

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Amauri Hassui

E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 04/07/97

Anselmo Eduardo Diniz
ORIENTADOR

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

Comparação Sobre a Utilização de Diferentes Sensores no Monitoramento do Processo de Retificação

Autor: **Amauri Hassui**
Orientador: **Anselmo Eduardo Diniz**
Co-Orientador: **Juarez Felipe Jr.**

07/97

H279c

32052/BC

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

Comparação Sobre a Utilização de Diferentes Sensores no Monitoramento do Processo de Retificação

Autor: Amauri Hassui

Orientador: Anselmo Eduardo Diniz

Co-Orientador: Juarez Felipe Jr.

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

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

**Campinas, 1997
S.P. - Brasil**



0086115

UNIDADE	78C
N.º CHAMADA:	T/UNICAMP
	H279c
V.	Ex.
TOMED BC/	32052
PROC.	281197
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	15/11/97
N.º CPD	

CM-00102371-1

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

H279c

Hassui, Amauri

Comparação sobre a utilização de diferentes sensores
no monitoramento do processo de retificação / Amauri
Hassui.--Campinas, SP: [s.n.], 1997.

Orientadores: Anselmo Eduardo Diniz, Juarez Felipe
Jr..

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Máquinas - Monitoração. 2. Retificação e polimento.
3. Máquinas-ferramenta - Vibração. 4. Emissão acústica.
5. Usinagem. 6. Correntes elétricas. I. Diniz, Anselmo
Eduardo. II. Felipe Jr., Juarez. III. Universidade Estadual
de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV.
Título.

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

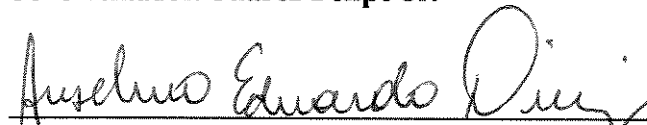
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Comparação Sobre a Utilização de Diferentes
Sensores no Monitoramento do Processo de
Retificação**

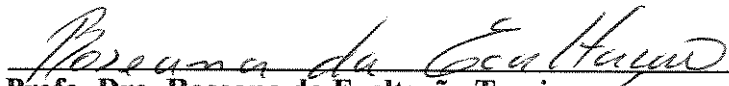
Autor: **Amauri Hassui** 

Orientador: **Anselmo Eduardo Diniz** 

Co-Orientador: **Juarez Felipe Jr.** 



Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz, Presidente
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP



Profa. Dra. Roseana da Exaltação Trevisan
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP



Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho
Escola de Engenharia de São Carlos - EESC - USP

Campinas, 04 de julho de 1997

Dedicatória:

Dedico este trabalho aos meus amigos e à minha família, especialmente ao meu tio Yociteru que sempre me incentivou.

Agradecimentos

Este trabalho contou com a colaboração de diversas pessoas às quais eu agradeço sinceramente:

À minha família, pela confiança e apoio;

Ao professor Anselmo , pela confiança, amizade e orientação;

Ao professor João Fernando da EESC, pelo apoio e pelas discussões relativas à parte experimental;

Aos colegas João Jorge e Juarez da EESC, pela colaboração nos experimentos e pela acolhida em São Carlos;

Aos amigos Márcia, Adilson e Sílvia pela hospedagem em São Carlos;

Aos colegas de pós graduação, em especial ao Celso, Gilberto e André, pelas discussões, e apoio;

Aos professores das disciplinas cursadas na pós-graduação, pela contribuição à minha formação;

Ao técnico Aristides do Laboratório de Usinagem do DEF, pela usinagem dos corpos de prova;

Ao técnico Bruno do Lamafe da EESC, pelo apoio na preparação dos experimentos;

Às secretarias do DEF, pela prestatividade;

Ao CNPq, pelo auxílio financeiro;

À SENSIS São Carlos, pelo empréstimo dos equipamentos de monitoramento utilizados nos ensaios;

À EESC, por permitir a utilização de seu laboratório para realização da parte experimental.

*O desenvolvimento da ciência se dá porque
alguns homens vêem o que todos viram,
mas pensam no que ninguém pensou.*

Albert Szent-Gyorgyi

Sumário

1 Introdução	01
2 O Processo de Retificação	03
2.1 Introdução	03
2.2 Rebolos	03
2.2.1 Características dos Rebolos	04
2.2.1.1 O Material do Abrasivo	04
2.2.1.2 O Tamanho do Grão Abrasivo	05
2.2.1.3 A Dureza do Rebolo	06
2.2.1.4 A Estrutura do Rebolo	06
2.2.1.5 O Material Aglomerante	07
2.2.1.6 Especificação de Rebolos	07
2.2.1.6.1 Rebolos Convencionais	07
2.2.1.6.2 Superabrasivos	08
2.2.2 Mecanismos de Desgaste dos Rebolos	09
2.2.2.1 - Vida dos Rebolos	11
2.2.3 A Operação de Dressagem	13
2.2.3.1 Tipos de Dressadores	13
2.2.3.2 A Ação da Dressagem no Desempenho da Retificação	14
2.3 Características do Processo de Retificação	18
2.3.1 Classificação dos Processos de Retificação	18
2.3.2 Parâmetros de Caracterização	18
2.3.3 Mecanismo de Formação de Cavaco	20
2.3.4 Forças de Corte	22
2.3.5 O Ciclo de Retificação Cilíndrica de Mergulho	23
2.3.6 Temperaturas e Danos Térmicos	25
2.3.6.1 Queima da Peça	26
2.3.6.2 Revenimento	27
2.3.6.3 Tensões Residuais	27

3 Monitoramento dos Processos de Usinagem	29
3.1 Introdução	29
3.2 A Emissão Acústica no Monitoramento da Retificação	31
3.2.1 A Detecção de Contato Peça/Rebolo	34
3.2.2 O Centelhamento Acelerado	36
3.2.3 O Estado de Afição do Rebolo	38
3.2.4 Dressagem e Correção da Posição Diametral do Rebolo	39
3.3 A Vibração Mecânica no Processo de Retificação	40
3.4 O Monitoramento da Potência do Motor no Processo de Retificação	43
3.5 Tratamento do Sinal	44
3.6 Estratégias de Monitoramento	46
4 Procedimento Experimental	48
4.1 Equipamento e Acessórios Utilizados	48
4.2 O Equipamento de Monitoramento	49
4.3 Ensaios Preliminares	52
4.4 Condições Utilizadas nos Ensaios	53
5 Resultados e Discussões	59
5.1 Resultados referentes à utilização de rebolo duro	59
5.1.1 Análise dos corpos de prova após a retificação	59
5.1.1.1 Rugosidade	59
5.1.1.2 Circularidade	62
5.1.2 Monitoramento do Processo de Retificação	63
5.1.2.1 Emissão Acústica	63
5.1.2.2 Vibração Mecânica	66
5.1.2.3 Corrente elétrica consumida pelo motor	69
5.1.2.4 Análise de sensibilidade dos sensores	70
5.1.2.5 Tempos de deformação elástica e centelhamento	73
5.2 Resultados referentes à utilização de rebolo mole	75
5.2.1 Análise dos corpos de prova	75
5.2.1.1 Rugosidade	75

5.2.1.2 Circularidade	77
5.2.2 Monitoramento do Processo de Retificação	78
5.2.2.1 Emissão Acústica	78
5.2.2.2 Vibração Mecânica	80
5.2.3 Tempos de deformação elástica e centelhamento	83
6 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	85
Referências Bibliográficas	88
Apêndices	98
Apêndice I - Programas CNC	98
Apêndice II - Esquema das V.I.s desenvolvidas	101

Lista de Figuras

2.1	Mecanismos de desgaste do rebolo	10
2.2	Parâmetros da operação de dressagem	15
2.3	Macroefeito e microefeito produzidos por mecanismos de dressagem	16
2.4	Três regiões de microfenômenos de remoção de cavacos na retificação	21
2.5	Exemplo de um ciclo de retificação cilíndrica de mergulho	24
3.1	Faixa de frequência da emissão acústica em comparação com outras ondas	32
3.2	Fontes de emissão acústica na retificação cilíndrica	33
3.3	Efeitos de folgas diferentes de peças na preparação do rebolo	34
3.4	Uso da detecção de contato para reduzir o tempo de retificação em vazio	35
3.5	Ciclo de retificação cilíndrica de mergulho com centelhamento acelerado	37
3.6	Dressagem ótima com monitoramento do processo	39
3.7	Modelo idealizado de retificação cilíndrica de mergulho	41
3.8	Sinal bruto e valor RMS	45
3.9	Janela de controle com limite estático	46
3.10	Janela de controle com limite dinâmico	47
4.1	Esquema do banco de ensaios	51
4.2	Esboço do corpo de prova	52
4.3	Seqüência de operações durante os ensaios	53
5.1	Rugosidade superficial, R_a x volume específico de material removido	60
5.2	Rugosidade superficial, $R_{máx.}$ x volume específico de material removido	60
5.3	Circularidade x volume de material removido	62
5.4	Valor médio da EA x volume específico de material removido, conjunto BM-12	63
5.5	Valor médio da EA x volume específico de material removido, conjunto Physical Acoustics	64
5.6	Desvio padrão da EA x volume específico de material removido	66
5.7	Vibração mecânica x volume específico de material removido	67
5.8	Corrente elétrica x volume específico de material removido	69
5.9	Sinal dos quatro sensores, EA (2x), Vibração e Potência, mostrando um ciclo completo de retificação	70

5.10	Sinais dos diversos sensores no início do ciclo de retificação	71
5.11	Sinais dos diversos sensores no fim do ciclo de retificação	72
5.12	Tempo de deformação elástica x avanço do rebolo no início, meio e fim de vida do rebolo	74
5.13	Tempo de centelhamento x condições de avanço no início, meio e fim de vida do rebolo	74
5.14	Rugosidade superficial, Ra x volume específico de material removido	75
5.15	Rugosidade superficial, R _{máx.} x volume específico de material removido	76
5.16	Circularidade x volume de material removido	77
5.17	Valor médio da EA x volume específico de material removido, conjunto BM-12	78
5.18	Valor médio da EA x volume específico de material removido, conjunto Physical Acoustics	79
5.19	Vibração mecânica x volume específico de material removido	80
5.20	Tempo de deformação elástica x condições de avanço no início, meio e fim de vida do rebolo	83
5.21	Tempo de centelhamento x condições de avanço no início, meio e fim de vida do rebolo	83
II.1	Interface do Programa de Aquisição	101
II.2	Diagrama do Programa de Aquisição	102

Lista de Tabelas

2.1	Algumas propriedades dos materiais abrasivos	05
2.2	Códigos de identificação utilizados em rebolos convencionais	08
2.3	Códigos de identificação utilizados em rebolos convencionais	08
2.4	Códigos de identificação utilizados em rebolos superabrasivos	09
2.5	Códigos de identificação utilizados em rebolos superabrasivos	09
4.1	Condições de usinagem com rebolo duro	56
4.2	Condições de usinagem com rebolo mole	57

Nomenclatura

Letras Latinas

b - largura de atuação do rebolo	[mm]
b_d - largura de atuação do dressador	[mm]
b_{dr} - largura real de atuação do dressador	[mm]
a - profundidade de penetração do rebolo	[mm]
a_d - profundidade de dressagem	[mm]
A_s - área real de contato rebolo-peça	[mm ²]
A_{sd} - área de dressagem	[mm ²]
D_e - diâmetro equivalente	[mm]
D_s - diâmetro do rebolo	[mm]
D_w - diâmetro da peça	[mm]
F'_n - força normal de corte específica	[N/mm]
G - relação entre volume de material usinado e volume de rebolo desgastado	
h_{cu} - espessura de corte unitário, por grão	[μm]
h_{cuef} - espessura de corte unitário efetivo, por grão	[μm]
h_{eq} - espessura de corte equivalente	[mm]
k_a - constante de rigidez de acoplamento	[N/mm]
k_s - constante de rigidez do rebolo	[N/mm]
k_w - constante de rigidez da peça	[N/mm]
l_c - comprimento de contato entre peça e rebolo	[mm]
n_w - rotação da peça	[rpm]
P' - potência de retificação por unidade de largura do rebolo	[kW/mm]
P'_{ch} - potência de formação do cavaco por unidade de largura do rebolo	[kW/mm]
P'_{pl} - potência de riscamento por unidade de largura do rebolo	[kW/mm]
P'_{sl} - potência de atrito por unidade de largura do rebolo	[kW/mm]
P_c - pressão crítica de corte	[N/mm ²]
Ra - rugosidade média	[μm]
Rmáx. - rugosidade máxima	[μm]

r_p - raio de ponta do dressador	[mm]
S_d - passo de dressagem	[mm]
T - tempo	[s]
T_u - profundidade de corte por grão	[mm]
$u(t)$ - velocidade de avanço controlada	[mm/min]
U_d - grau de recobrimento na dressagem	
u_m - velocidade de recuo do rebolo	[mm/min]
V_d - velocidade do dressador	[mm/min]
V_e - velocidade efetiva	[m/s]
v_f - velocidade de avanço	[mm/min]
V_s - velocidade periférica do rebolo	[m/s]
V_w - velocidade periférica da peça	[m/s]
W_t - altura das ondulações deixadas no rebolo pelo dressador	[mm]
Z'_w - volume de cavaco removido por unidade de largura do rebolo	[mm ³ /s]
Z_s - volume de rebolo desgastado	[mm ³]
Z_w - volume de cavaco removido	[mm ³]

Letras Gregas

η - ângulo de penetração	[rad]
ρ - relação entre força tangencial e normal	
τ - tempo de deformação elástica	[s]

Abreviações

EA - Emissão acústica
RMS - Raiz quadrada média
V.I. - Instrumento virtual

Resumo

HASSUI, Amauri, *Comparação Sobre a Utilização de Diferentes Sensores no Monitoramento do Processo de Retificação*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1997. 102 p. Dissertação (Mestrado)

A determinação de forma objetiva do fim da vida do rebolo é de fundamental importância para a minimização do custo do processo, pois evita a rejeição de peças, que nesta fase do processo possuem alto valor agregado e otimiza a utilização da ferramenta bem como dos tempos de dressagem.

Este trabalho tem como objetivo, mostrar o comportamento de diversas características do processo de retificação ao longo da vida do rebolo, com diferentes condições de operação, além de mostrar uma comparação do desempenho dos sensores de emissão acústica, vibração mecânica e corrente elétrica do motor, tanto na definição do momento de dressagem do rebolo, quanto no estabelecimento dos tempos de deformação elástica e centelhamento, que fazem parte do ciclo de retificação externa cilíndrica de mergulho

Para tal, foram usinadas peças cilíndricas de aço endurecido com dois tipos de rebolos, um considerado duro e outro mole, utilizando uma retificadora CNC, retificação de mergulho, e diversas condições de trabalho. A rugosidade das peças era medida após cada corte e foi o fator determinante do fim de vida da ferramenta. Simultaneamente, foram utilizados quatro sensores, dois monitorando, em tempo real, a emissão acústica, um a vibração, estando estes acoplados ao contraponto da máquina e um sensor de efeito Hall instalado no motor da máquina, que media a corrente elétrica consumida por este.

Os resultados deste trabalho indicaram que o sinal de vibração mecânica é o mais adequado para determinação do fim da vida do rebolo, a corrente elétrica do motor e os tempos de deformação elástica e de centelhamento não apresentam relação com o desgaste do rebolo e o sinal mais indicado para determinação destes tempos é a emissão acústica.

Palavras Chave

- Retificação, Monitoramento, Emissão Acústica, Vibração Mecânica

Abstract

HASSUI, Amauri, *Comparação Sobre a Utilização de Diferentes Sensores no Monitoramento do Processo de Retificação*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1997. 102 p. Dissertação (Mestrado)

The precise determination of the end of a grinding wheel life is very important to minimize the process cost because it avoids workpieces rejection that in this phase of the process have high aggregate value and optimize the utilization of the grinding wheel as well as the dressing time.

The main objective of this work is observe the behavior of various grinding process characteristics throughout the grinding wheel life, using different conditions of operation and show a performance comparison among acoustic emission, vibration and electric current of the motor as the definition of the dressing moment as to establish the elastic deformation time and sparkout, that are parts of the plunge external cylindrical grinding process cycle.

In the experiment were machined cylindrical workpieces of hardened steel with a hard grinding wheel and soft workpieces with a soft grinding wheel, using a CNC machine, plunge grinding and various cutting conditions. The roughness of the workpieces was measured after each cut and was the factor that determined the end of the wheel life. Simultaneously, were utilized four sensors, two monitoring the acoustic emission, one the mechanical vibration fixed at the tailstock and a Hall sensor installed at the machine motor which measured the electrical current consumed

The results of this work indicated that the mechanical vibration signal is the most appropriated to determine the end of the grinding wheel life, the electrical current of the motor and the times related to elastic deformation and sparkout did not present relation to the grinding wheel wear and the most sensible signal to detect these times is the acoustic emission.

Key Words

- Grinding, Monitoring, Acoustic Emission, Vibration

Capítulo 1

Introdução

O mundo vem sofrendo um processo de abertura comercial que expõem as empresas à uma acirrada competição pelo mercado consumidor, que por sua vez vem exigindo produtos com qualidade mais elevada a preços menores. Isto explica o fato das indústrias buscarem cada vez mais a otimização dos processos de fabricação dos produtos. WHITELEY (1996)

A retificação é o processo de usinagem mais utilizado quando há necessidade de elevada qualidade superficial, dimensional ou geométrica. Em função disto este processo é, via de regra, a etapa final da seqüência de operações de usinagem.

A otimização de um processo requer o conhecimento deste. Na retificação, isto vem sendo dificultado pois este é considerado um dos mais complexos processos de usinagem, por apresentar muitas variáveis de influência e ser muito sensível à pequenas variações destas. Em função disso, este processo é bastante dependente de operadores experientes, que tomam decisões baseadas em critérios subjetivos e portanto sujeitos a uma variabilidade grande.

Os sistemas de monitoramento dos processos de usinagem tem como uma de suas finalidades aumentar a repetitividade das operações através do fornecimento de informações objetivas a respeito dos fenômenos que estão ocorrendo no processo.

Este trabalho tem como objetivo, mostrar o comportamento de diversas características do processo de retificação ao longo da vida do rebolo, com diferentes condições de operação, além de mostrar uma comparação do desempenho dos sensores de emissão acústica, vibração mecânica e corrente elétrica do motor, tanto na definição do momento de dressagem do rebolo, quanto no estabelecimento dos tempos de deformação elástica e centelhamento, que fazem parte do ciclo de retificação externa cilíndrica de mergulho

A definição do momento correto de efetuar uma dressagem é muito importante, pois caso esta seja feita de forma conservadora, ou seja, antes do fim da vida do rebolo, ter-se-á um desperdício de abrasivo e principalmente um aumento significativo do tempo total de retificação, já que estes são bastante pequenos em função dos baixos volumes de material removido. Por outro lado, uma utilização do rebolo além de sua vida acarretará em rejeição da peça usinada, o que aumentará bastante o custo, já que as peças a serem retificadas possuem alto valor agregado, haja vista que em geral, a retificação é realizada na peça após todos os outros processos já terem sido executados.

O estabelecimento do momento de dressagem através de um sistema de monitoramento pode ser utilizado como uma ferramenta para otimizar o processo de retificação bem como para auxiliar na automação deste.

Este trabalho está dividido nos seguintes capítulos:

- Capítulo 1: Introdução;
- Capítulo 2: O Processo de Retificação - aqui procura-se descrever os princípios básicos do processo, enfatizando-se a retificação cilíndrica de mergulho e os fatores que influenciam na vida do rebolo;
- Capítulo 3: O Monitoramento dos Processos de Usinagem - neste capítulo são apresentados os fundamentos do monitoramento dos processos, enfocando-se o monitoramento do processo de retificação cilíndrica via emissão acústica, via vibração mecânica e via potência do motor;
- Capítulo 4: Procedimentos Experimentais - aqui são descritos os equipamentos e a metodologia utilizada nos ensaios;
- Capítulo 5: Resultados e Discussões - neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios e a discussão pertinente a estes;
- Capítulo 6: Conclusões e Sugestões Para Trabalhos Futuros - são apresentadas as conclusões dos resultados do capítulo 5 e indicadas sugestões para continuidade deste trabalho.

Capítulo 2

O Processo de Retificação

2.1 Introdução

A usinagem abrange as operações nas quais uma fina camada de material, denominada cavaco, é removida por uma ferramenta cortante. TRENT (1984). Malkin, 1989, especificou a retificação como sendo o processo de usinagem que utiliza partículas abrasivas duras como ferramentas cortantes.

A característica que distingue a retificação dos demais processos de usinagem é que nesta, durante o corte, têm-se várias arestas atuando simultaneamente, com geometrias de corte desconhecidas, pois a distribuição das arestas na superfície da ferramenta é aleatória. Outra característica peculiar do processo de retificação é apresentar muitas variáveis de influência e ser muito sensível à pequenas variações destas.

Como consequência do que foi afirmado nos parágrafos anteriores, a retificação é considerada um processo de fabricação complexo. Neste capítulo, serão apresentados os conceitos sobre retificação necessários à compreensão deste trabalho.

2.2 Rebolos

Rebolo é a denominação da ferramenta de corte utilizada no processo de retificação. Seus componentes básicos são: os grãos abrasivos, o material aglomerante e o material de recobrimento, caso este exista. Os componentes podem variar em relação ao material utilizado, bem como às dimensões, ou quantidades dos mesmos, sendo que as combinações destas variações é que vão definir as propriedades do rebolo, que por sua vez indicarão seu campo de aplicação.

A identificação dos rebolos é feita utilizando-se um código alfa-numérico, que é normalizado (ANSI B74.13-1977 e ISO 525-1975E). As características que definem um rebolo são: o material do grão abrasivo, o tamanho do grão abrasivo, a dureza do rebolo, a estrutura do rebolo e o material aglomerante. Nos códigos utilizados comercialmente, além de representar estas características, os fabricantes podem utilizar números ou letras de forma opcional, como prefixo ou sufixo do código para indicar alguma outra característica especial. As características mencionadas acima, facilmente encontradas na literatura, AULT (1986), MALKIN (1989) e VRIES (1991), serão descritas mais detalhadamente nos itens posteriores.

2.2.1 Características dos Rebolos

2.2.1.1 O Material do Abrasivo

Malkin, 1989, cita que os materiais dos grãos abrasivos podem ser classificados em convencionais e superabrasivos.

Dentre os abrasivos convencionais, destacam-se o óxido de alumínio, Al_2O_3 e o carboneto de silício, SiC. O primeiro é usado na retificação de materiais ferrosos e apresenta a menor dureza dentre os abrasivos convencionais, mas é relativamente mais resistente ao impacto. O segundo é comumente utilizado na usinagem de materiais não ferrosos ou com excesso de carbono, pois apesar de apresentar dureza mais elevada que o óxido de alumínio, tem a tendência de reagir com o ferro à temperaturas elevadas, causando assim um desgaste acentuado destes grãos quando utilizados na usinagem de materiais ferrosos não saturados de carbono. AULT (1986)

Os materiais superabrasivos são o diamante e o nitreto de boro cúbico, CBN. O diamante, em sua forma sintética, é utilizado na retificação de carbonetos, materiais cerâmicos, vidros e outros materiais refratários. O CBN é indicado para usinagem de materiais ferrosos, particularmente aços endurecidos e/ou ligados, por apresentar uma maior resistência ao impacto, ao calor e ser quimicamente menos ativo. O diamante não é utilizado em materiais ferrosos por apresentar afinidade química com o carbono, desgastando-se muito rapidamente, o que é indesejável numa ferramenta de custo tão elevado. AULT (1986)

A tabela 2.1 apresenta algumas propriedades dos materiais utilizados como grãos abrasivos.

Tabela 2.1 Algumas propriedades dos materiais abrasivos. MALKIN (1989)

	Óxido de Alumínio	Carboneto de Silício	Nitreto de Boro Cúbico	Diamante
Estrut. Cristalina	Hexagonal	Hexagonal	Cúbica	Cúbica
Densidade(g/cm ³)	3,98	3,22	3,48	3,52
Pto de Fusão(°C)	2040	~2830	~3200*	~3700**
Dureza Knoop (kg/mm ²)	2100	2400	4700	8000

* a 105 kbar (ponto triplo)

** a 130 kbar (ponto triplo)

Observando a tabela 2.1, constata-se que os superabrasivos possuem friabilidade (capacidade que o grão tem de se quebrar) maior que os abrasivos convencionais, pois possuem durezas maiores. Por isso o abrasivo sofrerá uma fratura ou fragmentação com mais facilidade quando do impacto ou engajamento com a peça. MALKIN (1989).

2.2.1.2 O Tamanho do Grão Abrasivo

Os grãos abrasivos são classificados, segundo seu tamanho, utilizando peneiras com aberturas padronizadas, sendo que aberturas maiores que ¼ de polegada são medidas diretamente em polegadas e menores são expressas através de índices (“mesh”) que indicam o número de aberturas por polegada linear. Os grãos abrasivos de uma amostra, não apresentam todos o mesmo tamanho, portanto a classificação é feita em porcentagens retidas nas diversas peneiras, que possuem índices diferentes. MALKIN (1989)

Como regra geral, grãos maiores possuem uma maior friabilidade, pois estes são fraturados para gerar os grãos menores.

Grãos maiores são usados para retificação onde deseja-se uma taxa de remoção de material elevada, sem grande preocupação com a qualidade superficial da peça. Grãos abrasivos menores são recomendados nas operações em que as tolerâncias e a qualidade superficial da peça são importantes. AULT (1986)

2.2.1.3 A Dureza do Rebolo

A dureza do rebolo indica quão difícil é a remoção do grão abrasivo deste. Esta característica é função de diversos fatores referentes à ancoragem do grão abrasivo tais como a quantidade de material aglomerante (porosidade), a resistência mecânica do mesmo e sua resistência ao desgaste, já que o desgaste deste vai gerar uma diminuição da área que suporta os esforços de corte atuantes no grão abrasivo, favorecendo a remoção deste.

A porosidade relaciona-se com a dureza do rebolo na medida que uma porosidade menor indica que os grãos abrasivos estão melhor envolvidos pelo material aglomerante, ou seja, estão melhor ancorados, sendo portanto mais difícil a sua remoção em processo. MALKIN (1989). Observa-se nos rebolos uma tendência de desgaste nos seus cantos. Isso se dá porque os grãos abrasivos aí situados são envolvidos por uma menor quantidade de aglomerante.

Como regra geral, utilizam-se rebolos duros na usinagem de peças com menor dureza e vice-versa, pois os materiais endurecidos não podem sofrer danos térmicos, o que é mais provável quando da utilização dos rebolos duros. AULT (1986). Este fenômeno está relacionado com o mecanismo de desgaste dos rebolos que será detalhado à frente.

2.2.1.4 A Estrutura do Rebolo

A estrutura do rebolo indica a concentração volumétrica de grãos abrasivos no mesmo. Caso esta concentração seja alta, o rebolo terá uma estrutura fechada, pois haverá uma menor quantidade de poros, e vice-versa. A dimensão média dos poros é influenciada pelo tamanho dos grãos abrasivos. Rebolos com grãos menores e uma mesma concentração volumétrica apresentam poros menores. Muitos fabricantes, a fim de diminuir a porosidade dos rebolos, efetuam uma mistura de tamanhos de grãos, inserindo grãos menores que preenchem os espaços deixados entre os maiores. MALKIN (1989)

Os limites de concentração volumétrica dos grãos abrasivos são impostos, por um lado, pela limitação do fator de empacotamento, que está relacionado com o tamanho do grão e sua distribuição. Grãos com formas mais regulares propiciam um melhor empacotamento. Por outro lado, o limite inferior de concentração volumétrica é imposto, pelo menos em relação aos rebolos com aglomerantes vitrificados, pela necessidade da manutenção de contatos entre grãos abrasivos para minimizar as distorções durante o processo de vitrificação, na fabricação do reboło. MALKIN (1989)

2.2.1.5 O Material Aglomerante

Os grãos abrasivos são reunidos no reboło por vários tipos de materiais, denominados aglomerantes. Tais materiais devem suportar as forças de retificação, as temperaturas do processo e as forças centrífugas sem se desintegrar, bem como resistir aos ataques químicos do fluido de corte. MALKIN (1989)

Os materiais aglomerantes podem ser divididos basicamente em: vitrificados, orgânicos e metálicos. Os vitrificados são frágeis e seguram com rigidez os grãos abrasivos, fraturando-se quando ocorre um aumento da força de retificação. Apresentam ainda altas temperaturas de fusão. Os aglomerantes orgânicos incluem resinas, borrachas e goma laca, tendo como características uma maior elasticidade e menor resistência ao calor do que os vitrificados. Os aglomerantes metálicos são mais resistentes ao calor que os orgânicos e mais resistentes ao impacto que os vitrificados. Estes aglomerantes são utilizados basicamente com superabrasivos. AULT (1986)

2.2.1.6 Especificação de Rebolos

2.2.1.6.1 Rebolos Convencionais

As tabelas a seguir reproduzem os conceitos das normas ANSI B74.13-1977 e ISO 525-1975E e foram apresentadas por Vries, 1991, sendo facilmente encontradas em outras referências.

Tabelas 2.2 e 2.3 - Códigos de identificação utilizados em rebolos convencionais. VRIES (1991)

Tipo de Abrasivo	Dureza			Tipo de Aglomerante
A - Óxido de Alumínio	Baixa	Média	Alta	B - Resinóide
C - Carboneto de Silício	A E	I M	Q V	BF - Resinóide Reforçado
Z - Óxido de Alumínio	B F	J N	R W	E - Goma Laca
Zirconado	C G	K O	S X	O - Oxi Clorado
	D H	L P	T Y	R - Goma Elástica
			U Z	RF - Goma Elástica Reforçada
				S - Silicatos
				V - Vitrificados
				Mg - Magnésia

51

↓

A

36

↓

L

5

↓

B

—

↑

Prefixo	Tamanho do Abrasivo				Estrutura		Marca do Fabricante
Código do fabricante indicando a especificação exata do abrasivo (opcional)	Grosso			Muito Fino	Densa	Aberta	Símbolo de identificação do fabricante (uso opcional)
	8	30	90	280	1	9	
	10	36	100	320	2	10	
	12	46	120	400	3	11	
	14	54	150	500	4	12	
	16	60	180	600	5	13	
	20	70	220		6	14	
	24	80	240		7	15	
					8	16	

2.2.1.6.2 Superabrasivos

Os superabrasivos são identificados de forma similar aos convencionais, conforme será apresentado nas tabelas 2.4 e 2.5.

$$G = \frac{Z_w}{Z_s} \quad (2.1)$$

Serão apresentados neste tópico os principais mecanismos de desgaste dos rebolos, relacionando estes com os parâmetros de caracterização topográfica.

