitir a saída da ferramenta. A figura 4.2 apresenta o formato deste corpo de prova .

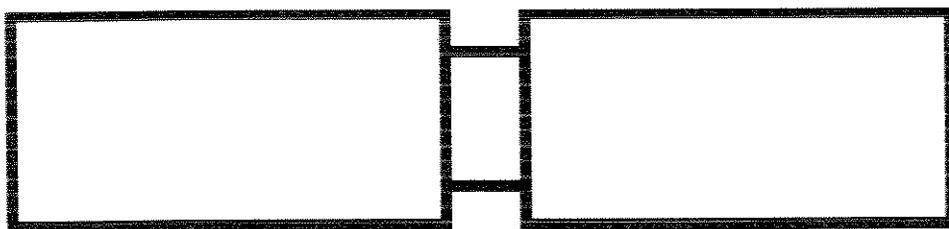


Figura 4.2: Corpo de prova Tipo I.

O segundo corpo de prova utilizou também aço 4340 e foi idealizado com o objetivo de permitir a obtenção de dados referentes a um ciclo completo de operação da ferramenta, a dizer, coletar os dados referentes ao instante anterior ao choque da ferramenta com a peça, o instante do choque propriamente dito, a região estável de corte e a região de saída da ferramenta. Procurava-se desta forma identificar as regiões que fossem mais representativas do desgaste. A figura 4.3 apresenta o formato deste corpo de prova.

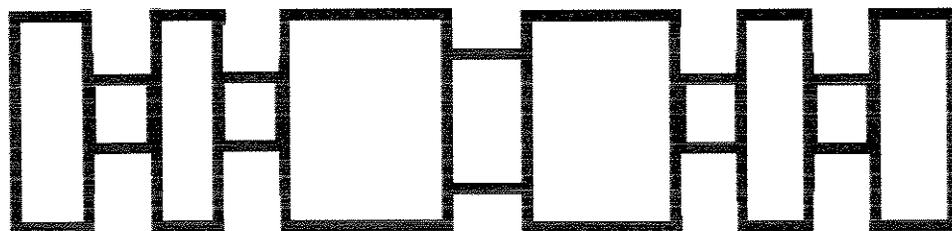


Figura 4.3: Corpo de prova Tipo II.

O diagrama em blocos do instrumental utilizado para o levantamento preliminar do sinal obedece . esquema convencional de aquisição, conforme está mostrado na figura 4.4:



FIGURA 4.4: Diagrama em blocos da aquisição de dados

O sensor utilizado foi o acelerômetro KISTLER 8702B500, colocado de forma a ser sensível na direção principal de corte. O amplificador correspondeu ao acoplador 5134 da KISTLER. O conversor AD foi programado para operar com entrada de +- 5V e taxa de amostragem de 20Khz, baseado na literatura que aponta como de 4 a 8 Khz como as maiores componentes de freqüência dos sinais de vibração nas condições selecionadas.

A análise espectral e a visualização da variação de amplitude do sinal em função das várias condições de operação, permitiram identificar que não ocorria saturação do transdutor nestas condições, com o sinal variando no máximo entre -2 e + 2.5 volts. No entanto a análise espectral realizada mostrava componentes muito fortes espalhadas em todo o espectro, sem uma predominância nítida em alguma região específica. Este fenômeno levava a crer que as componentes do sinal se estendiam acima dos 10 Khz, o que estaria provocando erros devido à sub-amostragem do sinal ("aliasing").

Para verificação desta hipótese, aumentou-se a taxa de amostragem até 100khz, máximo permitido pela placa de aquisição disponível. Repetiram-se os experimentos, o que veio a confirmar a faixa de variação da amplitude do sinal. Porém, no que se refere ao conteúdo espectral, apresentaram-se componentes na faixa de 30 a 45 Khz vários decibéis acima dos componentes presentes na faixa até 10Khz. Não foi encontrado nenhuma referência a estas componentes de freqüência elevada na bibliografia consultada.

Foi realizado um estudo sobre a origem destas componentes e sua influência sobre o sinal que se desejava obter. Dado a frequência muito elevada, foi descartada a existência de vibrações mecânicas relevantes (que normalmente atingem um máximo de 20Khz). Um estudo do sensor utilizado identificou que a resposta de frequência do acelerômetro escolhido possuía o formato especificado na figura 4.5

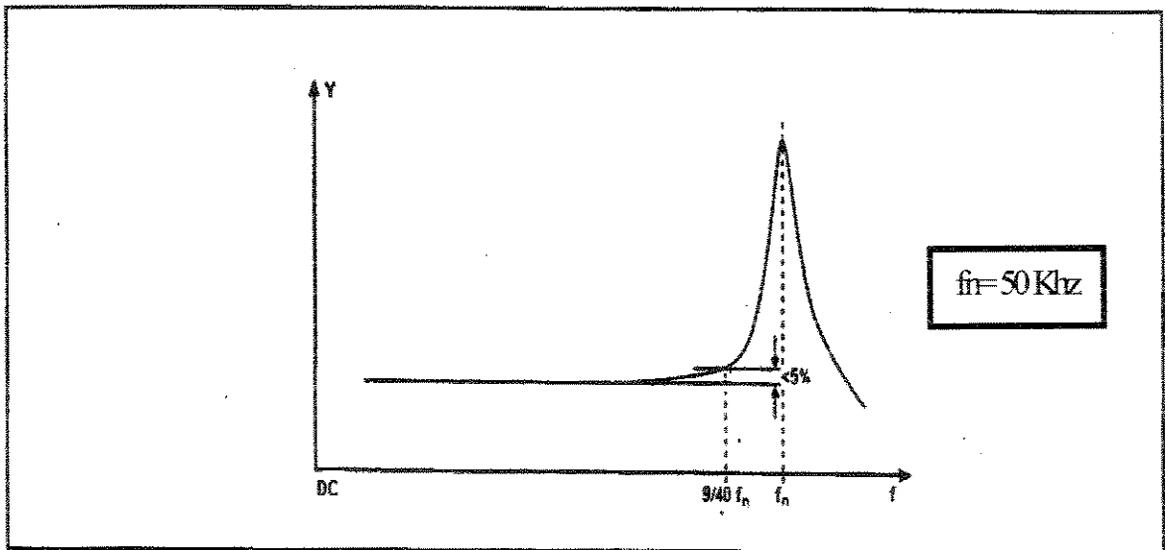


Figura 4.5. Resposta em frequência do acelerômetro

Identifica-se através desta curva que a resposta do acelerômetro só é confiável até a faixa de 8 KHz. Em 10 KHz os sinais já são amplificados em cerca de 10% e daí em diante os sinais são amplificados ainda mais, atingindo um pico de amplificação em torno de 50khz, frequência de ressonância do cristal. Devido ao fato que a utilização do sensor próximo à frequência de ressonância é bastante instável, observa-se que este acelerômetro deve ser necessariamente seguido de um filtro passa baixa, que limite o sistema a sinais de, no máximo, 10 KHz.

Deve-se observar que o uso do filtro irá também reduzir a necessidade de altas taxas de amostragem do sinal, o que facilita a operação em tempo real do sistema.

Para garantir que o filtro utilizado eliminava de forma efetiva o sinal acima de 10 KHz, repetiram-se os experimentos anteriormente realizados (mantendo-se a taxa de amostragem em 100 KHz), porém com o filtro e amplificador integrados, programados para corte em 10 KHz. A análise espectral não mostrou nenhum componente significativo acima dos 10kHz, o que comprovou a eficiência do filtro e não exigiu a implementação de nenhum tipo de correção de curva de aquisição por software.

Com o filtro selecionado, os sinais ficaram na faixa de 0-10KHz, amplitude entre +2.2 e -2.5 Volts. Desta forma pode-se baixar a taxa de amostragem dos dados para 31250 KHz. Esta taxa de amostragem é um compromisso adequado entre a capacidade de memória do microcomputador para armazenar uma corrida de aquisição, a garantia de recuperação integral do sinal baseada nas considerações realizadas no capítulo 2 e disponibilidade de tempo de processamento para a realização de outras tarefas entre o intervalo das aquisições.

Uma vez levantadas as características preliminares do sinal iniciou-se o projeto dos vários blocos constituintes do sistema idealizado.

4.2.2 - O sistema de transmissão e recepção de sinais

Para a transmissão sem fios do sinal do acelerômetro para o sistema de condicionamento de sinal foram analisadas as opções de rádio frequência(RF), ultra-som e feixe infravermelho. Medidas realizadas no laboratório onde se encontrava o torno

mostraram ruído eletromagnético na faixa de 200Khz a 25 Mhz. Isto representava um problema para a transmissão por enlace de RF. Outro ponto contra o uso de RF era a possibilidade de interferência cruzada entre os sinais gerados em diferentes máquinas. Embora todos estes problemas possam ser resolvidos com o projeto correto da eletrônica, resultaria em sistemas complexos e de custo elevado.

Transmitir os sinais em forma de ondas acústicas, na faixa audível ou ultra-som é possível em teoria, devido à limitação da faixa a 10Khz. No entanto, esta solução não é adequada devido à dificuldade de isolamento do ruído ambiental e à possibilidade de múltiplos caminhos entre a origem e o destino do sinal (inúmeras reflexões), o que confunde os sistemas de decodificação.

A modulação de um feixe de luz é uma técnica que tem um conjunto de características que a tornam adequada para este tipo de conexão sem fio. É de curto alcance e pode ser feita de forma direcional. Portanto, a possibilidade de interferência entre diferentes máquinas é extremamente reduzida. Escolhendo-se um sistema de modulação pulsado, a interferência ambiental pode ser considerada residual. A eletrônica associada, considerando-se os requisitos de baixa frequência e curta distância de transmissão é muito simples e de baixo custo, além de necessitar de um baixo consumo de energia, fator importante, pois a alimentação do sistema que fica sobre a torre porta-ferramenta do torno deve ser necessariamente realizada através de baterias.

Decidiu-se, portanto, pela implementação de um sistema baseado em transmissão infravermelha, cujo projeto é detalhado em [Tavares et all, 1995].

4.3 - Ensaios de vida da ferramenta

4.3.1 - Procedimento de amostragem .

Uma vez verificado a amplitude de variação do sinal e suas componentes freqüenciais, foram desenvolvidos programas de aquisição de dados que permitissem três perfis de coleta, todos os três com taxa de amostragem de 31250 Khz.

O primeiro perfil utilizava-se do corpo de prova 2 (figura 4.2) e permitia a análise dos sinais referentes ao instante anterior ao choque ferramenta-peça, ao choque propriamente dito, ao tempo de estabilização e à saída da ferramenta da peça. O tempo amostrado em cada aquisição era de aproximadamente de 3 segundos. A figura 4.5 apresenta uma curva típica obtida com este perfil de aquisição.

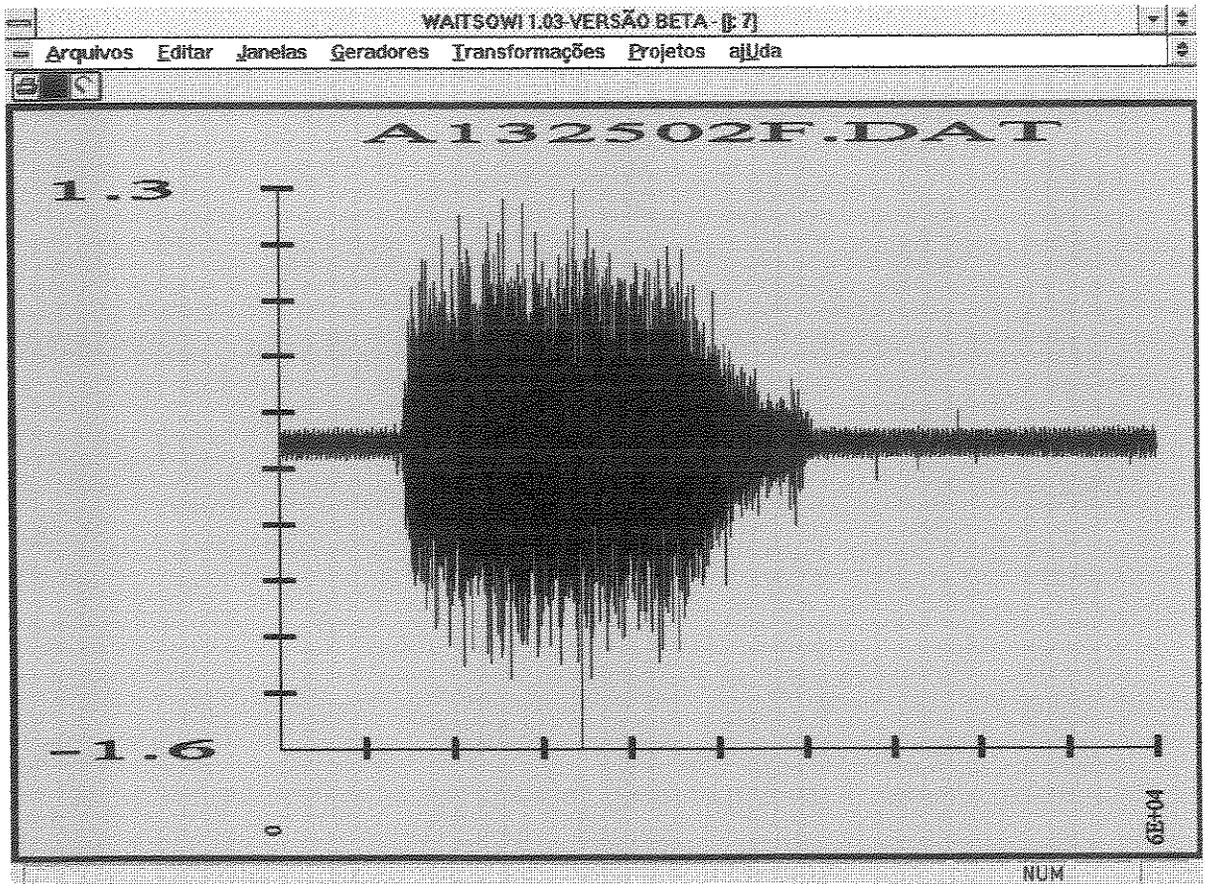


Figura 4.6. Exemplo de aquisição com o perfil I de aquisição

Foram realizados vários experimentos que comprovaram que o instante de choque, embora potencialmente fosse rico em informações sobre o sistema em análise, era por demais instável para permitir a extração de características de modo confiável. Além do mais, a operação do torno nesta condições não simulava com perfeição a operação industrial, pois provocava a ocorrência de muitos choques repetitivos, o que poderia provocar desgastes adicionais na ferramenta que normalmente não ocorreriam em condições industriais normais. Este perfil de aquisição, no entanto, foi decisivo na determinação dos intervalos de choque, estabilização, sinal estável e o decaimento após a ferramenta se separar do corpo sendo usinado. Com estes experimentos pôde-se determinar que após cerca de 1 segundo do choque, o sinal já se apresentava estável o

suficiente para que a análise estatística tivesse uma representatividade adequada.

O segundo perfil fazia a coleta a partir do instante do choque com um tempo de amostragem global de 4 segundos, utilizando o corpo de prova sem as aletas (corpo de prova 1, figura 4.1). Este perfil permitia a análise do sinal numa região mais estável, sem perder informações sobre os choques que eventualmente viessem a fornecer algum dado adicional. No entanto, observou-se que o desgaste no início da utilização da ferramenta cresce bem lentamente, até que, após atingido um dado valor, passa a crescer de forma abrupta no final da vida da ferramenta. Isto fazia com que várias coletas de dados perdessem justamente o instante de maior desgaste da ferramenta, que ocorria quando esta estava usinando uma parte mais interna da peça, (após os 4s de amostragem).

Como uma coleta de dados de forma contínua, do tipo desenvolvido pelo perfil dois de coleta, facilmente esgotaria a quantidade de memória disponível no sistema de aquisição de dados ao se coletar informações sobre todo o comprimento do corpo de prova, optou-se pelo perfil 3 de coleta, qual seja: As amostragens seriam realizadas em conjuntos de 4096 pontos, espaçadas igualmente por todo o corpo de prova, numa quantidade especificada pelo usuário. Nestes experimentos determinou-se que 10 amostras por corpo de prova permitiam um acompanhamento adequado da curva de desgaste por toda a extensão do corpo de prova e ao mesmo tempo mantinha o consumo de memória e tempo livre de CPU em níveis adequados.

A quantidade de 4096 pontos por amostra é matematicamente representativa do sinal, conforme pode ser verificado utilizando-se das fórmulas levantadas no capítulo dois.

Dado que este perfil de coleta de dados, juntamente com a utilização do corpo de prova 1, preenchia todas as necessidades

de extração de informações de vibração, decidiu-se utilizá-lo em todos os experimentos restantes.

4.3.2 - Procedimentos de análise

Os ensaios foram então realizados para todas as condições especificadas na tabela 4.1. Após a usinagem de cada peça ela tinha a sua rugosidade medida (R_a e R_{max}), utilizando-se um rugosímetro MITUTOYO surfest 211. Isto foi feito com o fim de se poder comparar o comportamento da rugosidade das peças à medida que o corte progredia (a rugosidade é o principal critério de fim de vida da ferramenta em operações de acabamento, conforme citado no capítulo dois), com o comportamento de diversos parâmetros dos sinais provenientes do acelerômetro.

Um ensaio consistia do torneamento consecutivo de diversos corpos de prova com a mesma aresta da ferramenta, até que esta apresentasse um desgaste tal que impossibilitasse totalmente o corte, causando uma rugosidade na peça extremamente ruim (o rugosímetro já não conseguia mais medir a rugosidade).

Inicialmente foram avaliados os seguintes parâmetros do sinal de aceleração obtido:

- Valor RMS da aceleração
- Variação espectral da aceleração
- Wavelets D4 da aceleração
- Valor RMS de níveis selecionados de wavelets.

Estas medidas foram então repetidas para o caso do sinal de velocidade e deslocamento, obtidos através das integrações sucessivas do sinal original. O objetivo deste levantamento era de obter o maior número de parâmetros possível, de forma a

facilitar a identificação dos parâmetros mais eficazes na extração da característica desejada.

O acelerômetro fornece um sinal diretamente proporcional à aceleração na sua base. Ao se integrar este sinal, obtém-se a curva da velocidade na base do acelerômetro. Uma integração adicional resulta no deslocamento sofrido por este ponto, o que em última análise é proporcional ao deslocamento da ponta da ferramenta. A integração dupla mostra-se também eficaz em remover as componentes de alta frequência que são devidos à outros fenômenos que não o desgaste propriamente dito. Deve-se observar também que é necessário a remoção do nível médio antes de cada operação de integração, pois esta componente, se integrada, iria provocar o surgimento de um sinal de saída em forma de rampa em superposição ao sinal desejado, o que iria mascarar o sinal que realmente se deseja processar.

Sobre os sinais de aceleração, velocidade e deslocamento foram aplicadas transformadas de wavelets, especificamente as wavelets de Daubechies, dos tipos D2 até D20. O objetivo foi o de identificar qual transformada era capaz de explicitar de forma mais evidente o possível, o desgaste da ferramenta e também qual o sinal (aceleração, velocidade ou deslocamento) que melhor era portador desta informação. Destes experimentos elegeu-se a transformada D4 como a mais apropriada para esta finalidade.

O software para os experimentos, portanto, consistiu do desenvolvimento de rotinas para análise por wavelets em tempo real, transformadas direta e inversa, de obtenção da transformada rápida de Fourier, do levantamento de valores médio e RMS

De uma forma resumida, o ambiente experimental completo desenvolvido para a identificação em tempo real do desgaste de

uma ferramenta de corte em operações de torneamento pode ser expresso como:

- acelerômetro e sistemas de acoplamento óticos lineares (hardware)
 - coleta de 4096 pontos a 31,250 Khz, espaçados ao longo do corpo de prova (hardware + software).
- extração destes dados com nível médio zero (evita erros devido a integração da decalagem do sinal)
- integração destes dados, obtendo-se a velocidade
- extração dos dados resultantes com nível médio zero
- nova integração dos dados , obtendo-se o deslocamento
- extração dos dados resultantes com nível médio zero
- cálculo das wavelets seguindo Daubechies D4
- eliminação dos coeficientes que tendem a mascarar as variações nos demais níveis
- obter a curva inversa dos coeficientes resultantes
- obter a curva RMS destes valores. Verificação em tempo-real da correlação entre esta curva com a curva da rugosidade.
- atuação sobre o torno para a troca automática de ferramentas

As transformações matemáticas necessárias foram realizadas com o programa Waitsowi, e a aquisição de dados com o programa AVE, desenvolvido especialmente para permitir a amostragem segmentada ao longo de todo o comprimento da peça, característica esta não encontrada nos softwares comerciais disponíveis para utilização.

Capítulo 5

Resultados e discussões

5.1 - Considerações preliminares

O trabalho de análise realizado sobre os sinais obtidos nos experimentos descritos no capítulo anterior, teve como objetivo básico a procura por procedimentos e técnicas que permitissem associar algum parâmetro do sinal de vibração ao desgaste da ferramenta de corte. Não se desejou entrar em considerações sobre a influência das condições de operação sobre o desgaste ou sobre os mecanismos físico-químicos que determinam o perfil e taxa do desgaste. Desta forma, o sistema ferramenta-peça-torno foi considerada uma "caixa preta", sobre o qual as únicas informações de saída disponíveis eram o sinal em bruto da aceleração e a rugosidade da peça.

O sinal de aceleração obtido pelo sistema de aquisição de dados é a resultante de componentes variadas que tendem a se combinar de forma a mascarar o efeito individual de cada componente. De forma simplificada, pode-se dizer que o sinal de aceleração é composto de:

$$s = s_d + s_m + r_u,$$

onde s = sinal resultante

s_d = sinal devido ao desgaste

s_m = sinal devido às constantes típicas de cada máquina e das condições de operação

ru = ruído de fundo devido à vibrações presentes a todo instante na máquina

Com exceção da componente ru, as demais componentes são diretamente influenciadas pelas condições de operação (velocidade de corte, avanço, profundidade de usinagem, tipo de material e de pastilha de corte, etc...) e pelo estado geral e qualidade da máquina. Isto leva a um modelamento complexo que dificulta o uso da formulação matemática baseada em um modelo levantado empiricamente para a determinação do momento de fim de vida da ferramenta. A abordagem comparativa, em que o sistema de controle é informado do valor de determinados parâmetros com a pastilha em bom estado e durante o procedimento de corte (desde que mantida as condições iniciais de operação), torna-se um melhor procedimento para indicar o momento de troca da ferramenta.

O problema torna-se então a seleção de parâmetros que sejam indicativos do desgaste, com o mínimo de influência dos outros componentes. Esta seleção é dificultada devido à pequena parcela representada pela variação do desgaste na somatória total do sinal. Para a escolha destes parâmetros decidiu-se pela realização de um conjunto de experimentos na busca das transformações matemáticas que viessem a explicitar de forma mais decisiva possível o fim da vida da ferramenta.

Para cada arquivo coletado realizaram-se as seguintes análises em função do comprimento de corte, tanto para o sinal bruto obtido no sensor de aceleração, quanto para velocidade e deslocamento instantâneos do ponto do porta-ferramenta ao qual o sensor está acoplado:

- valor RMS global
- Análise da transformada de Fourier
- Análise de wavelets (D4)
- RMS da inversa da wavelet de níveis selecionados

- rugosidade Ra
- rugosidade Rmax

Cada gráfico foi obtido a partir de uma média de oitenta arquivos por vida de ferramenta, com 4096 pontos por arquivo, resultando numa representatividade estatística adequada.

5.2 - Análise da rugosidade

Como já visto no capítulo 3, a rugosidade da peça é um parâmetro necessário e suficiente para a determinação do fim de vida da ferramenta em operações de acabamento. Viu-se também que, a medida que o desgaste de flanco de ferramenta cresce, a rugosidade também cresce, até que a peça não mais atenda as exigências do projeto com relação a seu acabamento superficial. Então, neste estudo, procurou-se correlacionar o comportamento do sinal de vibração no tempo (ou comprimento) de corte, não diretamente com o desgaste da ferramenta, mas com a rugosidade da peça.

As figuras 5.1 e 5.2 a seguir apresentam a rugosidade Ra e Rmax para o teste com v_c (velocidade de corte) = 200 m/min e f (avanço) = 0.13 mm/volta. Ambas as curvas estão expressas em função do comprimento de corte L_c , dado em metros, calculado através da fórmula $L_c = \frac{\pi D L_f 10^{-3}}{f}$, com D = diâmetro em cm, L_f = comprimento de avanço em cm, f = avanço em mm/volta. As curvas para as demais condições estão apresentadas no Apêndice 1. As curvas aqui apresentadas representam bem o que aconteceu nos demais testes. Deve-se observar que em todos os gráficos estão apresentados simultaneamente a curva obtida diretamente com os dados e a curva polinomial de grau seis correspondente. Esta curva polinomial não tem como objetivo simplesmente obter a curva mais próxima aos dados obtidos, porém representa um passo adicional no conjunto de transformações matemáticas a que será

submetido o sinal original, no sentido de se facilitar a extração da característica desejada por meios computacionais.

