



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia
Campus de Bauru



MONITORAMENTO DA DRESSAGEM NA RETIFICAÇÃO ATRAVÉS DO SINAL PURO DE EMISSÃO ACÚSTICA

CARMEN FRANCISCA LOURENÇO PINTO HELLMEISTER

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP - Campus de Bauru, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial.

BAURU - SP

Julho - 2004



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia
Campus de Bauru



MONITORAMENTO DA DRESSAGEM NA RETIFICAÇÃO ATRAVÉS DO SINAL PURO DE EMISSÃO ACÚSTICA

CARMEN FRANCISCA LOURENÇO PINTO HELLMEISTER

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP - Campus de Bauru, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial.

BAURU - SP

Julho - 2004

*Ao meu orientador, Prof. Dr. **PAULO ROBERTO DE AGUIAR**, o mais profundo agradecimento pela competência, paciência e amizade com que conduziu a orientação deste trabalho.*

*Ao meu marido **Luiz** que incansavelmente me apoiou.*

*Aos meus pais **Benedicto** e **Izaura** (in memoriam) que me educaram e me deram a base da perseverança.*

*Ao meu sogro Prof. Dr. **João Cesar Hellmeister** (in memoriam), pelo exemplo, à minha sogra **Maria Evelina** (in memoriam), pela bondade e desapego.*

*Aos meus filhos **Victor**, **Gabriela** e **Marília**, fonte de inspiração e razão de meu viver.*

*À minha irmã **Fátima** e meus sobrinhos **Daniel** e **Felipe**.*

Dedico este trabalho, com todo o meu afeto.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a **DEUS** pela conclusão deste trabalho.

À **UNESP** – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Bauru, pela oportunidade.

Ao Prof. Dr. **EDUARDO CARLOS BIANCHI**, Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pelas contribuições e amizade.

Às funcionárias da Seção de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia da UNESP - Campus de Bauru, em especial à **DJANIRA MARIA AMARAL e YARA LÚCIA BRITO DOS SANTOS**, pela amizade e atenção dispensada. À **MARIA e CLÁUDIA**, pela amizade.

Às funcionárias do Departamento de Engenharia Elétrica, **REGINA CÉLIA e TATIANE**, pela atenção.

Aos Professores do Departamento de Engenharia Elétrica Prof. Dr. **ANDRÉ NUNES DE SOUZA** e Prof. Dr. **IVAN NUNES**, pelo incentivo e amizade.

Aos Professores do Departamento de Engenharia Mecânica, em especial o Prof. Dr. **CELSO LUIZ DA SILVA** e Prof. Dr. **LUÍS EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ** pelo apoio e informações transmitidas.

Aos colegas da Pós-Graduação que estivemos juntos no decorrer deste período; pelo apoio, em especial ao Engenheiro **LANDRY PANSANATTO**.

Aos colegas e amigos do CTI (Colégio Técnico Industrial da UNESP), pelo incentivo e amizade.

Aos meus Tios **EDUARDO, ONÉLIA e PRIMOS**, pelo incentivo.

A todos que, diretamente ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho, meu muito obrigada.

SUMÁRIO

RESUMO	1
ABSTRACT	2
1 INTRODUÇÃO	3
2 JUSTIFICATIVAS E OBJETIVO	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 Restrições do processo de retificação	6
3.1.1 Capacidade de potência da máquina	6
3.1.2 Vibrações da máquina-ferramenta	7
3.1.3 Danos térmicos	8
3.1.4 Desgaste do rebolo.....	9
3.1.5 Rugosidade	11
3.1.6 Tolerâncias.....	11
3.2 Principais Variáveis e Parâmetros Envolvidos no Processo de Retificação do Tipo Tangencial Plana	12
3.2.1 Comportamento da Profundidade de Corte (a)	13
3.2.2 Comportamento da Velocidade de Corte (V_s)	14
3.2.3 Comportamento da Velocidade da Peça (V_w).....	14
3.2.4 Espessura Equivalente de Corte (heq)	15
3.2.5 Relação G.....	16
3.3 Conceitos de Retificação	16
3.3.1 Características Básicas do Sistema	17
3.4 Operação de Dressagem	18
3.4.1 Ferramentas de Dressagem.....	19
3.4.2 Influência da Dressagem no Processo de Retificação	20
3.4.3 Grau de Recobrimento (U_d)	21
3.4.4 Dressagem Inteligente	22
3.4.5 Agressividade	23
3.4.6 Avaliação da Dureza de Rebolos	25
3.5 Rebolos e Abrasivos	27
3.5.1 Tipos de Abrasivos	29
3.5.2 Retificação com Superabrasivos	31