Malkin, 1989, afirma que são três os principais mecanismos de desgaste do rebolo, conforme mostra a figura 2.1.

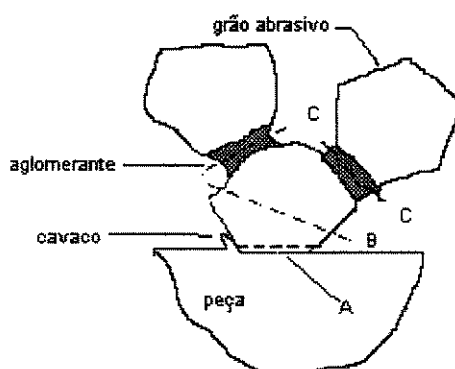


Figura 2.1 Mecanismos de desgaste do rebolo: A - desgaste por atrito, B - fratura do grão abrasivo e C - fratura do aglomerante devido ao desgaste.

O desgaste do tipo A ocorre devido ao atrito entre o grão abrasivo e o material da peça que está sendo usinada. Dentre os mecanismos de desgaste, este é o que apresenta menor contribuição volumétrica e está diretamente relacionado à dureza do grão abrasivo. Este mecanismo de desgaste, apesar da pequena contribuição volumétrica, é considerado o mais importante na definição do fim da vida do rebolo, pois tem uma forte influência nos esforços de corte, na temperatura do processo e na qualidade e integridade superficial da peça usinada. MALKIN (1989).

A fratura do grão abrasivo está relacionado com a friabilidade do mesmo. Outro fator que pode gerar fraturas no grão abrasivo é a fragilização deste, quando se retifica materiais com os quais este apresente afinidade química. MALKIN (1989).

A fratura do material aglomerante devido ao desgaste, quando da utilização de rebolos moles, é o mecanismo de desgaste que apresenta maior participação percentual no volume de

material desgastado do rebolo. Este mecanismo está ligado à friabilidade do material aglomerante e à forma de cavaco gerado no processo, pois cavacos longos atiram com o material aglomerante desgastando o mesmo, até que este apresente resistência mecânica menor que os esforços de corte e sofra uma ruptura. Rebolos duros apresentam uma maior quantidade de material aglomerante (em geral possuem menor porosidade), reduzindo a probabilidade de fratura do mesmo, sendo que o oposto ocorre com os rebolos moles, onde esta capacidade de perda de grãos é denominada auto-afiação. MALKIN (1989).

O material aglomerante pode atritar-se com os cavacos, caso estes sejam longos. Este atrito provoca um desgaste do aglomerante favorecendo a remoção do grão abrasivo pois reduz a ancoragem do mesmo. Esta diminuição de volume também pode ocorrer devido ao ataque químico dos fluidos de corte.

Dogan & Hawk, 1995, concluem em seu trabalho que a resistência ao desgaste não é uma propriedade intrínseca do material, pois é fortemente influenciada pelas condições de utilização do abrasivo. Os autores mencionam ainda que no caso da alumina (abrasivo utilizado neste trabalho) além dos fatores mencionados anteriormente, a resposta ao desgaste depende também da composição química dos contornos de grão e das fases presentes nestes.

2.2.2.1 - Vida dos Rebolos

Os mecanismos de desgaste mencionados no item anterior, atuam durante o processo de retificação, deteriorando as condições superficiais da ferramenta. Bianchi, 1990, afirmou que são três os mecanismos de perda de afiação dos rebolos: perda do macroefeito de dressagem, perda do microefeito de dressagem e entupimento das porosidades. A definição de macro e microefeito de dressagem será feita no próximo item. Em dado momento é necessário efetuar a afiação, ou dressagem do rebolo, para recompor sua capacidade de corte (agressividade do rebolo).

Ferraresi, 1977, definiu a vida de uma ferramenta como sendo o tempo entre duas afiações sucessivas necessárias, no qual ela trabalha efetivamente, obedecendo um determinado critério para estabelecimento do seu término. Na retificação este período de tempo é, geralmente, medido em volume de cavaco removido (Z_w) ou em volume específico de cavaco

removido (Z'_w) que consiste no volume de cavaco removido por largura de atuação do rebolo (b), sendo que o critério de fim de vida da ferramenta é definido por parâmetros do processo ou de qualidade da peça usinada. Bianchi, 1990, relacionou os principais critérios utilizados no processo de retificação para definir o fim da vida do rebolo, quais sejam:

Aumento excessivo das forças de corte: com o desgaste dos grãos abrasivos e entupimento dos poros do rebolo pelos cavacos, há uma elevação do atrito entre o rebolo e a peça usinada, aumentando as forças necessárias para remoção de material. Esse aumento de forças pode ser extremamente significativo, a ponto de superar a potência disponível no motor da máquina.

Integridade superficial da peça: o aumento do atrito mencionado no parágrafo anterior, gera também um aumento da temperatura na região do contato rebolo-peça. Se esta temperatura tornar-se excessivamente alta, pode ocorrer queima da peça com perdas de características mecânicas, trincas ou elevação das tensões residuais.

Erros de forma: o aumento de temperatura na região de corte gera deformações térmicas heterogêneas na peça, devido à variações na sua composição e microestrutura. Tais deformações provocam variações na profundidade de corte. A perda volumétrica heterogênea de material abrasivo é outro fator gerador de erros de forma. O primeiro destes fenômenos é típico de rebolos duros e o segundo de rebolos moles.

Vibração: a vibração do sistema máquina-ferramenta-peça está associada aos fenômenos de auto-excitação que ocorrem. O rebolo desgastado ou empastado de forma não uniforme, girando com uma rotação constante, provoca variações na força de corte, tornando-a oscilante. Uma força oscilante, atuando num sistema com massa e elasticidade como é o caso do sistema rebolo-peça, gera vibrações que danificam a rugosidade da peça.

Rugosidade da peça: o entupimento dos poros da estrutura do rebolo, provoca o riscamento da superfície da peça. Além disso, a vibração do sistema gera uma rugosidade maior, como citado no parágrafo anterior. Como em retificação trabalha-se com limites de rugosidade baixos, qualquer aumento de rugosidade torna-se significativo.

2.2.3 A Operação de Dressagem

Neste tópico serão apresentados os conceitos fundamentais da operação de dressagem na retificação cilíndrica. A decisão do momento de execução da dressagem é um dos objetivos deste trabalho.

A operação de dressagem tem três finalidades principais: a obtenção de desvios de posição mínimos entre a face de trabalho e o eixo de rotação do rebolo, o perfilamento da face de trabalho para uma operação de forma e a remoção da camada superficial do rebolo com grãos abrasivos gastos e poros entupidos por cavacos, para melhorar a agressividade da superfície de trabalho. OLIVEIRA (1988)

Na dressagem são utilizadas ferramentas que irão “usinar” o rebolo, removendo material até que os objetivos mencionados acima sejam atingidos. Esta “usinagem” é feita com um movimento radial do rebolo contra a ferramenta dressadora, que define a espessura de material removido, juntamente com um movimento axial do rebolo em relação a ferramenta, que visa a obtenção de uma superfície homogênea.

2.2.3.1 Tipos de Dressadores

Os dressadores são classificados de acordo com seu princípio de atuação cinemática em dressadores estáticos e dressadores rotativos.

Oliveira, 1988 e Bianchi, 1990, apresentaram um resumo com a descrição dos principais tipos de dressadores. Serão descritos aqui, apenas aqueles utilizados em rebolos convencionais.

Dressador de ponta única: é constituído de um suporte rígido para evitar vibrações, tendo um único diamante fixado na extremidade, podendo este ser bruto (para produção de perfis retilíneos) ou lapidado (para obtenção de perfis complexos). É um dressador estático, pois somente o rebolo gira. Os movimentos relativos entre rebolo e dressador na dressagem com este tipo de dressador são idênticos aos movimentos entre peça e ferramenta no torneamento.

Conglomerados: são compostos de vários diamantes fixados numa liga metálica. De acordo com a configuração diamante/liga, tem-se alguns tipos característicos como o fliese, que apresenta os diamantes alinhados e normalmente posicionados na vertical. Este tipo de dressador apresenta a vantagem de se desgastar regularmente na parte ativa, efetuar a dressagem mais rapidamente e possibilitar a obtenção de diversas formas geométricas no rebolo. A desvantagem dos conglomerados é a distribuição irregular dos grãos de diamante na massa metálica, o que as vezes proporciona uma dressagem de baixa qualidade.

Pastilha: é composta de grãos de diamante finos e alongados colocados lado a lado na massa metálica, formando uma fileira de diamantes. É muito utilizado em operações de perfilamento, substituindo com sucesso os diamantes de ponta única lapidados.

Rolo dressador: pode ser fabricado em aço sinterizado ou diamantado. A operação de dressagem é realizada pressionando-se o rolo contra o rebolo. Este método é rápido e preciso para duplicação de peças com o mesmo perfil, onde o perfil do rolo é passado para o rebolo e deste para a peça.

Rebolo dressador: também conhecido como disco dressador, é composto de um disco de liga metálica impregnado com diamantes, sendo muito usado no perfilamento de rebolos para operações de forma. Normalmente o disco apresenta a mesma largura do rebolo e pode trabalhar tanto cortando como esmagando o rebolo.

2.2.3.2 A Ação da Dressagem no Desempenho da Retificação

A operação de dressagem dos rebolos é responsável pela topografia inicial dos mesmos, influenciando portanto a força de corte, que por sua vez determina uma série de características do processo. Neste tópico será apresentado a relação entre condições de dressagem com ferramenta de ponta única e esforços de corte. A influência das forças, atuantes no processo, sobre outras características serão explanadas posteriormente.

A operação de dressagem gera no rebolo dois efeitos, que foram denominados macro e microefeitos de dressagem. OLIVEIRA (1988)

O macroefeito é a denominação dada à “rosca” gerada na superfície do rebolo, pelo dressador, devido à composição de movimentos de rotação e translação do rebolo.

O microefeito é causado pela fratura dos grãos abrasivos durante a dressagem, que gera novas arestas de corte.

A formação do macro e microefeito depende das condições de dressagem, friabilidade dos grãos abrasivos e granulometria do rebolo.

A figura 2.2 mostra os principais parâmetros da operação de dressagem com dressador de ponta única. Nesta figura, b_{dr} é a largura real de atuação do dressador; b_d é a largura de atuação do dressador; r_p o raio de ponta do dressador; W_t é a ondulação teórica da superfície do rebolo (macroefeito), S_d é o passo de dressagem (avanço por volta), a_d é a profundidade de dressagem e A_{sd} é a área de dressagem.

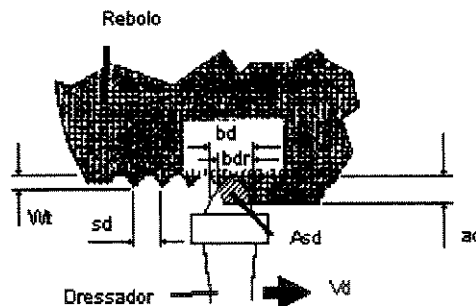


Figura 2.2 - Parâmetros da Operação de Dressagem. OLIVEIRA et alli (1992)

Nas dressagens mais grossas, com profundidade (a_d) e passo de dressagem (S_d) altos, ocorrem simultaneamente o macro e o micro efeito, gerando uma superfície duplamente agressiva (com alta capacidade de remoção de material). Nas dressagens mais finas, o macro efeito não atua e o micro efeito é atenuado, pois partículas pequenas são removidas ou fraturadas, gerando uma superfície menos agressiva.

Nos rebolos com granulometria mais grosseira, a dressagem produz sempre um microefeito agressivo, mas o tamanho grande do grão abrasivo atenua o alto macro efeito que seria gerado nas dressagens grosseiras. Nos rebolos com granulometria fina, o microefeito será

sempre pouco agressivo e a dressagem grosseira provocará um forte macroefeito, conforme observa-se na figura 2.3.

O macroefeito pode ser estimado pela equação:

$$W_t = \frac{(S_d)^2}{8r_p}$$

(2.2)

As condições de dressagem podem ser caracterizadas por um parâmetro denominado grau de recobrimento de dressagem, U_d . OLIVEIRA (1988). Este parâmetro é a razão entre a largura de atuação do dressador e o passo de dressagem, conforme a equação (2.3).

$$U_d = \frac{b_d}{s_d}$$

(2.3)





Rebolo com granulometria grosseira		Rebolo com granulometria fina	
		sd pequeno ad pequeno Ud grande	
Microefeito agressivo	Macroefeito agressivo		
		sd grande ad grande Ud pequeno	
Microefeito agressivo Macroefeito atenuado	Microefeito pouco agressivo com macroefeito		

Figura 2.3 - Macroefeito e microefeito produzidos por mecanismos de dressagem. OLIVEIRA & PURQUÉRIO (1989)

A agressividade de um rebolo é definida como sendo sua capacidade de remoção de material.

Existem vários métodos de se medir a agressividade de um rebolo. Oliveira, 1988, utilizou o método da esfera retificada criado por Nakayama, 1980. Este método consiste basicamente na usinagem de uma esfera sob força constante, onde é traçada a curva de penetração do rebolo na peça ao longo do tempo. Comparando-se dois rebolos com dressagens diferentes, o que apresentar maior penetração num mesmo intervalo de tempo é definido como mais agressivo.

A agressividade de um rebolo é influenciada por vários fatores. Bianchi et alli, 1996, concluíram que as condições de dressagem, a granulometria do rebolo, a friabilidade do material aglomerante, o tipo de grão abrasivo e a velocidade de corte são alguns destes fatores.

- A influência da granulometria na agressividade do rebolo pode ser vista na figura 2.3 e se dá através dos micro e macroefeitos.
 - A friabilidade dos grãos abrasivos influencia na agressividade durante o processo, sendo que grãos mais friáveis tendem a manter uma agressividade maior ao longo da vida do rebolo, pois se fraturam com mais facilidade, expondo novas arestas para o corte.
 - grau de recobrimento (U_d) definido anteriormente é um parâmetro utilizado para avaliar a dressagem do rebolo, sendo que em rebolos similares, um grau de recobrimento maior indica uma agressividade menor. A agressividade máxima para um dado rebolo é conseguida com grau de recobrimento unitário. Graus de recobrimento maiores implicam em agressividades menores e graus de recobrimento menores que a unidade indicam que partes do rebolo permaneceram sem dressar.
- OLIVEIRA (1988)

A agressividade exerce uma grande influência no processo de retificação. Como a agressividade é gerada no processo de dressagem, conclui-se que este é responsável por diversas características num processo de retificação. Oliveira, 1988, concluiu que, variando-se as condições de dressagem com o fim de se aumentar a agressividade do rebolo, pode-se obter diminuições da força de corte, da pressão crítica de corte (menor valor de pressão para que ocorra corte), com o aumento da vida do rebolo. A desvantagem do aumento da agressividade do rebolo, via diminuição do grau de recobrimento da dressagem, é o aumento da rugosidade da peça. É possível ainda, aumentar a flexibilidade de uma operação de retificação, utilizando a

mesma ferramenta para efetuar as operações de desbaste e acabamento, utilizando-se dressagens consecutivas que gerem superfícies no rebolo mais e menos agressivas, respectivamente. OLIVEIRA et alli (1992)

2.3 Características do Processo de Retificação

2.3.1 Classificação dos Processos de Retificação

A melhor forma de classificação dos processos de retificação é baseada em critérios de processo. A classificação que melhor se enquadra nesta filosofia é a da DIN 8589 que subdivide as operações, de acordo com a superfície do rebolo em contato com a peça e com o movimento de avanço do rebolo, em: tangencial de mergulho, tangencial de passagem, lateral (ou de face) de mergulho e lateral de passagem. A forma geométrica das superfícies obtidas são subdivididas em cilíndrica externa, cilíndrica interna, plana e plana rotativa. OLIVEIRA (1988). De acordo com o tipo de fixação da peça, a retificação cilíndrica externa pode ser classificada em retificação entre pontas ou sem centros (centerless).

Neste trabalho foi utilizada a retificação cilíndrica externa tangencial de mergulho com a peça fixada entre centros. Neste tipo de retificação, a peça e o rebolo possuem movimento de rotação e o rebolo avança perpendicularmente à superfície retificada, sem apresentar o movimento paralelo à mesma.

2.3.2 Parâmetros de Caracterização

Alguns parâmetros foram criados para facilitar a compreensão de alguns fenômenos do processo de retificação e também para possibilitar a comparação de grandezas entre processos com geometria distintas. A seguir serão apresentados tais parâmetros.

O diâmetro equivalente, D_e , representa o grau com que a superfície do rebolo (no caso da retificação tangencial) e a peça se adaptam. Pode-se afirmar também que o diâmetro equivalente é aquele que o rebolo deve ter para proporcionar a mesma geometria de corte da operação plana tangencial. LINDSAY (1986)

O diâmetro equivalente é dado por:

$$D_e = \frac{D_s}{1 \pm (D_s / D_w)} \quad (2.4)$$

onde D_s é o diâmetro do rebolo e D_w o da peça

O sinal (-) é utilizado para retificação cilíndrica interna, onde o contato é maior e o sinal (+) para retificação cilíndrica externa. O diâmetro equivalente é, portanto um parâmetro que interrelaciona a operação tangencial plana com a cilíndrica tangencial interna e externa para qualquer diâmetro de rebolo e peça.

Outro parâmetro importante é a espessura de cavaco equivalente, h_{eq} , que pode ser definida como a relação entre a taxa de remoção e a velocidade de corte (ou aproximadamente, a velocidade periférica do rebolo). Este parâmetro pode ser utilizado para transferir resultados entre processos de retificação, pois é universal, podendo ser usado em qualquer tipo de retificação. BRINKSMEIER et alli (1993). A expressão matemática para h_{eq} é:

$$h_{eq} = a \frac{V_w}{V_s} \quad (2.5)$$

onde V_s e V_w correspondem à velocidade periférica do rebolo e da peça respectivamente e a é, na retificação cilíndrica de mergulho, o avanço (que pela norma brasileira é representada por f).

O terceiro parâmetro muito utilizado pelos pesquisadores da área de retificação é o comprimento de contato, l_c , que é definido como sendo o comprimento em que um grão abrasivo permanece em contato com a peça durante uma rotação do rebolo. Muitos pesquisadores, LINDSAY (1986), MALKIN (1989) e VRIES (1991), tem utilizado como uma aproximação deste parâmetro, o arco geométrico percorrido pelo grão abrasivo. Tal aproximação é dada por:

$$l_c = \sqrt{aD_c} \quad (2.6)$$

Na retificação plana, D_c é igual a D_s .

Muito tem-se pesquisado a respeito do comprimento de contato, pois este sofre influência de vários fatores, tais como deformações do sistema peça-ferramenta devido aos esforços mecânicos ou aumento de temperatura, utilização de fluido de corte, escolha do rebolo, etc.. O modelo aceito como consenso entre os pesquisadores considera o comprimento de contato como uma soma do comprimento geométrico e de uma parcela referente aos demais fatores. GU & WAGER (1990), WAGER & GU (1991), ZHOU & LUTTERWELT (1992), ZHANG et alli (1992), ROWE et alli (1993) e QI et alli (1994)

2.3.3 Mecanismo de Formação de Cavaco

O mecanismo de formação de cavaco na retificação é extremamente complexo e portanto, muito difícil de ser totalmente compreendido. Os pesquisadores que estudam este fenômeno valem-se de aproximações para obtenção de resultados que possam fornecer algumas informações sobre o processo.

As geometrias das arestas de corte são variáveis e desconhecidas, bem como a profundidade de usinagem que está sendo utilizada. Alguns pesquisadores verificaram que a geometria da ferramenta abrasiva comporta-se como se fosse uma ferramenta convencional com geometria negativa. Em função disto adotaram como aproximação a forma esférica para os grão abrasivos. NUSSBAUM (1987), SHAW (1993) e CHEN & ROWE (1996)

O modelo mais aceito do mecanismo de formação de cavaco é o mostrado na figura 2.4. Neste modelo, aceita-se que o contato entre grão abrasivo e peça se dá ao longo de três regiões, quais sejam:

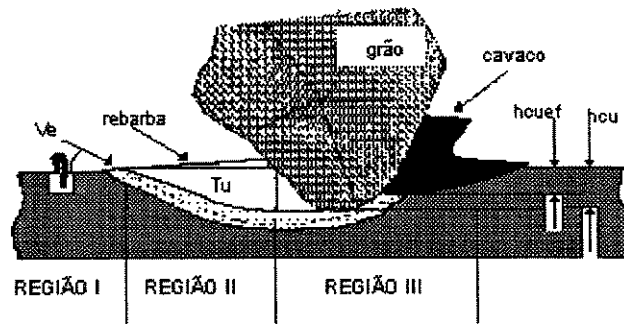


Figura 2.4 Três regiões de microfenômenos de remoção de cavacos na retificação. BIANCHI (1992)

Região I: ocorre apenas deformação elástica do material da peça e do rebolo, principalmente do material aglomerante. A energia que está sendo fornecida ao processo é consumida em deformações, atrito e calor.

Região II: a aresta cortante do grão abrasivo apresenta uma maior penetração na peça. O material da peça passa então a apresentar deformação plástica, escoando lateralmente e recuperando-se da deformação elástica do estágio I. Com isso, o atrito com o abrasivo é aumentado. A energia continua sendo dissipada por deformações, atrito e calor.

Região III: corresponde a um aumento da espessura de penetração, com aumento da pressão exercida pelo abrasivo até que se atinja o valor crítico, P_c (pressão mínima para que ocorra a ruptura do material). A partir deste ponto ocorre a formação de cavacos por cisalhamento.

Devido às deformações ocorridas, somente uma parcela da espessura de penetração da aresta (h_{cu} na figura 2.4) penetra na peça.

Alguns modelos de força de retificação consideram que a força total seja o somatório das forças exercidas por cada grão abrasivo individualmente.

O cavaco é removido da região de corte pela porosidade do rebolo, sendo posteriormente expulso da ferramenta pela ação da força centrífuga. Se o cavaco atingir uma dimensão maior do que o poro do rebolo, será comprimido contra este, incrustando-se em sua

superfície, o que provocará a perda de poder de corte do rebolo, aumento da rugosidade, queima na peça e vibrações no sistema.

2.3.4 Forças de Corte

Muitos pesquisadores desenvolveram modelos de forças de corte na retificação, onde os fatores levados em consideração foram basicamente: a relação de velocidades da peça e do rebolo, o diâmetro equivalente, a especificação do rebolo, o fluido de corte utilizado, as condições de dressagem, as condições de retificação, o material que está sendo usinado, a condição topográfica do rebolo e a rugosidade superficial da peça entre outros. No entanto, tais modelos são de difícil aplicação prática, pois exigem a determinação experimental de uma série de coeficientes. TÖNSHOFF et alli (1992)

Malkin, 1989, fez um estudo da potência específica de corte, P' , ou seja a potência consumida por unidade de largura do rebolo, definindo-a como sendo composta de três parcelas:

$$P' = P'_{CH} + P'_{PL} + P'_{SL} \quad (2.7)$$

onde:

P'_{ch} = potência devido à formação de cavaco,

P'_{pl} = potência de riscamento e

P'_{sl} = potência de atrito e escorregamento entre peça e rebolo.

Cada uma das parcelas foi definida por Malkin através das seguintes equações:

$$P'_{CH} = 13,8 V_w \cdot a \quad (2.8)$$

$$P'_{PL} = 1,0 \cdot 10^{-3} V_s \quad (2.9)$$

$$P'_{SL} = (C_1 + C_2 \cdot \frac{V_w}{V_s} d_e) d_e^{1/2} \cdot a^{1/2} \cdot A_s \quad (2.10)$$

onde:

C_1 e C_2 são constantes do par rebolo-peça e A_s é área real de contato dos grãos abrasivos (considerando a rugosidade do par rebolo-peça)

A expressão (2.8) é baseada na constante da energia específica de formação do cavaco ($13,8 \text{ J/mm}^3$) que, segundo Malkin, é válida para aços de várias composições, bem como para os tratados termicamente. Dividindo a equação (2.8) pela velocidade periférica do rebolo, obtém-se a força tangencial de retificação devido à formação do cavaco por unidade de largura do rebolo. Considerando-se a relação entre força tangencial e normal chega-se a:

$$F'_n = h_{eq} \cdot \frac{13,8}{\rho} \quad (2.11)$$

onde ρ é a relação entre as forças tangencial e normal de retificação ($\rho = F_t/F_n$)

A expressão obtida acima tem a mesma forma daquelas obtidas por outros autores, ou seja, um produto de uma constante pela espessura h_{eq} .

Analogamente pode-se dividir as equações (2.9) e (2.10) pela velocidade da peça e obter-se as forças de riscamento e de atrito por unidade de largura.

2.3.5 O Ciclo de Retificação Cilíndrica de Mergulho

Define-se o ciclo de retificação como o conjunto de etapas que ocorrem em uma operação desde a colocação até a saída da peça, dentro de especificações pré-determinadas, da máquina. Para cada uma das etapas é associado um tempo, cuja somatória irá resultar no tempo total de retificação. OLIVEIRA (1988)

A figura 2.5 mostra um ciclo de retificação ideal comparado com um real.

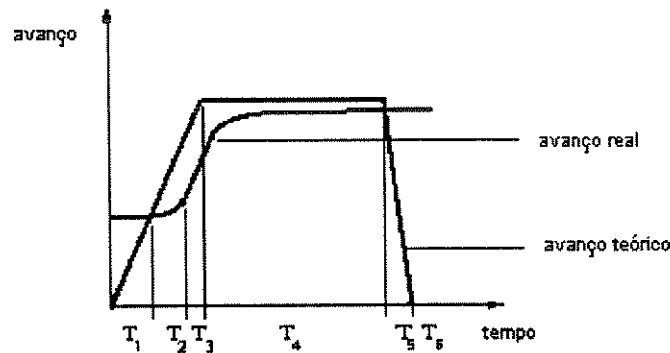


Figura 2.5 Exemplo de um ciclo de retificação cilíndrica de mergulho. OLIVEIRA (1988)

Na figura observa-se que o ciclo de retificação é composto das seguintes etapas:

- T_1 : movimentação do rebolo em direção à peça sem remoção de material com avanço de trabalho.
- T_2 : início do contato rebolo-peça. Nesta fase acontecem deformações elásticas da peça e do eixo do rebolo com conseqüente atraso do avanço real em relação ao teórico. Também é nesta fase que se inicia a geração de cavaco.
- T_3 : remoção de material com avanço real igual ao avanço nominal (ou teórico).
- T_4 : fase chamada de centelhamento, faiscamento ou “spark out”. Nesta fase mantém-se o rebolo na posição final de avanço, enquanto a peça e o eixo do rebolo recuperam-se da deformação elástica sofrida no início do ciclo. Nesta fase atinge-se o diâmetro final da peça e, sem ela, muito provavelmente não conseguir-se-ia as tolerâncias dimensionais e de forma, nem a rugosidade necessárias à peça, já que o diâmetro da peça no início do centelhamento ainda é bem diferente do diâmetro final desejado.
- T_5 : recuo do rebolo.
- T_6 : tempo gasto com uma possível dressagem. Este tempo é constituído por tempo de deslocamento do rebolo até o dressador, mais tempo de dressagem e tempo de retorno do rebolo à posição de corte. Caso a retificação seja manual, tem-se ainda o tempo de correção da posição do rebolo.

A otimização do processo de retificação consiste na minimização dos tempos mencionados na figura 2.5.

O objetivo deste trabalho é contribuir com a otimização do ciclo de retificação, minimizando T_6 , através do aumento da vida do rebolo e conseqüente diminuição do número de dressagens e também minimizando T_4 , através do estabelecimento preciso do momento de fim do centelhamento.

2.3.6 Temperaturas e Danos Térmicos

O processo de retificação, como já mencionado anteriormente, gera cavacos de pequenas proporções, utiliza como ferramenta (no caso do óxido de alumínio com aglomerante vitrificado) um mal condutor de calor e consome muito mais energia por volume de cavaco removido do que outros processos de usinagem, pois gera muito mais atrito e deformações. MALKIN (1989)

Shaw, 1993, afirmou que em retificações finas, 80% do total de calor gerado no processo é dissipado pela peça. Isto gera altas temperaturas na região de corte, que podem causar vários tipos de danos térmicos à peça, tais como queima, transformações de fase, amolecimento da camada superficial com possível reendurecimento, tensões residuais de tração, trincas e redução da resistência à fadiga. MALKIN (1989)

Os danos térmicos apresentam-se como um limitador da produtividade do processo de retificação. Em função disso, muitos pesquisadores tem desenvolvido modelos e métodos de medição em tempo real da temperatura na região de corte. GUO & MALKIN (1996), SHAW (1994), LAVINE (1991), HUANG et alli (1991), GUO (1996), UEDA et alli (1995), e MALKIN (1989)

Segundo Malkin, 1989, as temperaturas de pico na retificação aproximam-se do ponto de fusão do material sendo usinado, o que não chega a ser crítico, devido à duração do contato que é muito curta. A maioria dos danos térmicos ocorrem logo abaixo da superfície onde a peça recebe um fluxo contínuo de calor proveniente da zona de retificação. A temperatura da peça como um todo é outro fator importante, pois a dilatação da mesma leva a distorções e imprecisões e a dificuldade de obtenção de tolerâncias apertadas.

Lavine, 1991, analisou a influência da dissipação de energia nos planos de cisalhamento dos cavacos, com a finalidade de desenvolver um modelo que estime a temperatura de corte. Com isto, ele concluiu que no caso de rebolos convencionais, a hipótese de que toda a energia é dissipada pelo atrito das áreas desgastadas do grão abrasivo, conduz a bons resultados, mas quando da utilização de CBN, se for desprezada a contribuição da deformação e cisalhamento do cavaco nos planos de cisalhamento, um valor subestimado de temperatura de até 92% pode ser obtido.

Como resumo dos modelos de temperatura existentes, pode-se afirmar que estes utilizam-se de uma fonte de calor deslocando-se sobre a peça e efetuam um balanço energético da região de corte. A diferença entre estes reside no maior ou menor número de variáveis consideradas e na forma como estas são avaliadas. TÖNSHOFF et alli (1992)

Os principais métodos de medição da temperatura na região de corte são: o do termopar, utilizado pela maioria dos pesquisadores, entre estes Guo & Malkin, 1996, e o da medição de radiação infravermelha emitida pelo contato rebolo-peça desenvolvido por Ueda et alli, 1995.