$v_c=200$ m/min $f=0.13$ mm/volta

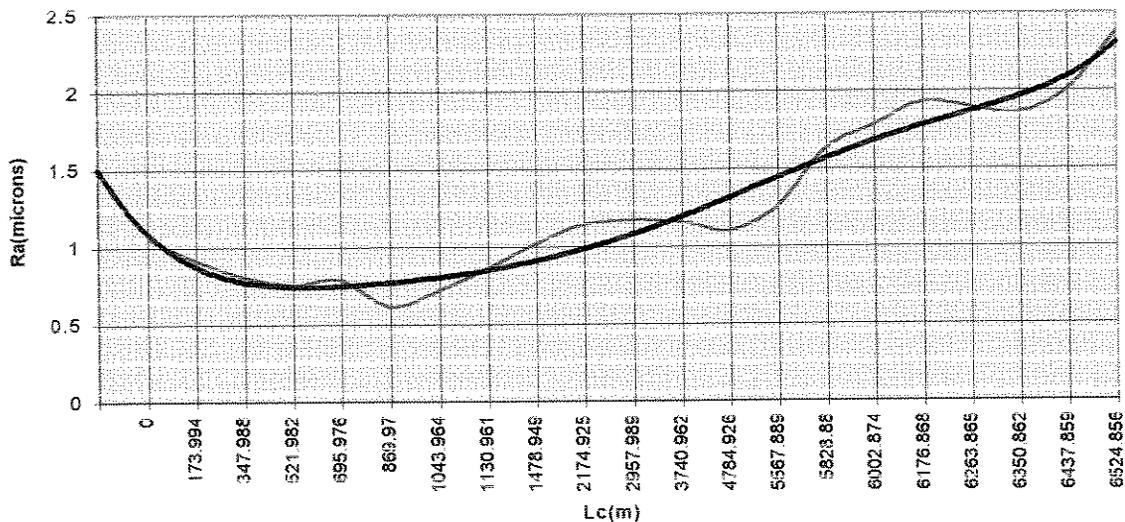


Figura 5.1 Ra X Lc para $v_c= 200$ m/min e $f= 0.13$ mm/volta

$v_c=200$ m/min $f=0.13$ mm/volta

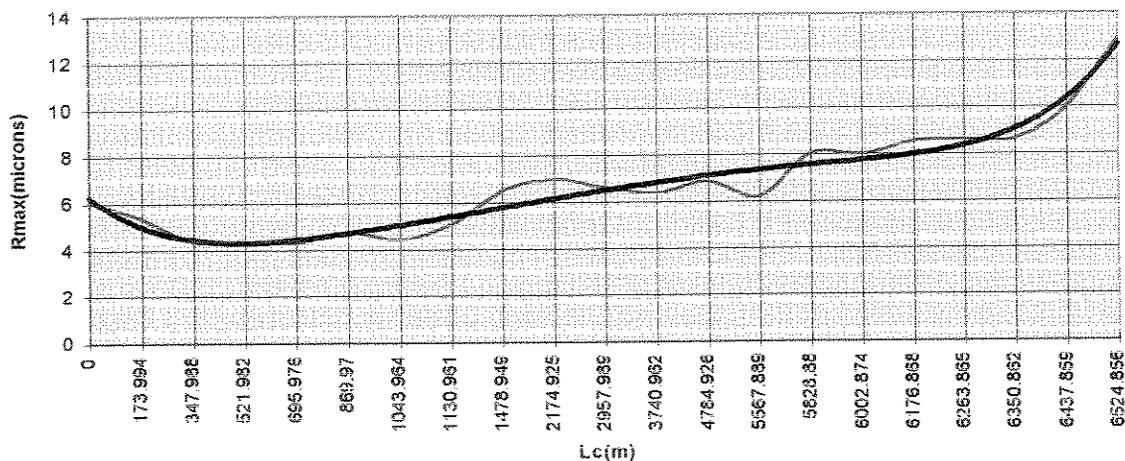


Figura 5.2 Rmax X Lc para $v_c=200$ m/min e $f=0.13$ mm/volta

A inspeção visual destas figuras revela que:

- A rugosidade é uma função não linear do comprimento de corte, com uma taxa de crescimento que aumenta perto do fim de vida da ferramenta, podendo inclusive acontecer que o ponto de troca venha a ocorrer repentinamente, com a ferramenta dentro de uma peça. Este fato ocorreu em vários dos experimentos, com o valor da rugosidade no início da peça completamente diferente do valor medido no meio da peça, sendo que em alguns casos, sequer era possível esta medida, por ela ultrapassar completamente a faixa de valores possíveis de serem medidas com o rugosímetro. Isto aconteceu quando as velocidades de corte eram bem acima das recomendadas.
- Este comportamento da rugosidade torna inadequada a aquisição de dados de vibração em um único ponto do corpo de prova, pois o valor obtido poderá não ser representativo. Este problema foi resolvido desenvolvendo-se um programa de aquisição que permitia ao usuário especificar quantas aquisições desejava fazer por corpo de prova, assim como o número de pontos de cada aquisição em particular. Nestes experimentos foram especificadas 10 aquisições igualmente espaçadas por corpo de prova.
- As condições de operação possuem forte influência sobre o desgaste da ferramenta, medido indiretamente através da rugosidade da peça. Baixas velocidades de corte exigiram cerca de 200 cortes em corpos de prova para que a rugosidade fosse considerada inadequada para fins de acabamento, enquanto que em velocidades mais elevadas 30 corpos de prova eram suficientes para provocar a total inoperância da ferramenta, concordando com o registrado na literatura sobre a influência da velocidade de corte no desgaste e vida da ferramenta. As condições de usinagem também provocaram perfis de desgaste completamente diferentes, tendo em comum apenas o fato

da rugosidade crescer concorrentemente ao fim de vida da ferramenta. (ver tabela 5.1)

- De uma forma geral, a rugosidade decresce logo no início do corte. Isto acontece (conforme já visto na revisão bibliográfica) porque, devido ao fato da ferramenta utilizada possuir três camadas de cobertura, ela tem um raio de aresta grande, o que aumenta a rugosidade da peça no início da vida. Depois de um certo tempo de corte, a aresta da ferramenta se amolda a um perfil mais adequado e a rugosidade cai. No fim da vida da ferramenta o desgaste (e a rugosidade) cresce mais rapidamente devido ao fato de que, chega um momento em que as camadas de cobertura já foram quase totalmente consumidas e a ferramenta passa a realizar o corte com o seu substrato, que é bem menos resistente ao desgaste.

Tanto a rugosidade máxima (R_{max}) como a rugosidade média (R_a) podem ser utilizadas como indicativo do desgaste da ferramenta, pois de qualquer forma o que se deseja é obter uma peça com os limites de rugosidade pré-especificados e ambas as curvas possuem um perfil semelhante. Porém R_a , como é uma medida que considera a média de vários valores, foi considerada como fator de determinação do desgaste no restante deste trabalho. Em alguns momentos de alguns ensaios, o valor de R_{max} crescia repentinamente e não era acompanhado pelo valor de R_a . Isto se prende ao fato de que um único pico ou vale maior dentro do comprimento de amostragem influencia fortemente o R_{max} , mas é amortecido quando se mede R_a . Este fato foi determinante para a escolha do R_a como padrão para a comparação da rugosidade da peça com os diversos parâmetros de vibração da ferramenta. A tabela 5.1 apresenta o comprimento de corte alcançado com os vários ensaios, adotando-se o critério de $R_a = 3.0 \mu m$ como a maior rugosidade média permitida (quando a peça atingia este valor, a ferramenta era considerada em fim de vida). Nos casos em que ocorreu um aumento repentino da

rugosidade para valores acima dos possíveis de serem medidos com o rugosímetro adotou-se como comprimento de corte o comprimento executado até a peça imediatamente anterior ao estouro.

Ensaio (v_c/f)	Lc (m)
200/0.13	6524
200/0.15	6190
225/0.15	1460
250/0.13	1437
275/0.15	1238
300/0.13	827
300/0.15	883

Tabela 5.1. Comprimento de corte para $R_a = 3 \mu m$

5.3 - Análise dos sinais de aceleração

Baseado na suposição de que à um maior desgaste corresponderia uma maior energia necessária para o corte (suposição que é em parte suportada pelo constatação de um aumento substancial da corrente do motor principal ao término da vida útil da ferramenta, mostrada em Diniz e Costa, 1995), decidiu-se traçar a curva do valor médio quadrático do sinal de aceleração, com o objetivo de determinar se a alteração deste parâmetro poderia ser utilizado como indicador do aumento da rugosidade.

Na figura 5.3 apresenta-se a curva de variação do RMS para cada coleta de dados para o ensaio de $v_c = 200$ m/min e $f = 0.13$ mm/volta e na figura 5.4 para o ensaio $v_c = 300$ m/min e $f = 0.13$ mm/volta. No Apêndice 2 apresentam-se as demais curvas para alguns dos testes realizados. Estas duas curvas são representativas do comportamento típico do sinal de aceleração para as variadas condições de corte.

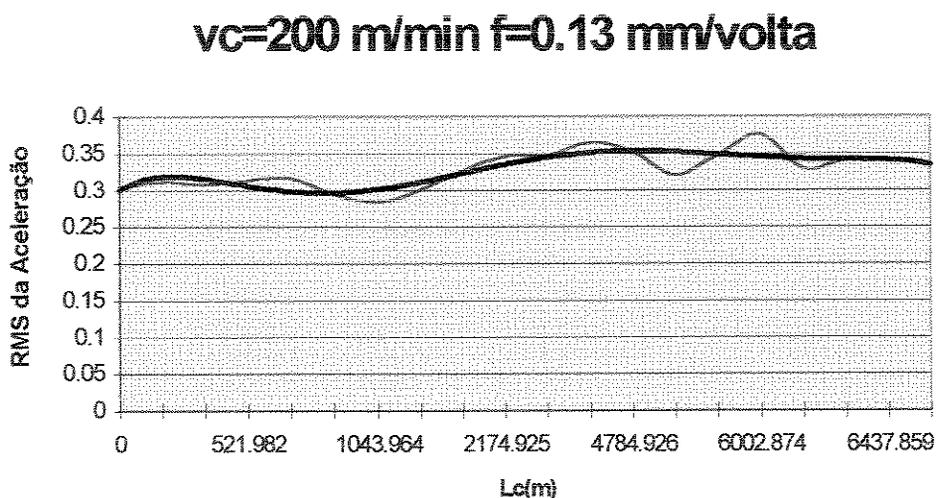


Figura 5.3. RMS da aceleração para $v_c = 200$ m/min e $f = 0.13$ /volta

$v_c = 300 \text{ m/min}$ $f = 0.13 \text{ mm/volta}$

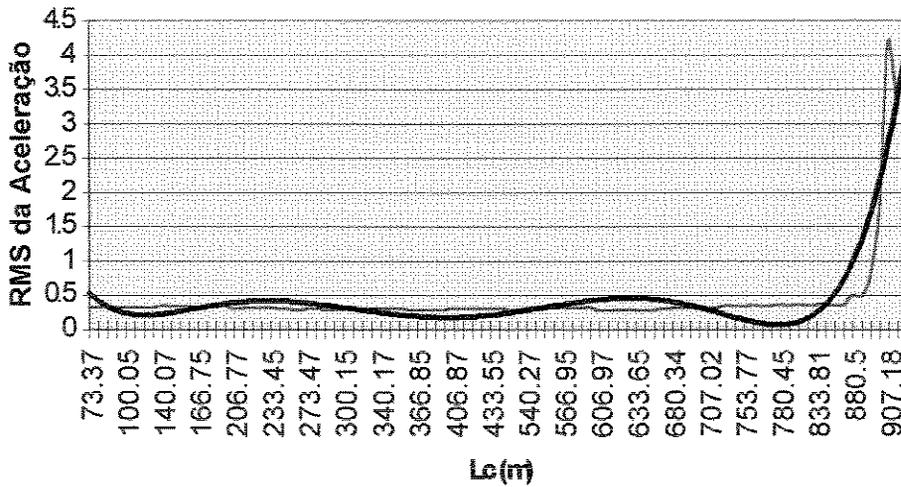


Figura 5.4. RMS da aceleração para $v_c = 300 \text{ m/min}$ e $f = 0.13 \text{ mm/volta}$

A análise destas figuras revela que:

1- Para condições de operação mais agressivas à ferramenta, (velocidades ou avanços mais elevados, figura 5.4), existe uma correlação qualitativa entre o sinal do RMS e a rugosidade. Esta relação, no entanto, não é explícita no caso das velocidades mais baixas, conforme pode ser visto na figura 5.3. O valor global do RMS da aceleração não se mostrou adequado como parâmetro de medida para este último caso. Adicionalmente, mesmo nos casos em que o sinal RMS da aceleração mostra uma tendência bem definida no fim de vida da ferramenta, existe uma relativa pouca sensibilidade, com a aceleração se mostrando com maior energia somente em níveis de rugosidade mais elevados. Por exemplo, no caso da figura 5.4, a inclinação da curva de RMS X L_c muda repentinamente em torno de $L_c = 800 \text{ m}$, enquanto que o fim de vida da ferramenta ($R_a = 3 \mu\text{m}$) aconteceu com $L_c = 827 \text{ m}$., conforme pode ser visto na Tabela 5.1.

2- A pouca correlação do sinal de RMS global em condições de baixas velocidades de corte deve-se à superposição das outras componentes do sinal, que tendem a "abafar" as variações devido ao desgaste.

Em função desta pouca sensibilidade do RMS do sinal de aceleração, procurou-se identificar a variação no conteúdo espectral do sinal em função do comprimento de corte, visando a eventual identificação de faixas de frequência mais sensíveis ao desgaste. Como o número de arquivos em alguns casos era muito grande e devido à natureza não linear do desgaste, obtiveram-se 4 curvas do espectro de potência do sinal, nos seguintes pontos:

- Primeiro corpo de prova
- Corpo equivalente à 50% do L_c total
- Corpo equivalente a 90% do L_c total
- Corpo equivalente a 100% do L_c total

A figuras 5.5a a 5.5d apresentam o comportamento do espectro de frequências para o ensaio de $v_c = 200$ m/min e $f = 0.13$ mm/volta, correspondendo ao espectro no início do corte, e decorridos respectivamente 50, 90 e 100% do comprimento de corte total obtido nestas condições.

FFT $v_c=200$ m/min $f=0.13$ mm/v com $L_c=$ inicial

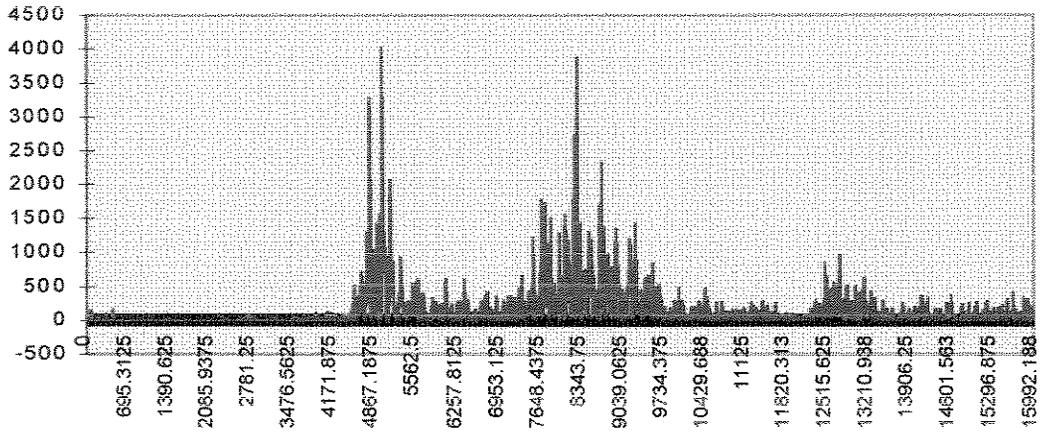


Figura 5a Espectro de frequências para o início do corte

FFT $v_c=200$ m/min $f=0.13$ mm/volta $L_c=50\%$

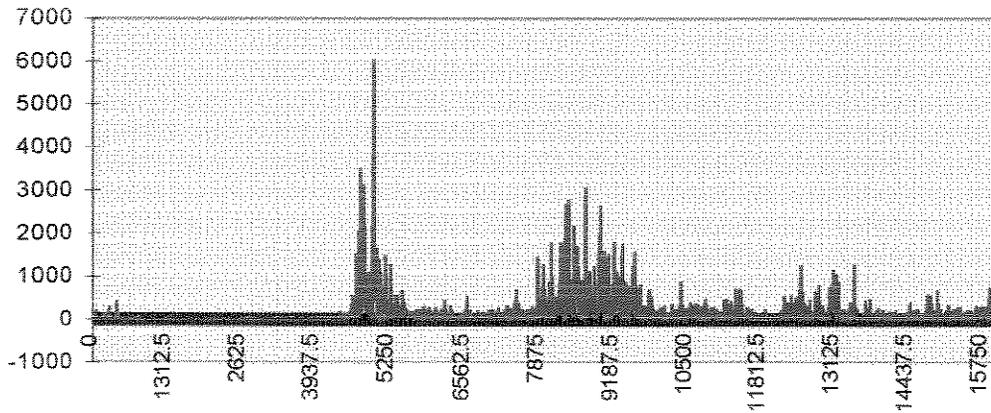


Figura 5b. Espectro de frequências para o 50% do corte

FFT $v_c=200$ m/min $f=0.13$ mm/volta $L_c=90\%$

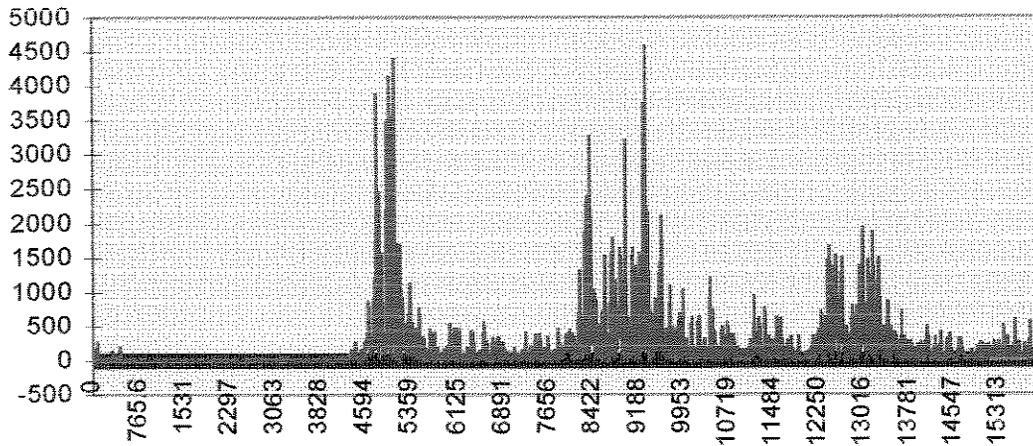


Figura 5c. Espectro de freqüências para 90% do corte

FFT $v_c=200$ m/min $f=0.13$ mm/volta $L_c=100\%$

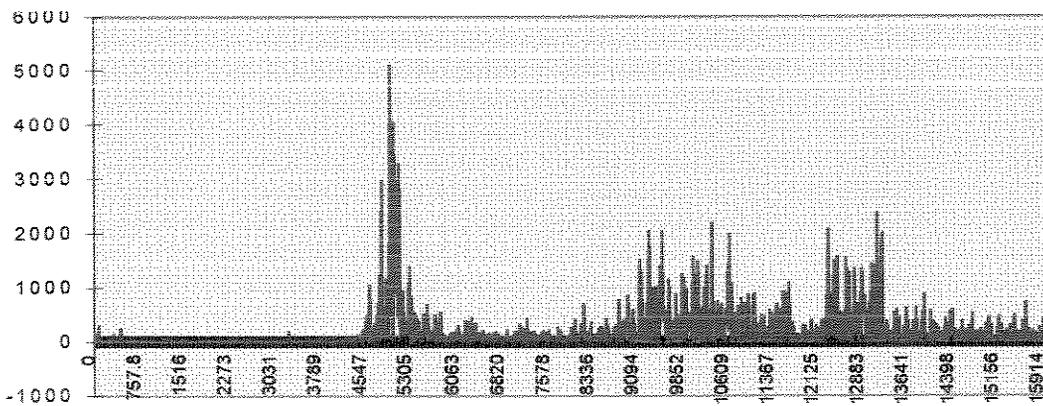


Figura 5.5d Espectro de potência para $v_c=200$ m/min e $f= 0.13$ mm/volta. 100% do corte

Pode-se observar nestas curvas que o conteúdo espectral do sinal de aceleração não apresenta uma tendência clara que possa ser associada ao desgaste da ferramenta. Para os casos de ferramenta totalmente desgastada verifica-se que ocorre a predominância de uma componente cuja freqüência depende das condições de operação. (Este fato não está expresso nos gráficos porque só ocorreu quando em condições inaproveitáveis da ferramenta para o trabalho de acabamento, que não permitiram a coleta do dado da rugosidade R_a). Vê-se na figura 5.5 que

existem 3 faixas de freqüências onde a energia está concentrada, quais sejam, 4500 a 5500Hz, 7500 a 10000Hz e 12000 a 14000Hz. Porém não se nota uma alteração na amplitude dos sinais destas faixas que poderiam ser correlacionados ao desgaste da ferramenta e à rugosidade da peça. Além disto, estas faixas de concentração de energia não se repetiram nas outras condições de usinagem ensaiadas, o que impossibilita a filtragem do sinal em uma determinada banda de freqüências.

A análise através da transformada de wavelets dos mesmos pontos acima foram então realizadas. Com esta análise procura-se identificar se as wavelets são capazes de capturar informações a respeito do crescimento da rugosidade. As figuras 5.6 a 5.9 apresentam os círculos de wavelets correspondentes. Pode-se observar que, de forma semelhante ao acontecido com a análise de Fourier, não se determina facilmente um padrão de crescimento dos coeficientes que possa ser correlacionado com o desgaste. Foram realizados experimentos no sentido de se obter a curva do RMS da inversa da wavelet para os níveis que apresentam o maior conteúdo energético, os níveis 11, 10 e 9 das figuras 5.6 a 5.9, porém este experimento também não se mostrou eficiente de uma forma geral, observando-se no entanto que, para os ensaios em que a aceleração já demonstra uma maior relação com o desgaste, esta técnica de escolha dos coeficientes de wavelets é capaz de melhorar a correlação entre os dois parâmetros (vibração e rugosidade).

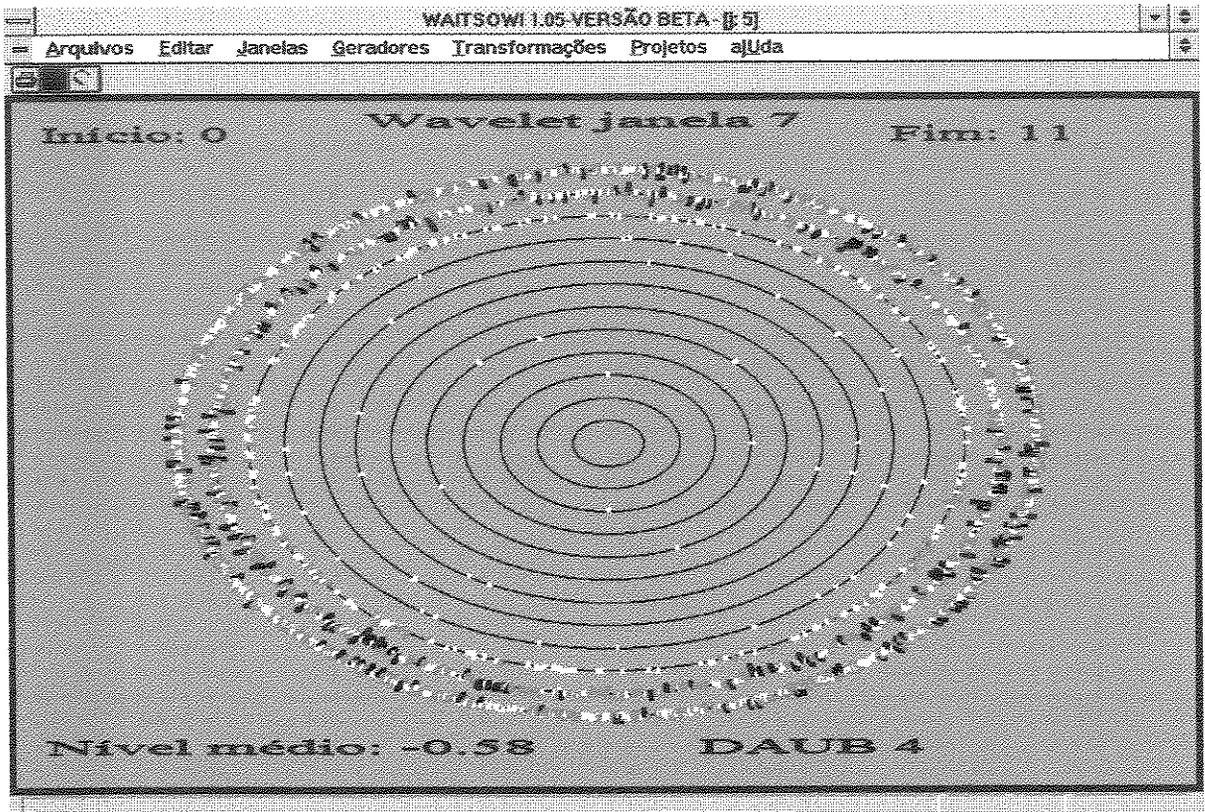


Figura 5.6 Círculo de wavelets para L_c = inicial

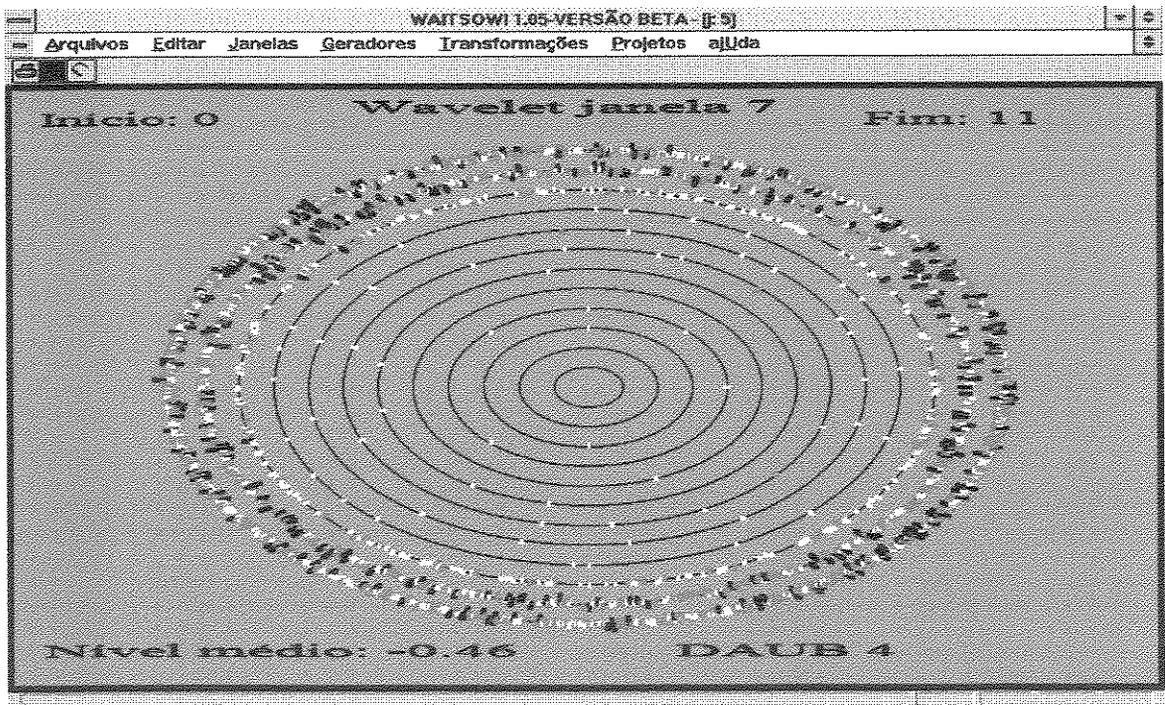


Figura 5.7 Circulo de Wavelet para L_c = 50% do comprimento de corte

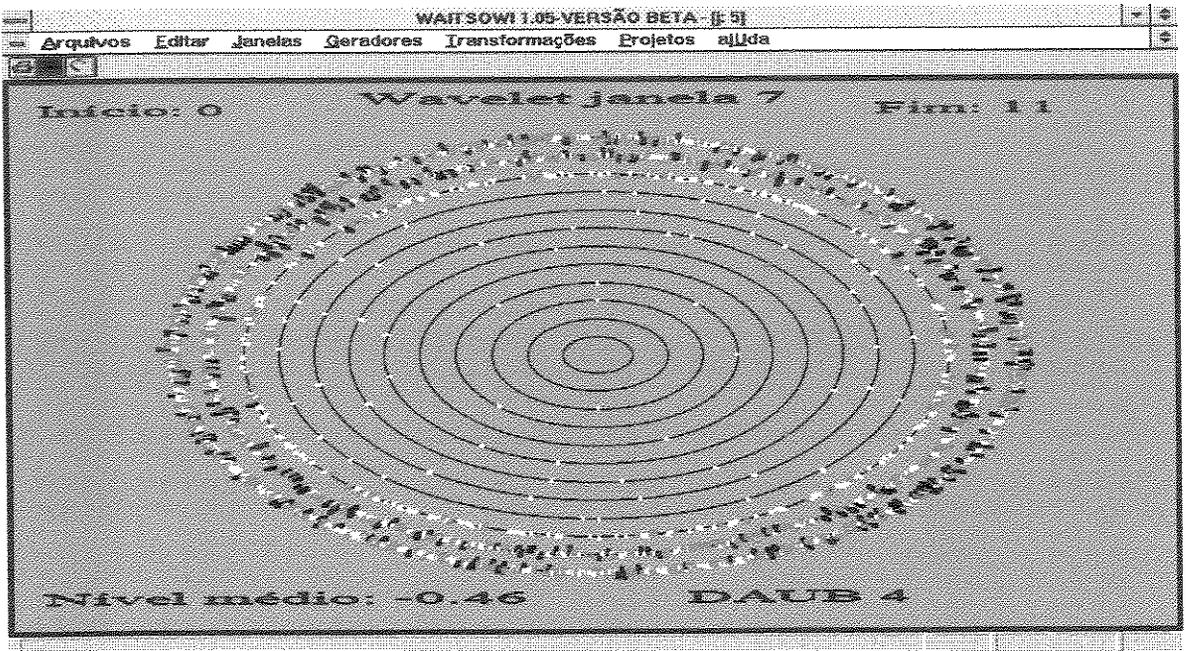


Figura 5.8 Circulo de wavelets para $L_c=90\%$ do comprimento de corte

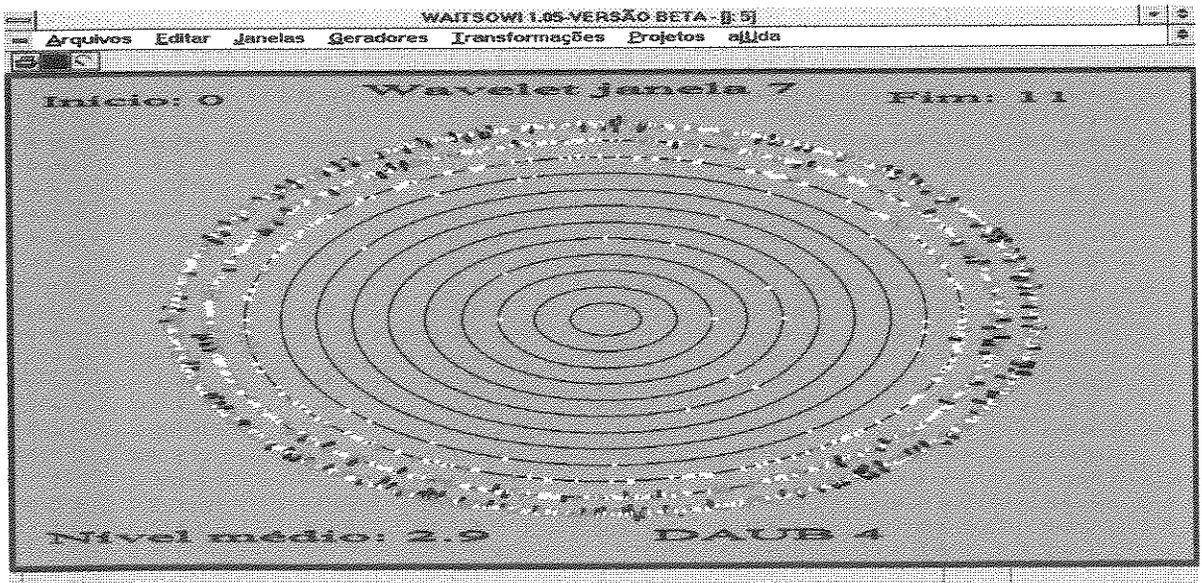


Figura 5.9 Circulo de wavelets para $L_c=100\%$ do comprimento de corte

Os círculos de wavelets apresentados correspondem as wavelets escala-tempo, Daubechies D4. O conteúdo espectral pode ser dividido, de uma forma aproximada, em oitavas correspondendo aos vários círculos, na proporção indicada na tabela 5.2.