3.5.3	Óxido de Alumínio Cerâmico (Targa).....	32
3.6	Distribuição da energia durante o corte na retificação	33
3.7	Monitoramento e Controle do Processo de Retificação	33
3.7.1	Princípios e Elementos do Controle de Processos	35
3.7.2	Sensores	36
3.7.3	Aquisição de Dados e Processamento de Sinais	43
3.7.4	Emissão Acústica	50
4	MATERIAL E MÉTODO	54
4.1	Retificadora.....	54
4.2	Rebolo, dressador e parâmetros de dressagem	55
4.3	Aquisição do sinal de Emissão Acústica	55
4.4	Descrição do <i>Software</i> Desenvolvido para Aquisição de Dados	58
4.5	Montagem do Banco de Ensaios.....	61
4.6	Operação de Dressagem	63
4.6.1	Medição da largura de atuação do dressador (bd)	63
4.6.2	Tempo de Dressagem	64
4.6.3	Controle do tempo de dressagem.....	65
4.6.4	Medição do tempo	65
4.6.5	Controlando o tempo de dressagem via inversor de frequência	66
4.7	Avaliação da Agressividade	67
4.8	Processamento de Sinais	71
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
5.1	Agressividade	72
5.2	Emissão Acústica	73
6	CONCLUSÃO	85
	SUGESTÃO PARA NOVOS TRABALHOS	86
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
	OUTRAS REFERÊNCIAS	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1 - Formação do cavaco por um grão abrasivo, caracterizado pelo ângulo de ataque negativo, pequeno ângulo de corte e desgaste do grão. (BOOTHROYD & KNIGHT, 1989).....	5
Figura 3-2 - Modelo idealizado de retificação plana. (Adaptado de KING & HAHN, 1986).	8
Figura 3-3 - Mecanismos do micro desgaste. (KÖNIG & KNOP, 1991).....	11
Figura 3-4 - Variáveis de entrada e saída para máquina e processos de retificação (Adaptado de KING & HAHN, 1986).....	13
Figura 3-5 – Gráfico Qualitativo – Força Tangencial de Corte vs Tempo de Contato (AGUIAR, 1997).	15
Figura 3-6 – Parâmetros envolvidos na retificação plana. (KING & HAHN, 1986).	17
Figura 3-7 - Principais parâmetros de dressagem com ferramenta de ponta única. (MARINELLI et al., 1998).	19
Figura 3-8 - Esquema do processo de dressagem (Adaptado de BIANCHI, 1996a).	21
Figura 3-9 – Identificação de um rebolo convencional.	27
Figura 3-10 - Estrutura do Rebolo.	28
Figura 3-11 - Comparação entre grãos óxido de alumínio comum e cerâmico.	32
Figura 3-12 - Distribuição de energia durante o corte na retificação	33
Figura 3-13 – Esquema de uma material piezo-elétrico (DALLY et al, 1993).	41
Figura 3-14 – Diagrama de um sensor piezo-elétrico típico (DALLY et al, 1993).....	42
Figura 3-15 - Cálculo da correlação.	50
Figura 4-1 - Suporte do dressador utilizado nos ensaios	56
Figura 4-2 - Sensor de emissão acústica em detalhe	56
Figura 4-3 - Sistema de aquisição de dados.....	57
Figura 4-4 - Módulo do sensor de emissão acústica.	57
Figura 4-5 - Fluxograma representando a lógica para a aquisição de dados.	59
Figura 4-6 - Interface do programa RamBooster.....	60
Figura 4-7 - Interface gráfica do programa de aquisição de dados.....	60
Figura 4-8 - Diagrama do Programa de Aquisição de Dados.....	61
Figura 4-9 - Banco de Ensaios e Sistema de Aquisição de Dados.	62
Figura 4-10 – Banco de ensaios, dressador e balança de agressividade.....	62
Figura 4-11 - Esquema da medição do bd no projetor de perfil.	63