2.3.6.1 Queima da Peça

Queima da peça é a denominação comum para os problemas de transformações de fases, amolecimento da camada superficial com possível reendurecimento, oxidação da camada superficial e trincas superficiais que muitas vezes acontecem no processo de retificação. SHAW (1993)

A queima é visível, nas peças de aço, por apresentar uma coloração diferente, consequência da formação de uma camada de óxidos, que é, normalmente, removida na fase de centelhamento. Mas a ausência desta coloração não significa necessariamente que a queima não ocorreu ou que a camada queimada tenha sido totalmente removida. MALKIN (1989)

Uma peça retificada sem queima geralmente apresenta algum amolecimento superficial, devido ao revenimento desta, mas as camadas subsuperficiais permanecem com sua dureza original. Já uma peça com queima apresenta um reendurecimento de sua camada superficial, devido à reaustenitização seguida pela formação de martensita não revenida, que por ser uma

fase extremamente dura e frágil atua de forma adversa no tocante à resistência à fadiga do material. Além disso, a reaustenitização provoca um amolecimento das camadas subsuperficiais.

Shaw, 1993, concluiu que as transformações de fase que ocorrem na retificação são mais complexas do que as que ocorrem em tratamentos térmicos, porque envolvem intervalos de tempo muito pequenos de exposição do material às altas temperaturas. Estes intervalos são suficientes para que ocorram transformações de fase, mas não o são para decomposição dos carbonetos e homogeneização do carbono.

2.3.6.2 Revenimento

Os aços são retificados, geralmente, após temperados. O revenimento ocorre devido ao aquecimento na retificação com rebolos desgastados e causa amolecimento junto à superfície acabada. A camada afetada pode ser minimizada com a utilização de velocidades maiores da peça e/ou do rebole, pois isto implica em menores forças de corte e menor tempo de aquecimento. As camadas revenidas em operações de desbaste são mais profundas e podem exigir uma operação de acabamento para sua remoção. Já as camadas decorrentes de operações mais finas são removidas, em geral, na fase de centelhamento do processo. MALKIN (1989)

2.3.6.3 Tensões Residuais

O processo de retificação normalmente gera tensões residuais na superfície acabada, devido à deformação plástica não uniforme nesta região. As interações mecânicas do rebole com a peça resultam principalmente em tensões residuais de compressão, devido às deformações plásticas. Tal tipo de tensão é positiva, pois aumenta a dureza superficial, bem como a resistência à fadiga da peça. Por outro lado, as tensões residuais de tração geram micro trincas superficiais que favorecem a falha por fadiga. As tensões residuais de tração são de origem térmica, pois as temperaturas desenvolvidas na região de corte provocam uma expansão térmica da superfície que é parcialmente restrita pela subsuperfície mais fria. Isto gera tensões de tração na subsuperfície e de compressão na superfície que, se suficientemente grandes, podem gerar deformação plástica na superfície. Durante o resfriamento subsequente,

após a retificação, o material deformado plasticamente tende a contrair mais que o material da subsuperfície, o que gera tensões de tração no primeiro. Caso ocorram mudanças de fase em função da temperatura de retificação, o fenômeno descrito torna-se mais complexo, pois estas transformações normalmente envolvem variações de volume. MALKIN (1989)

Como foi explanado, as tensões residuais estão ligadas ao gradiente de temperaturas entre a superfície e o núcleo da peça. Portanto, para evitar o aparecimento destas tensões deve-se minimizar esta diferença, o que pode ser conseguido através da utilização de rebolos mais agressivos, retificações menos severas e uso adequado do fluido de corte. Lau et alli, 1990, sugerem que no caso de aços com baixo teor de carbono, a aplicação de tensões de tração na fixação da peça, perpendicularmente à direção de retificação, minimizam as tensões residuais de tração pela interação das deformações térmicas com as mecânicas.

Capítulo 3

Monitoramento dos Processos de Usinagem

3.1 Introdução

A otimização dos processos de usinagem é um fenômeno que sempre foi de interesse das indústrias e tal interesse aumentou sobremaneira nos últimos anos devido ao aumento da concorrência a que estas foram expostas. O monitoramento dos processos de usinagem é uma das ferramentas de otimização dos mesmos e, portanto, vem despertando interesse crescente dos pesquisadores, engenheiros e técnicos do meio.

O monitoramento se aplica, segundo Dornfeld et alli, 1993, nos seguintes elementos do processo:

- Nas máquinas, para diagnósticos e monitoramento de performance.
- Nas ferramentas, para posicionamento, estado de afiação, alinhamento, lubrificação, etc.
- Nas peças, para monitoramento de geometria e dimensão, rugosidade superficial, tolerâncias e danos térmicos.
- Nos processos propriamente ditos, para melhor compreensão do mecanismo de formação de cavacos, monitoramento das temperaturas e consumo de energia entre outros.

O monitoramento das máquinas ferramentas tem como objetivo aumentar a confiabilidade das mesmas, detectando tanto as falhas catastróficas, onde o processo precisa ser paralisado, quanto as degradações dos subsistemas que compõem o processo, gerando um indicador do momento em que tais degradações atinjam um nível crítico.

Dornfeld et alli, 1993, apresentam diversas características dos sistemas de monitoramento que possibilitam a classificação dos mesmos. Dentre estas tem-se: tempo de resposta (respostas em tempo real ou após o ciclo), necessidade de contato entre o sensor e o componente monitorado, tipo de medição (direta, que mede a característica propriamente dita, como o diâmetro em uma operação de torneamento ou a medição óptica do desgaste da ferramenta; ou indireta, que possibilita a inferência da característica de interesse) e finalidade (o sistema de monitoramento controla o processo ou fornece diagnósticos da máquina).

Byrne et alli, 1995, afirmam que os sensores utilizados em sistemas de monitoramento devem possuir certas características tais como: possibilitar a medição o mais próximo possível da região de corte, não reduzir a rigidez da máquina ferramenta, não restringir o espaço de trabalho e os parâmetros de corte, ser resistente ao desgaste, ao ataque químico dos fluidos de corte, aos cavacos e às influências mecânicas, eletromagnéticas e térmicas, ser de fácil reposição, ter baixos custos, funcionar independentemente da ferramenta e da peça, possuir características metrológicas adequadas e possuir uma capacidade de transmitir os sinais de forma confiável. Certos sistemas de monitoramento atendem apenas a algumas destas características, sendo inadequados para uso industrial, ou restritos ao uso acadêmico.

Os sensores disponíveis para aplicação em máquinas ferramentas possuem a capacidade de detectar: fogo/fumaça, nível de som, imagem, presença de óleo, temperatura, contato, desgaste da ferramenta (através da dimensão da mesma), posição de arestas de corte, vibração mecânica, limites de curso, posição da ferramenta/peça, força, danos na ferramenta, temperatura do fluido de corte e nível do mesmo no reservatório, força/torque, deformações térmicas, rugosidade da superfície usinada, distribuição de temperatura na região de corte, pH do fluido de corte, emissão acústica do processo, velocidades de avanço da ferramenta, temperatura, umidade, pressão e quantidade de dióxido de carbono no ambiente. BYRNE et alli (1995)

A filosofia de implementação de qualquer metodologia de sensoreamento para diagnósticos ou monitoramento de processos pode ser dividida em dois enfoques simples: o primeiro usa as informações dos sensores para mostrar relações entre as características do processo, após determinação do comportamento considerado normal e observa o comportamento dos sinais até que estes apresentem um desvio do padrão inicial indicando um

problema. O segundo enfoque tenta determinar um modelo que relacione os sinais advindos dos sensores ao mecanismo de corte em questão e depois utiliza o modelo para prever o comportamento do processo. DORNFELD et alli (1993)

Os estudos a respeito dos sistemas de monitoramento mostram que as medições diretas são mais confiáveis porém mais difíceis de serem implantadas. A recíproca é verdadeira para as medições indiretas que, por isso, são mais utilizadas na prática. Além disso alguns sensores são mais adequados ao monitoramento de certas características do que outros, não havendo um sensor que atenda de forma ótima todas as necessidades dos sistemas manufatureiros. Devido a este fato, tem-se utilizado de forma crescente vários sensores (sistemas multi-sensores) atuando simultaneamente, tanto na indústria quanto em pesquisas acadêmicas, como pode observar-se nos trabalhos de Inasaki (1991) e Chang & Dornfeld (1995), entre outros.

Este trabalho monitorou a emissão acústica, a vibração e a corrente elétrica consumida pelo motor num processo de retificação, com a finalidade de estabelecer o momento de dressagem (fim de vida) de dois tipos de rebolos. Portanto, uma apresentação mais detalhada do monitoramento do processo de retificação utilizando estes sensores será feita a seguir, abordando pontos como a implementação, o processamento dos sinais e as estratégias mais comumente utilizadas.

3.2 A Emissão Acústica no Monitoramento da Retificação

A definição mais abrangente de emissão acústica foi a fornecida por Beattie, 1983:

“Emissão acústica (EA) pode ser definida como ondas acústicas geradas por um material quando sujeito a estímulos externos”.

Nos sistemas de monitoramento dos processos que se utilizam da emissão acústica, esta é captada por um sensor que fornece um sinal elétrico definido como sinal de emissão acústica. As características deste sinal são determinadas pelo mecanismo que o gerou, a forma como ele se propaga pelo material e pelo sensor. BEATTIE (1983)

Segundo a definição de Beattie, 1983, a emissão acústica é formada por ondas acústicas. Blum & Dornfeld, 1990, afirmaram que a faixa de frequências em que estas ondas atuam vão de 50 kHz a 1000 kHz, não sendo portanto audíveis, conforme pode ser observado na figura 3.1, que mostra a faixa de frequência de diversos fenômenos, incluindo a emissão acústica.

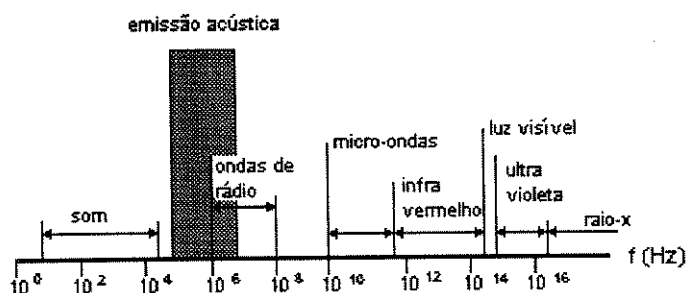


Figura 3.1 - Faixa de frequência da emissão acústica em comparação com outras ondas.

BLUM & DORNFELD (1990)

A emissão acústica tem sido extensivamente utilizada no monitoramento do processo de retificação devido às características deste propiciarem isto. A emissão acústica, por captar sinais em alta frequência e, por isso, livre dos ruídos advindos de fontes que não interessam especificamente ao processo, é um método de monitoramento bastante sensível e, portanto, adequado ao monitoramento da retificação, que possui taxas de remoção de cavaco bastante baixas. DORNFELD (1992) e KLUFT (1994)

A figura 3.2 apresenta as fontes de geração de emissão acústica na região de corte, no processo de retificação. Pode-se ver nesta figura que todos os fenômenos diretamente ligados ao processo, como a fratura do ligante e do abrasivo, as trincas do grão abrasivo, o atrito entre o grão e a peça e a deformação elástica do material que está prestes a se transformar em cavaco geram emissão acústica. Estes fenômenos estão diretamente ligados ao desgaste do rebolo, isto é, o desgaste influencia todos estes fenômenos e é influenciado por eles. Devido a isto é que se decidiu, neste trabalho, monitorar a emissão acústica gerada pelo processo, com o fim de acompanhar o desgaste do rebolo e o conseqüente crescimento da rugosidade da peça retificada.

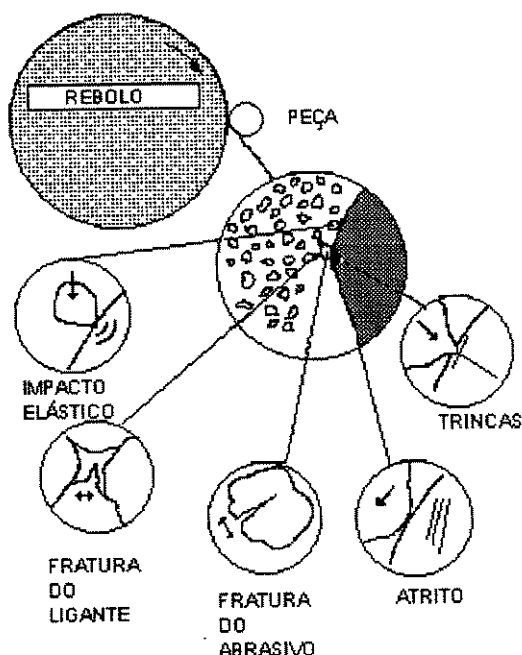


Figura 3.2 - Fontes de emissão acústica na retificação cilíndrica. HUNDT et alli (1994)

O sinal de emissão acústica captado no processo de retificação, apesar de, como já afirmado, captar sinais de alta frequência insensíveis a muitos ruídos externos ao processo, pode conter ainda ruídos provenientes de contatos e deformações dos componentes da máquina, sendo estes ruídos considerados sinais no caso de diagnóstico da mesma. DORNFELD (1992). Portanto, o sensor deve estar fixado o mais próximo possível da região de corte.

A emissão acústica necessita de um meio físico de propagação, sendo que na retificação os mais utilizados são os componentes metálicos da máquina que estão em contato com a região de corte, como o contra-ponto, o cubo e o eixo do rebolo (o sensor é fixado nestes locais). O sensor pode ainda ser fixado no tubo de fluido de corte, utilizando este como meio físico de propagação do sinal. CHANG et alli (1992). Conforme mencionado por Beattie, 1983, o sinal de emissão acústica sofre uma atenuação a cada interface que este ultrapassa. Portanto, procura-se sempre lubrificar estas interfaces, aumentando-se a área real de contato e minimizando, com isso, estas atenuações.

A seguir serão apresentadas as aplicações da emissão acústica no processo de retificação mais comumente encontradas na literatura, sendo que será enfatizada a retificação

cilíndrica, pois esta é a mais utilizada na indústria de autopeças, enquanto a retificação plana tangencial é utilizada quase que exclusivamente na ferramentaria. Em função disto utilizou-se a primeira neste trabalho.

3.2.1 A Detecção de Contato Peça/Rebolo

A detecção de contato é realizada basicamente com duas finalidades: otimização do ciclo de retificação, via diminuição do tempo que o rebolo permanece em contato com o ar em avanço de trabalho (o sistema para este fim é chamado “gap-less”) e detecção de colisões.

A figura 3.3 apresenta o início do ciclo de retificação cilíndrica de mergulho num processo sem monitoramento desta característica. As peças chegam à operação de retificação com tolerâncias relativamente abertas denominadas “folgas flutuantes”, pois estas variam de uma peça para outra. Em função destas folgas flutuantes, o rebolo se aproxima da peça em avanço rápido, mas interrompe este avanço numa posição distante da peça, deixando uma margem de segurança apropriada, a fim de evitar colisão. Uma vez atingida a posição de segurança, o avanço comuta para a velocidade de desbaste. Utilizando-se este procedimento, o rebolo entra em contato com a peça sempre tardiamente, com muito tempo não produtivo perdido com retificação em vazio. KLUFT (1994)

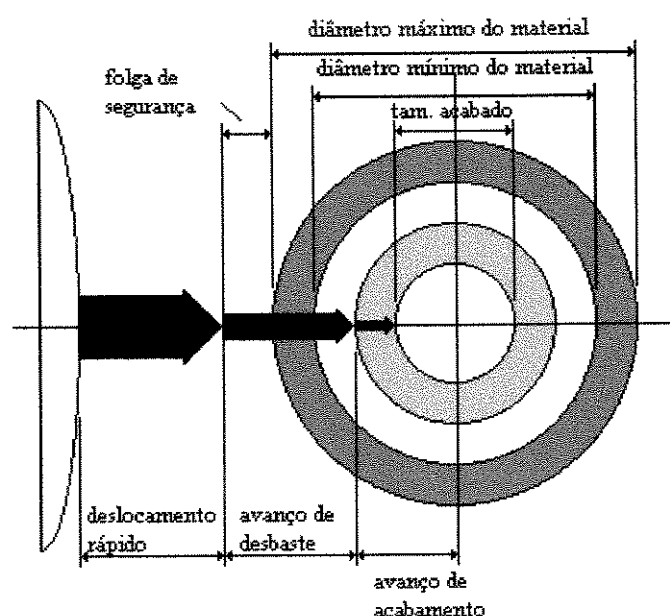


Figura 3.3- Efeitos de folgas diferentes de peças na preparação do rebolo. KLUFT (1994)

O “gap-less” visa minimizar o tempo não produtivo mencionado anteriormente, conforme pode-se observar na figura 3.4, através da utilização de uma velocidade de avanço maior que a de desbaste (mas menor que o avanço rápido da máquina) entre as posições de segurança e a posição real de cada peça. Quando o rebolo realmente entra em contato com a peça, a emissão acústica detecta este contato e informa este acontecimento ao comando da máquina, que imediatamente comuta a velocidade de avanço do rebolo. Kluft , 1994, utilizou um limite pouco acima do nível de ruídos para definir este contato. Felipe Jr., 1996, concluiu que utilizando-se o “gap-less” ocorre uma penetração do rebolo na peça com velocidade de avanço maior que a de desbaste. Esta penetração apresenta uma relação direta com a velocidade de aproximação e com o nível do sinal de emissão acústica estabelecido para detectar este contato (sensibilidade).

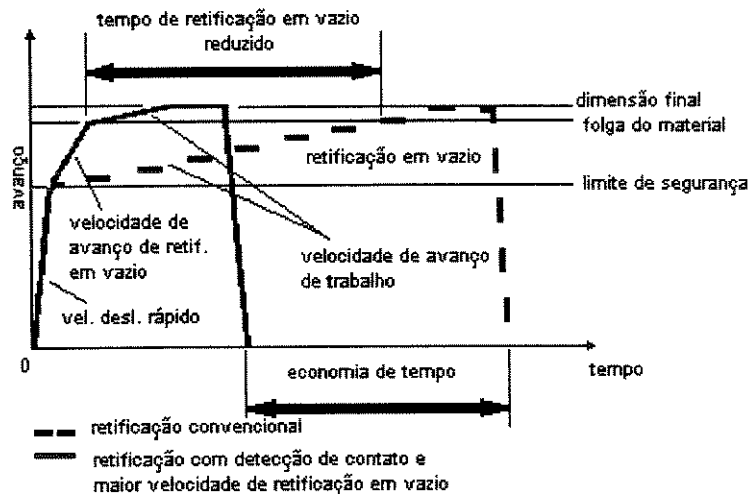


Figura 3.4- Uso da detecção de contato para reduzir o tempo de retificação em vazio.

KLUFT (1994)

O dispositivo denominado anti-colisão utiliza, em geral, uma tabela de decisão que leva em consideração a velocidade de deslocamento do rebolo e o nível RMS de emissão acústica. A presença de emissão acústica quando o rebolo estiver se deslocando em alta velocidade indica que ocorreu uma colisão. O aparelho de monitoramento envia então um comando ao CNC da máquina para recuar o rebolo a uma posição segura. Devido à alta sensibilidade da emissão acústica, esta colisão não provoca maiores danos ao sistema máquina-ferramenta-dispositivos de fixação-peça, minimizando-se os prejuízos, principalmente relativos ao custo de máquina parada. Felipe Jr., 1996, implementou o sistema de detecção de colisão através da emissão acústica e constatou que avançando o rebolo em direção à peça com velocidade *G0*

(avanço rápido), que é a máxima permitida pela máquina, o dano máximo provocado na peça foi da ordem de 200 μm , detectado antes que a peça completasse uma volta e tal dano foi insuficiente para retirar a peça de sua fixação, o que indica que a emissão acústica detectou a colisão com eficiência, ou seja rapidamente.

3.2.2 O Centelhamento Acelerado

Como visto no capítulo 2, o sistema peça-rebolo-máquina sofre uma deformação elástica no início do ciclo de retificação, deformação esta que depende da rigidez do sistema e que gera um atraso do avanço real do rebolo em relação ao que foi especificado na máquina. Após este atraso, o avanço real iguala-se ao avanço especificado e, no fim do ciclo, o rebolo deve permanecer estacionado na posição final para possibilitar a remoção do material que não foi retirado devido à deformação elástica do conjunto máquina-peça, já que cessado o avanço, este tende a recuperar-se. Este tempo de recuperação é denominado tempo de centelhamento e tem como característica uma diminuição da taxa de remoção de cavaco a cada volta completada pela peça, ocupando aproximadamente 30% do tempo de ciclo.

Malkin, 1989, propõem um método para reduzir o tempo de centelhamento na retificação cilíndrica de mergulho, denominado centelhamento acelerado. Este método consiste em ultrapassar a dimensão especificada de um valor pré-determinado com velocidade de avanço idêntica à utilizada durante o corte e depois recuar à dimensão final da peça, conforme mostra a figura 3.5. Nesta dimensão o rebolo deve permanecer somente o tempo suficiente para uma revolução da peça (n_w), o que reduz bastante o tempo do ciclo de retificação.

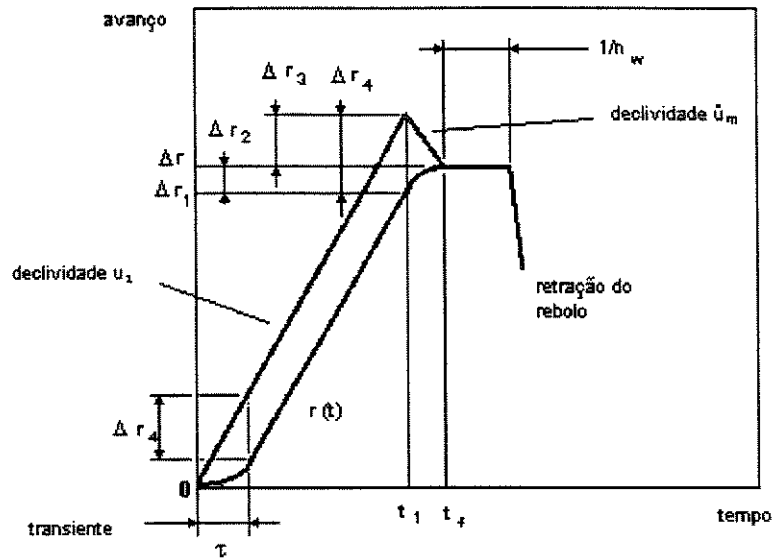


Figura 3.5- Ciclo de retificação cilíndrica de mergulho com centelhamento acelerado.

MALKIN (1989)

Para implantar o centelhamento acelerado é necessária a determinação dos valores mostrados na figura 3.5, como Δr_2 e a velocidade de recuo do reboio até a dimensão final da peça, de tal maneira que a dimensão da peça não ultrapasse suas tolerâncias. Malkin, 1989, equacionou estas grandezas em função do tempo de atraso do avanço real em relação ao avanço especificado, também denominado tempo de deformação elástica (τ). A dificuldade de implantação desta técnica reside na determinação em tempo real de τ .

Baldo & Diniz, 1995, concluíram que a emissão acústica pode ser utilizada para determinação do tempo de deformação elástica e conseqüentemente auxiliar a implementação do centelhamento acelerado.

Caso não seja possível a implementação do centelhamento acelerado, devido à ausência de um equipamento microprocessado que efetue os cálculos de Δr_2 e u_m a partir dos valores de τ obtidos pela sistema de monitoramento da emissão acústica e forneça resultados em tempo real, pode-se, ainda assim, otimizar o tempo de centelhamento através do monitoramento do mesmo. Oliveira et alli, 1991, mostram que o nível RMS de emissão acústica possui boa relação com a profundidade de usinagem, podendo portanto indicar o momento em que o centelhamento não está mais removendo material e neste instante finalizá-

lo, o que evita que o rebolo permaneça na posição de centelhamento por mais tempo que o necessário, o que é comum em processos não monitorados.

3.2.3 O Estado de Afiação do Rebolo

Dornfeld & Cai, 1984, analisaram a variação do RMS da emissão acústica com o desgaste e empastamento do rebolo. Estes pesquisadores utilizaram uma retificadora plana e monitoraram a emissão acústica (faixa de frequências entre 100 kHz e 800 kHz), a força tangencial de retificação e a posição do rebolo em tempo real, além de efetuarem uma medição da quantidade de partículas incrustadas na superfície do rebolo. Estes autores concluíram que a energia da emissão acústica aumenta com o empastamento do rebolo e com o aumento da força tangencial de retificação.

Inasaki, 1985, mostrou que as frequências do sinal de EA que apresentam valores de pico maiores, assim como o nível RMS da emissão acústica aumentam com o aumento do desgaste do rebolo.

Tanto Dornfeld & Cai, 1984, quanto Inasaki, 1985, mostraram que a emissão acústica apresenta relação com o desgaste do rebolo, mas não mencionaram em seus trabalhos a indicação do fim de vida do rebolo, não citando nem mesmo se a vida do rebolo foi esgotada em seus ensaios.

O momento de dressagem deve ser definido antes que ocorram danos térmicos à peça, porém um mecanismo que detecte estes é interessante para aumentar a confiabilidade do sistema em relação à qualidade das peças. Baseado nisto, Webster et alli, 1994, mostraram que a amplitude do sinal RMS de emissão acústica é bem maior (da ordem de 3 vezes) quando ocorre a queima da peça e Eda et alli, 1985, conseguiram detectar trincas decorrentes de condições excessivamente severas de retificação utilizando um sinal de emissão acústica com sinal filtrado na faixa de frequências entre 600 kHz e 800 kHz (filtro passa-banda).

3.2.4 Dressagem e Correção da Posição Diametral do Rebolo

Existem duas estratégias para reduzir o dispêndio de uma empresa com rebolos. A primeira é aumentar o número de peças produzidas entre duas dressagens consecutivas e a segunda é diminuir a quantidade de material removido em cada dressagem. Ambas as estratégias, se automatizadas, podem reduzir também o tempo de dressagem, o tempo de usinagem e o trabalho do operador. OLIVEIRA et alli (1994)

Kluft, 1994, propõe um sistema de monitoramento para garantir a qualidade da dressagem, bem como reduzir o tempo gasto na mesma, esquematizado na figura 3.6.

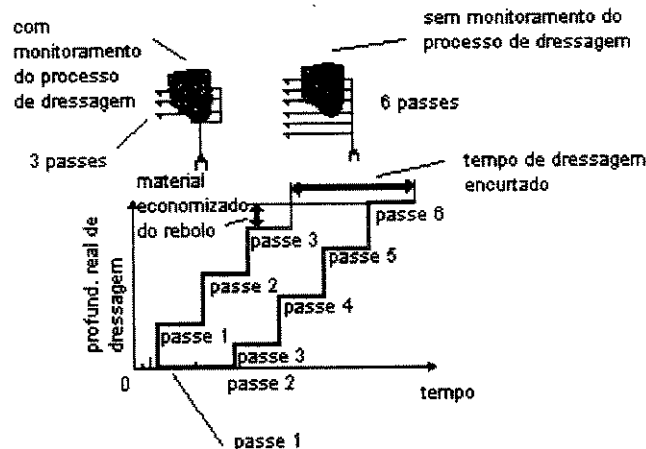


Figura 3.6 - Dressagem ótima com monitoramento do processo. KLUFT (1994)

Da figura 3.6 pode-se observar que Kluft utiliza a detecção de contato do rebolo, que é similar à detecção de contato da peça. Outra característica do sistema de monitoramento de Kluft é a decisão do momento em que o rebolo recuperou sua forma original. Isto é feito com o auxílio da emissão acústica e janelas de tempo, ou seja, o sistema de monitoramento é acionado logo após o rebolo entrar em contato com o dressador e desativado pouco antes do término deste contato. Caso o sinal sofra uma queda abaixo de limites especificados, dentro da janela de tempo, o CNC ordena que um novo passe de dressagem seja efetuado, pois a superfície do rebolo ainda possui falhas. Somente quando o sinal de emissão acústica se mostrar constante dentro de determinados limites é que se interrompe a dressagem, pois neste momento o perfil do rebolo já está reestabelecido. Felipe Jr., 1996, otimizou ainda mais o tempo de dressagem baseado na estratégia de monitoramento da dressagem idealizada por

Kluft, 1994, dividindo a dressagem em passes de desbaste com velocidades e profundidades maiores e um passe de acabamento com velocidade e profundidade menores, onde a agressividade desejada é conseguida.

Oliveira et alli, 1994, concluíram que a emissão acústica é eficiente na detecção do contato entre rebolo e dressador, pois é bastante sensível e efetua esta detecção sem que o rebolo seja danificado. Neste trabalho é sugerida a utilização desta detecção de contato para informar ao CNC a posição real da superfície do rebolo, a fim de que este efetue uma correção da posição diametral do mesmo, pois ela se altera ao longo do processo em função de deformações termo-mecânicas e perda volumétrica do rebolo. Tal procedimento visa retirar a correção da posição diametral do rebolo das características que indicam a necessidade de dressagem do rebolo. Gomes, 1997, utilizou um diamante com uma maior área de contato exclusivamente para efetuar a detecção da posição do rebolo, conseguindo uma maior geração de sinal, maior rapidez de resposta, marcas menores no rebolo e eliminação do erro induzido pelo desgaste do dressador.

3.3 A Vibração Mecânica no Processo de Retificação

A vibração mecânica pode ser definida como sendo o movimento oscilatório de corpos produzido por forças externas aos mesmos. Todos os corpos dotados de massa e elasticidade são capazes de vibração. Portanto, a maior parte das máquinas e estruturas está sujeita a certo grau de vibração. THOMSON (1978)

O processo de retificação cilíndrica de mergulho pode ser modelado como um sistema oscilatório linear conforme mostra a figura 3.7. MALKIN (1989)

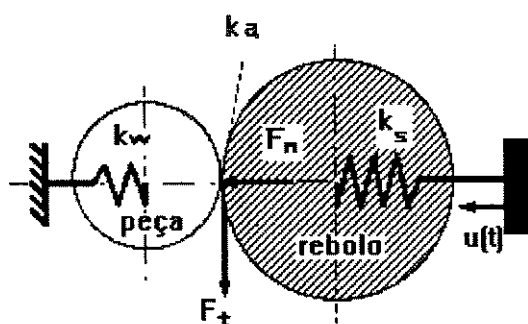


Figura 3.7 - Modelo idealizado de retificação cilíndrica de mergulho. MALKIN (1989)

No processo de retificação ocorrem diferentes tipos de vibração, dentre as quais destacam-se as vibrações forçadas originadas por forças externas (tais como o movimento do solo devido à presença de outras máquinas no mesmo ambiente), forças internas (tais como o desbalanceamento de elementos rotativos, choques dos elementos com movimentos alternados no seu fim de curso, flutuação das forças de retificação) e as vibrações auto-excitadas que acontecem quando mais energia é absorvida do que desprendida durante um ciclo simples e são induzidas por choques na ferramenta (originadas por incrustações duras no material da peça ou usinagem descontínua), espessura de cavaco variável, atrito e pelo próprio processo de formação de cavaco que é cíclico. MORI et alli (1992) e SHAW (1984)

As vibrações regenerativas são aquelas em que a amplitude da vibração resultante é maior que a amplitude da força que gerou a excitação do sistema. SEXTON (1982). Hahn, citado por Sollero, 1982, propôs que a instabilidade do sistema máquina-ferramenta é de natureza regenerativa, devida ao fato de que a ondulação gerada na superfície da peça por uma pequena perturbação, conduz à realimentação de energia durante a rotação seguinte, causando vibrações auto-excitadas de amplitude crescente.