círculo (nível da wavelet)	faixa de frequências (Hz)
11	16125-8062
10	8062-4031
09	4031-2015
08	2015-1008
07	1008-504
06	504-252
05	252-126
04	126-63
03	63-31
02	31-15.75
01	15.75-7.8
0	7.8-

Tabela 5.2 Faixas de frequências de cada nível de wavelet

Deve-se observar que, ao contrário de Fourier, que localiza o sinal precisamente em termos de frequências, cada círculo de wavelet corresponde a uma faixa de frequências e ainda assim não delimita esta faixa com precisão. Quanto maior a frequência maior também é a faixa coberta por cada nível de wavelet e, portanto pior a localização que se pode ter de um dado sinal. O inverso ocorre no que se diz à distribuição temporal, pois para os níveis superiores tem-se uma excelente localização temporal, representada pelo setor circular coberto por um dado coeficiente

Pode-se dizer que a aceleração, de uma forma geral, não se mostrou um parâmetro adequado à medida indireta da rugosidade, seja na forma do sinal em bruto, da variação do RMS em função do comprimentos de corte, do comportamento do espectro de frequência ou da análise tempo-frequência realizado com wavelets. Deve-se ressaltar que, no entanto, esta dificuldade de separação da componente do sinal devido ao desgaste indica que o sinal é rico em outras componentes que podem dizer muito sobre o estado da máquina e sobre as condições de operação, sendo a análise por wavelets um campo fértil para experimentação neste setor.

5.4 - Análise dos sinais de velocidade

Uma vez que a análise do sinal de aceleração não se mostrou eficiente na determinação de um parâmetro confiável para identificação da rugosidade, realizaram-se as mesmas operações anteriores para os sinais de velocidade, obtidos através da integração dos sinais de aceleração. A curva do RMS da velocidade versus comprimento de corte, para um dos ensaios realizados, está apresentada na figura 5.10. As curvas correspondentes aos demais ensaios estão apresentadas no Apêndice 3. Da análise desta figura e dos diversos outros gráficos que relacionam o valor RMS global da velocidade com o comprimento de corte, pode-se deduzir que o comportamento do RMS da velocidade amplifica de certa forma as variações da aceleração, sendo também inadequado como forma de determinação da rugosidade

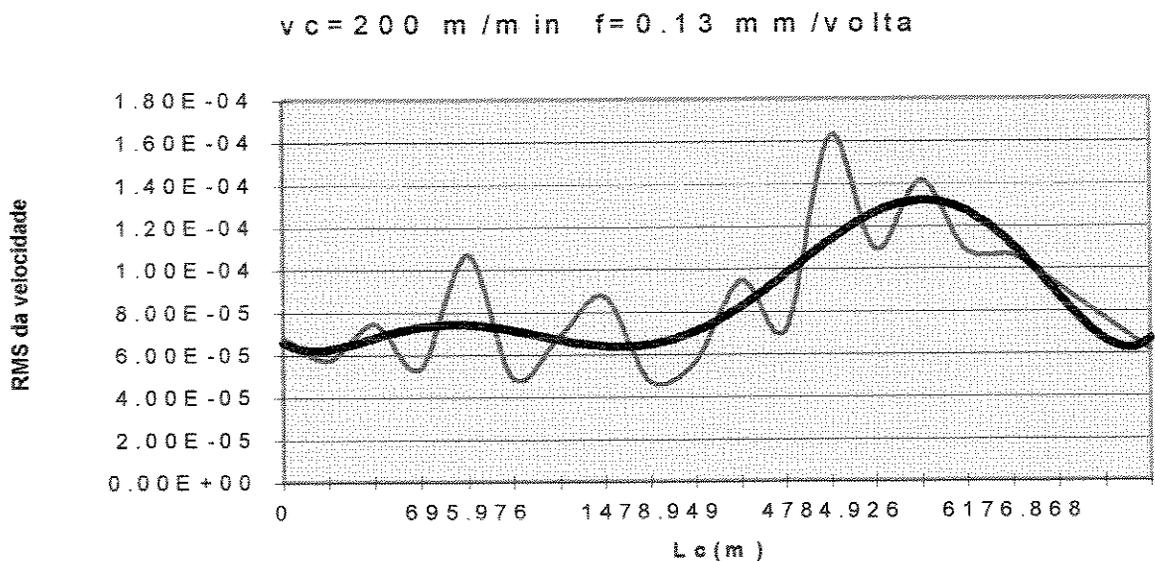


Figura 5.10. RMS da velocidade para $v_c = 200 \text{ m/min}$ e $f = 0.13 \text{ mm/volta}$

Em função da pouca correlação do RMS da velocidade, procurou-se também identificar a variação no conteúdo

espectral do sinal em função do comprimento de corte, visando a eventual identificação de faixas de frequência mais sensíveis ao desgaste . Por motivos idênticos ao explanado de quando da análise dos sinais de vibração escolheram-se os mesmos pontos para a análise, cujas curvas são apresentadas nas figuras 5.11a a 5.11d.

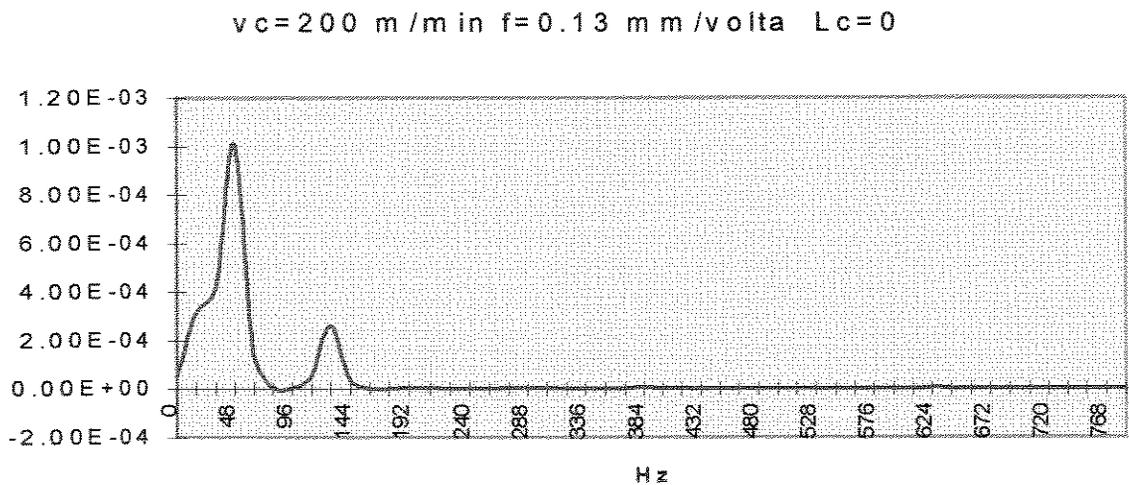


Figura 5.11a Espectro de potência da velocidade para $L_c = 0$

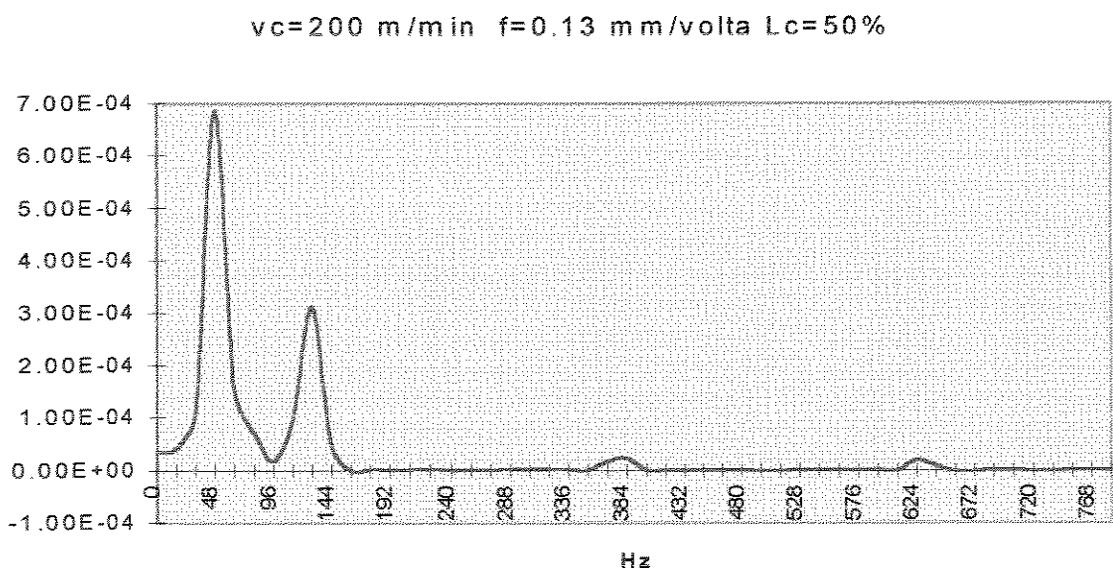


Figura 5.11b Espectro de potencia da velocidade para $L_c = 50\%$

velocidade $v_c=200$ m/min $f=0.13$ mm/volta $L_c=90\%$

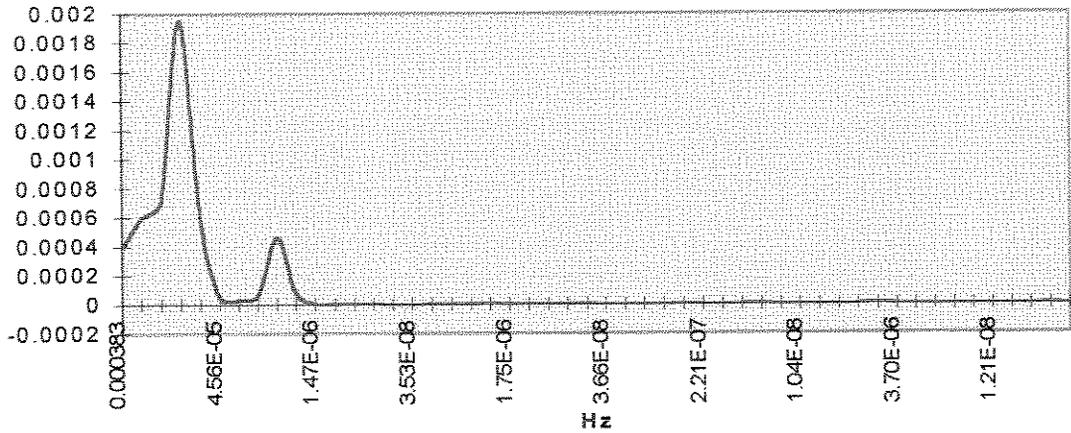


Figura 5.11c Espectro de potência da velocidade para $L_c = 90\%$

FFT velocidade $V_c=200$ $f=0.13$ $L_c=100\%$

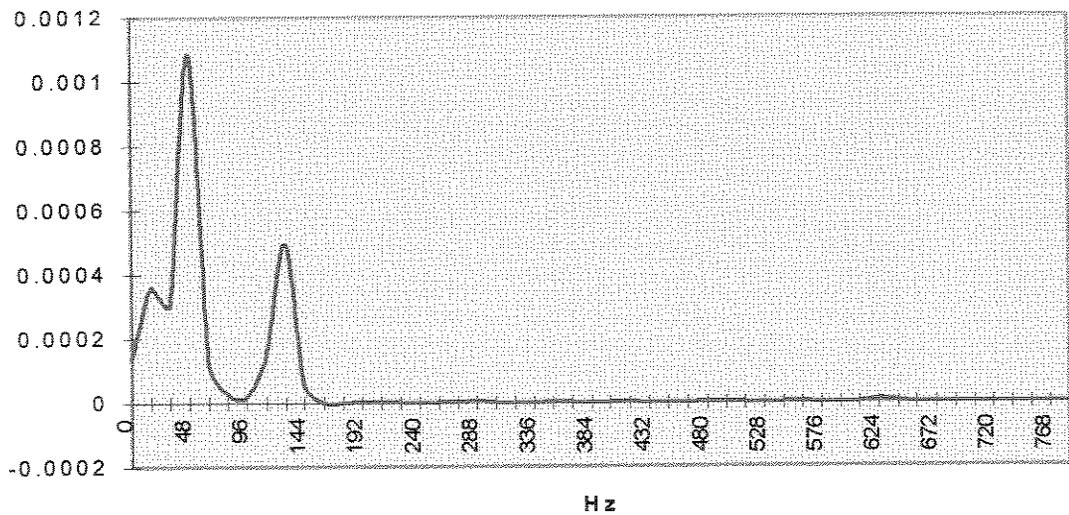


Figura 5.11d Espectro de potência da velocidade para $L_c = 100\%$

De forma similar ao já detectado na análise da aceleração, as curvas do espectro da velocidade também não permitem a determinação de um índice de desgaste. O conteúdo espectral não possui um perfil de variação que possa ser associado à

rugosidade da peça. No entanto, observa-se aqui que, em função da integração, a energia já se mostra mais concentrada em faixas mais baixas de frequência do que no caso da análise da aceleração, que apresentava um espectro mais disperso. Mas aqui, de novo, não se nota uma tendência da variação da amplitude do sinal correlacionada ao desgaste (ou com a rugosidade), em nenhuma faixa de frequência.

A análise por wavelets deste sinais forneceu os gráficos apresentado nas figuras 5.12 a 5.15. Não se identificou nenhum padrão nos coeficientes que pudesse estar associado ao desgaste. De forma similar, tomando-se a transformada inversa de cada nível de wavelet isoladamente, não se identificou uma variação que pudesse ser associada ao desgaste de forma geral. Devido à constante de tempo da integração, no entanto, o número de coeficientes de wavelets diminuiu para valores mais fáceis de serem trabalhados. Pode-se observar uma maior concentração de energia em poucos níveis, fato já possível de se determinar pela análise de espectro realizada anteriormente. Para exemplificar as conclusões anteriores, apresenta-se na figura 5.16, o gráfico da RMS da inversa do nível três tomado de forma isolada para o ensaio com as constantes de operação $v_c = 200$ m/min e $f = 0.13$ mm/volta. .

O fato de não ter sido possível até este ponto da análise, identificar uma faixa de frequências ou conjunto de wavelets significa que a parcela do sinal que se deseja extrair do sinal global é muito pequena em relação à soma total das parcelas. Estudou-se a possibilidade de outras wavelets serem capazes de melhor identificar o sinal (foram verificadas todas wavelets de Daubechies entre D2 e D20), porém em nada estas wavelets se mostraram claramente superiores à wavelet D4, que foi utilizada em todas os outros experimentos.

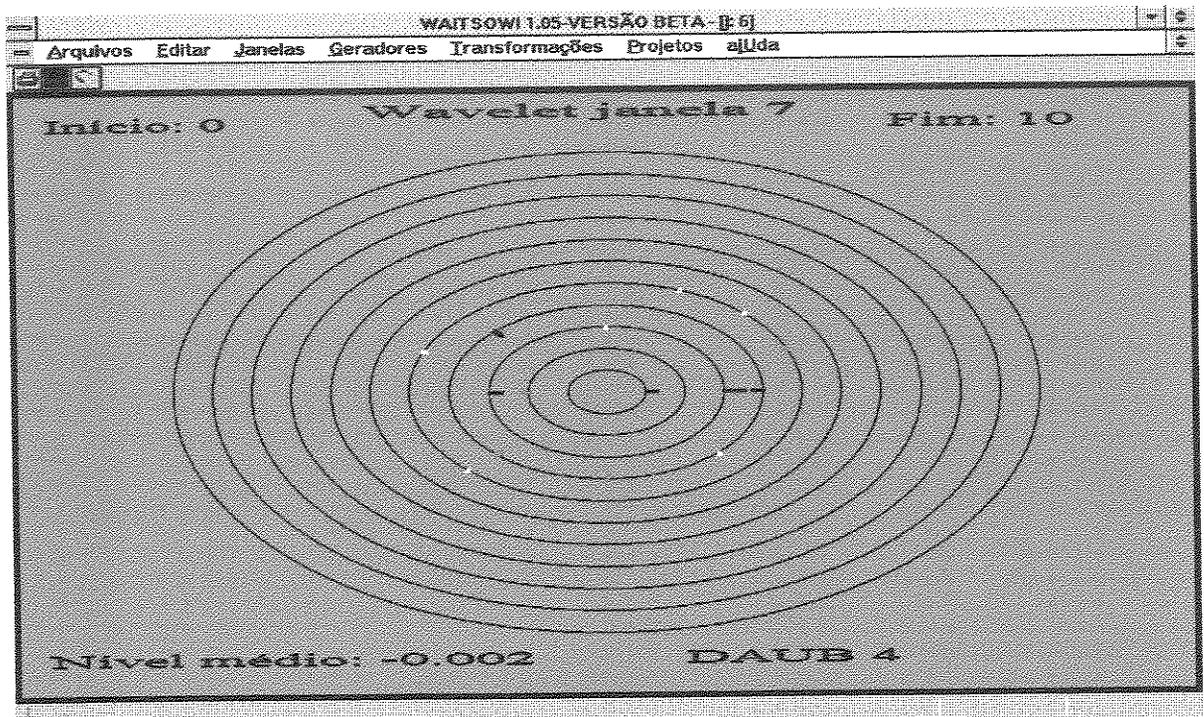


Figura 5.12 Wavelet da velocidade ($vc = 200$ m/min, $f = .13$ mm/volta) $Lc = 0$

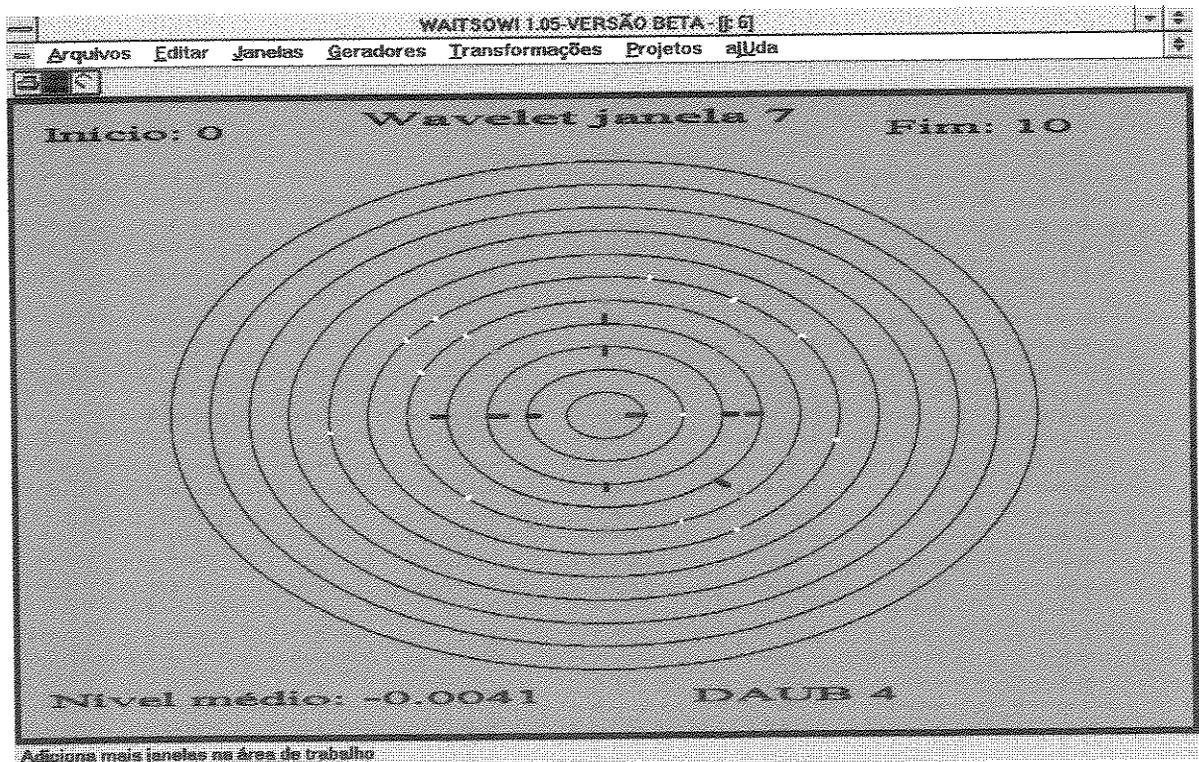


Figura 5.13 Wavelet da velocidade ($vc = 200$ m/min $f = .13$ mm/volta) $Lc = 50\%$

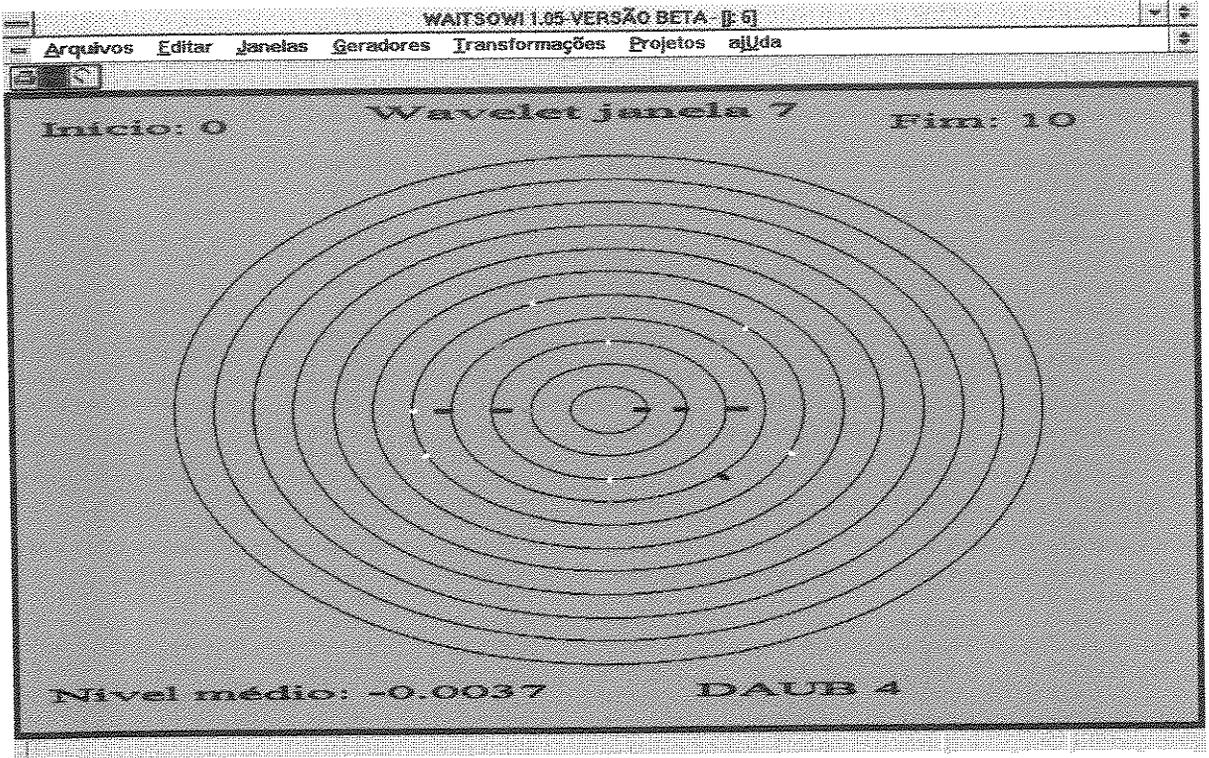


Figura 5.14 Wavelet da velocidade ($vc = 200 \text{ m/min}$ $f = 0.13 \text{ mm/volta}$) $Lc = 90\%$