Byrne et alli, 1995, afirmam que os sensores de vibração ou aceleração são utilizados no diagnóstico das máquinas, na detecção de vibrações auto-excitadas, de quebras de ferramentas e taxa de desgaste destas. Porém o nível de atividade das pesquisas sobre a vibração no processo de usinagem ainda deixa a desejar, principalmente no que diz respeito à correlação desta vibração com o desgaste da ferramenta. Se for feito o mesmo levantamento de Byrne et alli, 1995, considerando-se apenas os processos de retificação, certamente o nível de atividade das pesquisas com vibração será ainda menor. As razões para este fato não são

claras, pois, como vai se verificar mais a frente neste trabalho, o sinal de vibração do processo tem uma boa correlação com o desgaste do rebolo e com o crescimento da rugosidade da peça retificada.

Como apontado por Byrne et alli, 1995, a vibração auto-excitada é objeto de monitoramento, pois a presença desta em níveis elevados indica que a peça apresentará problemas de acabamento superficial, forma e mesmo de qualidade dimensional, dependendo da amplitude das vibrações.

Diversos autores tem proposto a diminuição da rigidez dos cubos utilizados para fixação dos rebolos nas retificadoras, alegando que isto reduz a amplitude das vibrações auto-excitadas e, conseqüentemente, melhora a qualidade das peças produzidas. SEXTON (1982) e WARNECKE (1995).

Fu et alli, 1994 e Mori et alli, 1992, apresentaram um sistema de classificação das vibrações auto-excitadas, Fu et alli através de uma técnica denominada de funções entropia e Mori et alli utilizando redes neurais. O trabalho destes pesquisadores é importante, pois consegue detectar a diferença entre níveis considerados normais de vibração e vibração auto-excitada regenerativa na peça e no rebolo, indicando tanto o ponto de origem do problema, quanto as possíveis soluções para o mesmo, soluções estas que são, muitas vezes, tomadas automaticamente no caso das redes neurais.

David & Warnecke, 1996, utilizaram o monitoramento via vibrações, com análise do espectro de frequências, para estabelecer as melhores condições de retificação. Os pesquisadores também relacionaram a vibração com as forças dinâmicas do processo, ou seja aquelas resultantes de fenômenos como o desgaste irregular do rebolo. A conclusão dos autores foi a de que as forças dinâmicas induzem o sistema máquina-rebolo-peça a vibrar, sendo possível captar um aumento na amplitude do sinal em determinadas frequências, quando o sistema atinge a instabilidade, podendo este aumento ser utilizado como indicador do momento de dressagem.

O sinal advindo do sensor de vibração é proporcional à aceleração instantânea do ponto em que o sensor está conectado (por isso o sensor é chamado de acelerômetro). Se este sinal

for integrado, tem-se um sinal proporcional à velocidade instantânea naquele ponto e se for integrado mais uma vez, tem-se o sinal correspondente ao deslocamento do ponto. Alguns autores já buscaram, com sucesso, uma relação entre o desgaste da ferramenta e a velocidade e deslocamento instantâneos de elementos da máquina-ferramenta no processo de torneamento. SOKOLOWSKI & KOSMOL (1991) e TAVARES (1996)

3.4 O Monitoramento da Potência do Motor no Processo de Retificação

Uma forma de medição indireta das forças de corte é a medição da potência consumida pelo motor, pois esta reflete variações de torque exigidas na região de corte. Os sensores de efeito Hall tem sido os mais utilizados para esta tarefa, efetuando a medição da corrente elétrica consumida pelo motor, o que fornece indiretamente a potência consumida pelo mesmo. A vantagem desta medição indireta das forças de corte reside no posicionamento do sensor no motor da máquina, ou seja, isolado do ambiente industrial que, via de regra, é bastante agressivo. Por outro lado, esta distância da região de corte implica num tempo de resposta maior, em função da inércia imposta pelo sistema máquina-ferramenta-peça. Apesar desta menor velocidade de resposta, o sinal que indica a potência elétrica do motor da máquina é bastante útil como complemento em sistemas de monitoramento multi-sensores. KÖNIG & KLUMPEN (1993)

Zhu et alli, 1996, utilizaram o monitoramento da potência consumida pelo motor para estudar o processo de retificação, mostrando que este sinal possibilita a visualização das três fases produtivas de um ciclo de retificação, a saber, período inicial, retificação com velocidade de avanço constante e centelhamento. Neste trabalho, Zhu et alli estimaram a energia despendida em deformações elásticas, comparando a área sob a curva do período inicial com a área sob a curva quando da retificação com potência constante e intervalo de tempo igual ao primeiro período. Desta comparação eles retiraram um indicador da rigidez do sistema máquina-rebolo-peça. Estes autores também definiram o momento do fim do centelhamento através do cálculo de inclinação da curva de potência do motor no tempo, ou seja, estabeleceram um valor limite para a derivada da curva. Caso este valor limite fosse alcançado, o CNC seria informado e daria um comando para que o rebolo finalizasse a operação.

Inasaki, 1990, utilizou a potência mecânica para detectar queima das peças e determinar o momento de dressagem dos rebolos. A queima das peças durante a retificação foi detectada facilmente, pois quando esta ocorria o sinal de potência do motor apresentava um súbito crescimento. O valor máximo deste pico era da ordem de três vezes o sinal normal. Deve-se ressaltar que a detecção de queima é interessante como um dispositivo de segurança, a fim de evitar que a peça que sofreu este dano seja enviada para processos posteriores e mesmo que outras peças sejam danificadas, mas o ideal é evitar que este fenômeno ocorra. Para definição do fim da vida do reboło, Inasaki utilizou a potência mecânica em conjunto com um dispositivo que media a variação do diâmetro da peça em tempo real. Foi criado no trabalho um parâmetro denominado tempo morto (do inglês “dead time”) definido como sendo a diferença, em unidades de tempo, entre o momento de início do aumento do sinal de potência e o momento de início do aumento do sinal de medição do diâmetro da peça. Esta diferença ocorre devido a inércia do equipamento, que é constante, e às deformações elásticas do sistema, que variam com a perda de afiação do reboło. Inasaki não apresentou uma proposta de estratégia para definir o momento de dressagem, mas mostrou que o tempo morto aumenta com a perda de afiação do reboło.

Como o sinal de potência ou de corrente elétrica consumida pelo motor representa um ciclo de retificação com todos os seus estágios, este poderia ser utilizado na detecção de contato. No entanto, Inasaki, 1985, mostrou que a emissão acústica efetua esta tarefa com maior eficiência, ou seja, detecta o contato com maior antecedência (0,8 s no experimento em questão), daí ser esta utilizada para detecções de contato.

3.5 Tratamento do Sinal

Após a aquisição do sinal num sistema de monitoramento, este deve ser amplificado, podendo haver a necessidade de dividir-se esta amplificação em duas partes, caso seja utilizado um cabo muito longo para transmitir o sinal do sensor à unidade de condicionamento do sinal. Este primeiro amplificador, posicionado antes do cabo que conduz o sinal, é denominado pré-amplificador.

Com o sinal amplificado a próxima etapa é a eliminação de ruídos, ou sinais não relacionados com o fenômeno que está sendo monitorado, sendo esta tarefa executada por

filtros que podem excluir frequências baixas (filtro passa alta), frequências altas (filtro passa baixa) e frequências fora de determinadas faixas (filtro passa banda).

A retificação e a conversão RMS do sinal são etapas posteriores à filtragem e só são efetuados se o sinal for analisado no domínio do tempo. A retificação transforma o sinal alternado com média zero (sem componente DC) em sinal contínuo com valor mínimo igual a zero e o RMS calcula a média quadrática do sinal em intervalos de tempo determinados. Os intervalos de tempo utilizados no RMS são denominados constante de tempo. O período entre amostragens deve ser menor ou igual ao menor período presente no sinal retificado, a fim de evitar-se distorções no sinal.

A figura 3.8 esquematiza estas etapas anteriores.

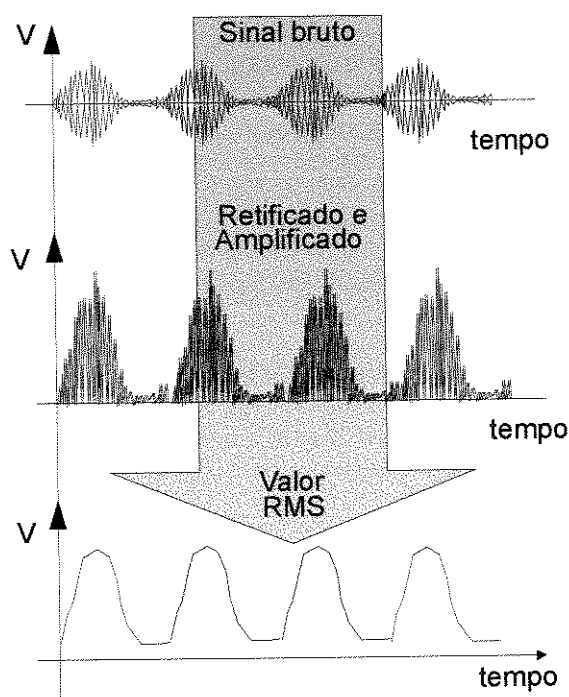


Figura 3.8 - Sinal bruto e valor RMS. FELIPE JR. (1996)

A análise do sinal pode ser feita no domínio do tempo e então segue-se os passos descritos neste tópico ou pode ser feita no domínio da frequência, onde o sinal bruto é submetido à uma transformada de Fourier, que tem como resultado a amplitude do sinal em cada frequência que o compõe. Assim, pode-se detectar quais as faixas de frequência mais sensíveis ao fenômeno que se quer monitorar (no caso, o desgaste do rebolo) e, a partir daí,

filtrar-se o sinal para que as outras faixas de frequência, que representam ruído, sejam extraídas da análise do sinal.

Ainda no domínio do tempo, pode-se também efetuar medidas de médias e dispersão dos sinais, a fim de visualizar-se o comportamento destes ao longo do tempo. Normalmente, utiliza-se as fórmulas e conceitos estatísticos, a saber, média, desvio padrão, kurtosis e skew. ASIBU & DORNFELD (1981)

3.6 Estratégias de Monitoramento

O sinal medido e tratado do sistema de monitoramento da usinagem deve ser analisado para que possa fornecer informações ao operador ou instruções ao CNC, afim de que estes atuem no processo. As técnicas mais comumente utilizadas para realizar estas análises são:

Janela de limite estático: efetua a avaliação do sinal tratado em um intervalo de tempo fixo, utilizando um limite estático, como mostra a figura 3.9. O sinal é comparado com o limite devendo ficar acima ou abaixo do mesmo, dependendo da característica que está sendo monitorada. Por exemplo, pode-se estabelecer um limite para o sinal de corrente elétrica do motor da máquina, o qual quando ultrapassado determina o fim da vida da ferramenta. KLUFT (1994)

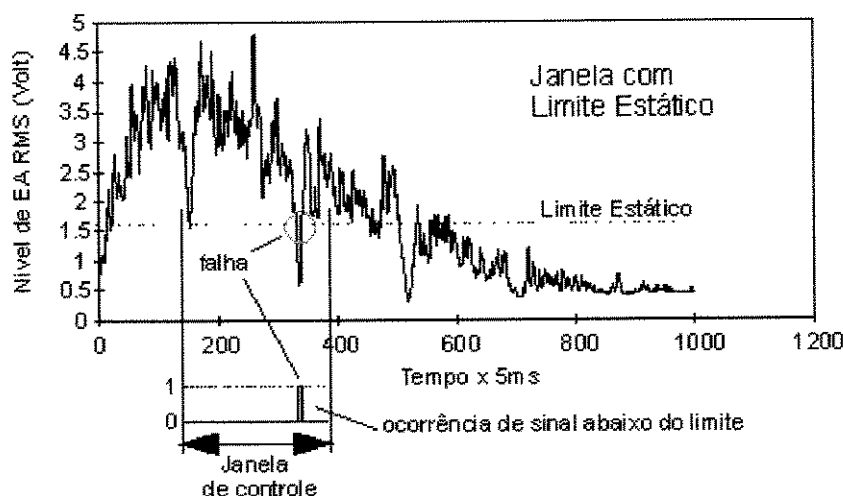


Figura 3.9 - Janela de controle com limite estático. FELIPE JR. (1996)

Janela de limite dinâmico: esta janela acompanha o desenvolvimento do sinal estabelecendo uma faixa de tolerância para sua variação. Neste caso, o intervalo de tempo e os limites em torno do sinal são variáveis ao longo do tempo, daí a denominação de dinâmico. A figura 3.10 mostra um exemplo de janela de limite dinâmico. KLUFT (1994)

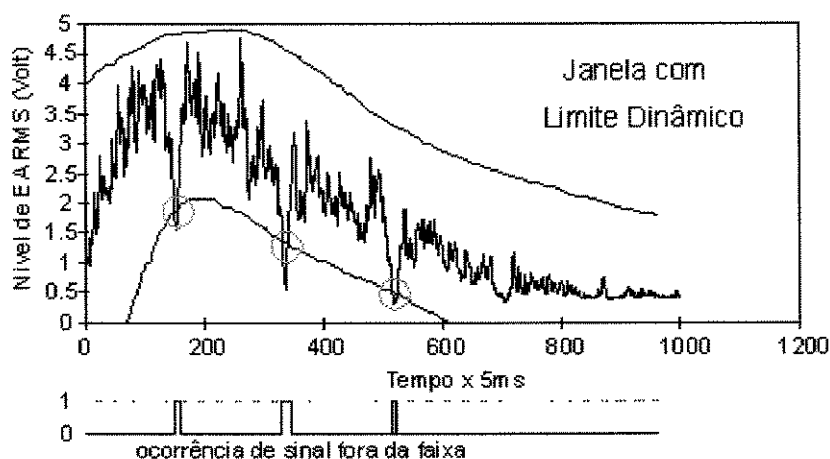


Figura 3.10 - Janela de controle com limite dinâmico. FELIPE JR. (1996)

Acréscimo em relação ao valor inicial: neste caso, o limite estático é definido como sendo um valor relativo ao valor inicial do sinal, considerado como um indicador de funcionamento normal do processo. A utilização desta técnica aumenta a flexibilidade do sistema de monitoramento, que pode trabalhar com condições de usinagem variáveis.

Estabilização da curva: esta técnica define como limite o ponto em que a curva do sinal apresente um comportamento estável, após um período de crescimento, ou seja, permaneça oscilando com sua dispersão característica em torno de um valor constante.

Capítulo 4

Procedimento Experimental

Neste capítulo são descritos os testes experimentais executados para verificar a viabilidade do estabelecimento do fim de vida de rebolos, através do monitoramento do processo de retificação.

Para o cumprimento do objetivo citado acima, foram retificadas peças de aço endurecido, com utilização da técnica de retificação de mergulho. Foram monitoradas, numa primeira bateria de ensaios com rebolo considerado duro, a emissão acústica gerada pelo processo, a corrente elétrica consumida pelo motor da máquina e a vibração mecânica do contra-ponto de fixação da peça e, numa segunda bateria de ensaios com rebolo considerado mole, a emissão acústica e vibração mecânica do contra-ponto.

4.1 Equipamento e Acessórios Utilizados

Para usinagem dos corpos de prova foi utilizada uma retificadora Zema CNC modelo G 800 com algumas características particulares, implementadas pelo Grupo de Retificação da Escola de Engenharia de São Carlos, que são o “gap-less”, a dressagem inteligente e a correção da posição diametral do rebolo, já descritas no capítulo 3.

A retificadora utilizada conta com um dispositivo de balanceamento hidrodinâmico que foi utilizados nos ensaios, a fim de minimizar o desbalanceamento do rebolo.

Como ferramenta foram utilizados dois tipos de rebolo, um considerado duro, o A 60 R V 11 e outro considerado mole, o AA 60 G V 11, da Carborundum, ambos com diâmetro de 500 mm e largura de 50 mm.

Para dressagem do rebolo foi utilizado um fliese. Para correção da posição diametral do rebolo foi instalado um diamante ao lado do dressador, conforme mostra a figura 4.1.

4.2 O Equipamento de Monitoramento

Como já citado, foram monitoradas numa primeira bateria de ensaios utilizando rebolo duro, a emissão acústica, a corrente elétrica consumida pelo motor e a vibração do contra-ponto da máquina-ferramenta.

Nesta primeira sequência de testes, foram utilizados quatro conjuntos de monitoramento, compostos de:

1 - Um sensor de emissão acústica e um aparelho de monitoramento BM 12, da empresa Sensis São Carlos, cuja função é amplificar, filtrar e transformar o sinal bruto que sai do sensor em um sinal proporcional ao RMS do sinal de entrada (amplificação com ganho máximo de 60 dB, filtro passa alta com frequência de corte de 10 kHz e constante de tempo do conversor RMS de 0,37 ms). O sensor deste conjunto foi colocado junto ao diamante utilizado para calibrar o rebolo;

2 - Um sensor de vibração e um aparelho de monitoramento BM 12, da empresa Sensis São Carlos, similar ao do item 1, mas agora com ganho máximo de 40 dB, filtro passa alta com frequência de corte de 100 Hz e constante de tempo de 0,14 ms. O sensor deste conjunto foi preso ao contra-ponto da retificadora;

3 - Um sensor de emissão acústica, um pré-amplificador da empresa Physical Acoustics com ganho de 40 dB e filtro passa banda de 100 kHz a 300 kHz e um voltímetro RMS com constante de tempo de 2 ms.

4 - Um sensor de efeito hall acoplado em um circuito para medir a corrente elétrica consumida pelo motor da máquina.

Após essa primeira bateria de ensaios, foi efetuada uma segunda, onde foi utilizado rebolo mole e foram monitoradas a emissão acústica e a vibração mecânica do contra-ponto.

Nesta segunda sequência de ensaios foram utilizados três conjuntos de monitoramento, a saber:

1 - Um sensor de emissão acústica, um aparelho BM 12, da Sensis São Carlos, com ganho máximo de 40 dB, um filtro passa alta de 2,5 kHz e uma constante de tempo de 0,025 ms

2 - Um sensor de emissão acústica, um aparelho BM 12, da Sensis São Carlos, com ganho máximo de 60 dB, um filtro passa alta de 100 Hz e uma constante de tempo de 0,025 ms.

3 - Um conjunto similar ao item 3 mencionado anteriormente.

Cabe esclarecer que o aparelho BM 12 possui como componentes um voltímetro RMS e um amplificador, com circuitos “plug in”, que permitem alterações em suas configurações, no tocante a constantes de tempo e filtros entre outros.

Os sinais adquiridos pelos conjuntos de monitoramento alimentavam um microcomputador Pentium 133 MHz, que estava equipado com um conjunto National de aquisição, composto por uma placa A/D com taxa de amostragem máxima de 500 kHz e o software LabView versão 4.0.

A figura 4.1 mostra um esquema do banco de ensaios, com seus componentes e a maneira como estes se comunicavam.

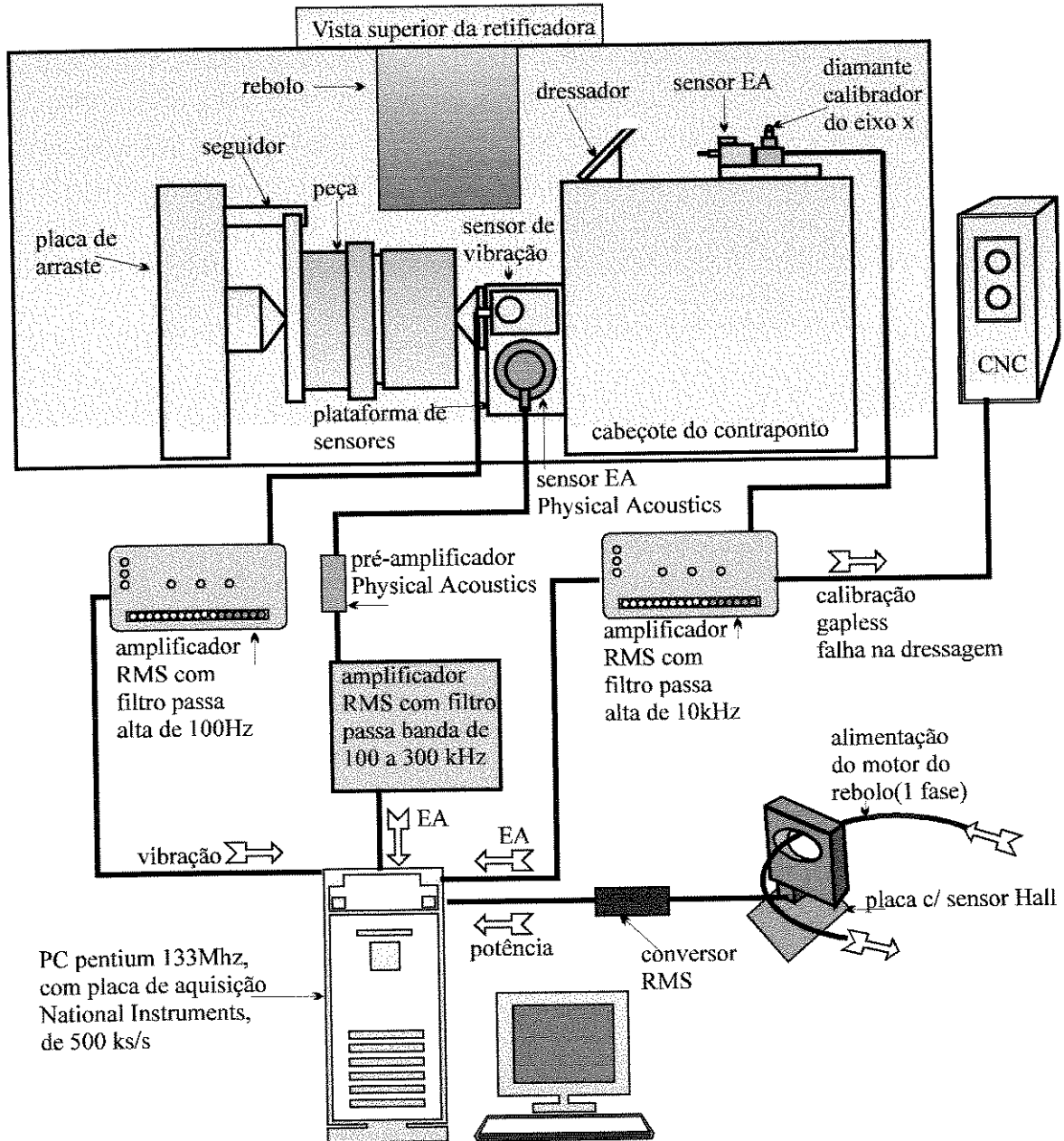


Figura 4.1 - Esquema do banco de ensaios

Durante os testes foram utilizados ainda um micrômetro com leitura milesimal para medição na faixa de diâmetros de 50 a 75 mm, um rugosímetro Taly Surf, com “cut off” ajustado em 0,8 mm e um aparelho Taly Round com filtro ajustado em 500 upr, para medição da circularidade das peças retificadas.

4.3 Ensaios Preliminares

Como corpos de prova foram utilizadas peças de aço SAE 4340 tratadas termicamente, com dureza de 47 HR_C, quando dos ensaios com rebolo duro e 34 HR_C nos ensaios com rebolo mole. Um esboço dos corpos de prova pode ser observado na figura 4.2.

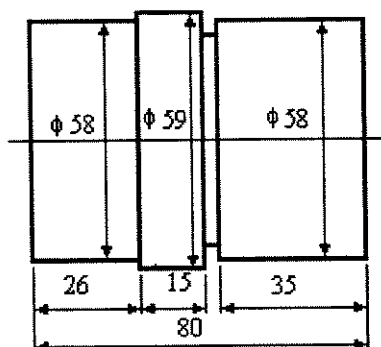


Figura 4.2 - Esboço do corpo de prova

Para os experimentos, foram confeccionados 50 corpos de prova, que foram numerados para facilitar a identificação dos mesmos.

Como primeiro passo, os corpos de prova foram retificados, com intuito de homogeneizar as dimensões e remover a camada superficial que, devido ao tratamento térmico, possui uma dureza muito elevada e, certamente, geraria um erro sistemático nos primeiros experimentos (que removeriam esta camada).

Posterior a este primeiro passo, algumas peças foram usinadas, a fim de se definir as condições a serem utilizadas nos ensaios propriamente ditos. Estes ensaios consistiram na usinagem dos corpos de prova com condições de avanço e largura útil do rebolo diferentes, sendo que as condições utilizadas no experimento final foram escolhidas baseadas nos seguintes critérios: velocidades de avanço utilizadas comumente na indústria (informação esta baseada na experiência do grupo de retificação da EESC), tendo como limites inferior uma vida do rebolo não excessivamente longa e superior a potência da máquina, sendo que esta última ditou a largura de contato do rebolo com a peça e velocidade da peça utilizadas. Durante este primeiro passo também se decidiu utilizar o sistema de monitoramento da

vibração do contra-ponto, que não fazia parte do projeto experimental original. Uma análise preliminar dos resultados mostrou que esta característica era a mais adequada no tocante aos objetivos deste trabalho e que a potência consumida pelo motor não apresentava resultados interessantes, conforme será mostrado em detalhes no capítulo 5. Em função disto, foram repetidos os ensaios utilizando rebolo mole, monitorando-se a vibração mecânica e não o fazendo em relação à potência do motor.

4.4 Condições Utilizadas nos Ensaios

A seqüência de operações utilizadas dentro de cada ensaio podem ser visualizadas na figura 4.3.

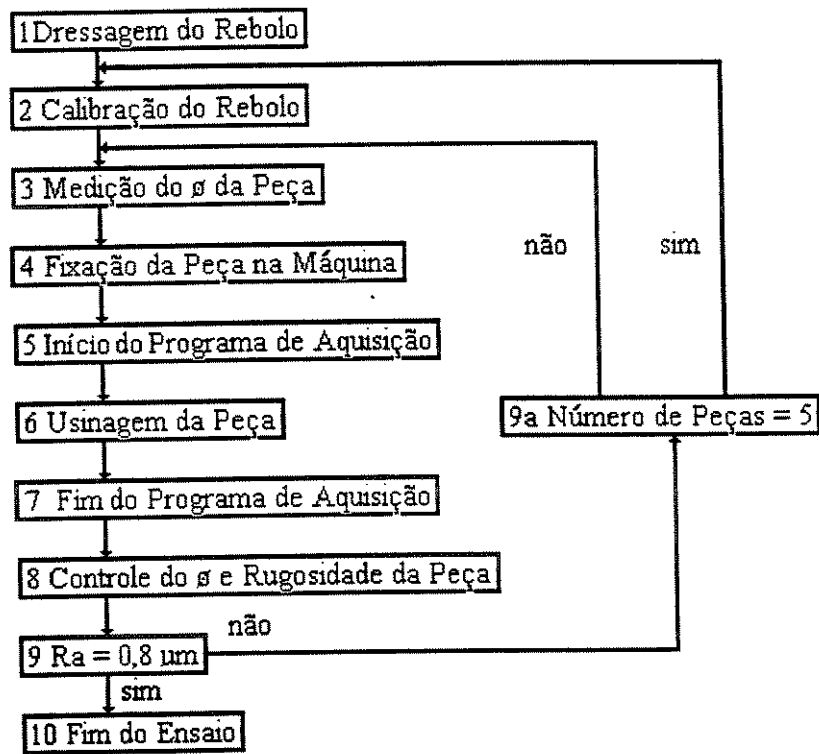


Figura 4.3 - Seqüência de operações durante os ensaios

A seguir serão detalhadas as operações mencionadas acima.

1 - Dressagem do Rebolo:

A dressagem do rebolo foi feita em passes de $40\text{ }\mu\text{m}$ de profundidade no diâmetro, sendo que nesta dimensão o dressador apresentava um $b_d = 0,35\text{ mm}$. Além disto, a dressagem final, ou de acabamento, foi feita com uma velocidade transversal de $122,5\text{ mm/min}$ e rotação do rebolo igual a 1750 rpm , o que fornece um grau de recobrimento, U_d , igual a 5.

A escolha deste último parâmetro foi feita para acelerar os ensaios, sem comprometer a validade dos resultados, pois a utilização de um grau de recobrimento maior equivale a iniciar-se os experimentos com um rebolo já desgastado, isto é, com baixa agressividade.

Quando da dressagem, foi utilizada a técnica denominada dressagem inteligente, que tornou esta operação mais rápida, bem como garantiu a uniformidade superficial do rebolo, com a agressividade estipulada previamente, em todas as séries de ensaios.

2 - Correção da Posição Diametral do Rebolo:

A correção da posição diametral do rebolo era feita com intuito de atenuar os efeitos dos desgastes do dressador e do rebolo, bem como das deformações térmicas do conjunto máquina-rebolo-peça, fazendo com que o volume de material removido por peça fosse mantido aproximadamente constante.

Esta operação era feita sem fluido refrigerante, a fim de evitar que a turbulência deste emitisse um sinal de emissão acústica antes que o contato rebolo-diamante de correção da posição diametral do rebolo tivesse efetivamente ocorrido.

O intervalo de correção da posição diametral do rebolo foi definido durante os ensaios preliminares. Ressaltando que um intervalo de correção da posição diametral do rebolo menor implica em maior repetitividade dimensional, mas em uma menor vida do rebolo, pois ocorre a formação de um sulco no mesmo, em função do contato com o diamante de correção da posição diametral do rebolo, sendo que o oposto ocorre com intervalos maiores. Para maiores detalhes a respeito deste assunto ver Gomes, 1997.

3 - Medição do Diâmetro da Peça:

Antes e após a usinagem de cada peça foi executada a medição do diâmetro da mesma e registrado tal valor, a fim de possibilitar o cálculo do volume de material removido e utilizar tal parâmetro para expressar a vida do rebolo. A escolha desta unidade (volume de material removido específico) se deu por ser ela mais robusta no tocante à variação de sobremetal e variação da largura de utilização do rebolo.