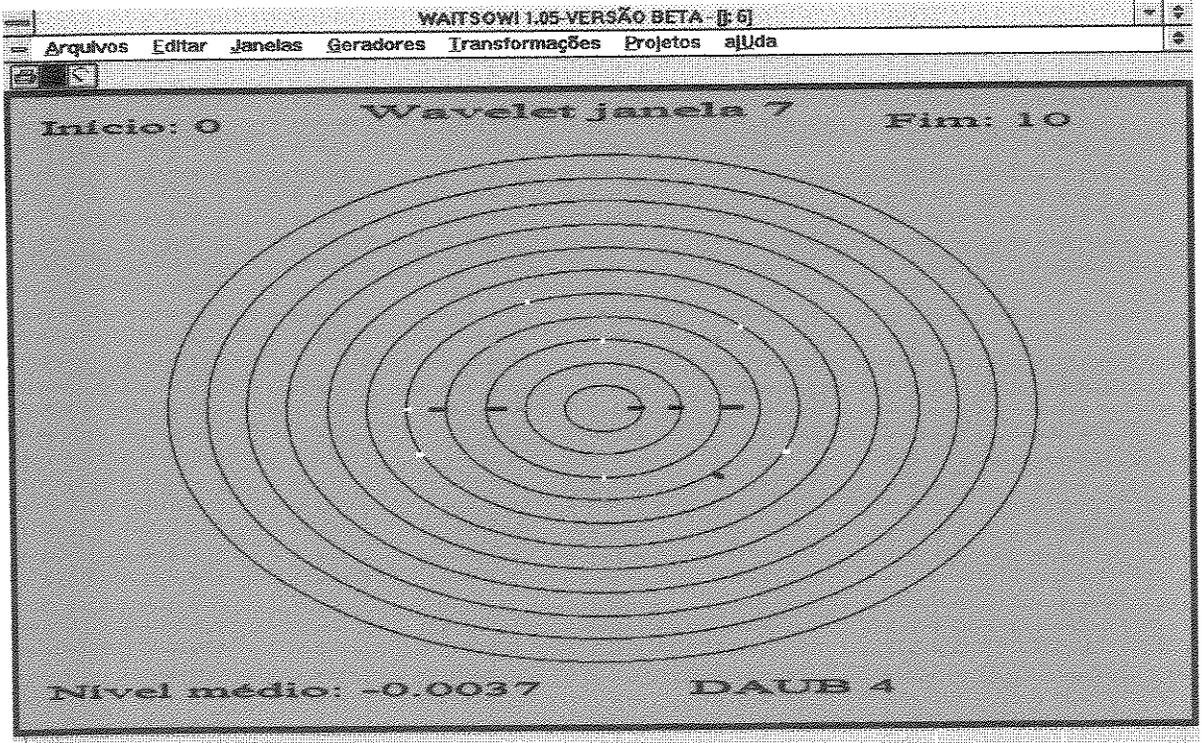


Figura 5.15 Wavelet da velocidade ($vc = 200 \text{ m/min}$) $Lc = 100\%$

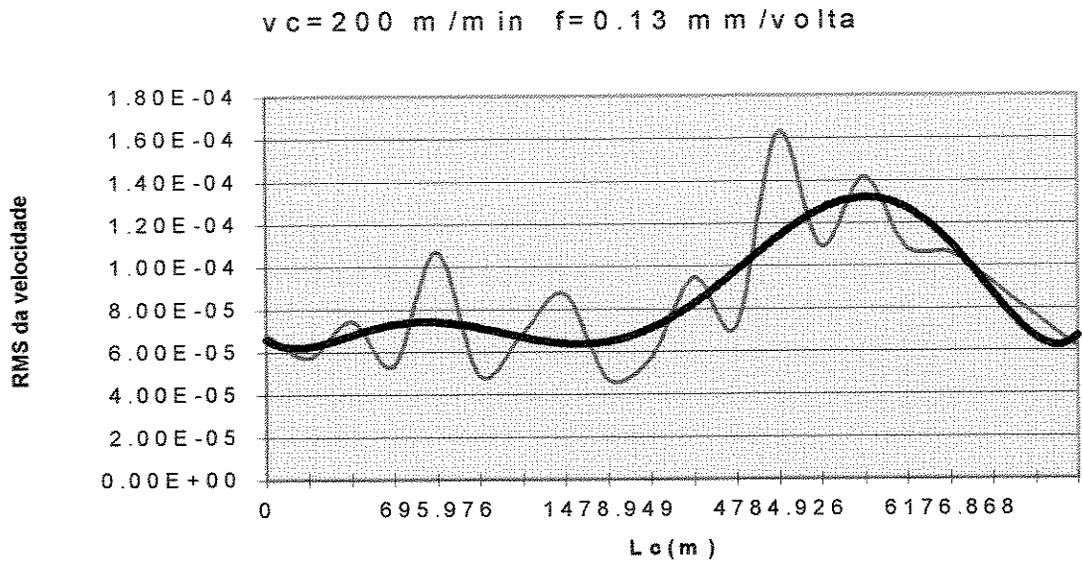


Figura 5.16 RMS da inversa do nível 3 da wavelet de velocidade
 ($v_c = 200 \text{ m/min}$, $f = 0.13 \text{ mm/volta}$)

5.5 - Análise dos sinais de deslocamento

Em função da pouca sensibilidade demonstrada pelos sinais de velocidade, inadequados para os fins desejados, decidiu-se pela repetição deste mesmo procedimento para o caso do deslocamento, obtido através da integração do sinal da velocidade. A curva do deslocamento versus comprimento de corte para o ensaio $v_c = 200$ m/min e $f = 0.13$ mm/volta está apresentada na figura 5.17. Curvas para os demais ensaios são apresentadas no apêndice 4.

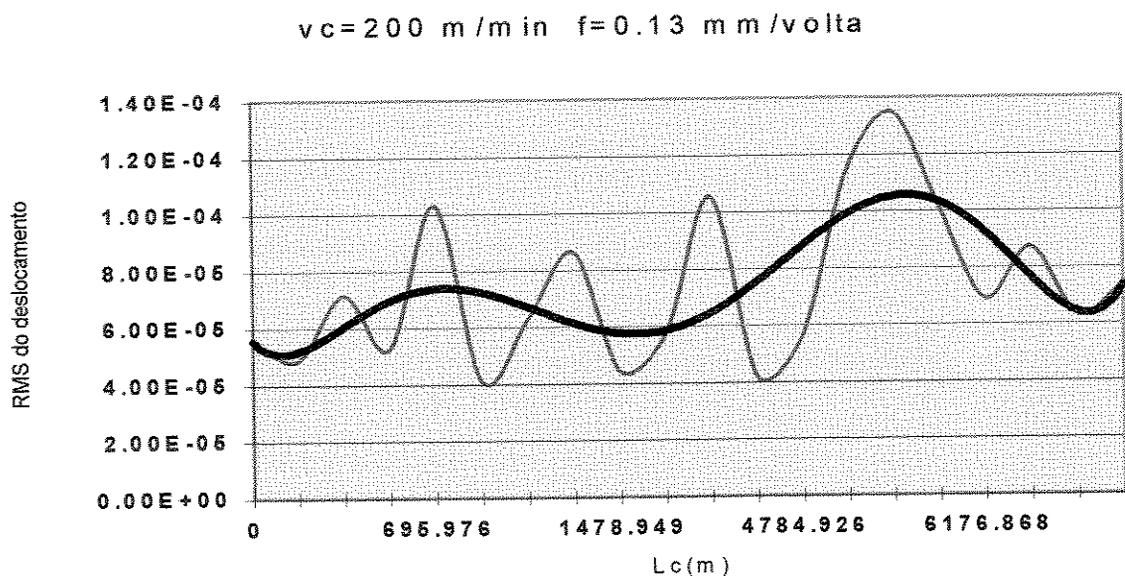


Figura 5.17. RMS do deslocamento para $v_c = 200$ m/min e $f = 0.13$ mm/volta

Nestas figuras pode-se verificar que o comportamento da curva média do RMS do deslocamento possui uma maior correlação com a curva da rugosidade. No entanto, é nítida que algumas condições de corte geram sinais adicionais que não são diretamente ligados ao desgaste, conforme pode ser

visto no apêndice 4. Uma curva típica onde o crescimento existe, porém é atrasado, em relação ao aumento da rugosidade pode ser visto na figura 5.18 a seguir.

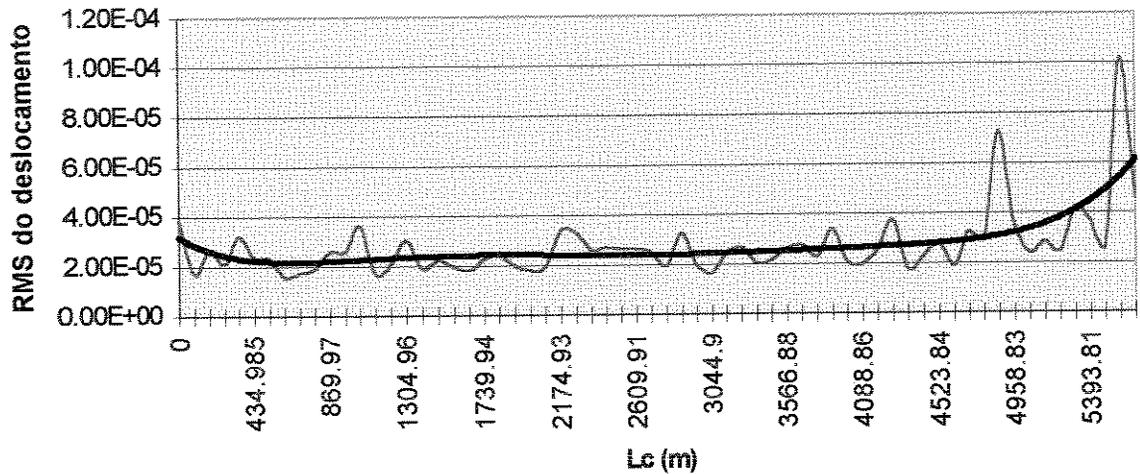


Figura 5.18. RMS do deslocamento para $vc= 200$ m/min $f= 0.20$ mm/volta

Procurou-se identificar estas componentes através da análise espectral, conforme apresentada na figura 5.19. Observa-se que, ainda neste caso, o espectro de potência não pode ser relacionado de forma clara com a rugosidade versus o comprimento de corte. É nítida a concentração de energia na parte inferior do espectro. Porém, também aqui, não aconteceu uma alteração na amplitude do sinal ao longo do comprimento de corte (em nenhuma faixa de frequência) que pudesse ser relacionada ao comportamento da rugosidade da peça.

FFT Deslocamento Vc=200 f=0.13

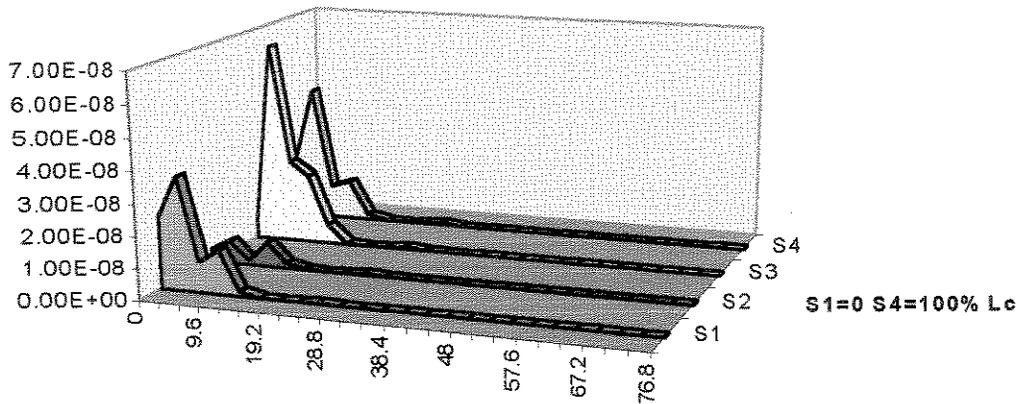


Figura 5.19. Variação do espectro de frequências do deslocamento para o ensaio $v_c = 200$ m/min e $f = 0.13$ mm/volta

Observando-se o comportamento do RMS do deslocamento pode-se notar que estas curvas apresentam maior correlação com a rugosidade, comparadas com as curvas da aceleração e da velocidade. No entanto, estas curvas são ainda muito distorcidas por componentes adicionais de difícil separação pela técnica de análise espectral.

Isto se dá por que estas componentes possuem uma forma complexa, o que equivale a dizer que possuem um espectro de frequências bastante espalhado, possibilitando uma sobreposição dos sinais e conseqüente dificuldade de separação dos fenômenos geradores do sinal pelos métodos de filtragem convencionais.

Foi então desenvolvida uma pesquisa exhaustiva, que consistia na decomposição do sinal em wavelets de várias

formas, procurando identificar aquelas "assinaturas" que melhor eram capturadas pelas várias wavelets. Dentro desta pesquisa observou-se que as wavelets de Daubechies D4 possuíam características de identificação do comportamento da variação da rugosidade bastante interessantes. O nível três das wavelets D4 mostrou-se particularmente sensível ou de outra forma, as curvas dos RMS da inversa do nível 3 das wavelets versus comprimento de corte, mostraram uma grande correlação com a curva similar de rugosidade, conforme exemplificado na figura 5.20

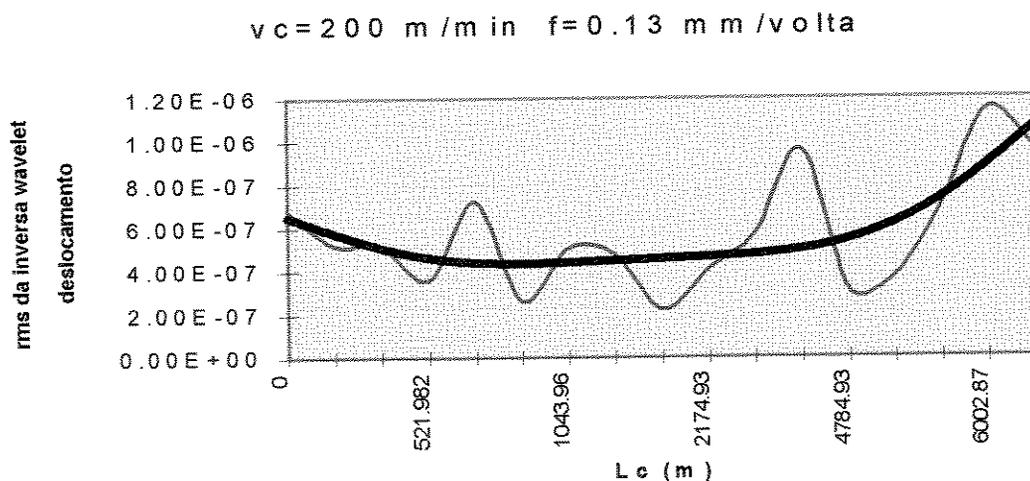
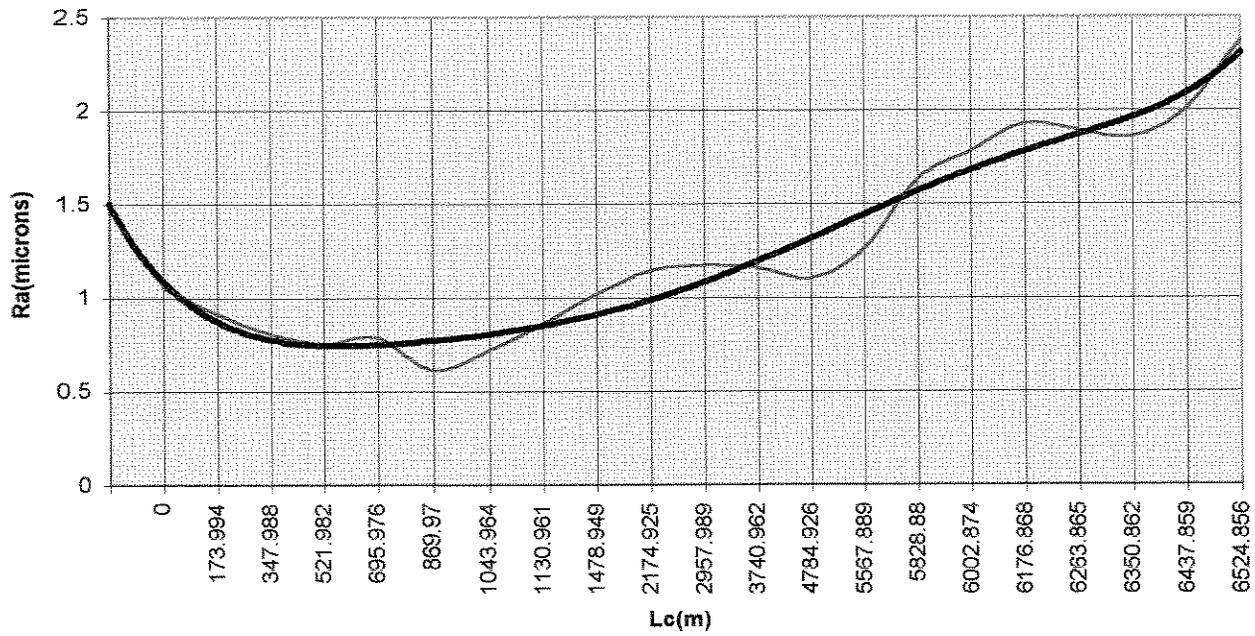


Figura 5.20. RMS do inversa do nível 3 da wavelet deslocamento para $vc = 200 \text{ m/min}$ e $f = 0.13 \text{ mm/volta}$

Para melhor exemplificar a correlação descoberta entre o RMS da inversa do nível três da wavelet, apresenta-se nas figuras 5.21 a 5.26 os gráficos correspondentes a $Ra \times Lc$ e RMS da inversa da wavelet $\times Lc$ para vários ensaios. Uma análise visual destas curvas demonstra que o comportamento do RMS da inversa da wavelet versus o comprimento de corte é muito semelhante ao comportamento da rugosidade, pelo menos

no que diz respeito às curvas de regressão polinomial, que dão uma idéia das tendências das curvas. É lógico que as curvas RMS x Lc se mostraram mais dispersas em relação à curva aproximada do que as curvas de Ra x Lc, pois se amostrou muito mais valores de RMS (10 amostragens de 4096 pontos dentro de cada peça) que da rugosidade (cada ponto no gráfico corresponde a uma média de 3 pontos medidos em cada peça). Também ocorre alguma pequena diferença nas inflexões das curvas de RMS x Lc e Ra x Lc, pois para cada peça existem 10 valores de Lc nas curvas de RMS e somente um valor de Lc nas curvas de Ra. O Lc de cada peça levado em conta nas curvas de Ra x Lc é o valor no meio do corte de cada peça.

vc=200 m/min f=0.13 mm/volta



vc=200 m/min f=0.13 mm/volta

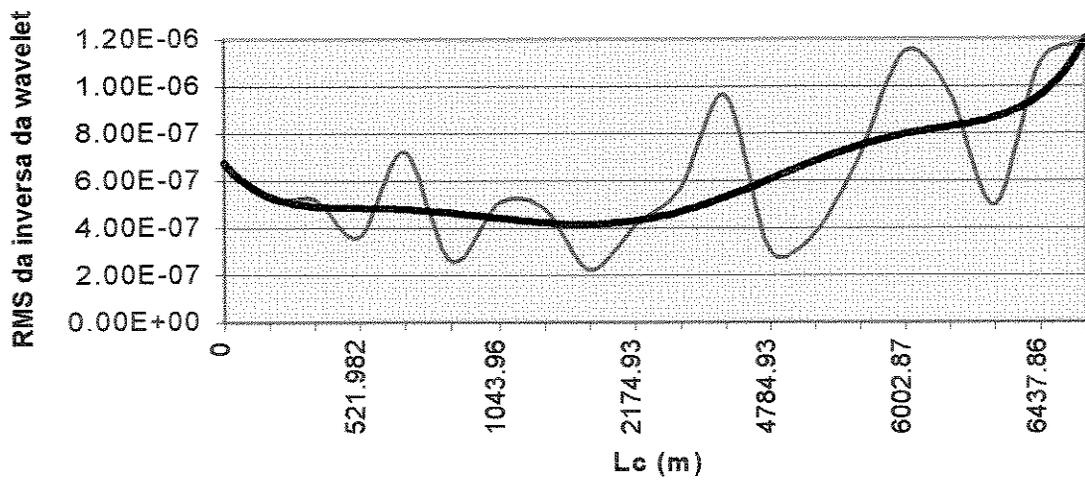


Figura 5.21 Rugosidade Ra e RMS inversa wavelet vc = 200 m/min f = 0.13 mm/volta

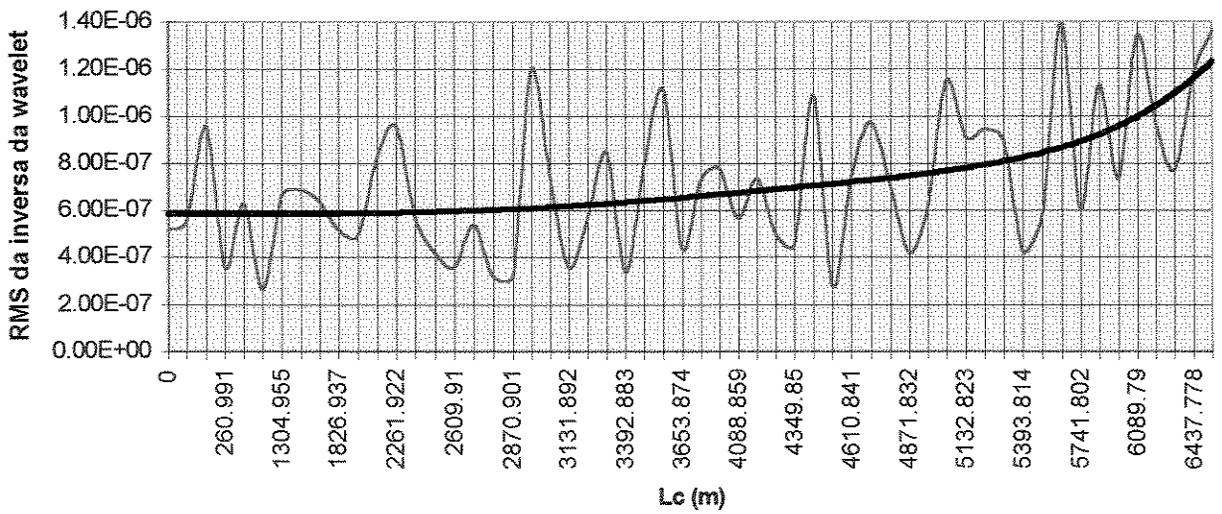
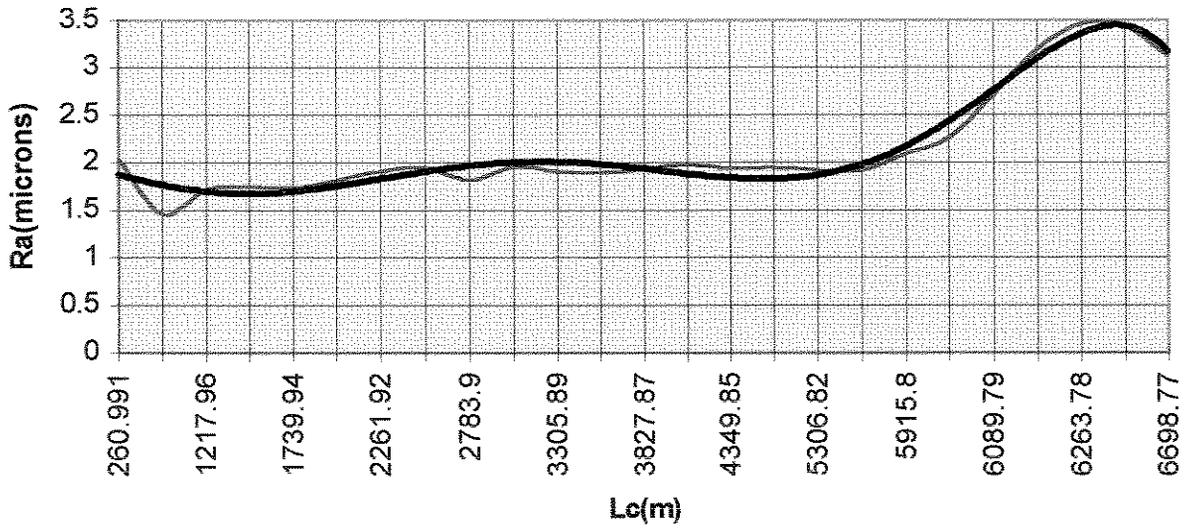


Figura 5.22 Rugosidade Ra e RMS inversa wavelet $vc = 200$
 m/min $f = 0.15$ $mm/volta$

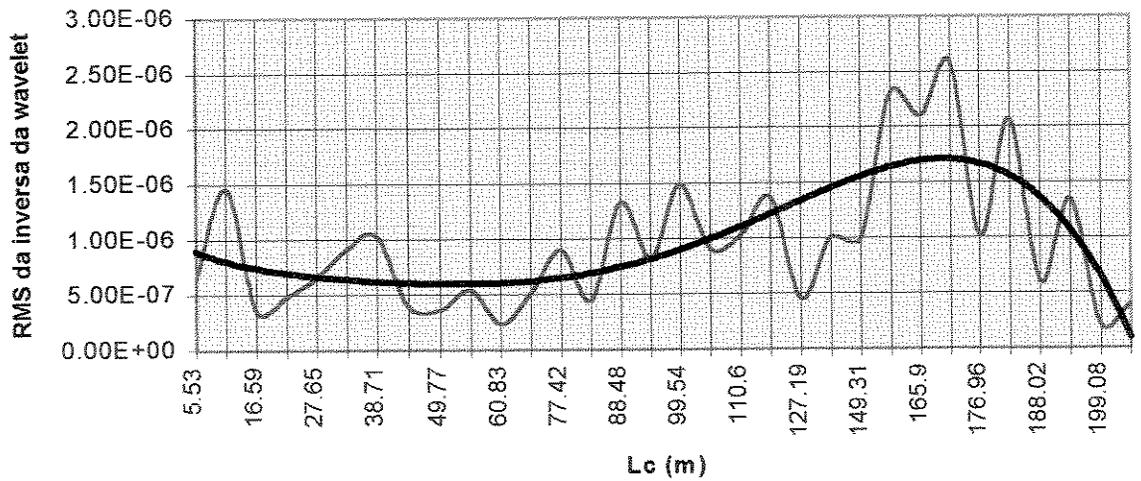
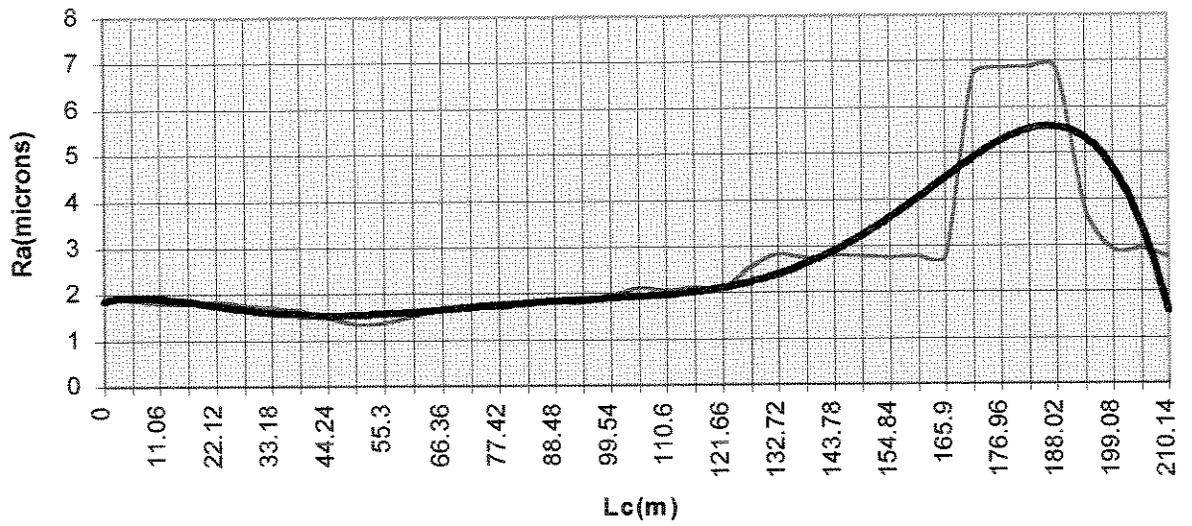