4 - Fixação da Peça na Máquina:

Foi utilizada, nos ensaios, a retificação cilíndrica de mergulho, com a peça fixada entre pontos. Na fixação das peças, foi aplicada uma camada de graxa entre os pontos da máquina e os furos de centro dos corpos de prova. Isto tinha a finalidade de evitar o desgaste dos pontos, mas nos experimentos também serviu para que não houvesse geração de ruídos no sinal de emissão acústica, além de evitar que uma possível camada de ar existente entre o acoplamento do contra-ponto com o corpo de prova servisse para atenuar o sinal de emissão acústica gerado na região de corte. O mesmo cuidado foi tomado quando da fixação dos sensores no contra-ponto.

5 e 7 - Início e Parada do Programa de Aquisição

O software LabView utiliza programação mnemônica, ou seja, é feita através da escolha e seqüenciamento de ícones correspondentes às funções desejadas pelo usuário e permite, conforme mostrado na figuras II.1 e II.2 do apêndice II, a inserção de comandos de início e parada da aquisição, que podem ser acionados manualmente. Foi utilizada tal característica, tomando-se o cuidado de se efetuar a aquisição do ciclo de retificação completo. Foram efetuadas as paradas entre ciclos para que o espaço de memória ocupado pelos dados não se tornasse demasiadamente grandes, fato este que impossibilitaria o tratamento posterior dos dados.

No programa de aquisição foi definida uma taxa de amostragem de 30 pontos por segundo. Tal valor foi definido por representar satisfatoriamente o ciclo de retificação e não consumir memória de forma desnecessária. Com esta taxa de amostragem ocorreu o

fenômeno de “aliasing” bastante acentuado, ou seja, como a frequência de amostragem foi muito menor que a do sinal retificado, perdeu-se informações a respeito de algumas frequências, o que, para este trabalho, não foi significativo pois foram utilizadas basicamente as médias dos sinais adquiridos.

6 - Usinagem da Peça

Na usinagem dos corpos de prova, foi utilizado o “gap-less”.

Foi definido como tempo de centelhamento 4 segundos, que é um valor típico em ambientes industriais. Definir o tempo exato de centelhamento é um dos objetivos do trabalho.

Os corpos de prova eram todos provenientes de uma mesma barra de aço, minorando portanto a variabilidade da composição química do material a ser usinado.

Os ensaios eram iniciados na peça subsequente àquela que determinara o fim do ensaio anterior. Além disto, ocorreram várias alterações de posição na sequência das peças, em função de várias operações de transporte, antes de ser efetuada a numeração das mesmas, o que garantiu um caráter de aleatoriedade das peças, evitando assim que a variação de dureza atuasse de forma sistemática.

As condições de usinagem, foram definidas durante os ensaios preliminares e podem ser visualizadas nas tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 Condições de usinagem com rebolo duro

Avanço (mm/min)	Rotação da peça (RPM)	Largura de atuação do rebolo (mm)
0,5	70	18
0,7	210	12
1,0	210	12

Tabela 4.2 Condições de usinagem com rebolo mole

Avanço (mm/min)	Rotação da peça (RPM)	Largura de atuação do rebolo (mm)
0,7	210	12
1,0	210	12

Nas tabelas 4.1 e 4.2, a largura de atuação do rebolo refere-se à largura de contato entre rebolo e peça. A rotação do rebolo utilizada foi 1750 RPM. A rotação da peça foi aumentada nas velocidades de avanço 0,7 mm/min e 1,0 mm/min para reduzir a potência consumida do motor que aciona o rebolo, que do contrário excederia a capacidade da máquina.

8 - Controle do Diâmetro e Rugosidade da Peça:

O controle do diâmetro já foi descrito anteriormente.

Mediu-se a rugosidade de 50% das peças (medição a cada 2 peças retificadas). Foi utilizado um rugosímetro Taly Surf, com “cut off” ajustado em 0,8 mm. O resultado apresentado foi obtido medindo-se a rugosidade em três pontos equidistantes ao longo do perímetro circular do corpo de prova. Os parâmetros de rugosidade medidos foram R_a e $R_{máx}$.

A rugosidade da peça foi o parâmetro escolhido para indicar o fim da vida do rebolo. O critério adotado foi o de $R_a = 0,8 \mu m$, apontado por Novaski, 1994, como valor limite para um processo de retificação de acabamento.

Alguns ensaios foram prolongados até valores de R_a maiores que os definidos como parâmetro de fim de vida, o que serviu para visualizar o comportamento do rebolo quando trabalhando após ultrapassado o momento ideal de dressagem.

Além das operações mencionadas acima, foram efetuadas medidas de circularidade de alguns corpos de prova, com uma frequência aproximada de 1 a cada 5 peças, utilizando um aparelho Taly Round, com filtro de 500 upr.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos experimentos descritos no capítulo 4.

Como mencionado anteriormente, foram monitoradas após a usinagem das peças, a rugosidade, a circularidade e o diâmetro dos corpos de prova e, durante o processo, a emissão acústica e a vibração mecânica do contra-ponto de fixação da peça e a potência elétrica consumida pelo motor da máquina. De posse de tais dados, foi feito um tratamento dos mesmos, através de cálculo de médias e desvios-padrão, análise de curvas de tendência e análise visual de curvas, enfocando determinadas etapas do ciclo de retificação. Estes resultados, para uma melhor visualização, serão mostrados de forma gráfica. Optou-se por apresentar, inicialmente, os resultados obtidos com o rebolo considerado duro, A 60 R V 11 e, posteriormente, os resultados relativos ao rebolo considerado mole, AA 60 G V 11.

5.1 Resultados referentes à utilização de rebolo duro

5.1.1 Análise dos corpos de prova após a retificação

5.1.1.1 Rugosidade

O monitoramento da rugosidade das peças retificadas ao longo do experimento apresentou como resultado, o que pode-se observar nas figuras 5.1 e 5.2.

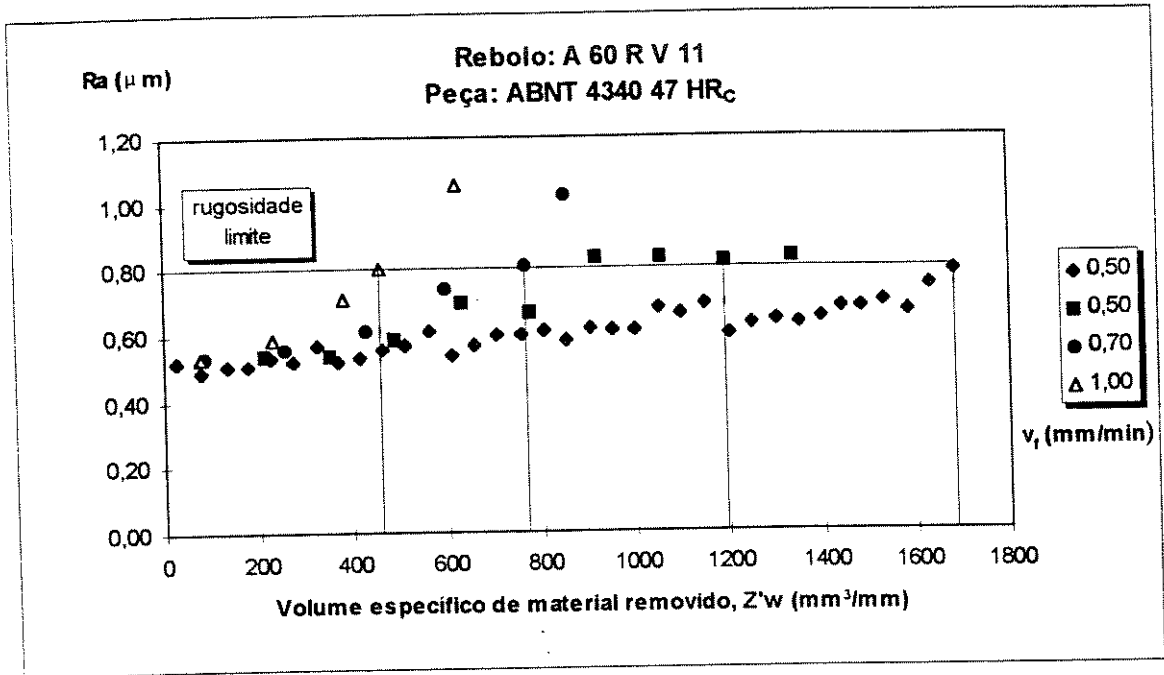


Figura 5.1 - Rugosidade superficial, Ra x volume específico de material removido.

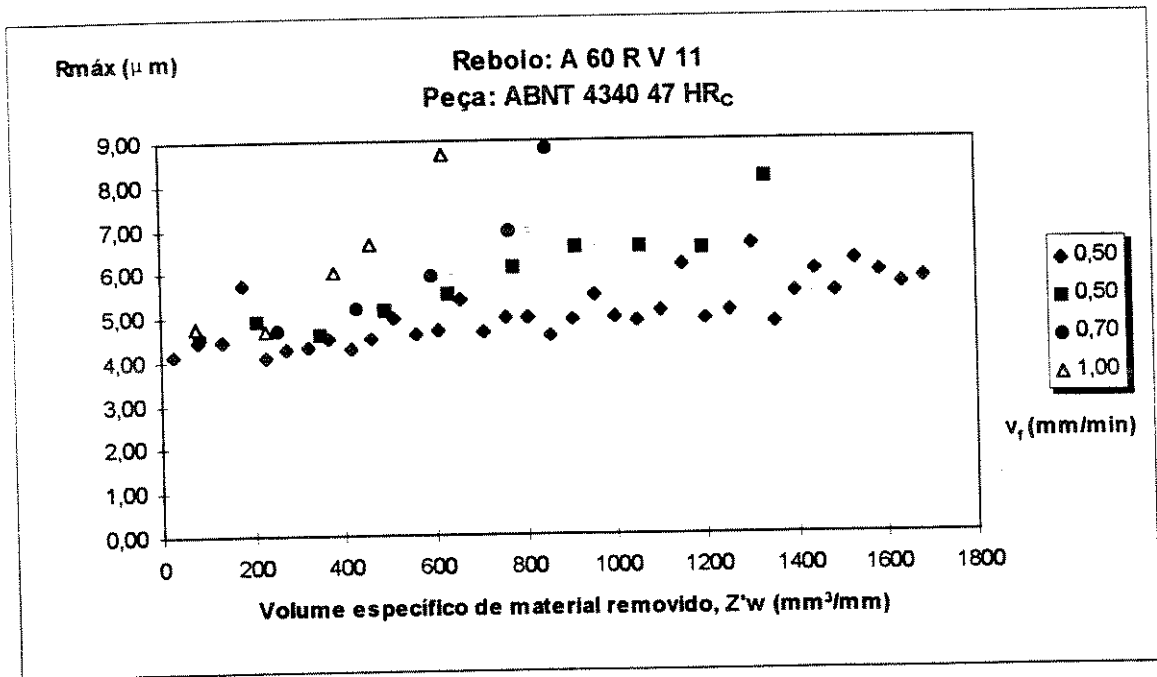


Figura 5.2 - Rugosidade superficial, Rmáx. x volume específico de material removido.

Pode-se observar nestas figuras que a rugosidade média, Ra, e a rugosidade máxima, Rmáx., crescem continuamente com o aumento do volume específico de material removido e, conseqüentemente, com o desgaste ou perda de afiação do rebolo. Como o rebolo utilizado era duro, a perda diametral do rebolo foi pequena (da ordem de 45 μm) e o principal fator causador do aumento da rugosidade da peça foi a perda de afiação do rebolo.

Nota-se também que as velocidades de avanço do rebolo não influenciam a rugosidade no início da vida da ferramenta, provavelmente porque a rugosidade é obtida durante a fase de centelhamento, onde o avanço é nulo. Porém, mesmo com a rugosidade final da peça sendo obtida no centelhamento, a condição de afiação do rebolo a influencia fortemente.

Para se explicar melhor esta relação entre perda de afiação e crescimento da rugosidade, deve-se examinar a figura 5.7, que mostra o comportamento da vibração do contra-ponto (que vibra devido à vibração da peça) contra o volume de material removido. Pode-se ver nesta figura que a vibração também cresce com o volume de material removido. Portanto, um dos importantes fatores que faz a rugosidade crescer é o aumento da vibração da peça (e também do rebolo) gerada pelo maior esforço de corte necessário para se realizar o corte com grãos do rebolo desgastados. Em outras palavras, quando os grãos do rebolo perdem a agressividade, maior esforço é despendido nas fases de deformação elástica e riscamento da peça, pois estas tornam-se mais longas e o grão abrasivo necessita penetrar uma maior profundidade antes de gerar cavaco. Assim, crescem os esforços de corte, cresce a vibração do sistema rebolo-peça-fixação e cresce a rugosidade da peça usinada.

Foi estabelecido como critério de fim de vida, após consulta a Novaski, 1994, uma rugosidade média igual a $0,8 \mu\text{m}$. Em função disto, foram obtidos os seguintes valores de vida do rebolo, $1682 \text{ mm}^3/\text{mm}$, $916 \text{ mm}^3/\text{mm}$, $767 \text{ mm}^3/\text{mm}$ e $461 \text{ mm}^3/\text{mm}$, para as velocidades de avanço de $0,5 \text{ mm/min}$ (2 vezes), $0,7 \text{ mm/min}$ e $1,0 \text{ mm/min}$ respectivamente. Destes resultados pode-se tirar duas conclusões. A primeira é que, à medida que a velocidade de avanço cresce, cresce também a velocidade com que o rebolo perde sua afiação e, portanto, diminui a vida do rebolo. A segunda conclusão é que a vida do rebolo varia bastante quando se repetem as mesmas condições de usinagem. Observa-se nos experimentos com velocidade de avanço igual a $0,5 \text{ mm/min}$, que a vida do rebolo apresentou uma variação de aproximadamente 83% entre os dois testes efetuados. Como somente 2 testes foram efetuados na mesma condição, não se pode ter uma idéia da dispersão da vida do rebolo, mas pode-se afirmar que esta dispersão existe e não é pequena.

Pode-se observar nas figuras 5.1 e 5.2 que as curvas de rugosidade média, R_a , e rugosidade máxima, $R_{\text{máx.}}$, tem comportamentos similares.

5.1.1.2 Circularidade

Os resultados relativos à circularidade das peças retificadas estão mostrados na figura 5.3. Inicialmente se pretendia também utilizar o erro de circularidade das peças como critério de fim de vida do rebolo.

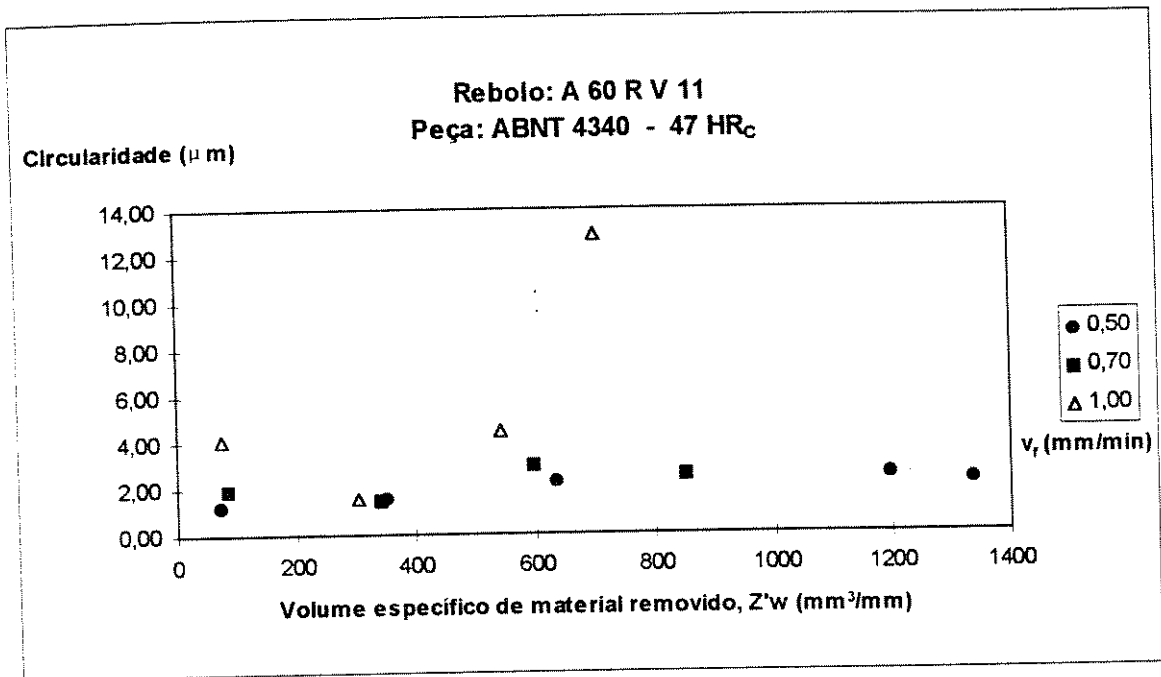


Figura 5.3 - Circularidade x volume de material removido

Nos experimentos após consulta a Novaski, 1994, foi definido que a qualidade dimensional desejada era IT 5. Baseado nesta informação, concluiu-se que, utilizando a regra prática citada por Agostinho, 1977, o valor limite para a circularidade era de $6,5 \mu\text{m}$, o que corresponde a metade da tolerância dimensional. Assim, o rebolo deveria ser dressado (fim de vida do rebolo) quando o erro de circularidade atingisse este valor.

A análise da figura 5.3 mostra que os valores de circularidade medidos para as velocidades de avanço $0,5 \text{ mm/min}$, $0,7 \text{ mm/min}$ e $1,0 \text{ mm/min}$, no fim da vida do rebolo (isto é, quando a rugosidade da peça já tinha atingido $R_a = 0,8 \mu\text{m}$) foram $2,50 \mu\text{m}$, $2,50 \mu\text{m}$ e $4,45 \mu\text{m}$, respectivamente. A figura mostra ainda que somente em uma peça foi alcançada a circularidade de $12,90 \mu\text{m}$ e, uma análise desta figura conjuntamente com a figura 5.1, mostra que esta circularidade corresponde a uma rugosidade R_a próxima a $1,0 \mu\text{m}$, o que está além do fim de vida do rebolo.

Pode-se concluir que, para os objetivos deste trabalho, a circularidade não constitui um bom parâmetro de fim de vida do rebolo, pois as medidas efetuadas resultaram em valores considerados aceitáveis. Esta conclusão vai de encontro àquela obtida por Sexton, 1982. Assim, daqui para frente no trabalho, a rugosidade será o parâmetro de definição de fim de vida do rebolo e será utilizada para comparação com os sinais provenientes dos sensores.

5.1.2 Monitoramento do Processo de Retificação

5.1.2.1 Emissão Acústica

Foram monitorados os sinais de emissão acústica utilizando dois conjuntos de monitoramento, que serão denominados por BM-12 e Physical Acoustics, com o fim de procurar estabelecer indiretamente o momento de dressagem do rebolo. Cabe aqui lembrar que o sistema BM-12 foi preso ao suporte de fixação do diamante de correção da posição diametral do rebolo e o Physical Acoustics foi preso ao contra-ponto de fixação da peça.

As figuras 5.4 e 5.5 mostram o comportamento destes sinais em função do volume específico de material removido (Z'_w).

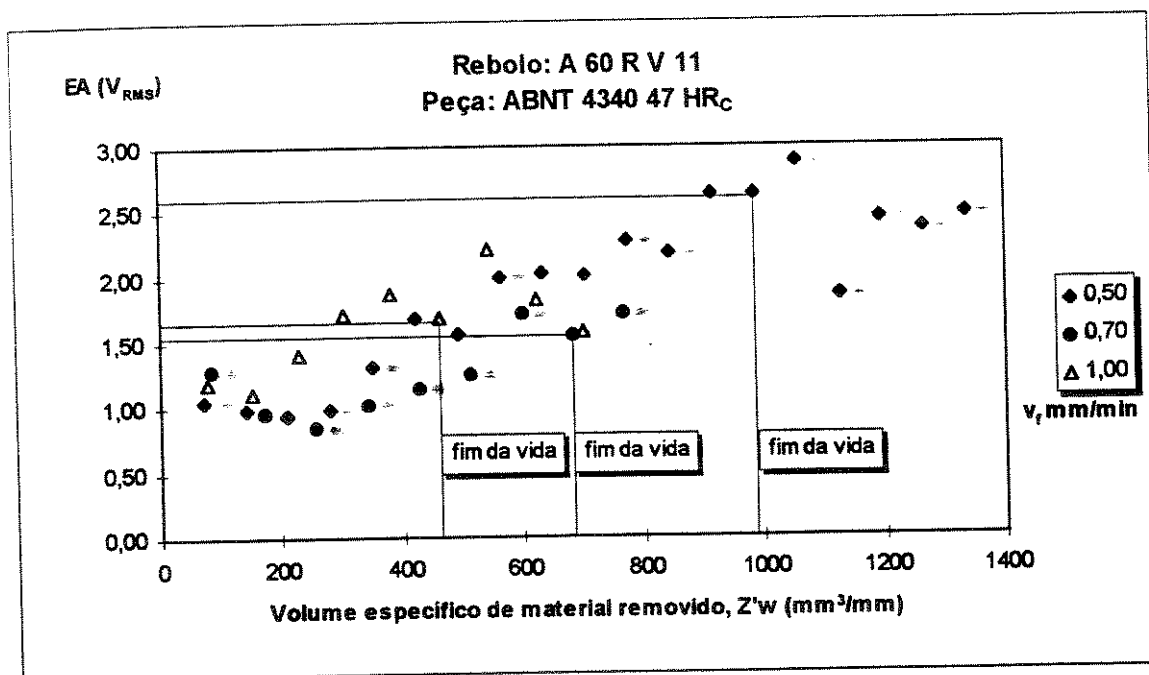


Figura 5.4 - Valor médio da EA x volume específico de material removido, conjunto BM-12.

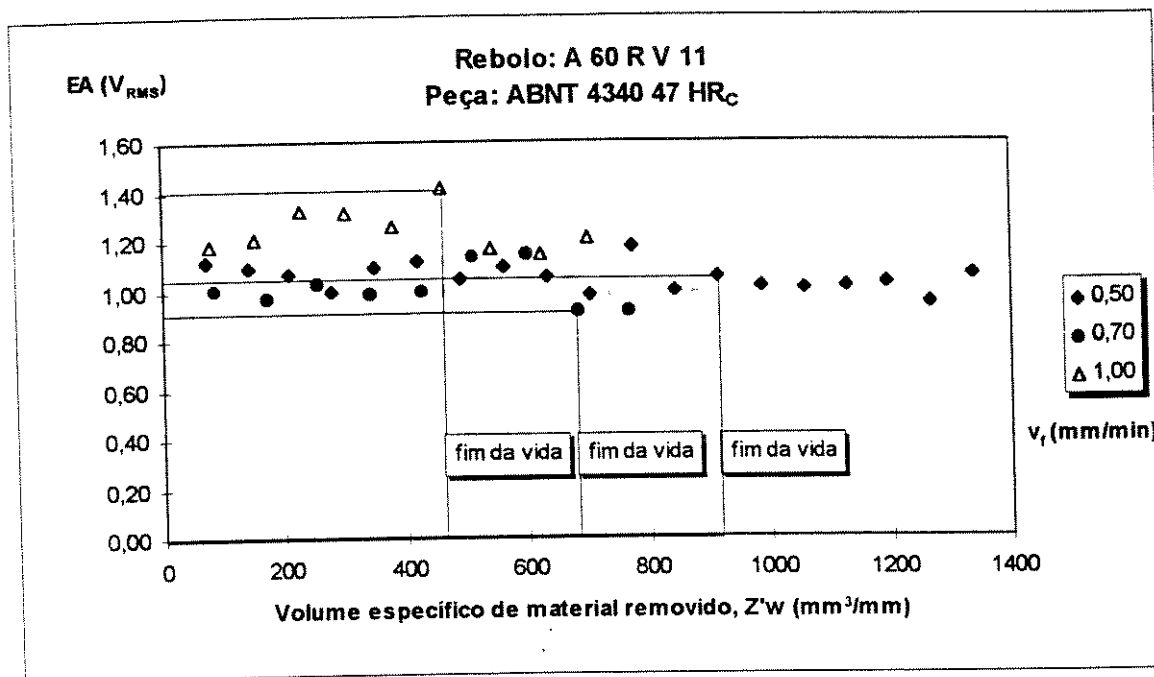


Figura 5.5 - Valor médio da EA x volume específico de material removido, conjunto Physical Acoustics.

Conforme pode ser observado na figura 5.4, o sinal de emissão acústica captado pelo aparelho BM-12, apresenta um decréscimo inicial, passando em seguida para um aumento com o aumento do volume de material removido, sendo que as três velocidades de avanço apresentam curvas com aproximadamente o mesmo formato. Apesar de ocorrer um aumento da emissão acústica, esta não apresenta um comportamento que possa identificar o fim de vida do rebolo, pois o sinal apresenta uma estabilidade, um aumento e uma queda seguida de aumento no fim de vida para velocidades de avanço de 0,5 mm/min, 0,7 mm/min e 1,0 mm/min respectivamente. Por exemplo, a curva para $v_f = 1,0$ mm/min apresenta um forte decréscimo pouco antes do fim da vida do rebolo ($Ra = 0,8 \mu m$), o que confundiria qualquer estratégia de determinação do momento de dressagem. Pode-se pensar no entanto em se utilizar este sinal como um dos parâmetros de entrada de uma rede neural utilizada para tomada de decisão do momento de fim de vida do rebolo (conjuntamente com outros sinais), já que, apesar do comportamento um pouco aleatório do sinal, existe uma tendência de crescimento do mesmo com o volume de material removido, tendência que também ocorre com a rugosidade, que é o parâmetro que realmente define o momento de dressagem do rebolo.

Analisando-se a figura 5.5, pode-se perceber que o sinal de emissão acústica, captado pelo sistema Physical Acoustics, não apresenta relação com o volume de material removido, pois o mesmo permanece oscilando em torno de um valor médio, sem apresentar aumento constante, apresentando este mesmo comportamento no fim de vida do rebolo, para todas as velocidades de avanço. Com isto, pode-se concluir que os fenômenos que afetam a rugosidade e definem o fim da vida do rebolo, como vibração e perda da agressividade dos grãos, não afetam a emissão acústica medida no contra-ponto de fixação da peça. Tentou-se especular porque o sistema BM-12, que estava colocado em uma posição mais distante da região de corte que o sistema Physical Acoustics (portanto com sinal mais suscetível à atenuações), apresentou resultados mais compatíveis com o crescimento da rugosidade da peça e com a perda de afiação do rebolo. A hipótese mais provável para explicação deste evento é que o sinal de EA do sistema BM-12 capta frequências mais baixas (foi filtrado com um filtro passa-alta com frequência de corte de 10 kHz, enquanto o sistema da Physical Acoustics foi filtrado com um filtro passa-banda de 100 a 300 kHz) e pôde melhor captar as harmônicas do sinal de vibração de baixa frequência que, como já visto, foi um dos causadores do crescimento da rugosidade da peça.

Das afirmações anteriores, pode-se concluir que a emissão acústica não pode ser usada a priori, sem um maior condicionamento do sinal, para estabelecimento do fim da vida do rebolo, embora venha sendo largamente utilizada para monitorar outras características do processo com sucesso, conforme mostrado no capítulo 3.

A fim de se calcular outros parâmetros do sinal de emissão acústica que se relacionassem com o fim da vida do rebolo, foram calculados também os desvios padrão dos sinais de emissão acústica ao longo do experimento, cujo resultado pode ser observado na figura 5.6.

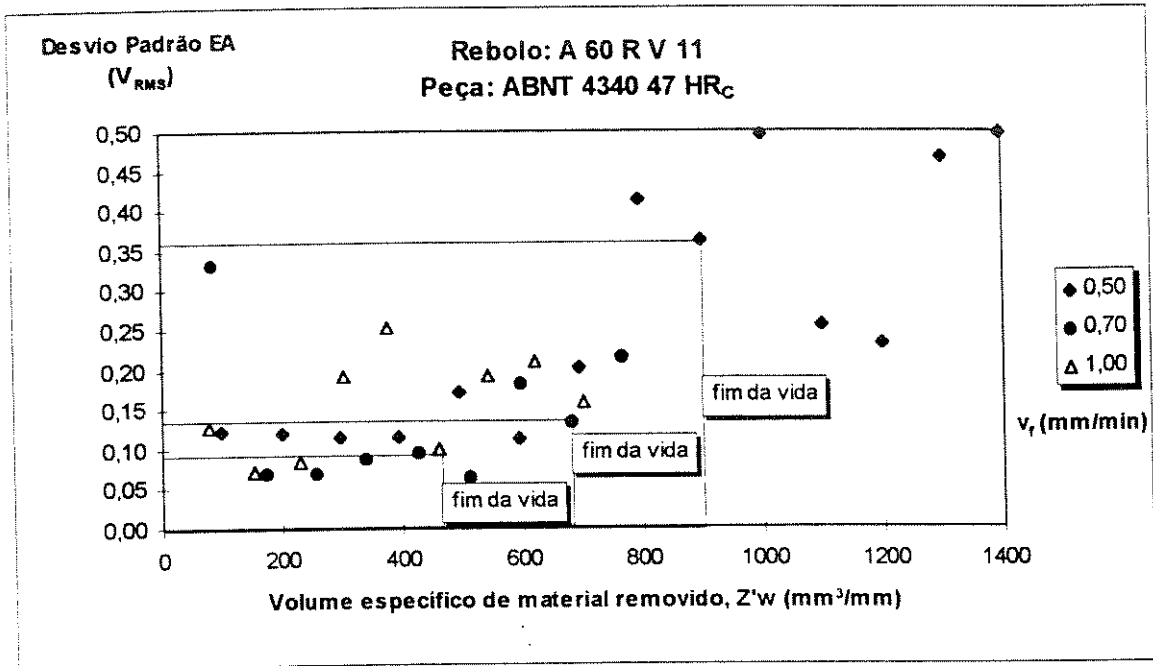


Figura 5.6 - Desvio padrão da EA x volume específico de material removido

Os dados desta figura foram adquiridos com o sistema BM-12 e mostram que o desvio padrão do sinal de emissão acústica não apresenta relação com o desgaste do rebolo, não podendo ser utilizado como indicador do momento de dressagem, ou troca da ferramenta.

5.1.2.2 Vibração Mecânica

Durante os testes preliminares, percebeu-se claramente que o sistema máquina-ferramenta-peça apresentava um nível de ruído (som) maior, à medida que o rebolo perdia afiação, ruído este que é utilizado por operadores experientes na indústria como um dos fatores que determinam o momento de dressagem. Porém, os sensores de emissão acústica não detectavam este fenômeno, especialmente o sistema Physical Acoustics. Decidiu-se então pela medição também da vibração mecânica, cujo resultado pode ser observado na figura 5.7.