Figura 5.23 Rugosidade Ra e RMS inversa wavelet $V_c = 225 f = 0.15$

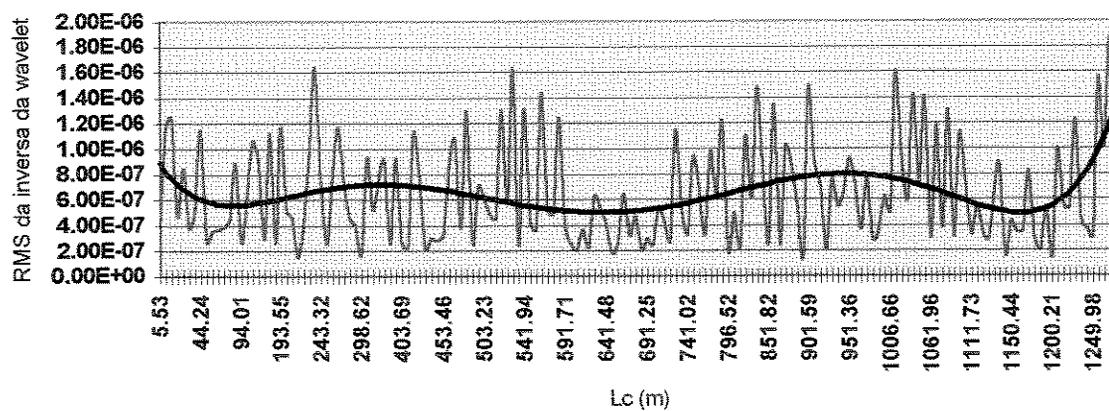
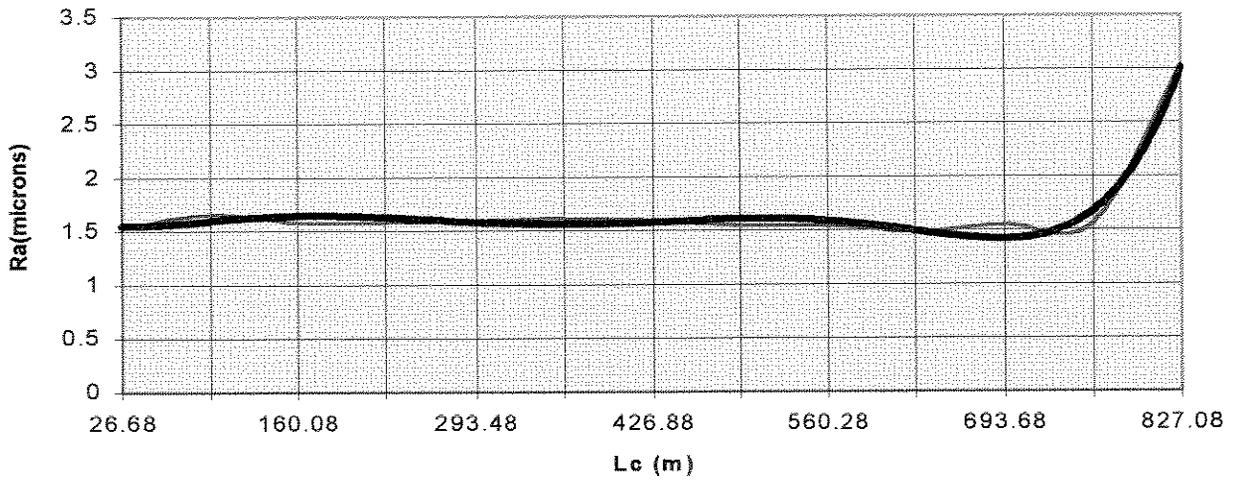


Figura 5.24 Rugosidade Ra e RMS inversa wavelet $v_c = 275$
 m/min $f = 0.15$ mm/volta

vc=300 m/min f=0.13 mm/volta



vc=300 m/m in f=0.13 m m/volta

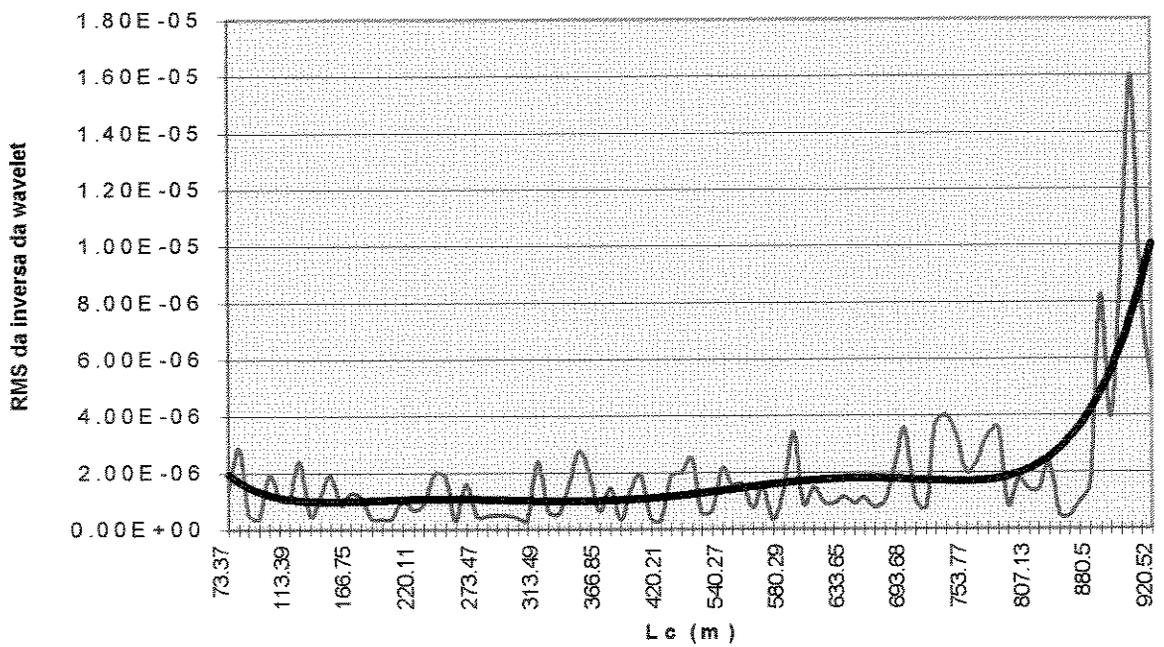


Figura 5.25 Rugosidade Ra e RMS inversa wavelet vc = 300 m/min f = 0.13 mm/volta

vc=300 m/min f=0.15 mm/volta

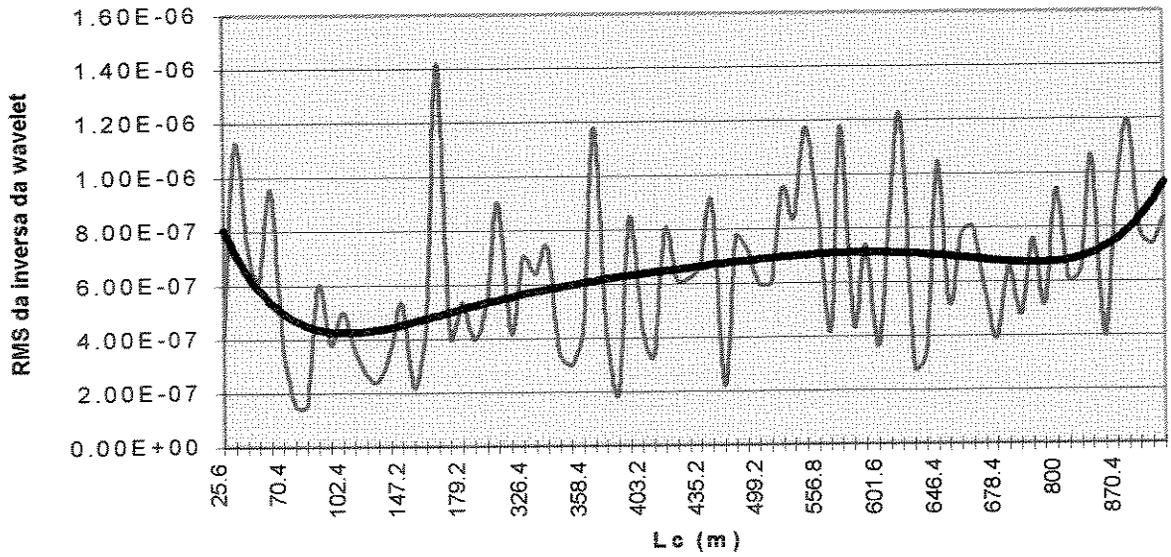
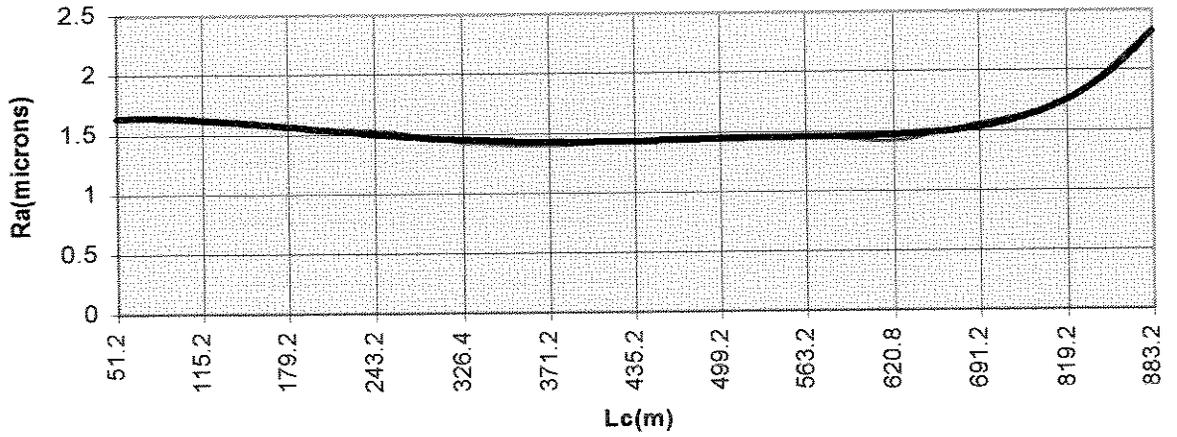


Figura 5.26 Rugosidade Ra e RMS inversa wavelet vc = 300 m/min e f = 0.15 mm/volta.

Dada esta semelhança entre os comportamentos do RMS da inversa de wavelet e da rugosidade da peça, procurou-se então uma maneira de se estabelecer o fim da vida de cada ferramenta, que acontece quando o valor de Ra ultrapassar $3.0 \mu m$, como já citado anteriormente.

Verificou-se que, muitas vezes, a rugosidade passava de um valor inferior a $3.0 \mu m$ em uma peça, para um valor muito grande, maior do que o rugosímetro podia medir na próxima peça. Verificou-se também que, fazendo-se a divisão entre o valor de Ra imediatamente antes da rugosidade atingir o valor limite de $3.0 \mu m$ e a rugosidade inicial em cada ensaio, obtêm-se um valor próximo a 1.5.

Utilizou-se então, este fator (1.5), para se estabelecer o fim de vida da ferramenta usando-se o RMS da inversa da wavelet. Assim, multiplicou-se o valor do RMS inicial (obtido na curva de regressão polinomial) por 1.5, e, com este novo valor de RMS (ainda utilizando-se a curva de regressão polinomial), obteve-se o valor de Lc de fim de vida da ferramenta, segundo este critério..

A tabela 5.3 apresenta os valores de vida da ferramenta em utilizando-se os dois critérios, quais sejam: $Ra = 3.0 \mu m$ e $RMS = 1.5 * RMS$ inversa da wavelet inicial. Pode-se ver nesta tabela que as vidas das ferramentas são bem próximas, utilizando-se os 2 critérios e que, em geral, a vida da ferramenta baseada nas wavelets é muito próxima da vida baseada na rugosidade (em torno de uma peça menor). A diferença entre estes valores é sempre menor que o comprimento de corte relativo à uma peça. Não poder-se-ia esperar precisão maior que esta, já que o comprimento de corte, quando se mede a rugosidade, se refere a um ponto do

meio da peça, enquanto que os sinais de vibração foram amostrados em dez instantes durante o corte de uma peça. Em outras palavras, pode-se dizer que o parâmetro RMS da inversa do nível 3 da wavelet de Daubechies D4 do sinal correspondente ao deslocamento, é o melhor parâmetro do sinal de vibração da ferramenta para estabelecimento do fim de sua vida em operações de torneamento em acabamento e estabelece este momento com uma pequena antecipação.

ensaio(v_c -f)	Ra	inversa
200 0.13	6500	6480
200 0.15	6100	5800
225 0.15	1440	1300
275 0.15	1240	1260
300 0.13	827	840
300 0.15	883	890

Tabela 5.3. Comparação dos níveis de detecção de fim de vida por dois parâmetros

5.6 - Considerações finais:

Através das análises das figuras mostradas neste capítulo pode-se inferir que o sinal de aceleração, como advindo diretamente do sensor de aceleração, não é um indicador confiável para uma medida indireta da rugosidade, porém a análise do sinal de vibração propriamente dito (deslocamento em torno de um ponto) permite identificar um comportamento que pode ser associado ao comportamento da rugosidade da peça

sendo usinada. O uso de wavelets em conjunto com técnicas estatísticas convencionais, na determinação de "assinaturas" embebidas dentro de sinais formados de várias componentes de formas complexas, mostrou-se uma ferramenta eficiente na extração de características, sendo superior às ferramentas convencionais de análise no domínio da frequência ou no domínio do tempo isoladamente, tais como número de picos, determinação de médias, valores médio quadráticos, etc.

O motivo do porque o deslocamento ter sido uma melhor alternativa para a extração do sinal correspondente à variação da rugosidade deve-se ao fato de que o sinal de aceleração propriamente dito possui componentes de amplitude e frequência elevadas que são devidas a outros fatores além do desgaste propriamente dito. A integração dupla removeu estas componentes permitindo ressaltar a componente proporcional somente ao desgaste. Além disto, ao diminuir a faixa de frequências sobre a qual se necessitava operar, a integração permitiu uma otimização da localização frequencial da transformada de wavelet.

De outra forma, o uso de wavelets, e não da análise convencional (FFT) permitiu a recuperação de sinais não-estacionários de forma complexa, o que seria impossível de ocorrer caso se decompusesse o sinal em senos e cossenos apenas, como seria no caso de se utilizar da transformada de Fourier. Esta observação leva a se aventar a hipótese de existência de uma outra base de wavelets que poderia representar com maior precisão o sinal devido ao desgaste, o que viria a melhorar os resultados obtidos com a wavelet D4. Tal desenvolvimento, no entanto, transcende em muito o proposto no início deste trabalho, porém certamente é um campo de pesquisa extremamente promissor.

Pode-se concluir que um procedimento confiável para a determinação indireta do fim da vida da ferramenta em operações de torneamento em acabamento pode ser descrito como se segue:

- coleta do sinal de aceleração (32,250 Khz de taxa de amostragem)
- extração do valor médio e integração (duas vezes em seqüência)
- obtenção dos coeficientes de wavelets
- extração do nível 3 de wavelet
- inversa da wavelet
- obtenção do valor médio quadrático.
- regressão polinomial de sexta ordem
- comparação deste valor com o valor inicial (limiar de 50%)
- quando esta comparação ultrapassar o limiar previamente estabelecido, substituir a ferramenta.

Este conjunto de procedimentos é passível de ser realizado em tempo real. Isto é, o computador pode automaticamente tomar a decisão de término da vida da ferramenta. Para que se tenha um sistema totalmente automático, é necessário que se informe à máquina CNC do momento de fim de vida, a fim de que ela automaticamente passe a não utilizar mais aquela ferramenta desgastada e sim uma outra ferramenta idêntica, que deve estar em uma outra posição na torre porta-ferramentas. Isto exige o desenvolvimento de um protocolo de comunicação entre o CNC e o computador. Este protocolo deve ser necessariamente

específico para cada CNC, visto que não existe ainda uma padronização para os protocolos a nível de chão de fábrica.

Todos estes procedimentos podem ser implementados com algoritmos rápidos e de pequeno consumo de memória, atingindo-se deste modo o objetivo de desenvolver uma técnica que possa ser empregada na determinação, em tempo real, do estado de uma ferramenta de corte em operações de torneamento.

Capítulo 6

Conclusões e sugestões para trabalhos Futuros

Dado os resultados relatados e discutidos no capítulo 5, pode-se concluir, para as condições ensaiadas neste trabalho, que:

- O uso de sinais de aceleração em bruto só é adequado para o estabelecimento automático do fim da vida da ferramenta em situações mais agressivas de uso da ferramenta, ou para a detecção de níveis elevados de desgaste.

- O uso do conteúdo energético (medida do RMS) da velocidade e do deslocamento, obtidos a partir do sinal de aceleração é mais sensível ao desgaste, porém ainda inadequado para cobrir uma ampla variação das condições de usinagem.

- A determinação das características do desgaste a partir do sinal de deslocamento, utilizando-se wavelets Daubechies D4, mostrou-se capaz de extrair as assinaturas proveniente do desgaste, isolando-as do restante das componentes existentes no sinal.

- A utilização do valor RMS das wavelets selecionadas possibilitou a geração de um índice adequado à

identificação do momento de substituição da ferramenta, com independência das condições de operação.

- A implementação da análise por wavelets em software é mais simples que a transformada de Fourier e o conjunto de técnicas adotadas possibilita a implementação de sistemas aptos a serem utilizados em condições de tempo real, seja no auxílio ao operador, seja na operação independente de máquinas.

A técnica desenvolvida neste trabalho, combinando análise escala-tempo com a extração do valor RMS de níveis específicos, mostrou-se uma forma eficiente de extração de informações em sinais temporais para as condições de usinagem experimentadas. No entanto, para a extrapolação do uso desta técnica fora dos limites do laboratório, torna-se necessário a realização de um conjunto de trabalhos adicionais que permitam a sua validação em níveis adequados à utilização industrial corriqueira. Como temas para estes futuros trabalhos sugere-se:

- A realização de mais experimentos de ensaios de vida de ferramenta, nas condições de operação mais variadas possíveis experimentando-se diversas máquinas, materiais a serem torneados, diversos tipos de ferramentas e condições de avanço, profundidade e velocidade de corte. Estes experimentos teriam a finalidade de validar a técnica aqui desenvolvida para uma maior faixa de operação.

- Uso desta técnica em determinação de desgaste em outros processos além do torneamento. Teoricamente não há nenhuma limitação ao uso em outras operações, embora é possível que a wavelet mais adequada não seja a Daubechies 4.

•Utilização desta técnica na extração concorrente de outras informações sobre o mesmo sinal, por exemplo, determinação simultânea do desgaste da ferramenta e do estado de rolamentos e engrenagens da máquina. Como cada um destes elementos deve possuir uma "assinatura" própria, o uso de wavelets na sua detecção parece ser uma alternativa natural.

•A escolha da wavelet D4 neste trabalho foi o resultado de uma pesquisa exaustiva baseada em tentativa e erro. Um trabalho de grande valor seria o estudo teórico de uma wavelet ortogonal (para facilidade de implementação computacional) que fosse capaz de capturar com a maior precisão possível, os diversos fenômenos que se deseja estudar e que imprimem, de uma forma ou outra, a sua assinatura sobre o sinal de aceleração.

•Outro sistema de grande importância seria a extensão desta metodologia à sinais outros além do sinal de aceleração, tais como por exemplo a emissão acústica, sons gerados no processo de torneamento e sinais proporcionais a força de corte.

Referências bibliográficas

Adewuya, O.A. & Agba, E.I. Using Infrared Thermometer To Investigate Dimensional Errors in Turning Operations. Proceedings of the Sixth International Conference FAIM Conference. May 13-15 pp 100-109, 1996.

Ahn, J.H.; Lim, H.S.; Sakata, S. *Machining Process/Tool Wear Monitoring System Based on Real Time Sound Recognition*. Bulletin of the Japan Society for Precision Engineering. v60 n8 pp1144-1148, 1994.

Akihito, N & Fujita, S. *Development of a Cutting Tool Failure Detector*. Bulletin of The Japan Society of Precision Engineering, v32 pp 134-139, 1989.

Arshinov, V. & Alekseev, G. *Metal Cutting Theory and Cutting Tool Design*. Mir Publishers Moscow, 1970.

Beattie, R. J. *Acoustic Emission, Principles and Instrumentation*. *Journal of Acoustic Emission*, v2, pp95-128, 1983

Blum, T. & Inasaki, I. *A Study on Acoustic Emission from The Orthogonal Cutting Process*. *Journal of Engineering for Industry*, v112, p203-211, 1990

Bonifacio, M.E.R. & Diniz, A.E. *Correlating Tool Wear, Tools Life, Surface Roughness and Tool Vibration in Finish Turning With Coated Carbide Tools*. *Wear*, 173 pp 137-144, 1994.a

Bonifácio, M.E.R. & Diniz, A.E. *Monitoring the Tool Life in Finish Turning Using Vibration Signals*. J. of th Braz. Soc. Mechanical Sciences. v XVI, n1m pp-56-71, 1994b

Bonifácio, M.E.R. *Monitorização do processo de Torneamento de Acabamento via Sinais de Vibração*. Tese de Mestrado. UNICAMP. 103 pp. 1993.

Braga, D.U.; Diniz, A.E.; Cupini, N.L. *Monitoramento Indireto da Vida da Ferramenta de Torneamento Usando Parâmetros Elétricos da Máquina-Ferramenta*. J. of the Braz. Soc. Mechanical Sciences. v XV n3 pp 210-220, 1993.

Choi, G.B.; Wang, Z.X.; Dornfel, D.A. *Development of an Intelligent On-Line Tool Wear Monitoring System for Turning Operations*. Japa-USA Symposium of Flexible Automation, Kyoto, Japan, 1990.

CHUI, C.K. *An Introduction to Wavelets*. Texas. Academic Press, 1992

CODY, M. *The Fast Wavelet Transform*. Dr. Dobbs Journal, vol 12, n.4, p16-28 Abril, 1992

COHEN, A. *Biomedical Signal Processing*. Florida. CRC Press, 1986

DAUBECHIES, I. *Ten Lectures on Wavelets*. Philadelphia. Siam, 1992, 357p

Diniz, A. E. *Apostila "Usinagem. dos Materiais"* UNICAMP 1996.

- Diniz, A.E.;Vilella,R.C.; Cuppini,N.L. Surface Roughness: Turning of AISI 1045 Steel with uncoated Carbide Revista Brasileira de Ciências Mecânicas VXI, n2, pp 171-182, 1989
- Diniz, A.E. e Costa,C.E. A Corrente Elétrica do Motor da Máquina Mostra o Fim Da Vida da Ferramenta. Revista Máquinas e Metais. n354 p41-52 1995.
- Diniz,A.E. e Pigari, A. Monitoramento do Processo de Torneamento em Desbaste via Emissão Acústica. COBEM-CIDIM, Belo Horizonte 1995
- Dornfeld, D.A. Neural Network Sensor Fusion for Tool Conditioning Monitoring. Anals of CIRP. v39 n1 pp101-105 1990.
- Du,R.X.; Elbestawi,M.A.; Li,S. Tool Conditioning Monitoring in Turning Using Fuzzy Set Theory. Int. J. Mach. Tools Manufact. v32, n6, pp781-796, 1992.
- Elbestawi,M.A.; Papazafiriou,T.A.;Du,R.X. In-Process Monitoring of Tool Wear in Milling Using Cutting Force Signature.International Journal of Machine Tools and Manufacture. v31, n1,55p, 1991.
- Fang,X.D.;Yao,Y.;Arndt,G. Monitoring Groove Wear Development in Cutting Tools via Stchocastic Modelling of Three-dimensional Vibration, Wear, v151, pp 143-156, 1991.
- Ferraresi, D. Fundamentos da usinagem dos metais, Editora Blucher, São Paulo, Brasil, 1977.

Grabec, I. & Susic, E. *Application Of A Neural Network to the Estimation of Surface Roughness From AE Signals Generated By Friction Process*. Int. J. Mach. Tools Manufact. vol 35, n8, pp 1077-1086, 1995.

Graham, T.S. *Monitoring the unmanned machining System*. FMS Magazine n7, v3, p127-131, 1989.

IFEACHOR, E.C. AND JERVIS, B.W. *Digital Signal Processing*. Addison-Wesley Publishing Company. England, 1993.

Jacobsen, S.L. & Ayre, R. *Engineering Vibrations with Applications to Structures and Machinery*. Macgraw-Hill, New York, 1956.

Kannatey-Asibu, Jr. E. & Dornfeld, A.D. *Quantitative Relationships for Acoustic Emission From Orthogonal Metal Cutting*. Journal of Engineering for Industry, v103, pp330-340, 1981.

Kasashima, N.; Mori, K.; Ruiz, G.H. *Diagnosing Cutting Tool Conditions in Milling Using Wavelet Transform Advanced of Intelligent Production*. The Japan Society for Precision Engineering, 1994.

Kerkyras, S.C.; Wilcox, S.J., Borthwick, W.K.D. Reuben, R.L. *Acoustic Emission Monitoring of Turning Operations Using PVdF Film and PZT Sensors*. 1ST International Conference on Acoustic Emission in Manufacturing. Boston USA September 16-19 p72-29 1991.

Li,S., Elbestawi,M.A., Du,R.X. *Tool Condition Monitoring In Turning Using Fuzzy Set Theory*. Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol 32, n6. pp781`-796, 1992.

MALLAT,S.G. *A Theory for The Multiresolution Signal Decomposition : The Wavelet Representation*.IEEE Transactions of Patterns Analysis and Machine Intelligence, vol. 11 n.7 p674-693, 1989.

Martin, K.F. *A Review by Discussion of Condition Monitoring and Fault Diagnosis in Machine Tools*. Int. J. Mach. Tools Manufact. n4, v34, p527-551, 1994.

Martin,P.;Muttel,B.;Drapier,J.D. *Influence of Lathe Tool Wear on the Vibration Sustained in Cutting*. Proceedings of the 15th International Machine Tool Design and Research Conference. pp 251-274 , 1974.

Mathew J. & Li Dan. *Tool Wear and Failure Monitoring Techniques for Turning - A Review*. Int. J. Mach. Tools Manufact. n4. v30. p579-598, 1990.

McLaughlin,C ,Tansel, I.N., Mekdeci,C. *Detection od Tool Failure in End Milling With Wavelet Transformations and Neural Networks*. Int. J. Mach. Tools Manufact. vol 35, n8, pp 1137-1147, 1995.

MEYER,Y. *Wavelets, Algorithms and Applications*. Siam,1993,133p

Moon.S.K. & Sutherland,J.W. *Procrustes Analysis and Its Applications to Sensor Integration*. Transactions of NAMRI/SME v XX, p 347-354, 1992.

Nair,R.;Danai,K.Malkin,S; *Turning Process Identification Through Force Transients*. Transactions of the ASME. Journal of Engineering for Industry. vol114, n1, p1-7 Feb 1992.

NEWLAND, D.E. *An Introduction to Random Vibrations, Spectral & Wavelet Analysis*. Longman Scientific & Technical. England, 1993.

Nicolescu,M.,Carlsson,T. e Bejhem,M. *The Use of Vibration Signals in Cutting Process Monitoring*. 1st International Machining and Grinding Conference. September 12-14 . Ann Arbor, Michigan, 1995.

Novak,A. & Colding, B. *Sensing of a Workpiece diameter, vibration and out-of-Roundness by laser-way to Automate Quality Control*. CIRP Annals, vol30, n1, p473-6, 1981.

Pandit,S.M. & Kashow,S.,1982. *A Data Dependent System Strategy of the On-Line Tool Wear Sensing*. Journal of Engineering for Industry, v104, pp 217-223,1982.

Petropoulos,P.G. *Statistical Basis for Surface Roughness Assesment in Oblique Finish Turning of Stell Components*. Int. Journal for Production Research, n3. vol12. pp 345-360, 1990.

Rangwala, S. & Dornfeld,D.A. *Sensor Integration Using Neural Networks for Intelligent Tool Condition Monitoring*. Journal of Engineering for Industry. v112, n3, pp 219-218, 1990.

Rao, S.B. *Tool Wear Monitoring Through the Dynamics of Stable Turning*. Journal of Engineering for Industry, vol 108, pp184-196, 1986.

Rioul, O. and Vetterli, M. *Wavelets and Signal Processing*. IEEE SP Magazine, vol.91, n.10, p14-38, 1991.

Sawai, N.; Song, J.Hwayoung, P. *Automated Measurements of Tool Wear Using An Image Processing System*. Journal of Japan Society for Precision Engineering. v61 n3 Mar 1995 p368-371, 1995.

Shaw, M.C. *Metal Cutting Principles*. Clarendon Press. Oxford, 1984.

Shiraishi, M. *Scope of in-process Measurement, Monitoring and Control Techniques in Machining Process Techniques for Tools*. Precision Engineering c10 n4 p179-199 October 1988.

Sokolowski, A. & Kosmol, J. *Utilization of Vibration Measurements of Machine Tool Elements in the Monitoring of the Cutting Tool Conditions*. Proceedings of the 4th World Meeting on Acousting Emission and 1st International Conference on AE in Manufacturing, pp 327-333. 1991

Sundaram, R.M. & Lambert, B.K. *Surface Roughness Variability of AISI 4140 Steel In Fine Turning Using Carbide Tools*. Int Journal for Production Reseach, n3. vol17. pp249-258, 1990.

Susic, E. & Grabec, I. *Application of a Neural Network to The Estimation of Surface Roughness From AE Signals Generated By*

Friction Process. Inj. J. Mach. Tools Manufact. v35 n8 ,pp1077-1086, 1995.

Sutherland, J.W. & Moon, K.S. *Procrustes Analysis and Its Application to Sensor Integration. Transactions of NAMRI/SME , vol XX, pp 347-354 1992.*

Tadao, K.; Hiroshi, O.; Akinori, N.; Eiji, K. *Application of Wavelets Analysis to Monitoring of Cutting Conditions in Milling. Advanced of Intelligent Production. The Japan Society for Precision Engineering pp 345-350, 1994.*

Tavares F., R.F.; Bonifácio, M.E.R.; Diniz, A.E. *Developing a Wireless Connection Between the Sensor and the Conditioning Signal System in Tool Vibration Monitoring. Proceedings of The Thirty-first International MATADOR Conference . Manchester. England. 1995*

Trusty, J. ; Wells, R.L.; Smith, S. *Sensor Based Supervision of CNC Machining. Transactions of NAMRI/SME. v XX, p299-303, 1992.*

Vidakovic, B. and Müller, P. *Wavelets for Kids. A Tutorial Introduction. Institute of Statistics And Decision Sciences Duke University, p1-26 ,1991.*

Walter, G.C. *WAVELETS, A New Tool in Applied Mathematics. The Umap Journal. p155-179, 1992.*

Well, R.L., Smith, S. Trusty, J. *Sensor Based Supervision of CNC Machining, Transactions of NAMRI/SME vXX, p299-303, 1992.*

Weller, E.J., Schrier, H.M., Weichbrodt, B.. *What Sound Can be Expected From a Worn Tool*. Journal of Engineering for Industry n8, p525-534, 1969.

Wildes D.G. et al. *Review Prospects for In-process Diagnosis of Metal Cutting by Monitoring Vibration Signals*. Journal of Materials Science. v22, p3821-3830, 1987 .

Williams, J. And Amaratunga, K. *Introduction to Wavelets in Engineering*. International Journal for Numerical Methods for Engineering, vol.37, n.6, p.2365-2388, 1994

Apêndice 1.