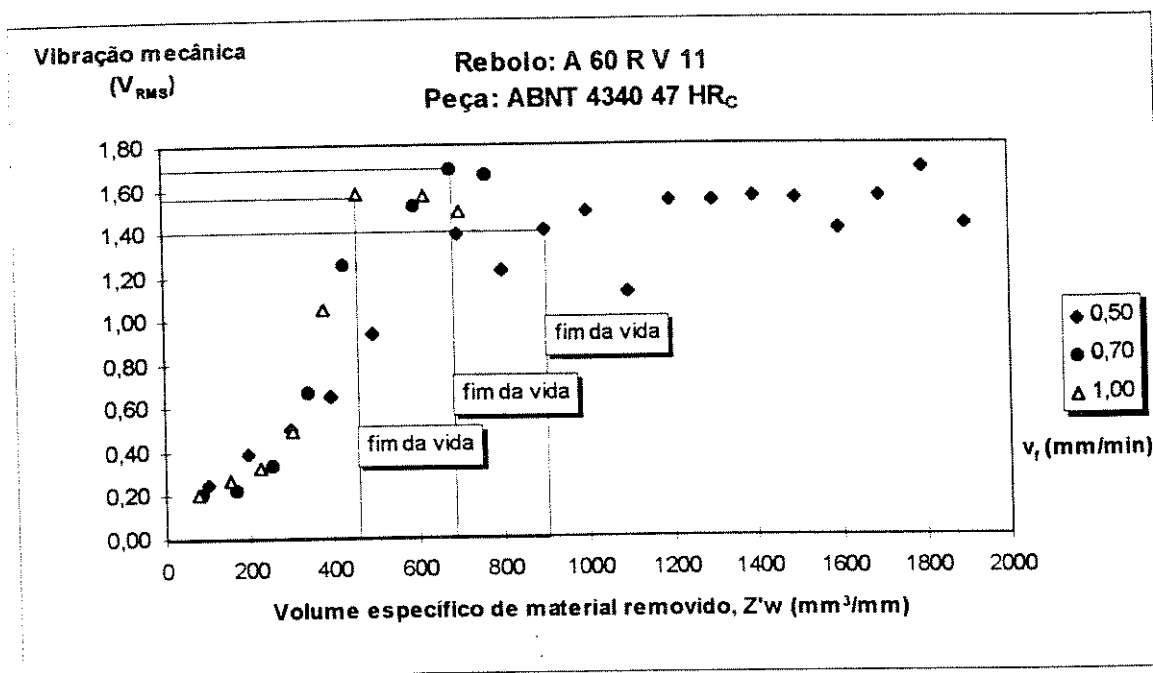


Figura 5.7 - Vibração mecânica x volume específico de material removido.

A análise desta figura mostra que a vibração apresenta comportamento bastante semelhante ao comportamento da rugosidade, apresentando um crescimento do nível de vibração contínuo com o volume de material removido, sendo que com velocidade de avanço de 0,5 mm/min a curva se estabilizou após o fim da vida do rebolo.

Nota-se ainda que no início de vida, ou seja, com o rebolo recém dressado, o nível de vibração é igual para as três condições de avanço, de onde conclui-se que o avanço não influencia a vibração mecânica. O fator que exerce influência na vibração do sistema é o estado de afiação do rebolo, este sim influenciado pela velocidade de avanço do mesmo.

O estabelecimento de uma estratégia para decisão de dressagem não pode ser feito de imediato, haja vista que as estratégias comumente utilizadas no mercado não se aplicam, pois:

A) Os níveis de vibração, no fim de vida (quando $R_a = 0,8 \mu m$) foram 1,41 V, 1,66 V e 1,31 V para as velocidades de avanço de 0,5 mm/min, 0,7 mm/min e 1,0 mm/min respectivamente, sendo este último obtido via interpolação. Caso fosse feita uma opção por dressar o rebolo quando o nível de vibração fosse 1,31 V (o menor dos valores de vibração, que garantiria que, com nenhuma das velocidades de avanço se ultrapassasse a rugosidade limite), seria estabelecida uma vida de 845 mm^3/mm e 468 mm^3/mm , para $v_f = 0,5$ mm/min e

0,7 mm/min, gerando um desperdício de vida do rebolo de 7,7% e 38,9%, respectivamente. Por outro lado, se a decisão de dressagem se desse com um nível de vibração em 1,66 V (o maior dos valores de vibração no fim da vida do rebolo), ter-se-ia certamente R_a acima de $0,83 \mu\text{m}$ para $v_f = 0,5 \text{ mm/min}$, e acima de $1,05 \mu\text{m}$ para $v_f = 1,0 \text{ mm/min}$, o que ocasionaria rejeição de peças. Por último, pode-se adotar o valor de vibração igual a 1,41 V, sendo que neste caso, teríamos um desperdício de 31,1 % para o avanço de 0,7 mm/min e uma rugosidade em torno de $0,84 \mu\text{m}$ para o avanço de 1,0 mm/s. Analisando-se os resultados apresentados acima, percebe-se que ou a ordem de grandeza dos desperdícios são muito altas ou o valor de rugosidade média é inaceitável. Assim, a estratégia de determinação de um valor absoluto de vibração para o estabelecimento do fim da vida do rebolo não pode ser utilizada.

B) Outra estratégia comumente utilizada é a de se adotar um percentual de crescimento do sinal em relação ao seu valor no início da vida do rebolo. Porém, analisando-se a figura 5.7, nota-se que os valores iniciais são praticamente iguais (da ordem de 0,2 V) e os valores finais são aqueles mencionados no parágrafo anterior. Efetuando-se os cálculos, obteve-se como resultados 5,67, 8,23 e 6,50 para as relações de valor final sobre valor inicial para as três velocidades de avanço em questão. O maior valor é cerca de 45% maior que o menor valor. Portanto, também esta estratégia acarretaria desperdício do rebolo ou rejeição de peças, dependendo do valor adotado de percentual de crescimento do sinal.

C) Outro aspecto que pode ser analisado é a estabilização da curva em torno de um determinado valor. Pelo gráfico, para $v_f = 1,0 \text{ mm/min}$, o ponto a partir do qual a curva estabiliza-se, que não pode ser utilizado para determinação do fim de vida, pois haverá necessidade de pontos posteriores a este para se determinar a estabilidade da curva, corresponde a uma rugosidade média em torno de $0,9 \mu\text{m}$, maior que a rugosidade limite, acarretando rejeição de algumas peças. Analisando-se as demais curvas da mesma forma que a mencionada anteriormente, tem-se rugosidades médias no momento da estabilização em torno de $0,65 \mu\text{m}$, estando estas portanto próximas do momento real de dressagem, mas ainda gerando desperdício de rebolo.

Sugere-se para a definição de uma estratégia de determinação do fim da vida do rebolo, a aquisição e tratamento do sinal de vibração mecânica bruto e, utilizando-se por exemplo, a análise do sinal no domínio da frequência, como o efetuado por Inasaki, 1990. Como uma segunda sugestão, pode-se utilizar uma rede neural para análise do sinal de vibração mecânica, conjuntamente com outros sinais.

Foram efetuados cálculos referentes aos desvios padrão do sinal de vibração, mas a exemplo do ocorrido com a emissão acústica, não houve correlação entre o desvio padrão e o desgaste do rebolo.

5.1.2.3 Corrente elétrica consumida pelo motor

A figura 5.8 mostra a variação da corrente elétrica consumida pelo motor da retificadora contra o volume específico de cavaco removido.

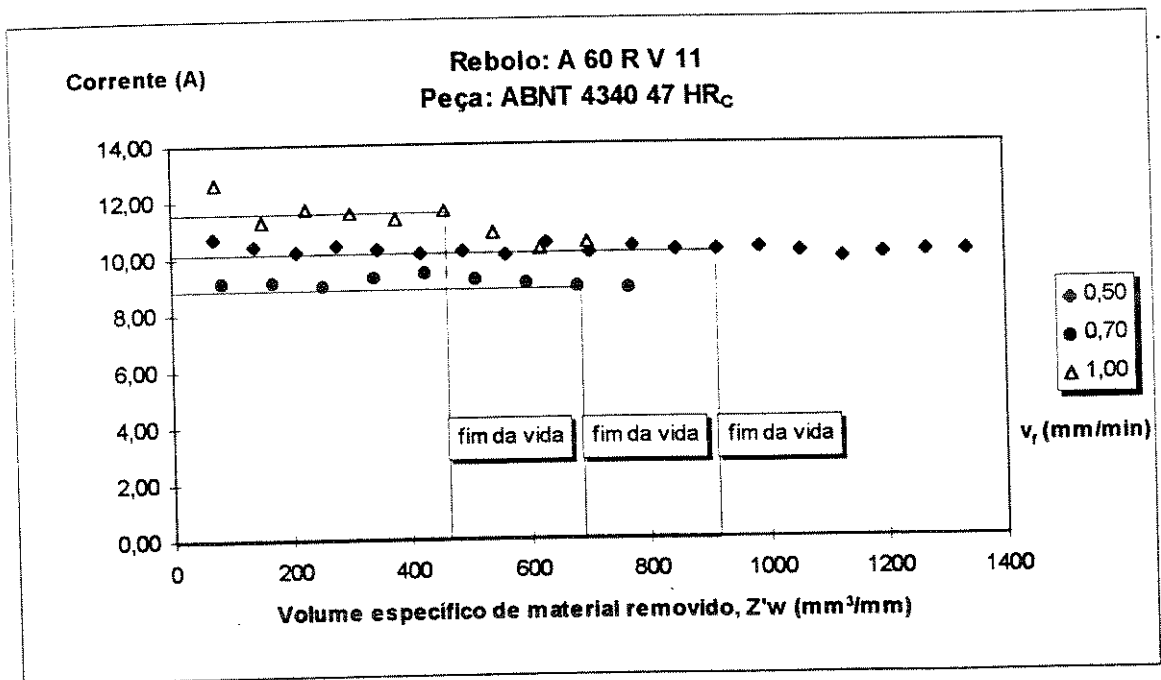


Figura 5.8 - Corrente elétrica x volume específico de material removido.

A análise da figura 5.8 mostra que a corrente elétrica consumida pelo motor da máquina permanece praticamente constante ao longo da vida do rebolo, provavelmente devido à relação entre os esforços de corte e as forças necessárias para acionamento dos diversos

componentes da máquina ser pequena. Desta forma variações nas forças de corte, que ocorrem devido à perda de afiação do rebolo, não são significativas no montante total.

Traçou-se também uma figura que relaciona o desvio padrão do sinal de corrente e o volume específico de material removido que, a exemplo dos demais desvios padrão, não apresentou relação com a perda de agressividade do rebolo.

5.1.2.4 Análise de sensibilidade dos sensores

Como foi visto no capítulo 3, é importante determinar-se com exatidão o momento de término da deformação elástica da peça e do eixo do rebolo, que se inicia logo após o contato rebolo-peça na retificação de mergulho e, também, o momento de fim da fase de centelhamento do rebolo. Assim, procurou-se verificar qual dos sensores utilizados podia determinar estes momentos com mais exatidão.

A figura 5.9 mostra os sinais dos 4 sensores utilizados durante um ciclo completo típico de retificação de uma peça.

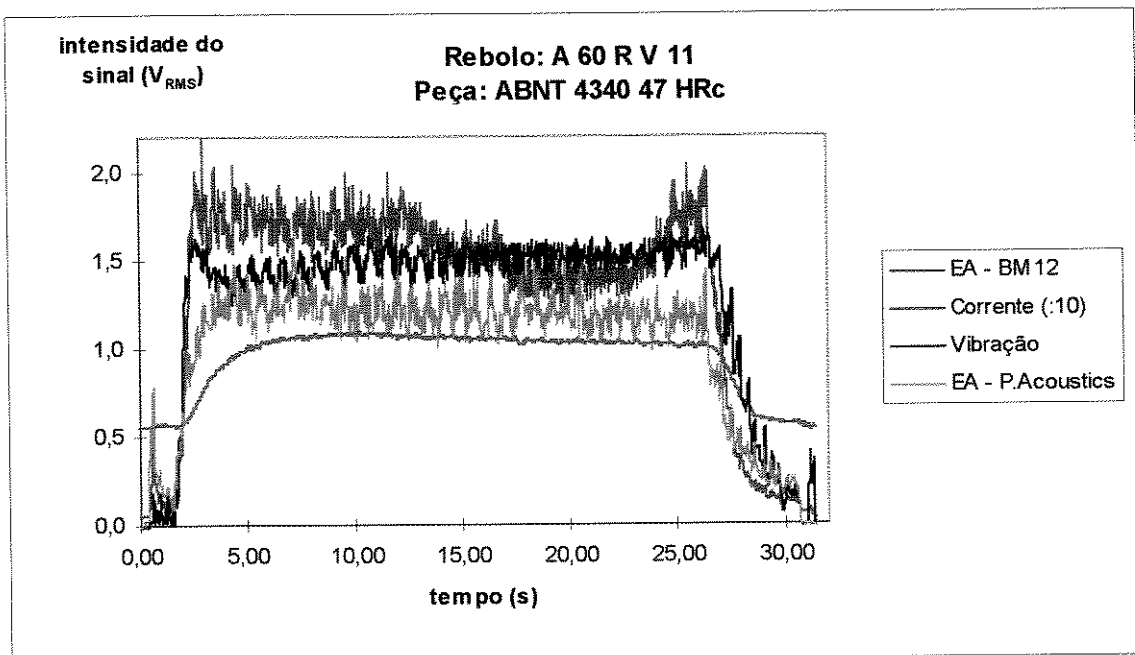


Figura 5.9 - Sinal dos quatro sensores, EA (2x), Vibração e Corrente, mostrando um ciclo completo de retificação.

Pode-se ver nesta figura que todos os sensores tem comportamento semelhante, isto é, crescimento inicial durante a fase de deformação elástica, estabilização depois que o avanço efetivo se estabilizou, queda durante a fase de centelhamento e posterior estabilização, quando o centelhamento já terminou e somente se tem atrito entre peça e rebolo (não ocorre mais retirada de cavaco). Resta agora saber qual (ou quais) dos sensores detecta todas estas fases com maior exatidão.

Ainda na figura 5.9, percebe-se que o sinal de corrente demora mais para se estabilizar ao fim da fase de deformação elástica que os demais sensores e se estabiliza antes que os demais no fim da fase de centelhamento. Além disso, ele também é o último a começar a cair no início da fase de centelhamento. Isso deve-se à inércia do sistema máquina-rebolo, pois o motor deve acionar uma série de componentes antes de fazer o mesmo com o rebolo. Assim, conclui-se que o sinal de corrente não é sensível às pequenas variações no avanço efetivo que ocorrem durante as fases de deformação elástica e centelhamento.

A figura 5.10 mostra uma ampliação do período de deformação elástica, monitorado por três sensores (EA (2x) e vibração mecânica).

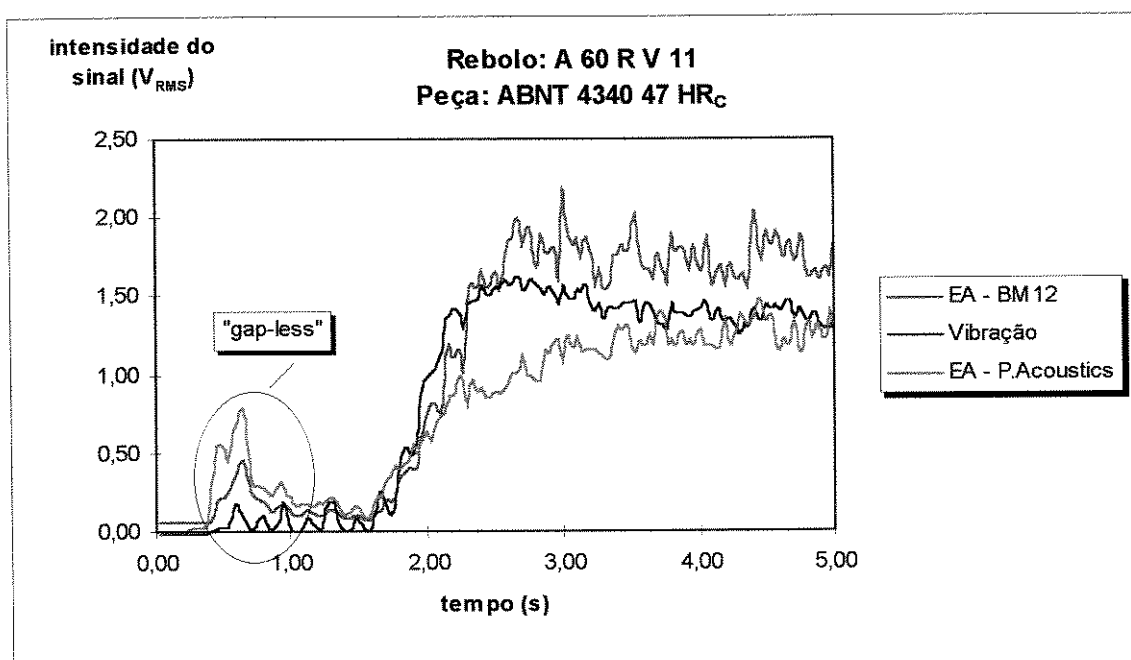


Figura 5.10 - Sinais dos diversos sensores no início do ciclo de retificação

Analisando-se a figura 5.10, observa-se que os três sinais conseguem detectar o contato rebolo-peça, realizado pelo sistema “gap-less” e que esta detecção é feita simultaneamente. Já

em relação ao fim da fase de deformação elástica, o sinal do sensor de emissão acústica do sistema Physical Acoustics se estabiliza pouco depois que os demais, indicando que este sensor consegue detectar variações menores do avanço efetivo, sendo, por isso, o sensor mais indicado caso o objetivo seja a determinação do tempo de deformação elástica.

A figura 5.11 é similar à figura 5.10, mas refere-se à fase de centelhamento.

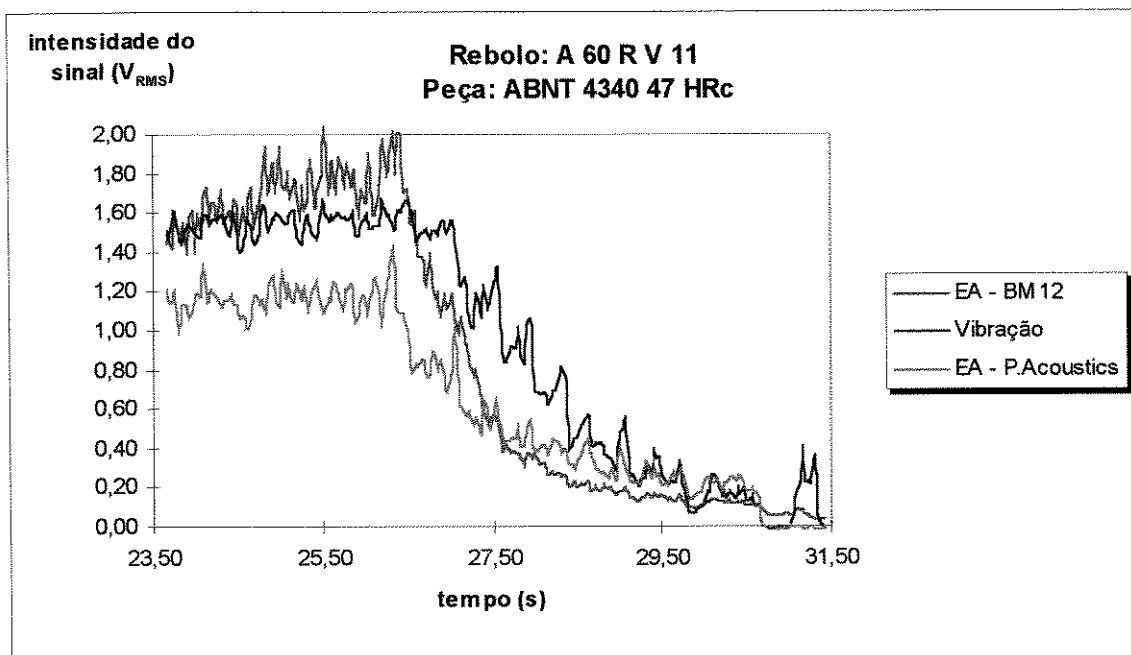


Figura 5.11 - Sinais dos diversos sensores no fim do ciclo de retificação

Fazendo a mesma análise que foi feita para a deformação elástica, nota-se na figura 5.11 que os três sensores detectam o início do centelhamento quase que simultaneamente, isto é, começam a cair quase que no mesmo instante. Com relação à determinação do fim da fase de centelhamento, que é o momento mais importante a ser determinado com exatidão, pois é neste momento que se deve dar início ao afastamento rápido do rebolo, pode-se notar que o sinal de EA-BM12 se estabilizou bem antes dos demais (em torno de $t = 29$ s). Os sinais de vibração e de EA-Physical Acoustics se estabilizaram em torno de $t = 30$ s, que parece ser realmente o momento a partir do qual não se tem mais remoção de cavaco (fim do centelhamento). O sensor de EA-BM12 entre os instantes 29 e 30 s detectou a pequena remoção de cavaco ainda existente de uma maneira muito tênue (inclinação da curva muito pequena).

Assim, se o propósito é a detecção exata do fim do centelhamento, tanto o sistema EA-Physical Acoustics, quanto o monitoramento da vibração podem ser utilizados. Porém, o sistema de EA-BM12 não deve ser descartado para este fim, pois em muitos casos, tolera-se o afastamento do rebolo um pouco antes do fim do centelhamento para economia de tempo, mesmo com uma certa queda na qualidade da peça.

Comportamentos similares aos mostrados nas figuras 5.9 a 5.11 ocorreram em todas as operações realizadas com rebolo duro, mostrando que as conclusões tiradas acima podem ser extrapoladas para as demais peças e demais condições de usinagem.

A conclusão deste item é de que deve-se determinar a característica de interesse a ser monitorada e, em função desta, definir o sistema de monitoramento, pois as características deste vão determinar uma maior ou menor sensibilidade do sistema.

Para a análise que vai se fazer a seguir a fim de se verificar a existência de uma relação entre os tempos de deformação elástica e/ou de centelhamento com a perda de afiação do rebolo, utilizar-se-á o sistema de EA da Physical Acoustics, pois este foi capaz de detectar com exatidão tanto o tempo de deformação elástica, quanto o de centelhamento. Caso esta relação seja verificada, poder-se-á utilizá-la para estabelecimento do fim de vida do rebolo.

5.1.2.5 Tempos de deformação elástica e centelhamento

Para que se analisar a correlação entre os tempos da deformação elástica do sistema eixo do rebolo-peça e do centelhamento com o estado de afiação do rebolo, é necessário determinar estes valores com exatidão. O método para estabelecê-los foi o seguinte:

Utilizando o software Microsoft Excel foram traçadas curvas que aproximavam as curvas do começo e fim do ciclo de retificação de uma peça referentes ao sinal de EA-Physical Acoustics, por um polinômio. Derivou-se as equações destas curvas e determinou-se os pontos onde estas derivadas eram iguais a zero. Assim, definiu-se os pontos de início e fim da deformação elástica e do centelhamento. Contou-se então os pontos entre as posições onde a função tinha derivada zero. Como a taxa de amostragem utilizada foi de 30 pontos por segundos, foi possível converter-se o número de pontos em unidades de tempo.

Os resultados destes cálculos podem ser vistos nas figuras 5.12 e 5.13.

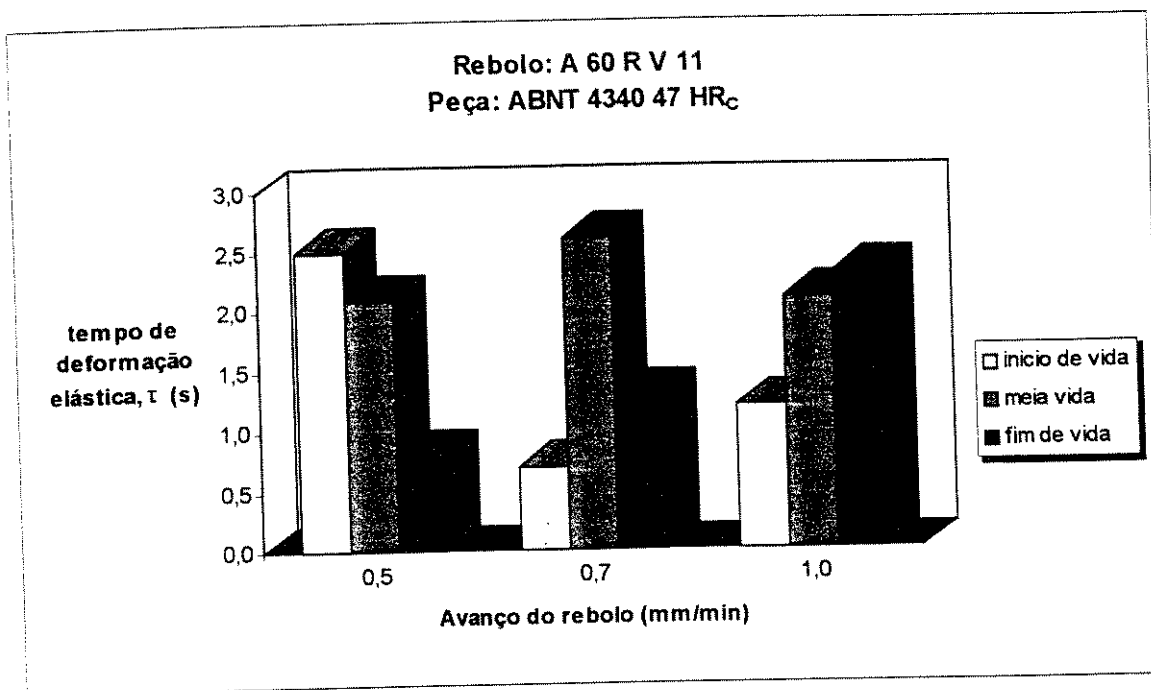


Figura 5.12 - Tempo de deformação elástica x avanço do rebolo no início, meio e fim de vida do rebolo

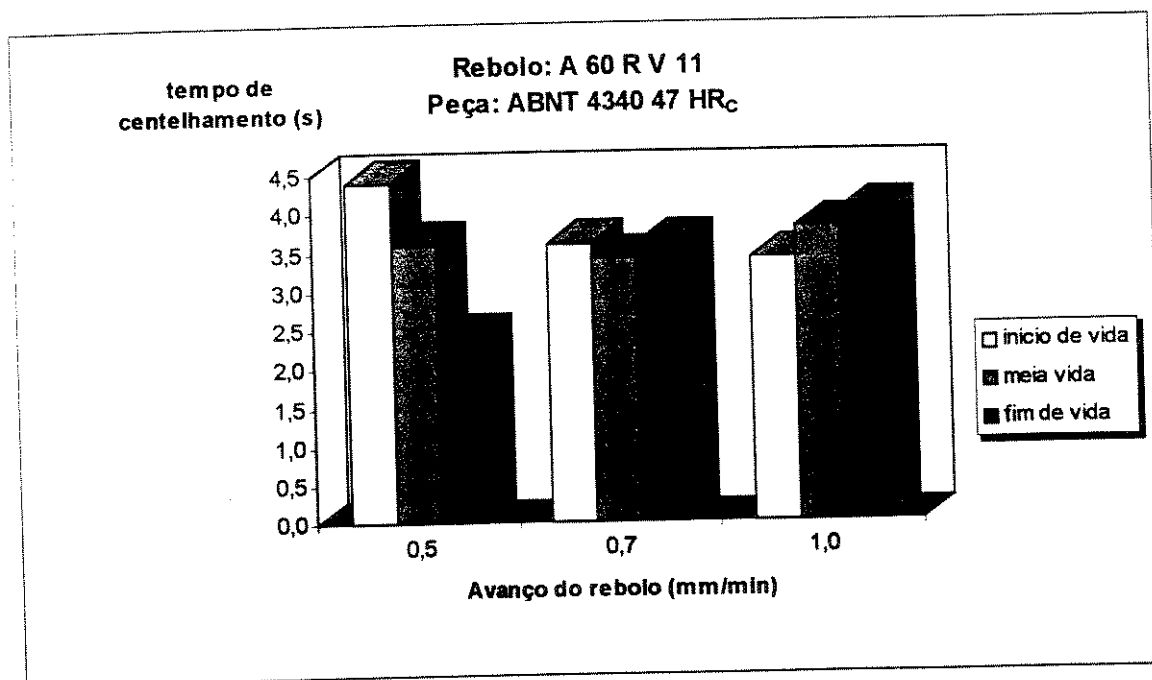


Figura 5.13 - Tempo de centelhamento x condições de avanço no início, meio e fim de vida do rebolo.

Analisando as figuras 5.12 e 5.13, nota-se que não há correlação entre os tempos de deformação elástica e centelhamento e o estado de afiação do rebolo, bem como entre estes e as condições de avanço. Isto mostra que o aumento dos esforços de corte causado pela perda de agressividade do rebolo não foi grande o suficiente para influenciar o valor da deformação elástica do sistema e, portanto, não influenciou nem o tempo desta fase e nem o relaxamento desta deformação elástica, que se dá no centelhamento

5.2 Resultados referentes à utilização de rebolo mole

Os ensaios utilizando rebolo mole foram feitos posteriormente aos ensaios com rebolo duro. Em função disto não foi monitorada a corrente elétrica do motor, pois como foi concluído, esta não apresenta correlação com a perda de afiação da ferramenta.

5.2.1 Análise dos corpos de prova

5.2.1.1 Rugosidade

A utilização do rebolo considerado mole forneceu como resultado das medições de rugosidade, ao longo do experimento, os dados mostrados nas figuras 5.14 e 5.15.

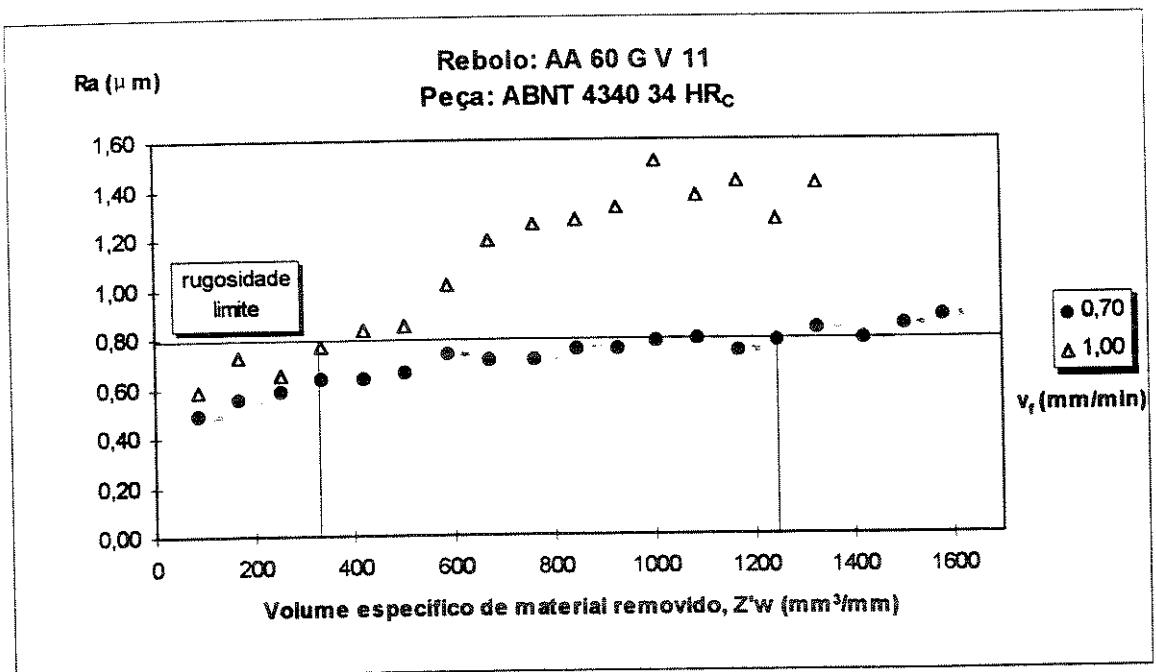


Figura 5.14 - Rugosidade superficial, Ra x volume específico de material removido.

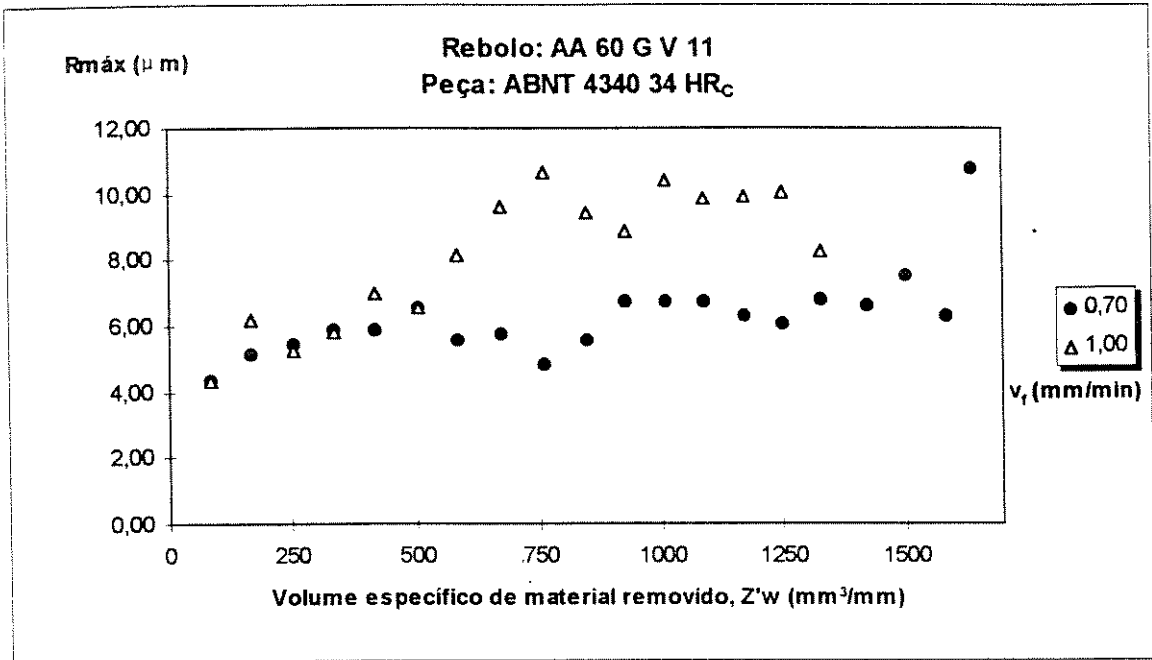


Figura 5.15 - Rugosidade superficial, R_{\max} , x volume específico de material removido.

Pode-se observar nas figuras 5.14 e 5.15 que a rugosidade média, R_a , e a rugosidade máxima, R_{\max} , crescem continuamente com o aumento do volume específico de material removido e, conseqüentemente, com o desgaste ou perda de afiação do rebolo, da mesma forma que foi observada anteriormente com rebolo duro. Conforme visto no capítulo 2, o mecanismo de desgaste característico de rebolos moles é a perda volumétrica.

Nota-se na utilização de rebolo mole, que as condições de avanço influenciam a rugosidade no início da vida da ferramenta, sendo que para a velocidade de avanço maior obteve-se rugosidades médias maiores (20% a 30% maiores), diferente do que ocorreu com rebolo duro. Neste caso, então, o centelhamento não conseguiu corrigir a maior rugosidade causada pelo maior avanço. Nota-se também que o comportamento da rugosidade média difere do da rugosidade máxima. O valor inicial de R_{\max} é idêntico para as duas velocidades de avanço. A explicação para este acontecimento está ligada ao fato de que o centelhamento elimina os picos de rugosidade, diminuindo o valor de R_{\max} com uma intensidade bem maior do que o faz com a rugosidade média. Isso mostra que a influência do centelhamento se dá em escala da ordem de grandeza das cristas de rugosidade

Outro ponto que deve ser ressaltado, é o de que a velocidade de avanço influencia fortemente a taxa de crescimento da rugosidade e com isso a vida do rebolo. Ainda tendo como critério de fim de vida $R_a = 0,8 \mu\text{m}$, tem-se para $v_f = 0,7 \text{ mm/min}$ uma vida de $1423 \text{ mm}^3/\text{mm}$, enquanto que para $v_f = 1,0 \text{ mm/min}$, a vida foi de $378 \text{ mm}^3/\text{mm}$.

5.2.1.2 Circularidade

Nestes testes também a circularidade foi medida a posteriori, com o mesmo propósito dos ensaios com rebolo duro. Os dados obtidos podem ser observados na figura 5.16.

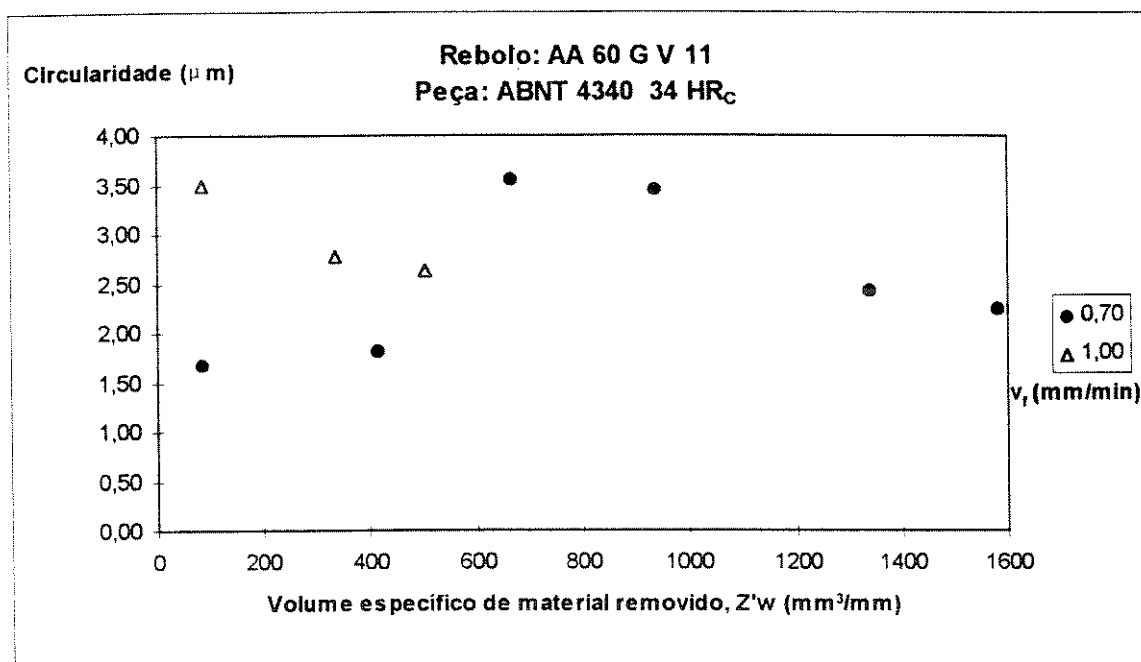


Figura 5.16 - Circularidade x volume de material removido

Também nestes testes com rebolo mole definiu-se IT 5 como a qualidade dimensional desejada. Logo, o valor limite para a circularidade era metade da tolerância dimensional ($13 \mu\text{m}$), isto é, $6,5 \mu\text{m}$

A análise da figura mostra que os valores de circularidade obtidos com as velocidades de avanço de $0,7 \text{ mm/min}$ e $1,0 \text{ mm/min}$, no fim da vida do rebolo, foram $2,30 \mu\text{m}$, e $2,70 \mu\text{m}$ respectivamente. A figura mostra ainda que o maior valor de circularidade medido foi de $3,55 \mu\text{m}$, bem abaixo do limite para o fim da vida. Assim, mesmo quando se retificou com rebolo mole, onde a perda volumétrica do rebolo é mais acentuada à medida que o volume de

material removido cresce, o erro de circularidade não cresce a ponto de comprometer a qualidade das peças.

Assim, a circularidade não constitui um bom parâmetro para definição do momento de dressagem e, daqui para a frente, somente será utilizada a rugosidade como critério de fim de vida do rebolo e como parâmetro de comparação com os sinais advindos dos sensores.

Um dos objetivos deste trabalho é colaborar com a automação do processo de retificação, eliminando o controle “off line” das características da peça que definem o fim da vida do rebolo substituindo tal controle pelo dos sinais captados do processo.

5.2.2 Monitoramento do Processo de Retificação

5.1.2.1 Emissão Acústica

Foi utilizada a mesma montagem experimental dos ensaios anteriores, portanto, os sinais de EA, foram adquiridos de dois conjuntos de monitoramento, o BM-12 e o Physical Acoustics, cujas características também foram descritas anteriormente. As figuras 5.17 e 5.18 mostram o comportamento destes sinais contra o volume específico de material removido.

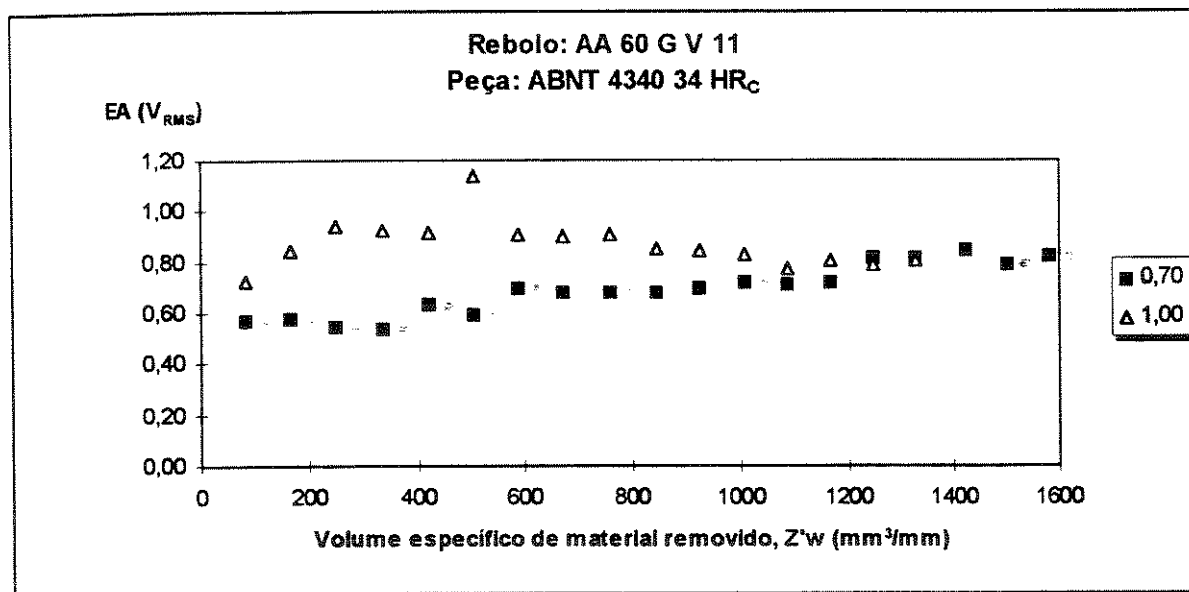


Figura 5.17 - Valor médio da EA x volume específico de material removido, conjunto BM-12.

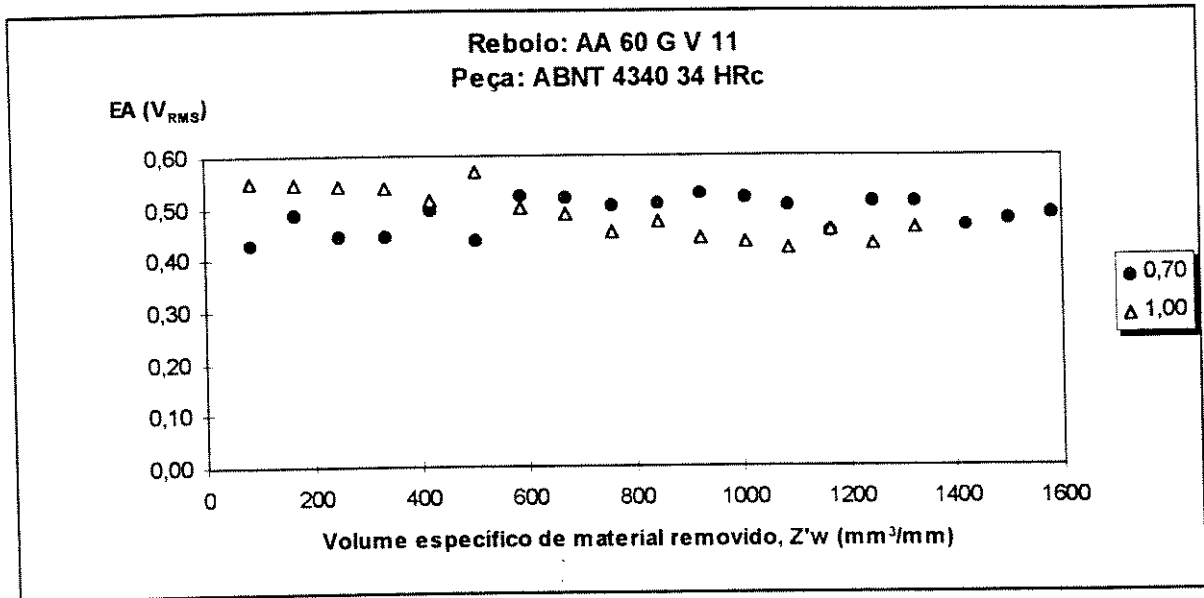


Figura 5.18 - Valor médio da EA x volume específico de material removido, conjunto Physical Acoustics.

Conforme pode-se observar na figura 5.17, o sinal de emissão acústica captado pelo aparelho BM-12 apresenta comportamentos diferentes para as duas velocidades de avanço estudadas. Para a velocidade de avanço de 0,7 mm/min, o sinal apresenta um crescimento pequeno mas constante ao longo da vida do rebolo. Já para $v_f = 1,0$ mm/min ocorre um crescimento inicial até aproximadamente 250 mm³/mm, ocorrendo então uma estabilização da curva. Com esta variação de comportamento não é possível decidir o momento de dressagem baseado nas informações deste sinal.

Analisando-se a figura 5.18, pode-se perceber que o sinal de emissão acústica captado pelo sistema Physical Acoustics também não apresenta relação com o volume de material removido, pois o mesmo permanece oscilando em torno de um valor médio, sem mostrar indícios de que o rebolo está se desgastando. Novamente pode-se concluir que a emissão acústica medida através deste sistema de monitoramento não pode ser usada para estabelecimento do fim da vida do rebolo.

O fim da vida do rebolo neste caso se deu principalmente porque ocorreu perda diametral do rebolo (de uma maneira irregular que comprometeu a rugosidade da peça), sem necessariamente perda de agressividade. Como o rebolo continuou agressivo, não houve

variação nas fontes de geração de emissão acústica no processo de retificação, que são, como citado no capítulo 3 as fases de deformação elástica e riscamento de pequena porção de material à frente do grão abrasivo e a própria formação do cavaco. Assim, a emissão acústica não acompanhou o crescimento da rugosidade e, com isso, não conseguiu estabelecer o momento de fim de vida do rebolo.

Também nos ensaios com rebolo mole foram calculados os desvios padrão dos sinais de emissão acústica ao longo do experimento e novamente concluiu-se que o desvio padrão do sinal de emissão acústica não apresenta relação com o desgaste do rebolo.

5.2.2.2 Vibração Mecânica

Como já havia sido feito com rebolo duro, também aqui foi efetuado o monitoramento da vibração mecânica do contra-ponto de fixação da peça. Os resultados deste monitoramento estão mostrados na figura 5.18.

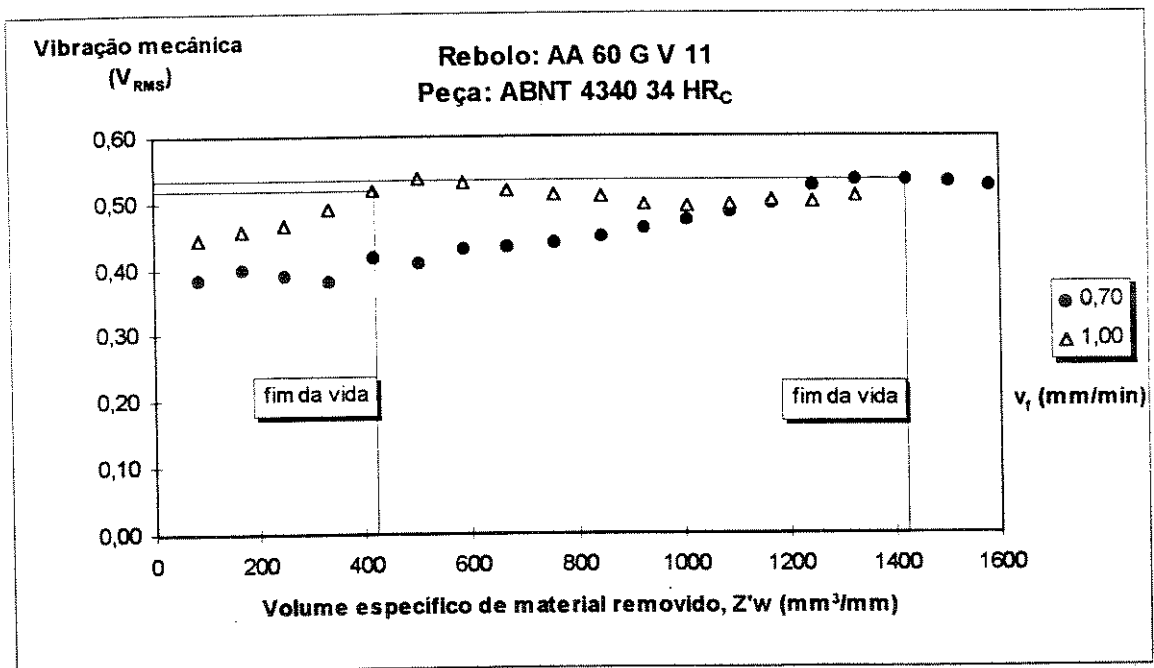


Figura 5.19 - Vibração mecânica x volume específico de material removido.

A análise desta figura mostra que novamente as curvas de rugosidade média (ver figura 5.14) e de vibração são bastante semelhantes ao longo da vida do rebolo, ou seja, ocorre um crescimento contínuo do nível de vibração com o volume de material removido. Porém, o crescimento da rugosidade ao longo da vida do rebolo é muito maior que o crescimento da

vibração, principalmente no tocante à curva relativa a $v_f = 1,0$ mm/min, o que não ocorreu quando da retificação com rebolo duro. Isto ocorreu porque o aumento da rugosidade (e, portanto o fim da vida do rebolo) se deu principalmente devido à perda diametral do rebolo (e não à perda de agressividade). Assim, os esforços de corte não cresceram substancialmente, não gerando aumento significativo da vibração. O pequeno aumento de vibração ocorrido deve ser creditado à irregularidade da perda diametral, que gerou erro de circularidade no rebolo e, portanto, variação na profundidade de usinagem que estava sendo retirada em cada instante.

Nota-se ainda que, diferentemente do que ocorreu com rebolo duro, no início de vida, ou seja com o rebolo recém dressado, o nível de vibração é maior para o avanço de 1,0 mm/min do que para o de 0,7 mm/min, mostrando que para este tipo de rebolo, o avanço influencia a vibração mecânica.

Pensando-se em se estabelecer uma estratégia de definição do momento de dressagem do rebolo, fez-se:

A) Os níveis de vibração no fim de vida do rebolo foram 0,53 V e 0,51 V para $v_f = 0,7$ mm/min e 1,0 mm/min respectivamente, o que fornece uma diferença de aproximadamente 3%. Se um valor fixo de 0,53 V for estabelecido como parâmetro de definição do fim de vida, ter-se-á uma rugosidade média igual a $0,85 \mu\text{m}$ para $v_f = 1,0$ mm/min. Por outro lado se o valor escolhido for 0,51 V, ter-se-á um desperdício de 10% da vida do rebolo quando a velocidade de avanço for 0,7 mm/min. Assim, se um valor fixo de vibração for estabelecido para este fim, não haverá grande desperdício de rebolo. Porém, esta estratégia deve ser testada em um maior número de condições de usinagem diferentes, para que se possa afirmar que ela pode ser utilizada.

B) Analisando-se a estratégia do percentual de acréscimo, tem-se como resultados das relações entre nível de vibração no final da vida e no início da vida 1,38 e 1,16 para $v_f = 0,7$ mm/min e 1,0 mm/min respectivamente, o que implica numa variação de 15% e, assim, descarta esta estratégia.

C) Outro aspecto que pode ser analisado é a estabilização da curva em torno de um determinado valor. Pela figura 5.19, para $v_f = 1,0$ mm/min, a estabilização ocorre após o fim da vida do rebolo, quando a rugosidade já era de $0,85 \mu\text{m}$ (o fim da vida do rebolo ocorreu quando Z'_w era $378 \text{ mm}^3/\text{min}$), sendo que para $v_f = 0,7$ mm/min, esta estabilização tem início exatamente quando ocorre o fim da vida do rebolo. Portanto esta estratégia também deve ser descartada.

Sugere-se a utilização da estratégia de valor fixo, pelo menos para as condições de ensaio utilizadas. Por outro lado, com certeza o sinal de vibração é um bom parâmetro a ser colocado como entrada em uma rede neural que tenha como objetivo determinar o fim da vida do rebolo.

Como conclusão, pode-se dizer que a vibração mecânica é influenciada pelo desgaste do rebolo mole, sendo portanto passível de ser utilizada para determinação do momento de dressagem, ressaltando-se o fato de que devem ser efetuados mais ensaios, com outras condições de usinagem, a fim de um estabelecimento mais confiável da estratégia a ser empregada. Além disso, vale a pena continuar explorando o sinal de vibração para determinação do momento de dressagem do rebolo, através de uma análise no domínio da frequência e no domínio do tempo-frequência (wavelets), além de se explorar também os sinais de velocidade (primeira integral do sinal de aceleração que sai do sensor) e de deslocamento (segunda integral) do ponto onde o sensor está preso.

Aqui também foram efetuados cálculos referentes aos desvios padrão do sinal de vibração mas, a exemplo do ocorrido anteriormente, não houve correlação entre o desvio padrão e o desgaste do rebolo.

5.2.3 Tempos de deformação elástica e centelhamento

Foi utilizada a mesma metodologia de determinação dos tempos de deformação elástica e centelhamento citada para rebolo duro. Os resultados podem ser vistos nas figuras 5.19 e 5.20.

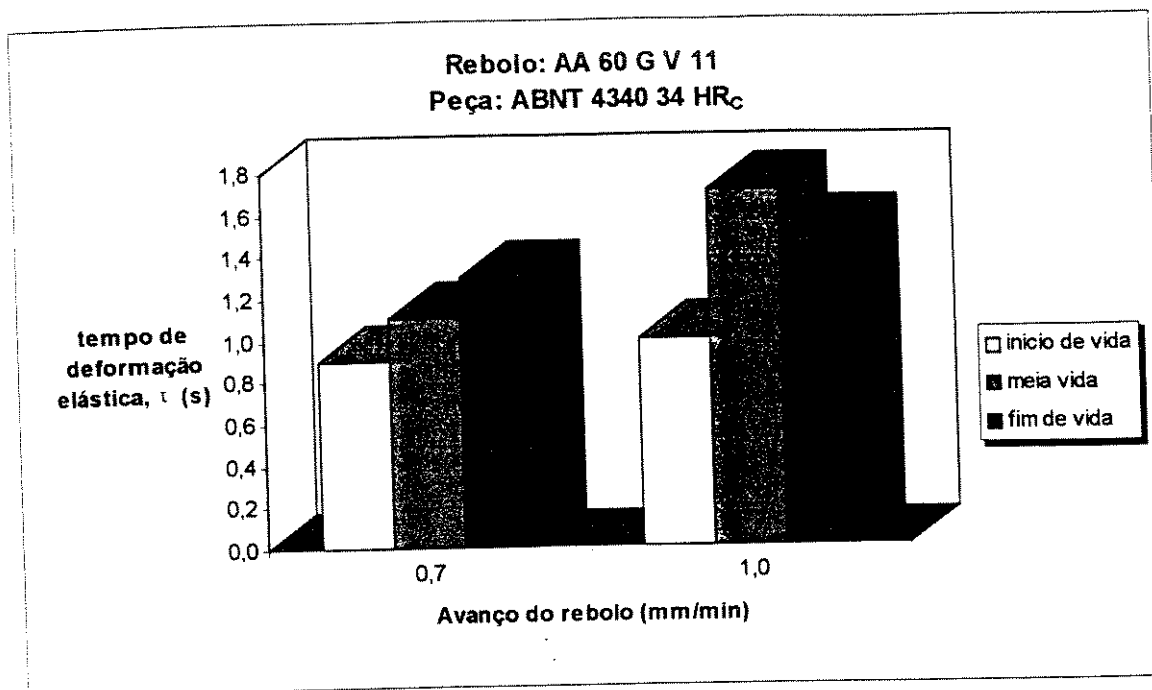


Figura 5.20 - Tempo de deformação elástica x condições de avanço no início, meio e fim de vida do rebolo

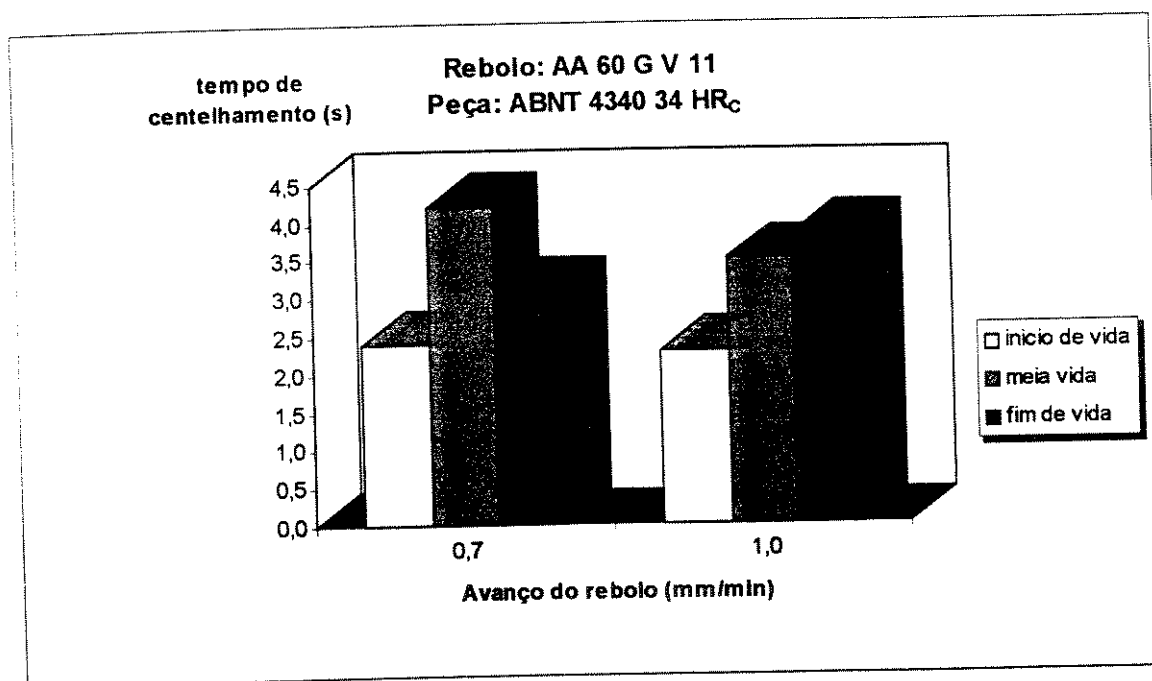


Figura 5.21 - Tempo de centelhamento x condições de avanço no início, meio e fim de vida do rebolo.

Analisando-se estas figuras, nota-se que também para rebolo mole, não há correlação entre os tempos de deformação elástica e centelhamento e o estado de afiação do rebolo, bem como entre os tempos mencionados acima e as condições de avanço. Isto se deve ao fato de

que, como a perda diametral do rebolo foi mais significativa que a perda de afiação, as forças de corte não cresceram muito e, com isso, não influenciaram nem a fase de deformação elástica do sistema eixo do rebolo-peça, nem o relaxamento desta deformação, que se dá no centelhamento.