Curvas de rugosidade Ra e rugosidade máxima para várias condições de teste

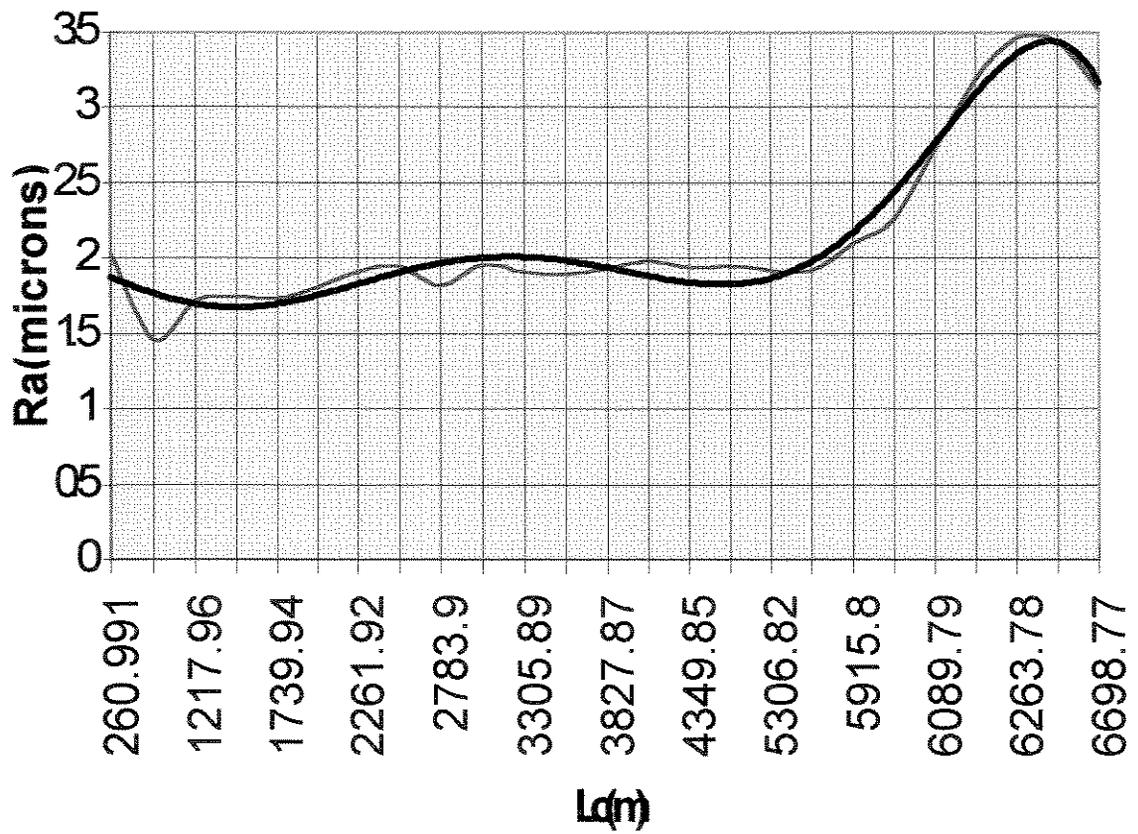


Figura 8.1- R_a x L_c para $V_c=200$ e $f=0.15$

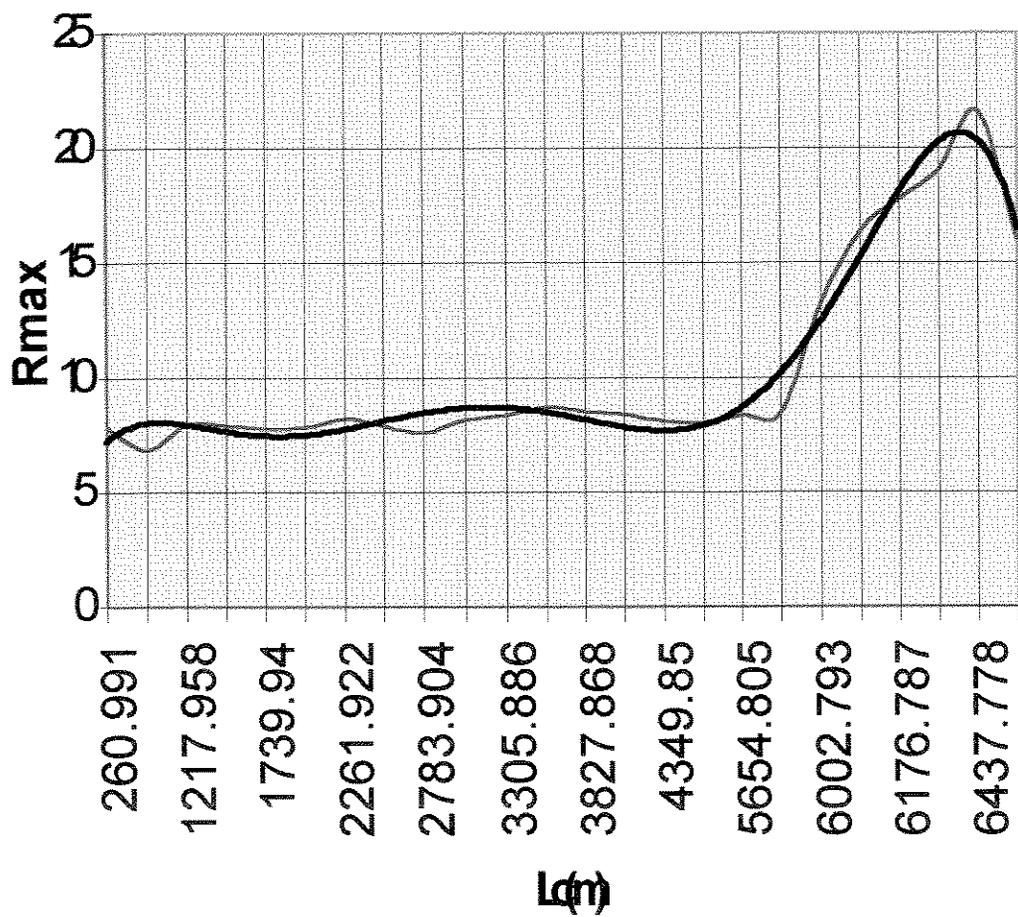


Figura 8.2- R_{max} x L_c para $V_c=200$ $f=0.15$

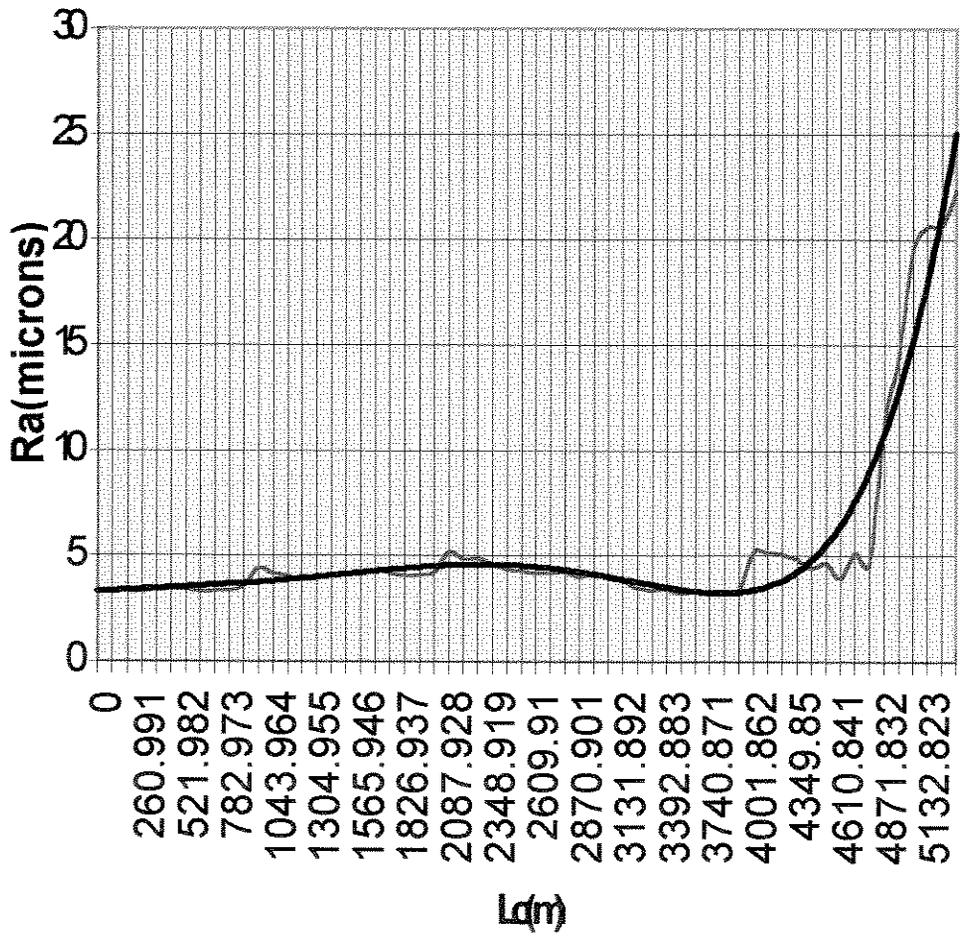


Figura 8.3- $R_a \times L_c$ para $V_c=200$ e $f=0.20$

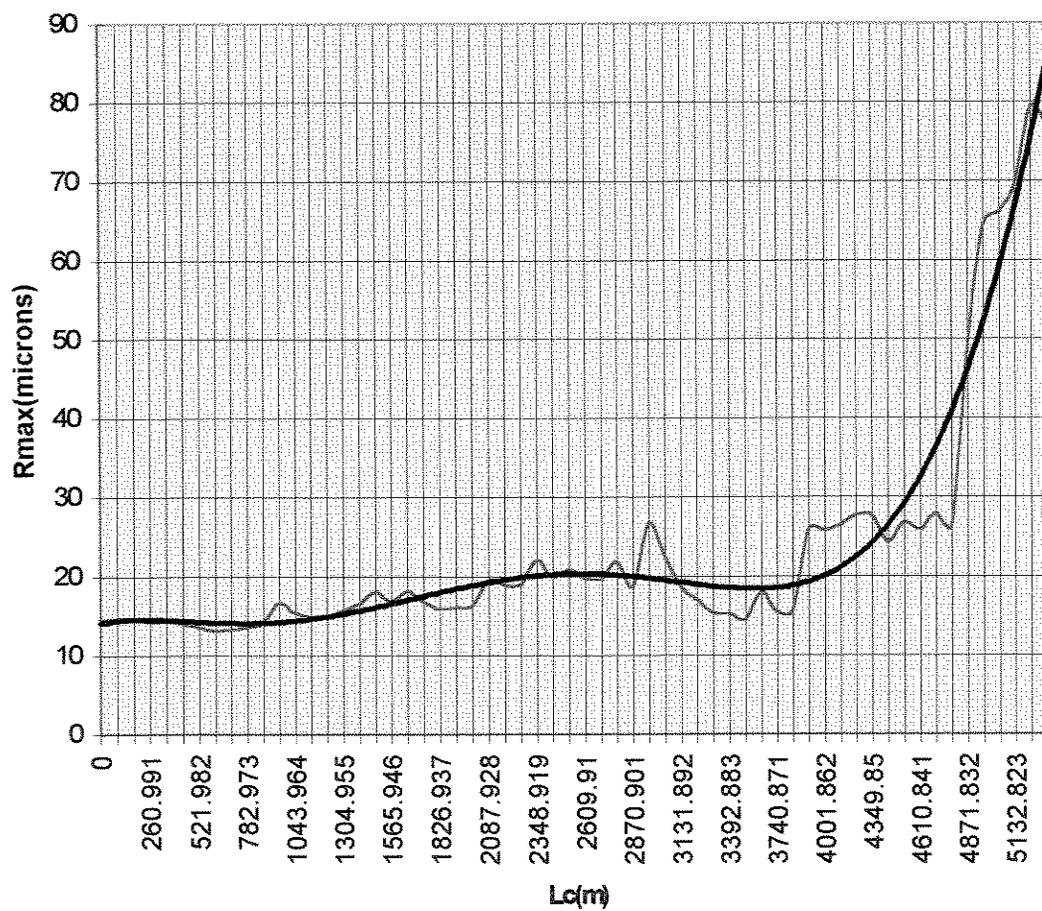


Figura 8.4 - R_{max} x L_c para $V_c=200$ e $f=0.20$

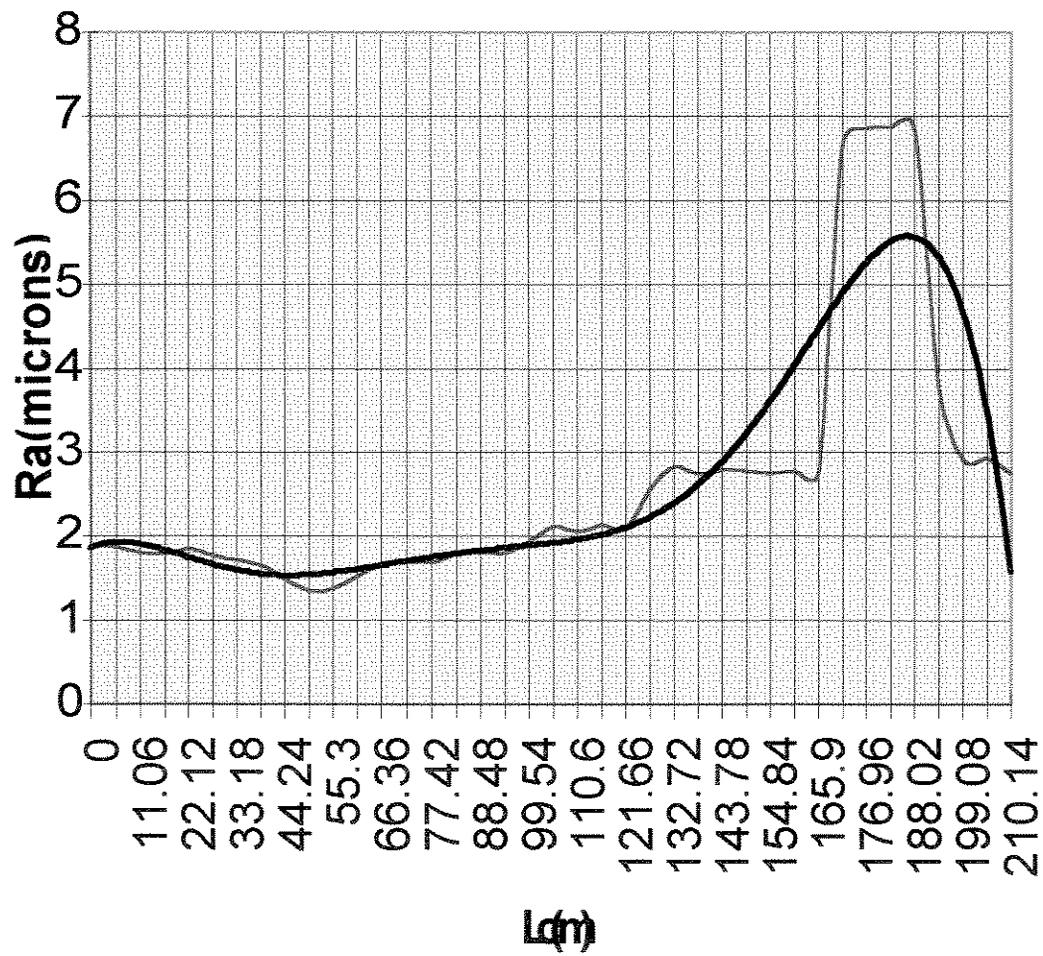


Figura 8.5 Ra x Lc para Vc=225 e f=0.15

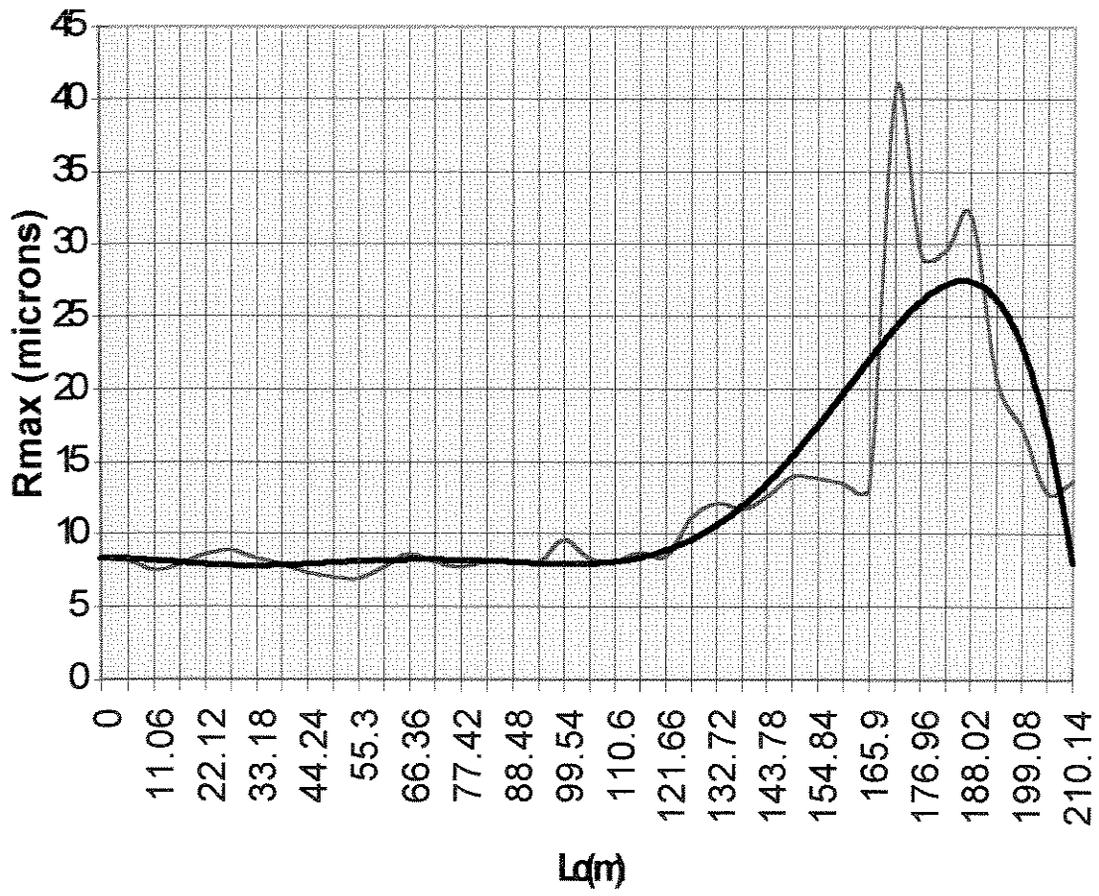


Figura 8.6 - R_{max} x L_c para $V_c=225$ e $f=0.15$

$v_c=300 \text{ m/min}$ $f=0.13 \text{ mm/volta}$

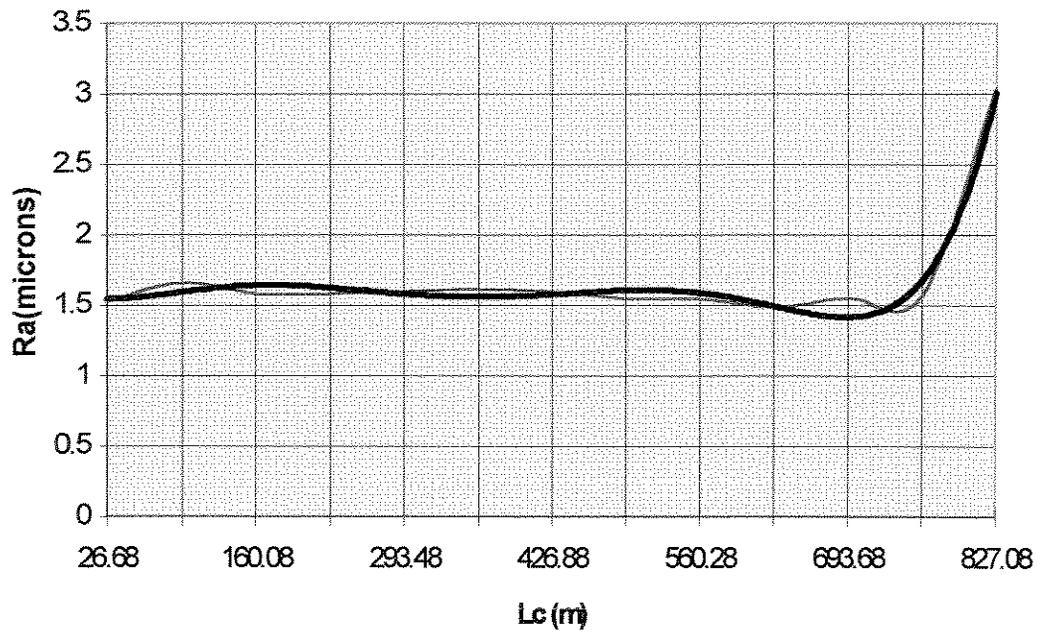


Figura 8.7. Ra x Lc para $V_c=300$ e $f=0.13$

Rmax $V_c=300$ $f=0.13$

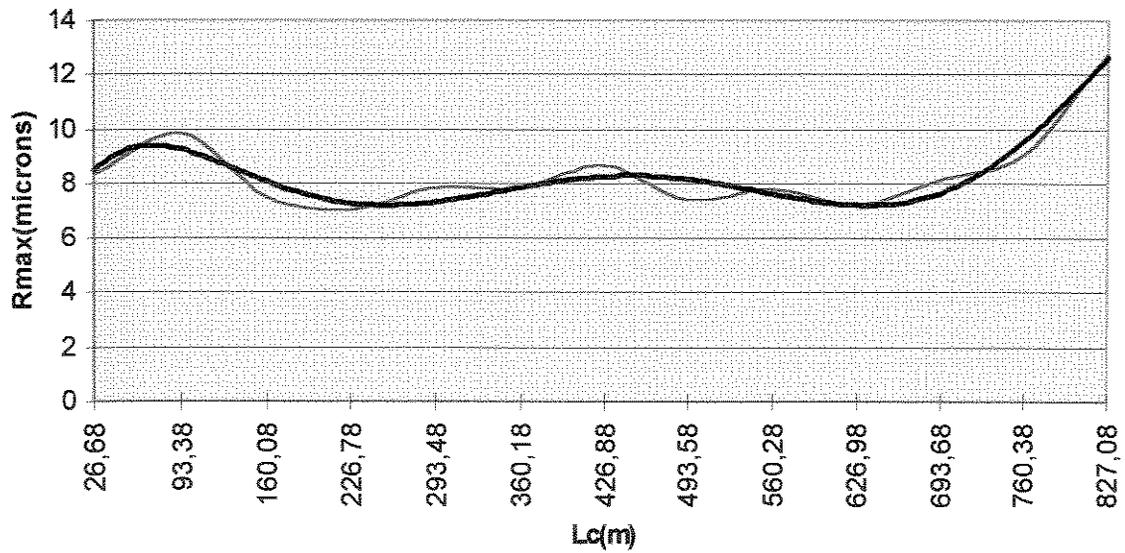


Figura 8.8 - Rmax x Lc para $V_c=300$ e $f=0.13$

Ra Vc=300f=0.2

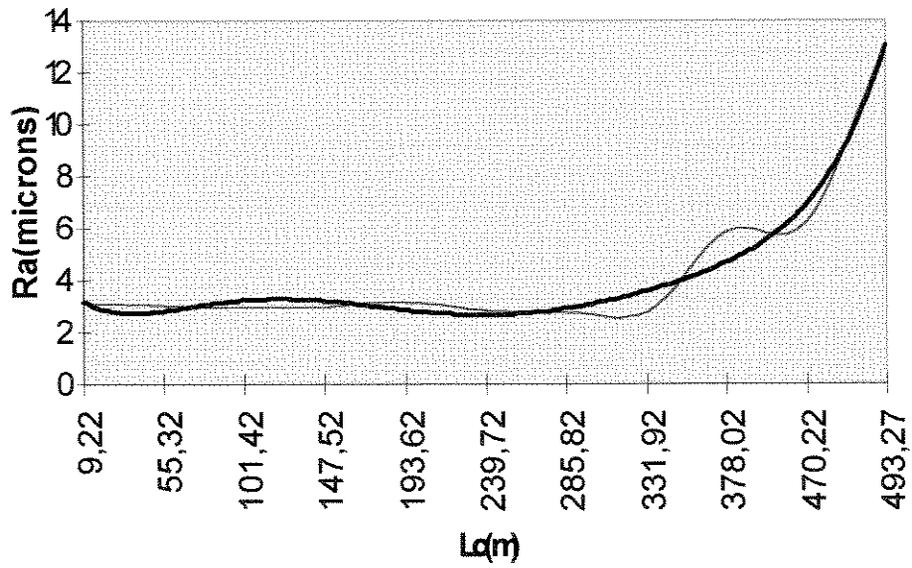


Figura 8.9. Ra x Lc para Vc=300 e f=0.2

Rmax Vc=300 f=0.20

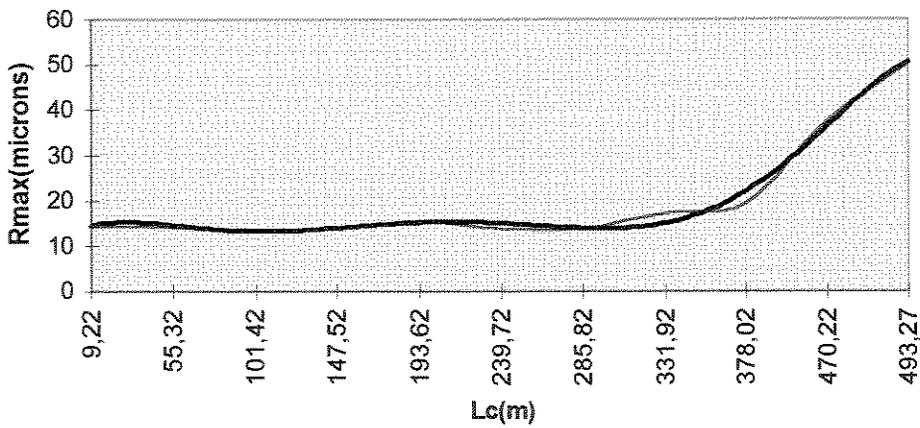


Figura 8.10. Rmax x Lc para Vc=300 e f=0.2

Apêndice 2.

Curvas do RMS da aceleração para várias condições de teste

RMS da aceleração $V_c=200$ $f=0.15$

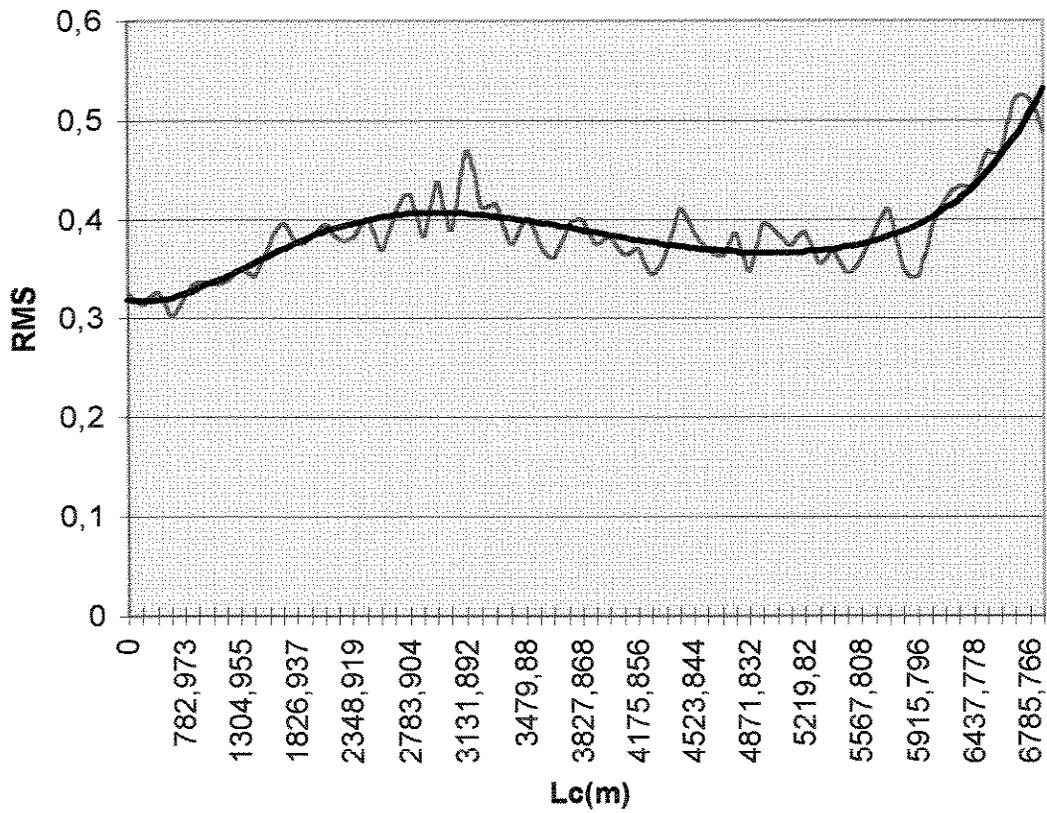


Figura 9.1. RMS da aceleração para $V_c=200$ e $f=0.15$

RMS aceleração $V_c=200$ $f=0.20$

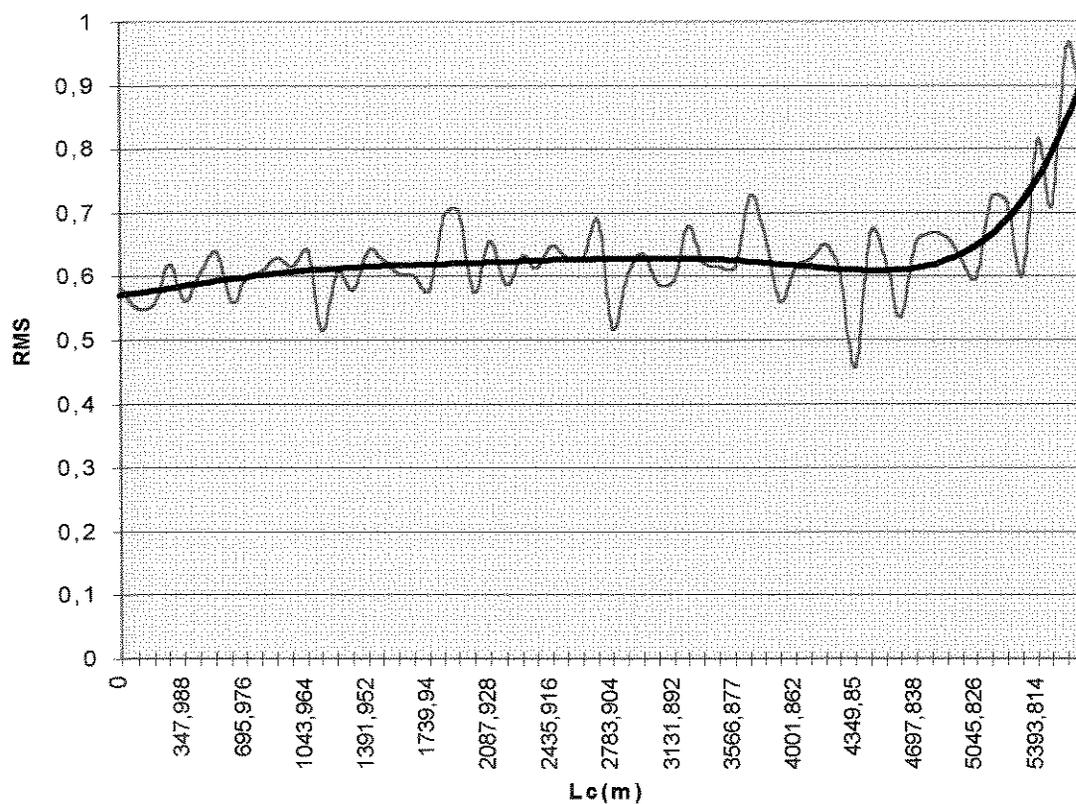


Figura 9.2. RMS da aceleração para $V_c=200$ e $f=0.20$

RMS aceleração $V_c=225$ $f=0.15$

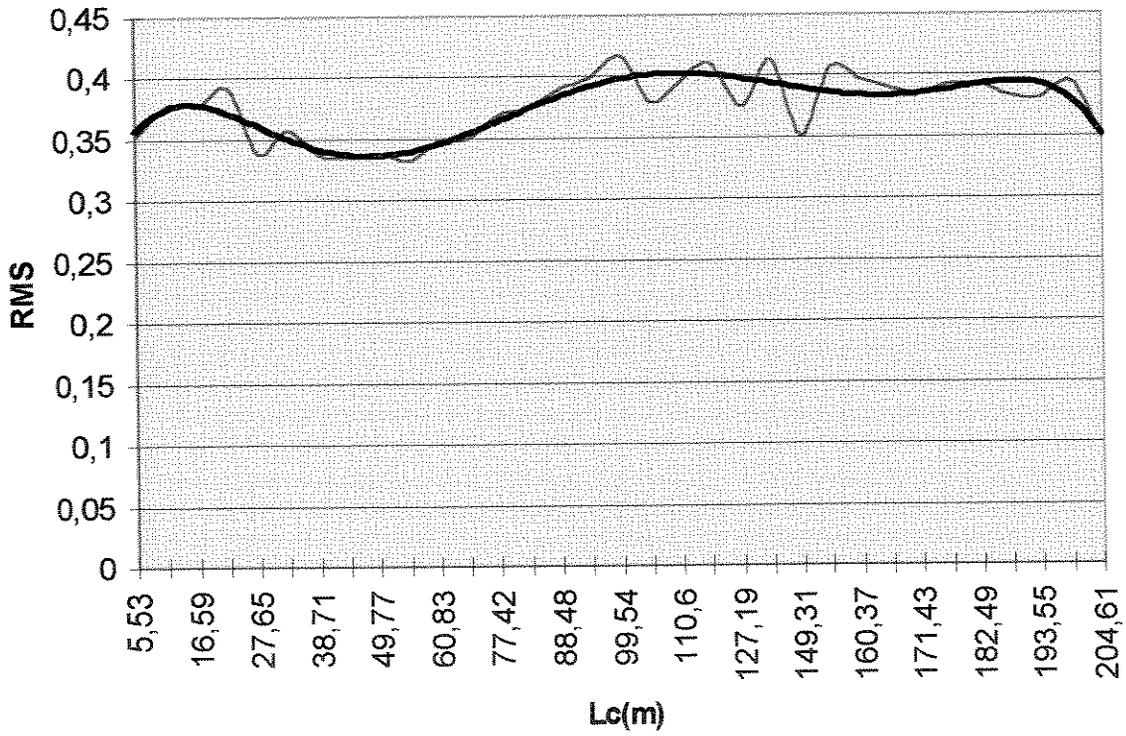


Figura 9.3. RMS da aceleração para $V_c=225$ e $f=0.15$

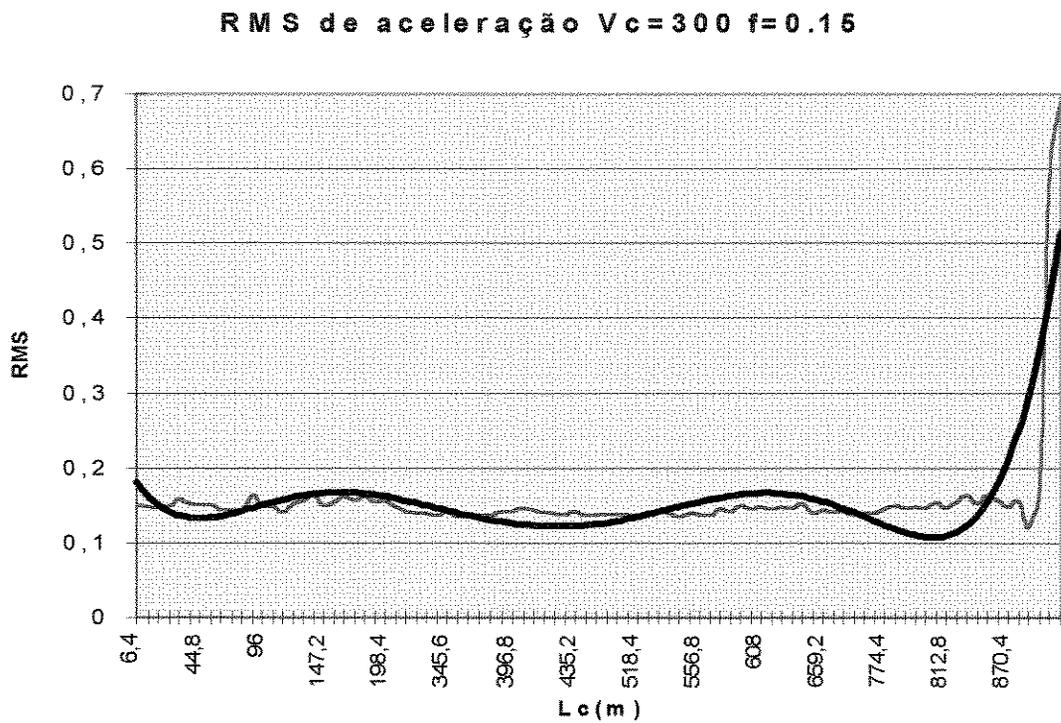


Figura 9.4 .RMS da aceleração para $V_c=300$ e $f=0.15$

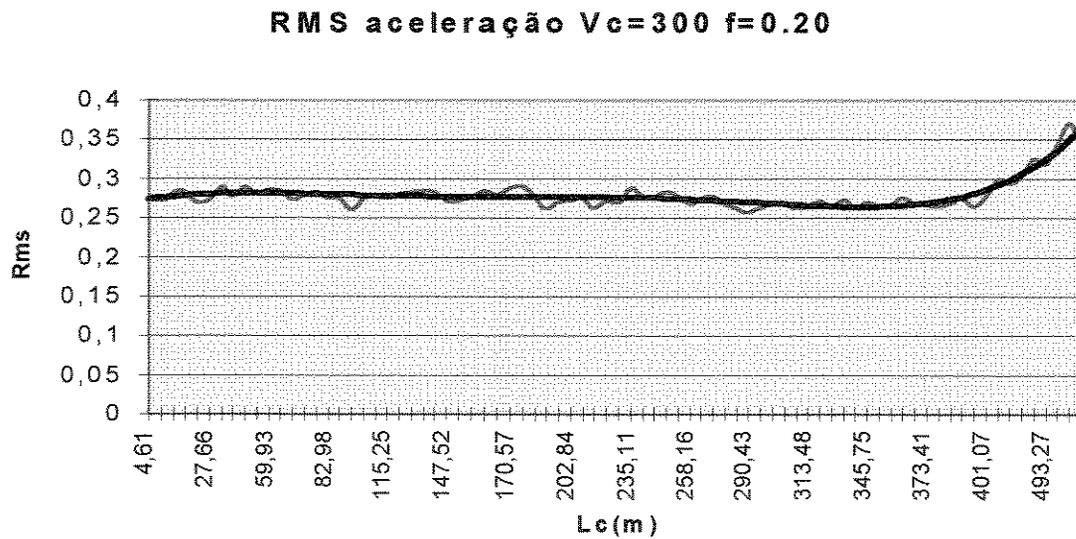


Figura 9.5 .RMS da aceleração para $V_c=300$ e $f=0.20$

Apêndice 3.

Curvas do RMS da velocidade para várias condições de teste

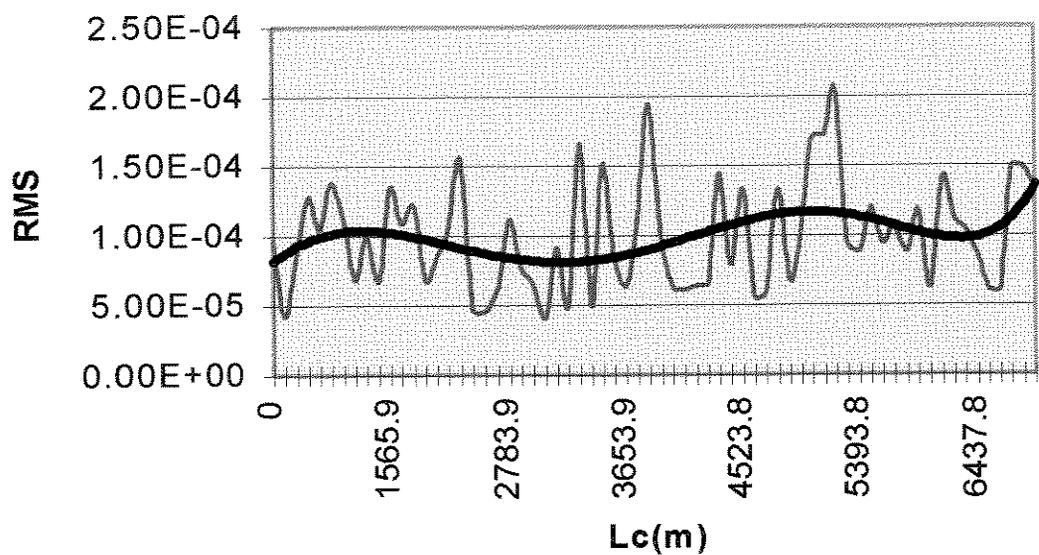


Figura 10.1. RMS da velocidade para $V_c=200$ e $f=0.15$

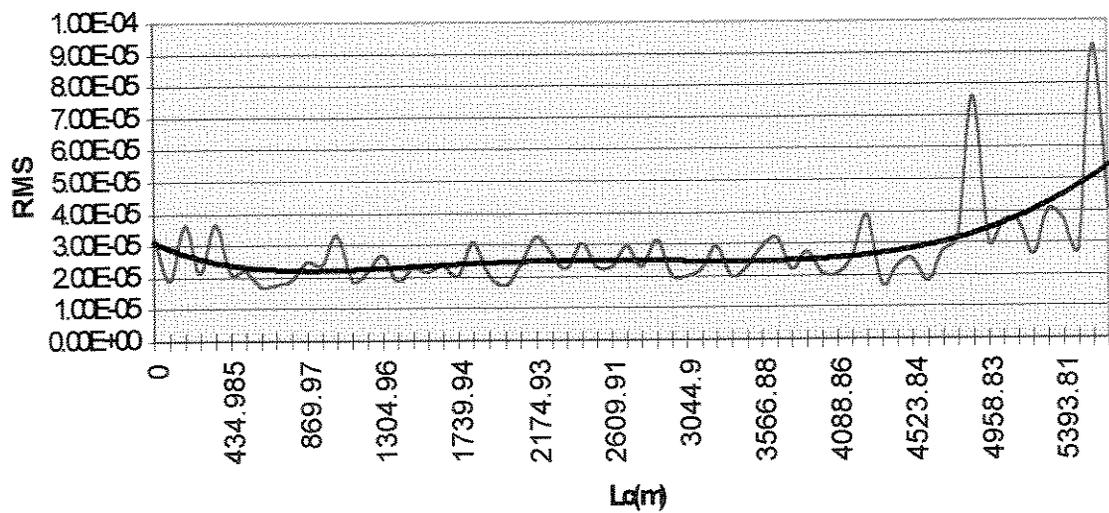


Figura 10.2. RMS da velocidade para $V_c=200$ e $f=0.20$

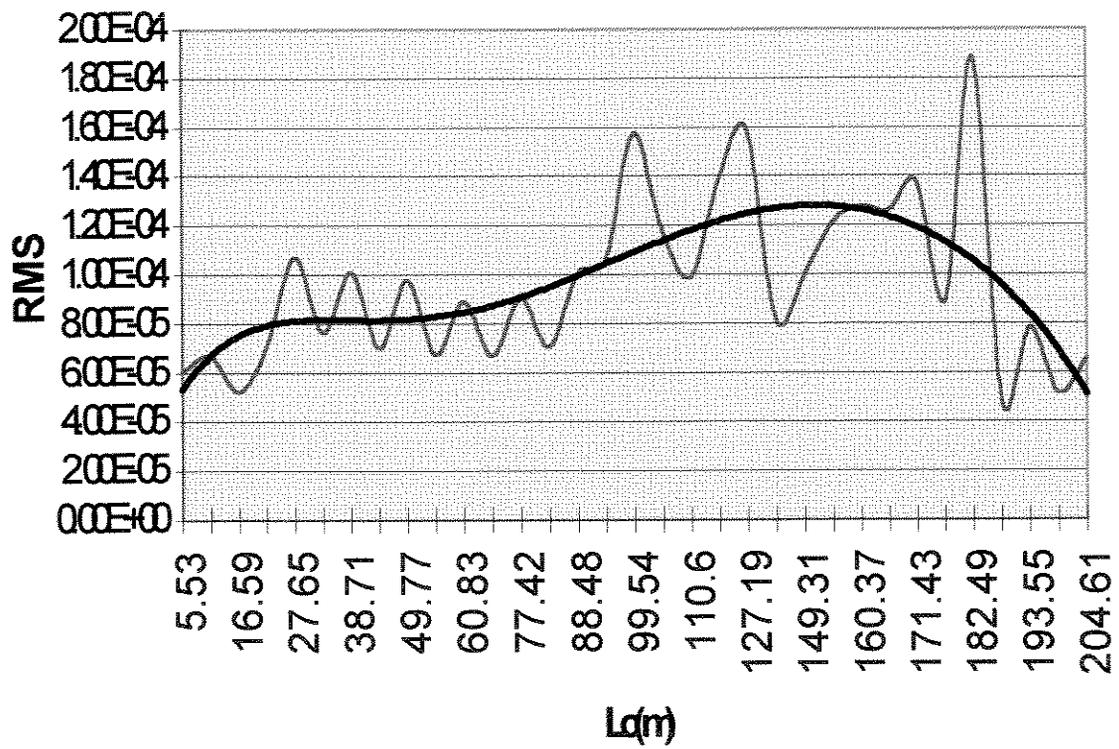


Figura 10.3 RMS da velocidade para $V_c=225$ e $f=0.15$

RMS velocidade $V_c=300$ $f=0.13$

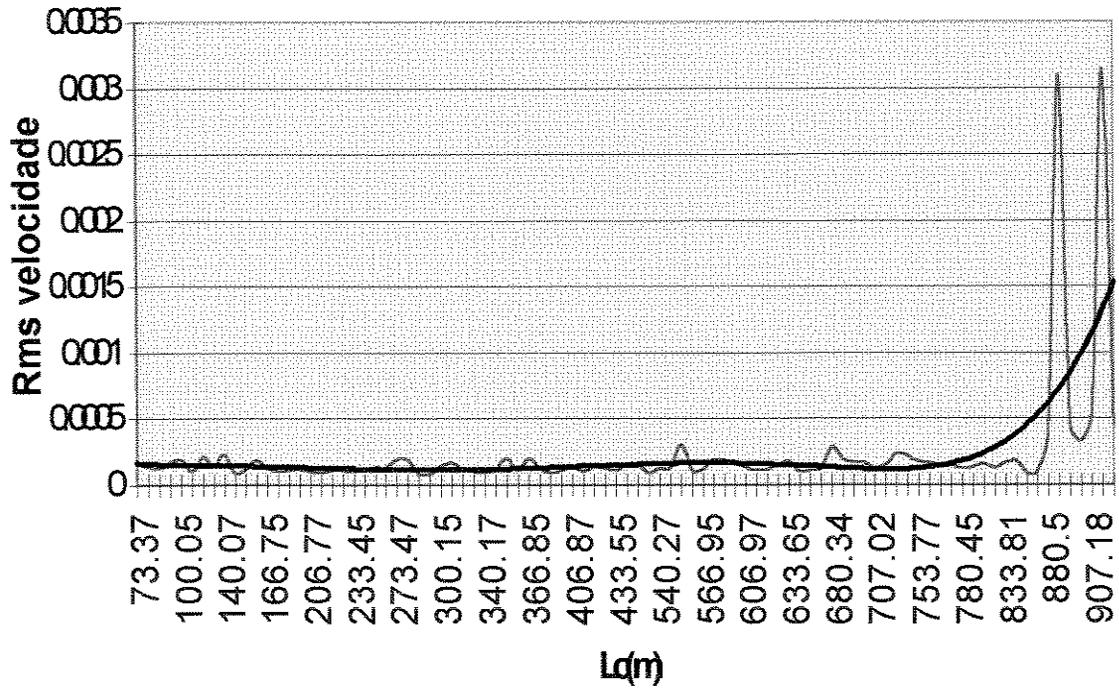


Figura 10.4. RMS da velocidade para $V_c=300$ e $f=0.13$

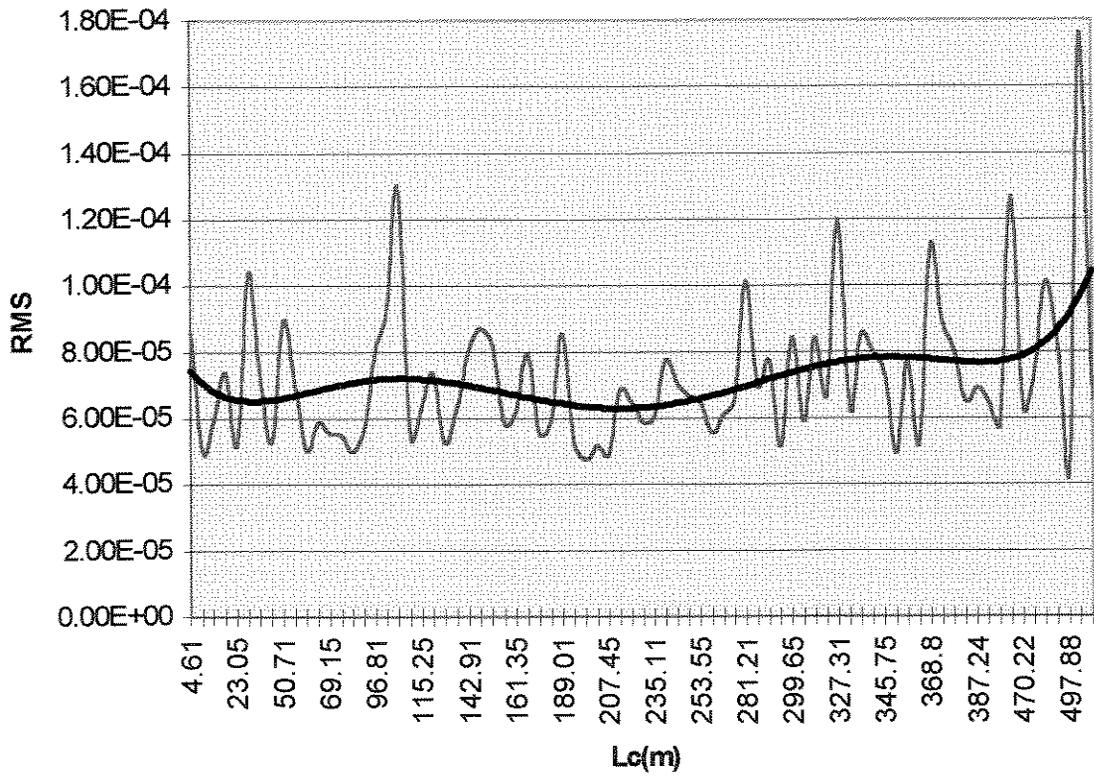


Figura 10.5 RMS da velocidade para $V_c=300$ e $f=0.20$

Apêndice 4.