Capítulo 6

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

A análise dos resultados obtidos neste trabalho permitem concluir que, sob as condições utilizadas:

1. A rugosidade média e a rugosidade máxima crescem continuamente com o desgaste do rebolo, podendo ser usada como critério de fim de vida do mesmo;
2. A circularidade não indicou o fim da vida do rebolo considerando-se a regra prática de que a tolerância de forma é igual à metade da tolerância dimensional;
3. A média do valor RMS da emissão acústica na faixa de 100 kHz a 300 kHz e da corrente do motor não apresentaram relação com o desgaste do rebolo, o mesmo ocorrendo com os desvios-padrão dos valores RMS da emissão acústica, da vibração mecânica e da corrente do motor;
4. A média RMS da emissão acústica com frequências acima de 10 kHz e da vibração mecânica com frequências acima de 100 Hz apresentaram crescimento com o desgaste do rebolo, sendo que a primeira não apresentou um comportamento que possibilitasse definir o momento de dressagem;
5. O valor RMS dos sinais de emissão acústica, vibração mecânica e corrente elétrica do motor mostraram-se capazes de definir as três fases produtivas do ciclo de retificação a saber: a deformação elástica inicial, o corte propriamente dito e o centelhamento;
6. O sinal de corrente elétrica do motor apresentou um atraso na detecção do fim da deformação elástica no início do ciclo e uma estabilização mais rápida no fim da fase de centelhamento. Assim, este sensor não é apropriado para a determinação dos tempos relativos às citadas fase;

7. Os sinais de emissão acústica e de vibração mecânica conseguiram detectar o contato peça-rebolo e são indicados para a determinação do término da deformação elástica e do centelhamento, sendo que a sensibilidade para tais determinações variam em função da configuração do sistema de monitoramento (filtro, ganho, constante de tempo);
8. Os tempos de deformação elástica e de centelhamento não apresentaram relação com o desgaste do rebolo;

A partir do que foi efetuado neste trabalho, pode-se sugerir os seguintes tópicos para trabalhos futuros:

1. Adquirir o sinal bruto da emissão acústica e da vibração mecânica e analisá-lo no domínio do tempo, da frequência e do tempo/frequência;
2. Estabelecer uma estratégia de decisão do momento de dressagem utilizando uma rede neural para análise dos sinais adquiridos de diversos sensores;
3. Monitorar a potência mecânica dispendida no processo de retificação utilizando um sensor mais próximo à região de corte, a fim de verificar se este posicionamento elimina a influência da inércia do sistema máquina-rebolo e viabiliza esta característica para determinação dos tempos de centelhamento e deformação elástica;
5. Implementar a dressagem automática utilizando a estratégia de valor RMS fixo da vibração mecânica;
6. Utilizar rebolos mole e duro na usinagem de peças com e sem tratamento térmico efetuando uma comparação da vida do rebolo nos dois casos, a fim de verificar a regra prática de que deve-se utilizar rebolos duros para peças sem tratamento térmico e vice-versa;

8. Estudar o comportamento dos sinais de vibração mecânica, emissão acústica e corrente elétrica do motor para determinação de queima das peças.

Referências Bibliográficas

Bibliografia Citada

ASIBU JR, E. K., DORNFELD, D. A study of tool wear using statistical analysis of metal cutting acoustic emission. *WEAR*, v. 76, p. 261-268, 1981

AULT, W. Types of Grinding Wheels, in KING, R. I., HAHN, R. S. *Handbook of Modern Grinding Technology*. New York: Chapman and Hall, 1986, Chapter 3

BALDO, E. D., DINIZ, A. E. Reducing the plunge cylindrical grinding time using acoustic emission monitoring. *Revista Brasileira de Ciências Mecânicas*, v. XVII, n. 3, p. 304-313, 1995

BEATTIE, A. G. Acoustic emission, principles and instrumentation. *Journal of Acoustic Emission*, v. 2, p. 95-128, 1983

BIANCHI, Eduardo Carlos. *Ação da condições de dressagem na vida de rebolos na retificação de precisão*. São Carlos: EESC, Universidade de São Paulo, 1990. 116 p. Dissertação (Mestrado)

BIANCHI, Eduardo Carlos. *Ação da geometria teórica do cavaco no desgaste de rebolos de CBN com ligante resinóide*. São Carlos: EESC, Universidade de São Paulo, 1992. 153 p. Tese (Doutorado)

BIANCHI, Eduardo C., DIAS, Antonio C. P., BORTOLOTO, Rodrigo G., SILVA JR., Carlos E. S., SANCHEZ, Luiz E. A., FERNANDES, Odilson C., AGUIAR, Paulo R., VIEIRA JR., Milton. O comportamento da agressividade de rebolos convencionais pode ser otimizado pelas condições de usinagem e dressagem. In: IV CONGRESSO DE ENGENHARIA MECÂNICA - NORTE NORDESTE, 1996. v. 1, p. 231-236

BLUM, Thomas, DORNFELD, David A. Grinding process feedback using acoustic emission. In: 4th INTERNATIONAL GRINDING CONFERENCE AND EXPOSITION, 5, 1993, Dearborn (Detroit), Michigan. Society of Manufacturing Engineering, 1993.

BRINKSMEIER, E., TÖNSHOFF, H. K., INASAKI, I., PEDDINGHAUS, J. Basic parameters in grinding - Report on a cooperative work in STC G. *Annals of the CIRP*, v. 42, p.795-799, February 1993

BYRNE, G., DORNFELD, D., INASAKI, I., KETTELER, G., KÖNIG, W., TETI, R. Tool condition monitoring (TCM) - The status of research and industrial application. *Annals of the CIRP*, v. 44, n. 2, p. 541-561, 1995

CHANG, Y. P.; DINIZ, A. E.; DORNFELD, D. A., Monitoring the grinding process through acoustic emission using a squirter. Proceedings of the 1992 JAPAN/USA SYMPOSIUM ON FLEXIBLE AUTOMATION, p. 335-340, San Francisco, 1992

CHANG, Yu-En P., DORNFELD, David A., Monitoring and characterization of grinding processes. In: 1st INTERNATIONAL MACHINING AND GRINDING CONFERENCE, 9, 1995, Dearborn, Michigan. Society of Manufacturing Engineers, 1995. v. 1, p. 591-603.

CHEN, X., ROWE, W. B. Analysis and simulation of the grinding process. Part II: Mechanics of grinding. *International Journal of Machining Tools and Manufacture*, v. 36, n. 8, p. 883-896, 1996

DAVID C., WARNECKE, G. A correlation between cutting process and dynamics of the machine-tool-system in grinding. *Transactions of NAMRI/SME*, v. XXIV, p. 51-56, 1996

DOGAN, C. P., HAWK, J. A. Effect of grain boundary glass composition and devitrification on the abrasive wear of Al_2O_3 . *WEAR*, v.181, p. 129-137, 1995

DORNFELD, D. A. Application of acoustic emission techniques in manufacturing. *NDT&E International*, v. 25, n. 6, p. 259-269, 1992

DORNFELD, D. A., CAI, H. G. An investigation of grinding and wheel loading using acoustic emission. *Journal of Engineering for Industry*, v. 106, p. 28-33, February 1984

DORNFELD, D. A., KÖNIG, W., KETTELER, G. Present state of tool and process monitoring in cutting. In: INTERNATIONAL CIRP/VDI CONFERENCE, 9, 1993, Düsseldorf. *Proceedings of New Developments in Cutting*.

EDA, H., KAKINO, Y., FUJIWARA, A., NAKAJIMA, M., UENO, H., KISHI, K. In-process detection of grinding cracks by the use of acoustic emissions. *Bulletin Japan Society of Precision Engineering*, v. 19, n. 3, p. 181-186, September 1985

FELIPE JR., Juarez. *Contribuição para implementação de funções de retificação inteligente (R. I.) utilizando técnicas de monitoramento por emissão acústica*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1996. 138 p. Tese (Doutorado)

FERRARESI, D. *Fundamentos da usinagem dos metais*. São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda, 1977, 751 p.

GOMES, J. J. F. *Implementação de sistema automático em retificadoras CNC utilizando emissão acústica*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1997. 80 p. Dissertação (Mestrado)

GU, D. Y., WAGER, J. G. Further evidence on the contact zone in surface grinding. *Annals of the CIRP*, v. 39, v. 1, p. 349-352, 1990

GUO, C., MALKIN, S. Inverse heat transfer analysis of grinding, part 1: Methods. *Journal of Engineering for Industry*, v. 118, p.137-142, February 1996

GUO, C. Effectiveness of cooling in grinding. *Transactions of NAMRI/SME*, v. XXIV, p. 111-116, 1996

HUANG, R., XIURONG, S., RUILIAN, D., BINGLIN, Z., YULIANG, M., BRANDON, J. A. A study of on-line identification for grinding burn. *International Journal of Machining Tools and Manufacture*, v. 32, n. 6, p. 767-779, 1992

INASAKI, I. Monitoring of dressing and grinding processes with acoustic emission signals. *Annals of the CIRP*, v.34, n.1, p. 277-280, 1985

INASAKI, I. Monitoring and optimization of internal grinding processes. *Annals of the CIRP*, v.40, n. 1, p. 359-362, 1991

KLUFT, W. A monitoração dos processos reduz custos e desperdícios. *Máquinas e Metais*, v. 10, p. 60-80, Outubro 1994

KÖNIG, W., KLUMPEN, T. Monitoring and sensor concepts for higher process reliability. In: 5th INTERNATIONAL GRINDING, 1993, Ohio. SME: Society of Manufacturing Engineers, 1993. p.

LAU, W. S., WANG, M., LEE, W. B. A simple method of eliminating residual tensile stresses in the grinding of low carbon steels. *International Journal of Machining Tools and Manufacture*, v. 31, n. 3, p. 425-434, 1991

LAVINE, A. S. Thermal aspects of grinding: The effect of heat generation at the shear planes. *Annals of the CIRP*, v. 40, n. 1, p. 343-345, 1991

LINDSAY, R. P. Principles of Grinding, in KING, R. I., HAHN, R. S. *Handbook of Modern Grinding Technology*. New York: Chapman and Hall, 1986, Chapter 2

MALKIN, S. *Grinding Technology Theory and Applications of Machining with Abrasives*. Chichester: Ellis Horwood Limited, 1989, 275 p

MORI, K., KASASHIMA, N., YAMANE, T., NAKAI, T. A intelligent vibration diagnostic system for cylindrical grinding. In: JAPAN/USA SYMPOSIUM ON FLEXIBLE AUTOMATION, 1992. ASME, 1992, v.2, p. 1097-1100

NOVASKI, O. *Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica*. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1994, 119 p.

NUSSBAUM, G. C. Princípios da ação de corte da ferramenta abrasiva. *Máquinas e Metais*, n. 260, p.55-62, agosto 1987

OLIVEIRA, J. F. G., PURQUERIO, B. M., COELHO, R. T., BIANCHI, E. C. Grinding process dominance by means of the dressing operation. In: 29th INTERNATIONAL MATADOR CONFERENCE, 1992, Manchester. p. 547-560

OLIVEIRA, J. F. G., PERES, A. E., MENDIZABAL, R. A. Utilização de técnicas acústicas para o monitoramento do processo de retificação. In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 12, 1991, São Paulo. ABCM, 1991. p. 353-356

OLIVEIRA, J. F. G., DORNFELD, D. A., SCHNEIDER, C., A otimização da dressagem e a redução do custo de rebolos. *Máquinas e Metais*, v. 5, p. 32-40, 1994

OLIVEIRA, João Fernando Gomes. *Análise da ação do macroefeito de dressagem de rebolos no desempenho do processo de retificação*. São Carlos: EESC, Universidade de São Paulo, 1988. 272 p. Tese (Doutorado)

QI, H. S., MILLS B., ROWE, W. B. An analysis of real contact length in abrasive machining processes using contact mechanics. *WEAR*, v. 176, p. 137-141, 1994

ROWE, W. B., MORGAN, M. N., QI, H. S., ZHENG, H. W. The effect of deformation on the contact area in grinding. *Annals of the CIRP*, v. 42, v. 1, p. 409-412, 1993

SEXTON, J. S. Chatter vibrations their supression through wheel design. *Industrial Diamond Review*, v. 42, n.3, p. 161-170, 1982

SHAW, M. C. *Metal Cutting Principles*, Clarendon Press - Oxford, 1968

SHAW, M. C. Mechanics of cutting and grinding. *Applied Mechanics Reviews*, v. 46, n. 3, p. 78-79, March 1993

SHAW, M. C., VYAS, A. Heat-affected zones in grinding steel. *Annals of the CIRP*, v. 43, n. 1, p. 279-282, 1994

SOKOLOWSKI, A. e 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 ACOUSTIC EMISSION and 1st INTERNATIONAL CONFERENCE ON AE IN MANUFACTURING p. 327-333, 1991.

SOLLERO, P. Estabilidade no processo de retificação cilíndrica. *Máquinas e Metais*, v. 3, p. 25-30, Janeiro 1982

TAVARES, Roberto Fernandes. *Análise multi-resolução na determinação do desgaste de ferramentas em torneamento*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1996. 180 p. Tese (Doutorado)

THOMSON, W. T. *Teoria da vibração com aplicações*. Rio de Janeiro: Interciência, 1978, 461 p.

TRENT, E. M. *Metal Cutting*. London: Butterworths & Co Ltd, 1984, 245 p

UEDA, T., SATO, M., SUGITA, T., NAKAYAMA, K. Thermal behaviour of cutting grain in grinding. *Annals of the CIRP*, v. 44, n. 1, p. 325-328, 1995

VRIES, W. R. *Analysis of Material Removal Processes*. New York: Springer-Verlag, 1991, 254 p

WAGER, J. G., GU, D. Y. Influence of up-grinding and down-grinding on the contact zone. *Annals of the CIRP*, v. 40, v. 1, p. 323-326, 1991

WARNECKE, G., ZITT, U. A new grinding wheel concept for high performance grinding. In: 1st INTERNATIONAL MACHINING AND GRINDING CONFERENCE, 9, 1995, Dearborn. SME: Society of Manufacturing Engineers, 1995. p. 627-642

WEBSTER, J., MARINESCU, I., BENNETT, R. Acoustic emission for process control and monitoring of surface integrity during grinding. *Annals of the CIRP*, v. 43, n.1, p. 299-304, 1994

WHITELEY, R. Como encarar os estrangeiros. *EXAME*, ed. 608, ano 29, n. 9, p. 82-86, abril de 1996

ZHANG, L. C., SUTO, T., NOGUCHI, H., WAIDA, T. Applied mechanics in grinding - III. A new formula for contact length prediction and a comparison of available models. *International Journal of Machining Tools and Manufacture*, v.33, n. 4, p.587-597, 1993

ZHOU, Z. X., VAN LUTTERWELT, C. A. The real contact length between grinding wheel and workpiece - A new concept and a new measuring method. *Annals of the CIRP*, v. 41, v. 1, p. 387-391, 1992

ZHU, C. B., MIDHA, P. S., TRMAL, G. J. Monitoring and evaluation of process parameters in a plunge grinding operation. *International Journal of Production Research*, v. 34, n. 2, p. 543-553, 1996

Bibliografia Consultada

- BRENNER, N., TORRANCE, A. A. Wheel sharpness measurement for force prediction in grinding. *WEAR*, n. 160, p. 317-323, 1993
- BRINKSMEIER, E., MINKE, E. High-performance surface grinding - The influence of coolant on the abrasive process. *Annals of the CIRP*, v. 42, n. 1, p. 367-370, 1993
- BRINKSMEIER, E., CINAR, M. Characterization of dressing processes by determination of the collision number of the abrasive grits. *Annals of the CIRP*, v. 44, n. 1, p. 299-304, 1995
- CHIU, N., MALKIN, S. Computer simulation for cylindrical plunge grinding. *Annals of the CIRP*, v. 42, n. 1, p. 383-387, 1993
- EDA, H., OHMURA, E., YAMAUCHI, S. Computer visual simulation on structural changes of steel in grinding process and experimental verification. *Annals of the CIRP*, v. 42, n. 1, p. 389-392, 1993
- GANESAN, M., GUO, C., RONEN, A., MALKIN, S. Analysis of hydrodynamic forces in grinding. *Transactions of NAMRI/SME*, v. XXIV, p. 105-110, 1996
- GUO, C., MALKIN, S. Analysis of energy partition in grinding. *Journal of Engineering for Industry*, v. 117, p. 55-61, February 1995
- HARA, Celso Minoru. *Utilização de Redes Neurais na Análise de Sinais de Vibração de Ferramenta de Torneamento*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1995. 107 p. Dissertação (Mestrado)
- LEZANSKI, P., RAFALOWICZ, J. An intelligent monitoring system for cylindrical grinding. *Annals of the CIRP*, v. 42, n.1, p. 393-396, 1993

MATSUO, T., TOUGE, M., IWASAKI, K. In-process measurements of progressive variation of grinding characteristics in constant-load heavy grinding. *Annals of the CIRP*, v. 42, n. 1, p. 401-405, 1993

OLIVEIRA, João Fernando Gomes. *Controle do Estado de Afição de Rebolos na Retificação de Precisão*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1992. 172 p. Tese (Livre Docência)

STANLEY, W.D. *Digital signal processing*. Reston: Reston Publishing Company Inc., 1975, 323 p.

VIEIRA JR., Milton. *Metodologia para Determinação das Condições de Usinagem e de Operação no Processo de Retificação*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1992. 107 p. Dissertação (Mestrado)

RAJMOHAN, B., RADHAKRISHNAN, V. A study on the thermal aspects of chips in grinding. *International Journal of Machining Tools and Manufacture*, v. 32, n. 4, p. 563-569, 1992

SAKAKURA, M., INASAKI, I. A neural network approach to the decision making process for grinding operations. *Annals of the CIRP*, v. 41, n. 1, p. 353-356, 1992

SAKAKURA, M., INASAKI, I. Intelligent data base grinding operations. *Annals of the CIRP*, v. 42, n. 1, p. 379-382, 1993

TÖNSHOFF, H. K., WOBKER, H. G., WERNER, F. Analysis of wheel waviness and grain wear in grinding. *Transactions of NAMRI/SME*, v. XXI, p. 145-149, 1993

UEDA, T., KANAZAWA, K., TANAKA, H., TORII, A., SUGITA, T. Measurement of grinding temperature of active grains using infrared radiation pyrometer with optical fiber. *Annals of the CIRP*, v. 42, n. 1, p. 405-408, 1993

WEBSTER, J. A., CUI, C., MINDEK JR., R. B. Grinding fluid application system design. *Annals of the CIRP*, v. 44, n. 1, p. 333-338, 1995

WEBSTER, J. A., ZHAO, Y. W. Time-optimum adaptive control of plunge grinding. *International Journal of Machine Tool and Manufacture*, v. 30, n. 3, p. 413-421, 1990

ZHOU, C., CHANDRA, J., WYSK, R. Optimal cutting tool replacement based on tool wear status. *International Journal of Production Research*, v. 28, n. 7, p. 1357-1367, 1990

Apêndices

Apêndice I - Programas CNC

Neste apêndice, são listados os programas utilizados para otimizar os ensaios.

A. Programa de Retificação

Programa 53

Comando	Comentário
N10 G00 X165	avança para a coordenada X 165 a velocidade máxima
N15 Z430668	avança para a coordenada Z 430,668 a velocidade máxima
N20 M3 S210	liga refrigerante e roda a peça com 210 rpm
N25 G01 XD21 F60000 I0.1	avança para a posição (D21 + 0,1) a 600 mm/min
N30 G23 XD21 F300 I-5.	avança para a posição (D 21 - 5.0) até detectar contato, a 3mm/min
N35 G01 XD22 FD20	avança para a posição (D22) retificando com F (D20)
N40 G04 HD19	pausa com duração de (D 19)(décimos de segundo)
N45 G01 XD21 F60000 I0.2	afasta 0,2 mm da peça a 600 mm/min
N50 G00 X165.	afasta até X 165
N55 M5	desliga refrigerante
N60 M30	finaliza programa e retorna ao início aguardando start

B. Programa de Correção da Posição Diametral do Rebolo

Programa - 54

Comando	Comentário
N45 G00 X165	avança para X 165 a velocidade máxima
N50 ZD18	avança para Z (D18) a velocidade máxima
N51 XD23 G01 F60000 I0.1	avança para X (D23 + 0,1) a 600 mm/min
N52 G01 F1000 XD23 I0.04	avança para X (D23 + 0,04) a 10 mm/min
N65 G23 X156000 F10	avança para posição X (156) até detectar contato a 0,1 mm/min
N70 G01 F60000 I0.1	afasta 0,1 a 600 mm/min
N75 G10 XD24	atualiza CNC com cota X (D24)
N80 M30	finaliza programa e retorna ao início aguardando start

C. Dressagem Inteligente

Programa 8 - Programa Principal

Comando	Comentário
N10 M11 S45	liga rebolo com 45 m/s
N30 M8	liga refrigeração
N40 E9 P1=-40 P2=-40 P3=12000	chama sub-rotina 9; estabelece valores p/ variáveis P1, P2 e P3
N45 M9	desliga refrigeração
N50 M30	fim de programa

Programa 9 - Sub-rotina para programa 8

Comando	Comentário
N10 G00 X165	afasta para posição X 165 rapidamente
N20 G00 ZD45 K5.	avança para posição (D45 +5.0) no eixo Z
N30 G37 IP1	compensa profundidade de . (P1) no diâmetro do rebolo
N40 G01 XD44 IP1 F60000	avança p/ posição (D44 + P1) a 600 mm/min
N60 G10 XD44	atualiza o valor de XD44
N80 G01 K-D49 F25000	avança (D49) mm no eixo Z para a esquerda a 250 mm/min, dressando
N100 G01 I1. F60000	afasta 1 mm no eixo X
N110 G01 X161. F60000	afasta para posição X 161 a 600 mm/min
N120 G00 X165.	afasta para posição X 165 rapidamente
N125 ZD45 K5.	Avança para coordenada Z (D45 + 5.0)
N135 G37 IP2	compensa profundidade de dressagem (P2) no diâmetro do rebolo
N140 G01 XD44 IP2 F60000	Avança para X (D44 + P2) a 600 mm/min
N150 G10 XD44	atualiza o valor de XD44
N155 G01 K-D49 FP3	avança (D49) mm no eixo Z para a esquerda a (P3) mm/min, dressando
N160 G01 X161. F60000	afasta para posição X 161 a 600 mm/min

Legenda:

D18 = parâmetro do CNC disponível, utilizada para armazenar coordenada Z de calibração.

D19 = parâmetro do CNC disponível, utilizada para armazenar o tempo de centelhamento em ms

D21 = parâmetro do CNC disponível, utilizada para armazenar a dimensão máxima da peça

D22 = parâmetro do CNC disponível, utilizada para armazenar a dimensão final desejada da peça

D23 = parâmetro do CNC disponível, utilizada para armazenar a cota X do dressador

D24 = parâmetro do CNC disponível, utilizada para armazenar a cota onde foi efetuado o contato rebolo-diamante de calibração

D45 = parâmetro do CNC, armazena coordenada Z do dressador.

- D44 = parâmetro do CNC, armazena coordenada X do dressador.
- D49 = parâmetro do CNC, armazena largura do rebolo.
- D20 = parâmetro do CNC disponível, utilizado neste caso para armazenar o diâmetro da peça a partir do qual a detecção de contato se inicia.
- G14 = novo comando inserido no CNC, faz a inicialização do S.M..
- G23 = novo comando inserido no CNC, faz a leitura de um relê do S.M. que indica quando ocorre a detecção de contato.
- G31 = novo comando inserido no CNC, faz a leitura de um relê do S.M. que indica se houve falha durante a dressagem.
- M33 = novo comando inserido no CNC, habilita a detecção de falhas no S.M.
- M34 = novo comando inserido no CNC, desabilita a detecção de falhas no S.M.; em conjunto com M33, cria uma janela de monitoramento.

Apêndice II - Esquema das V.I.s desenvolvidas.

A. V.I. para aquisição.

A figura II.1 mostra a interface da V.I. desenvolvida para aquisição de dados.

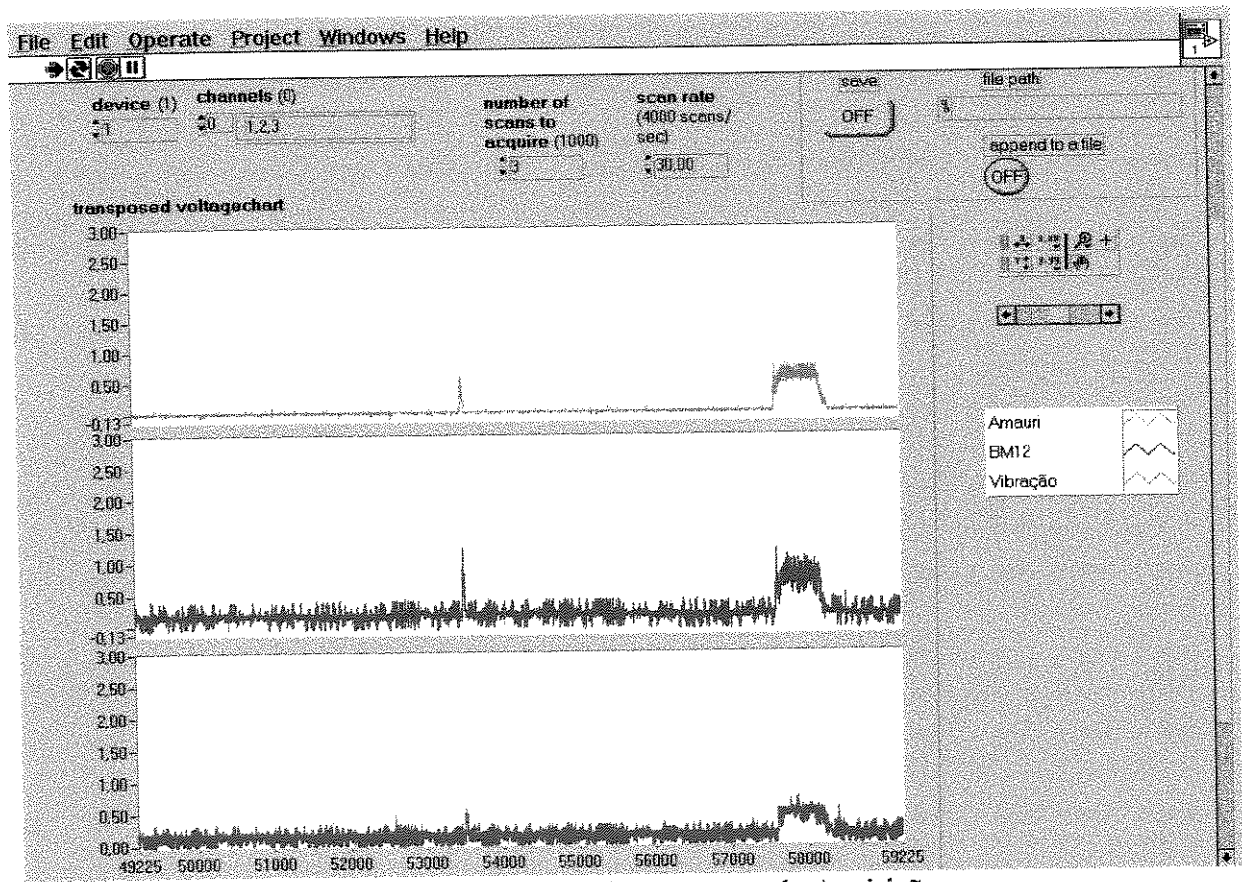


Figura II.1 Interface do Programa de Aquisição

A figura II.2 mostra o diagrama das V.I.s do sistema de aquisição, correspondente à interface mostrada em II.1.

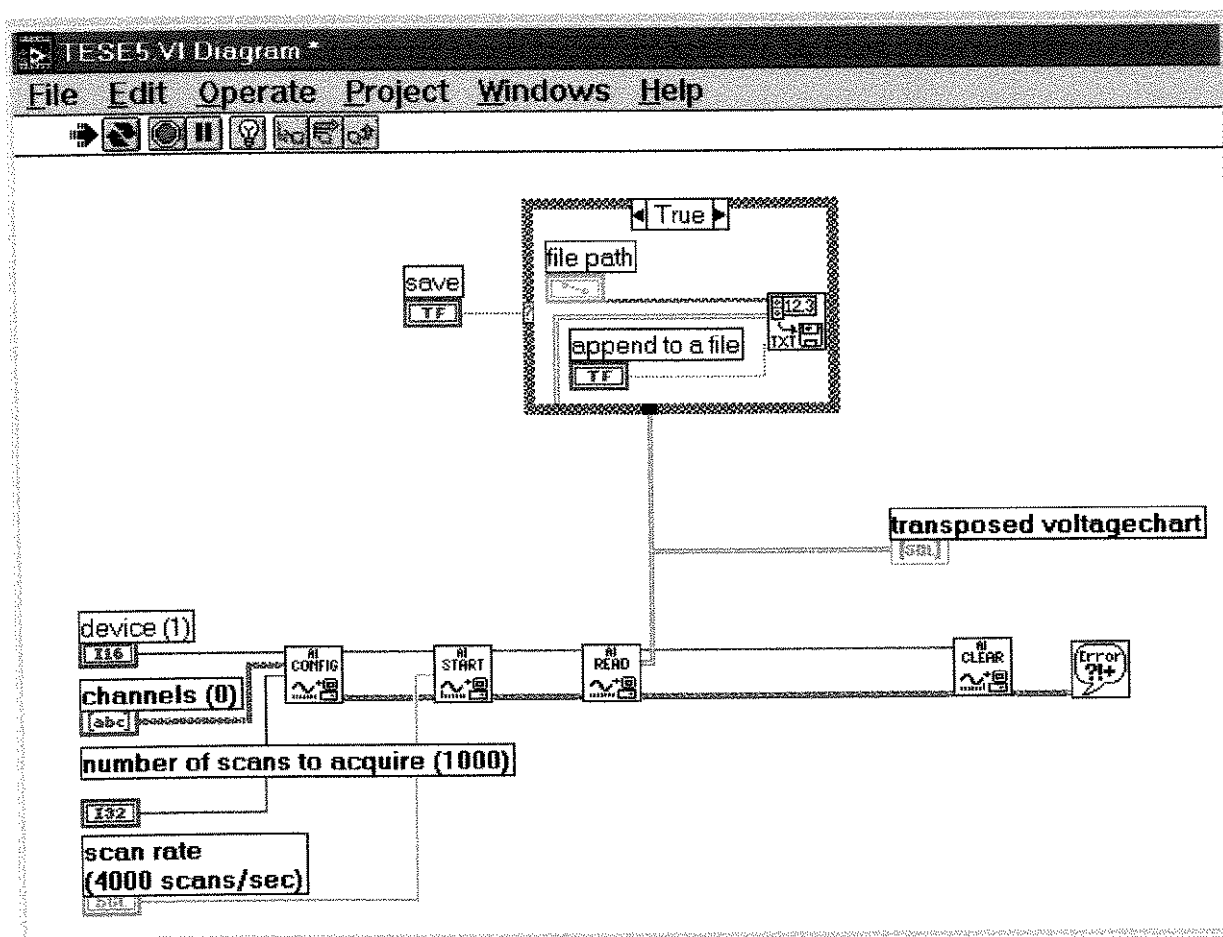


Figura II.2 Diagrama do Programa de Aquisição