Curvas do RMS do deslocamento para várias condições de teste

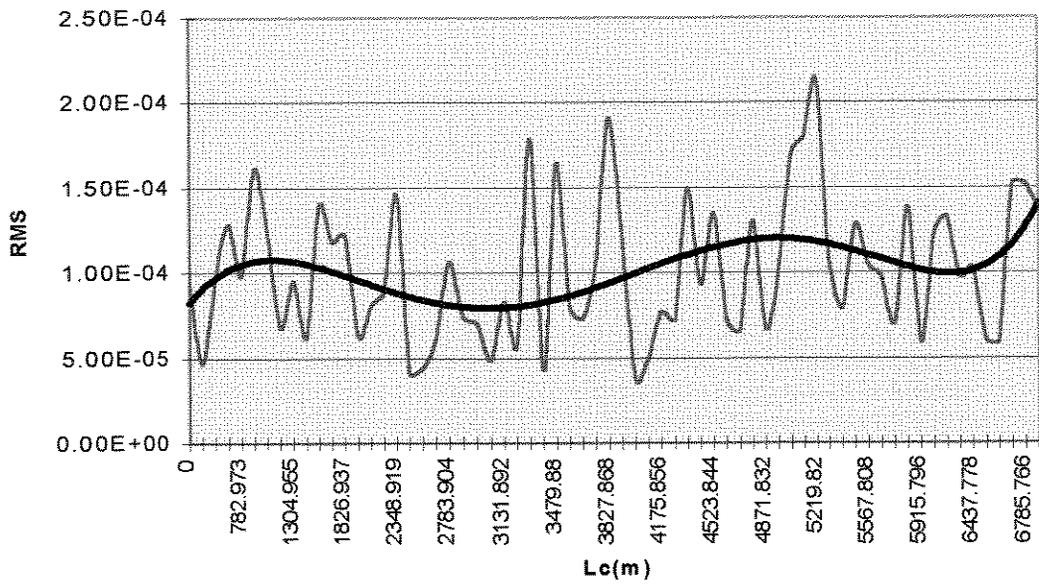


Figura 11.1. RMS do deslocamento para $V_c=200$ e $f=0.15$

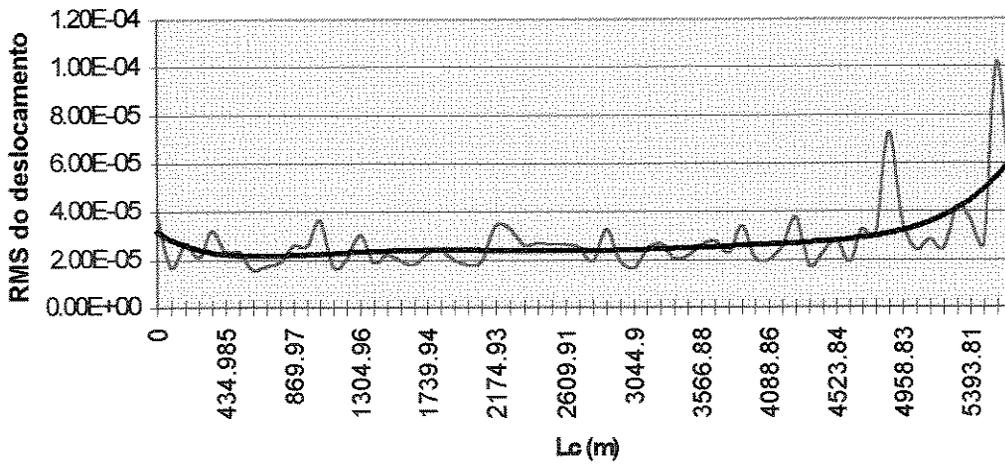


Figura 11.2. RMS do deslocamento para $V_c=200$ e $f=0.20$

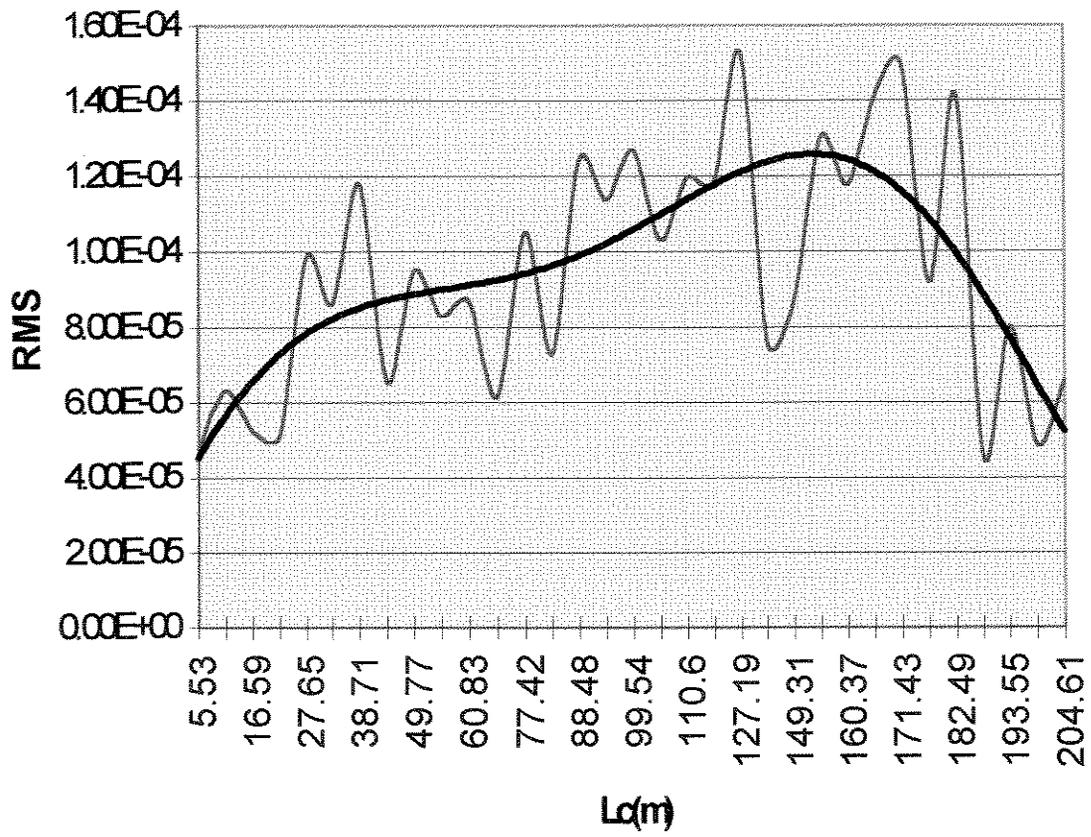


Figura 11.3. RMS do deslocamento para $V_c=225$ e $f=0.15$

RMS do deslocamento $V_c=300$ e $f=0.13$

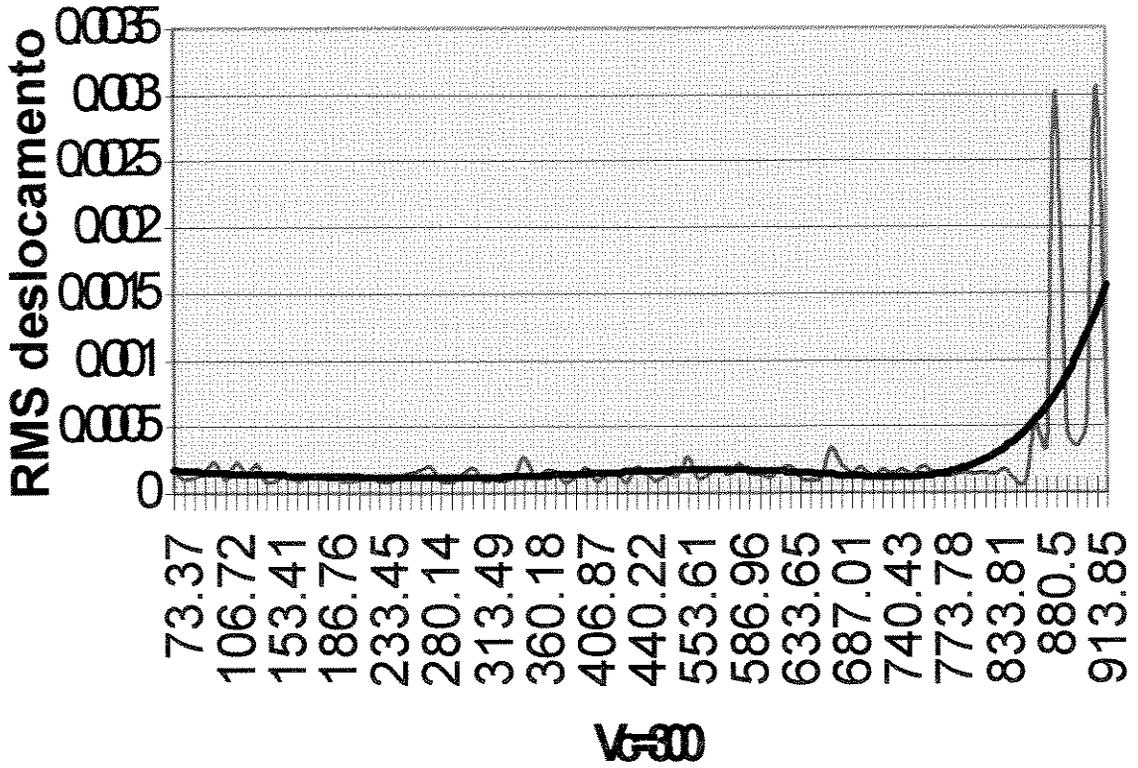


figura 11.4. RMS do deslocamento para $V_c=300$ e $f=0.13$

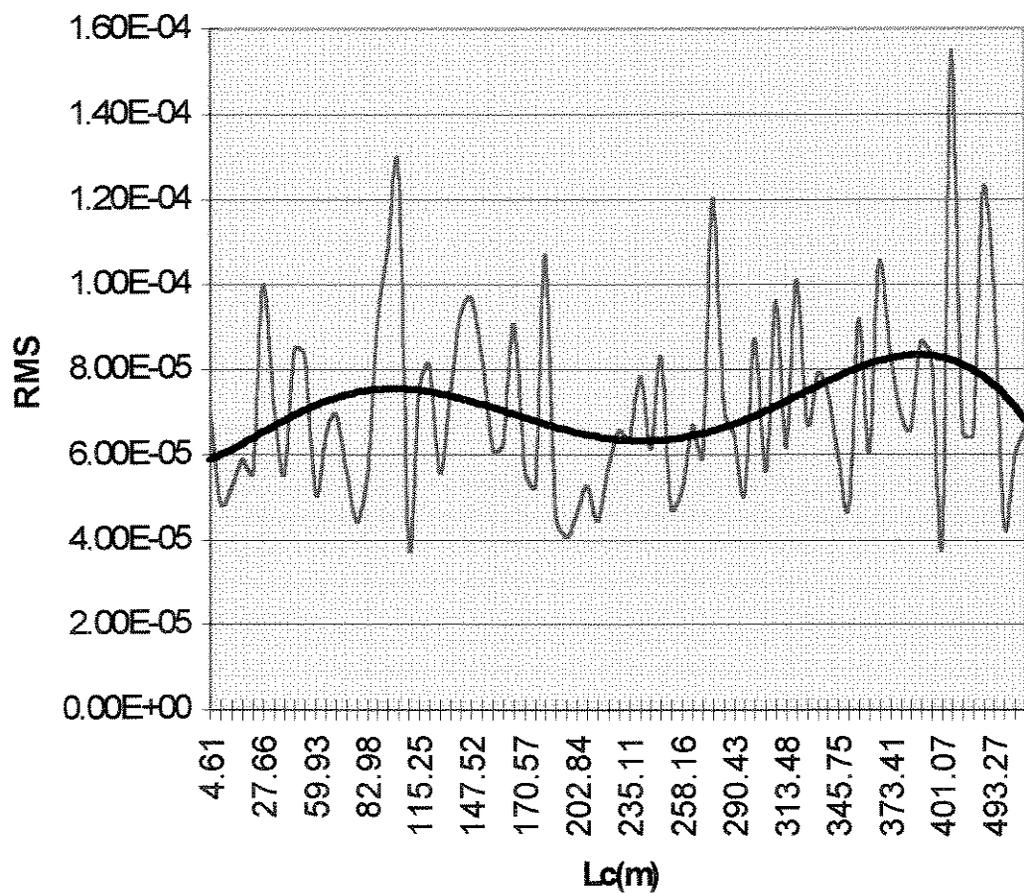


Figura 11.5 RMS do deslocamento para $V_c=300$ e $f=0.20$

Apêndice 5.

Curvas do RMS da Wavelet inversa do deslocamento (3° nível) para várias condições de teste

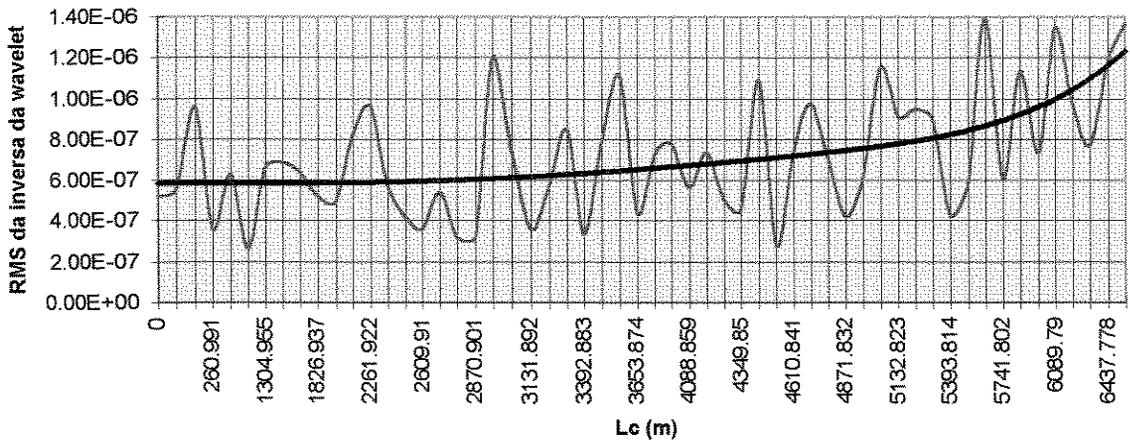


Figura 12.1. RMS da wavelet inversa para $V_c=200$ e $f=0.15$

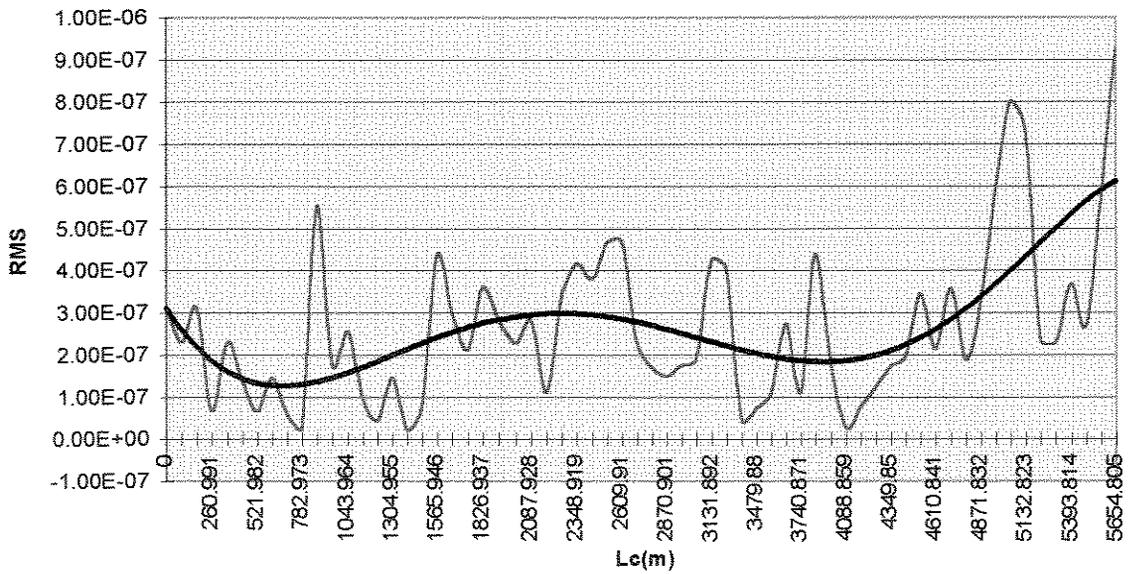


Figura 12.2. RMS da wavelet inversa para $V_c=200$ e $f=0.20$

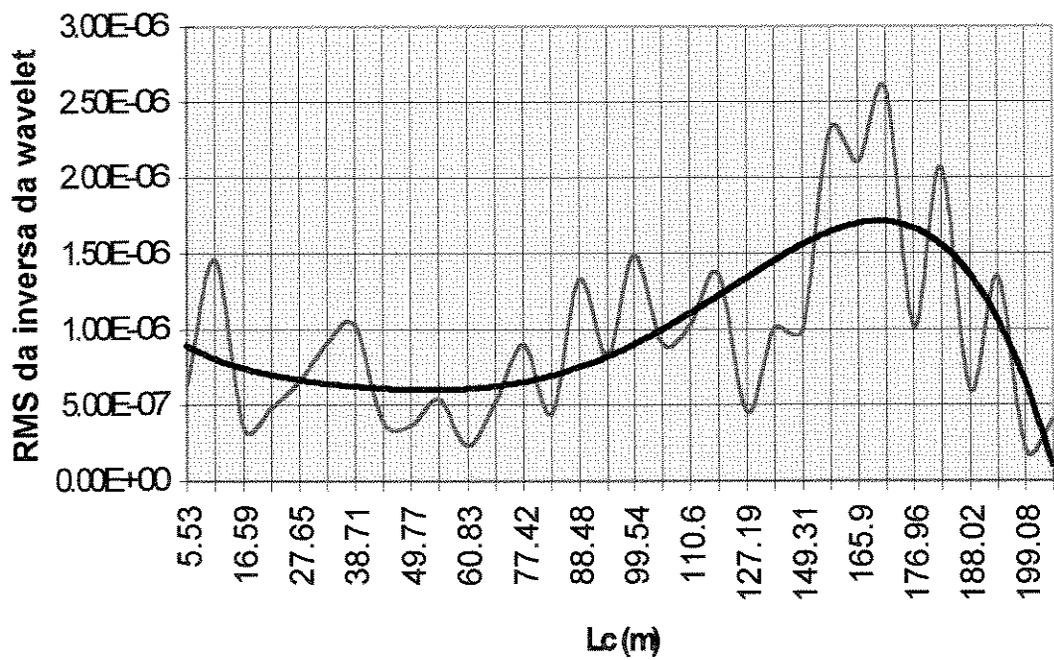


Figura 12.3. RMS da wavelet inversa para $Vc=225$ e $f=0.15$

$v_c=300$ m/min $f=0.13$ mm/volta

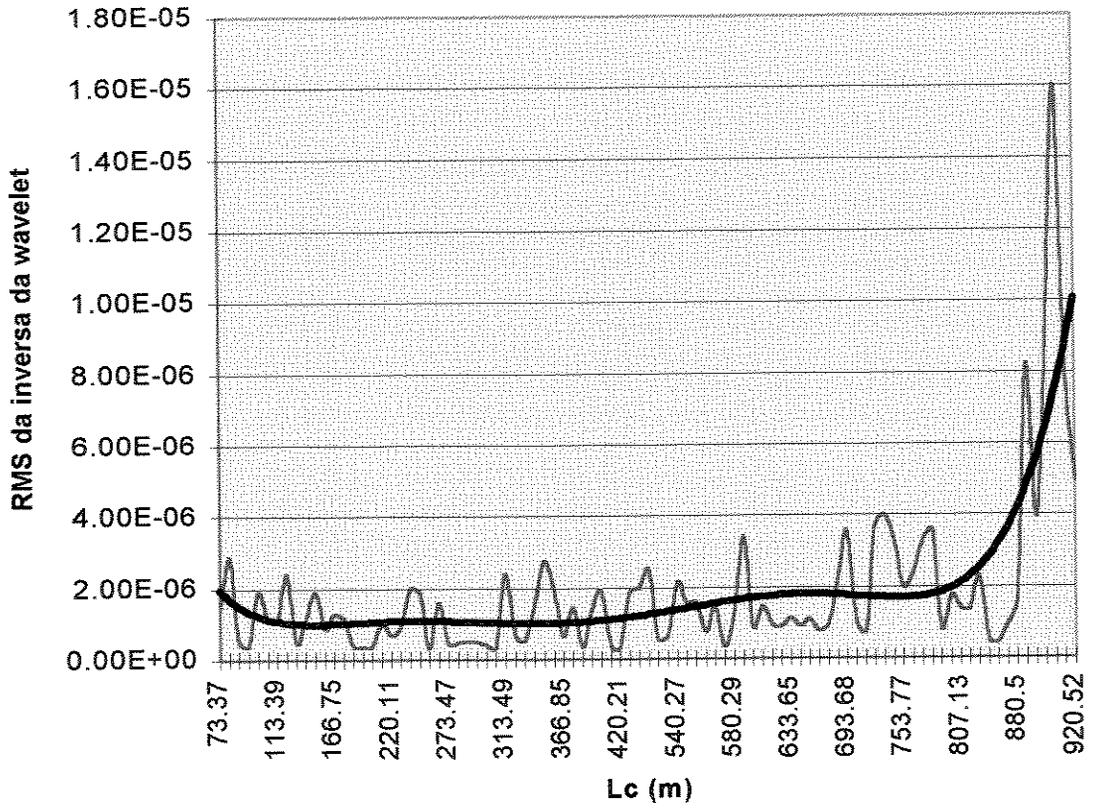
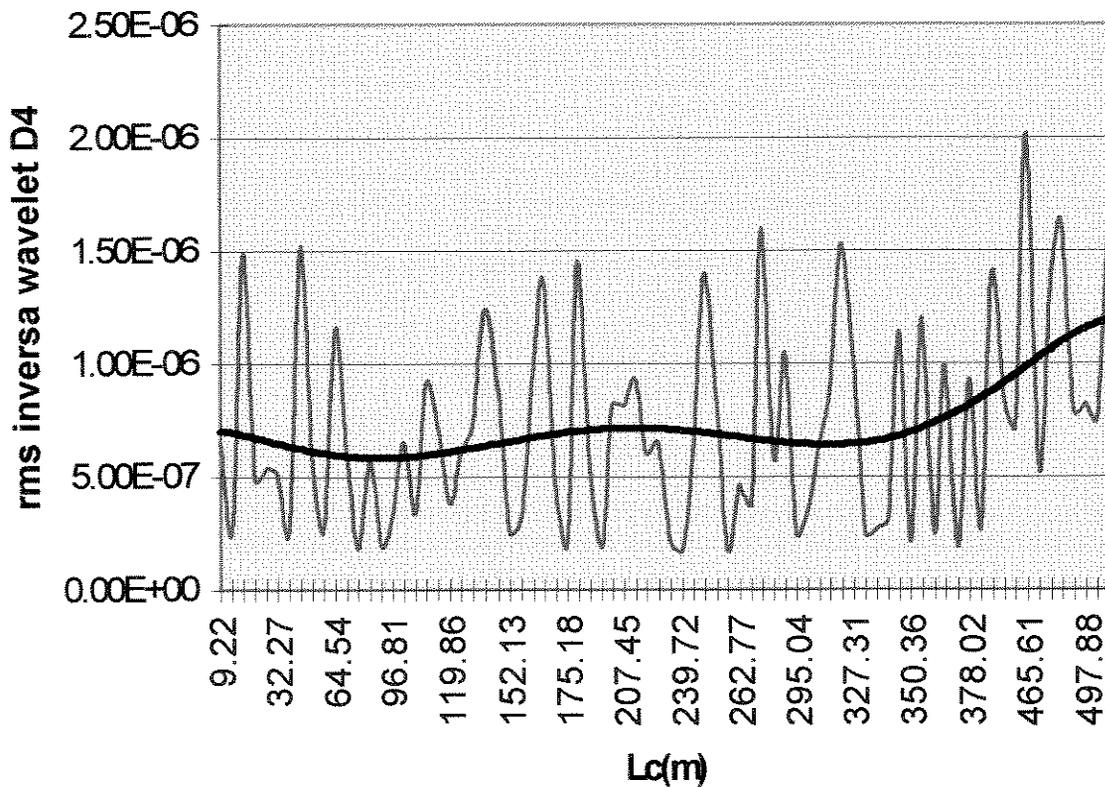


Figura 12.4 RMS da wavelet inversa $V_c=300$ e $f=0.13$



Figural2.5 RMS da inversa da wavelet para $Vc=300$ e $f=0.20$