Figura 4-12 - Painel do programa para medir o tempo de dressagem.	65
Figura 4-13 - Diagrama do programa para medir o tempo de dressagem.	66
Figura 4-14 - Inversores de Frequência utilizados.	66
Figura 4-15 - Curva de calibração da frequência versus o tempo de dressagem para $L_R = 19,5$ mm.	67
Figura 4-16 - Banco de teste de agressividade do rebolo	68
Figura 4-17 - Sensor de deslocamento utilizado no teste de agressividade.....	68
Figura 4-18 - Módulo TT60 usado no teste de agressividade.	69
Figura 4-19 – Painel Frontal do Programa usado no teste de agressividade.	69
Figura 4-20 – Diagrama do Programa usado no teste de agressividade.	70
Figura 4-21 - Calibração do sistema de teste de agressividade.	70
Figura 5-1 - Variação da agressividade com a profundidade de dressagem.	72
Figura 5-2 - Variação da agressividade com o grau de recobrimento (U_d).	73
Figura 5-3 - RMS do sinal de emissão acústica. Eixo vertical (Volts*constante); Eixo horizontal (No. Pontos calculados).	74
Figura 5-4 - CFAR do sinal de emissão acústica. Eixo vertical (Volts*constante); Eixo horizontal (No. Pontos calculados).	76
Figura 5-5 - FFT do sinal de emissão acústica. Eixo vertical (Volts*constante); Eixo horizontal (No. Pontos calculados).	78
Figura 5-6 - MVD do sinal de emissão acústica. Eixo vertical (Volts*constante); Eixo horizontal (No. Pontos calculados).	80
Figura 5-7 - ROP do sinal de emissão acústica. Eixo vertical (Volts*constante); Eixo horizontal (No. Pontos calculados).	82
Figura 5-8 - Nuttall do sinal de emissão acústica. Eixo vertical (Volts*constante); Eixo horizontal (No. Pontos calculados).	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades de alguns materiais abrasivos (MALKIN, 1989).....	30
Tabela 2 - Valores de temperatura máxima e da constante K para dois pares termoelétricos	38
Tabela 3- Variação do bd em relação à profundidade de dressagem	64
Tabela 4- Resultado das ferramentas testadas	84

LISTA DE SIMBOLOS

b	-coeficiente de difusão de calor
b_s	-coeficiente de difusão de calor do rebolo
b_w	-coeficiente de difusão de calor da peça
d	-deslocamento do disco dinâmico
f	-ângulo de ataque e de corte ($^{\circ}$ Graus)
w	-frequência
j	-coeficiente de Fourier
j_s	-s-ésimo coeficiente de Fourier de φ
s	-desvio padrão
m	-média da população
a	-profundidade de corte (mm)
a_d	-profundidade de dressagem (mm)
a_l	-coeficiente angular da reta de regressão linear (--)
A_{sd}	-área de dressagem (mm^2)
b	-largura do contato rebolo peça (mm)
b_d	-largura de trabalho (mm)
b_{dr}	-largura real de atuação do dressador
b_s	-largura do rebolo (mm)
C	-capacitância em Faraday
$CFAR$	-constant false alarm-rate
EA_{rms}	-média quadrática da emissão acústica
EA_{raw}	-sinal puro de emissão acústica
U_d	-grau de recobrimento (--)
F_n	-força normal à superfície de contato rebolo peça (N)
F_t	-força tangencial à superfície de contato (N)
G	-relação entre o volume de metal retificado e o desgaste volumétrico do rebolo
h_{eq}	-espessura equivalente de corte (μm)
k	-agressividade do rebolo ($\text{mm}^3/\text{N.s}$)
K_{eq}	-rigidez equivalente do sistema
K	-constante para pares termoelétricos

K_1	-rigidez da máquina
K_2	-rigidez da mesa e suporte da peça a ser usinada
MVD	-desvio do valor médio
N	-tamanho da população
n	-tamanho da amostra
r	-raio dos discos (mm)
$r[n]$	-média móvel intensificada
R	-relação entre o coeficiente de difusão de calor da peça b_w e do rebolo b_s
ROP	-ratio of power
S	-desvio da distribuição da simetria
S_d	-passo de dressagem (mm)
T	-estatística da lei da potência de Nuttall
U_d	-relação entre largura de atuação do dressador b_d e o passo de dressagem S_d
V_{fd}	-velocidade de penetração (m/s)
V_{sd}	-velocidade de avanço constante (m/s)
V_s	-velocidade de corte (m/s)
V_w	-velocidade da peça (m/s)
W_t	-ondulação teórica
Z	-taxa volumétrica de remoção, ou: $F'n$, $F't$, $Z'w$, $Z's$, $Q'w$ e $Q's$ (--)
Z'	-taxa de remoção por unidade de largura (--)
ZCR	-zero-crossing rate
Z_s	-volume do rebolo gasto (mm ³)
Z_w	-volume de metal retificado (mm ³)

RESUMO

No processo de retificação com rebolo convencional, a operação de dressagem é preocupante, pois é geradora de tempo improdutivo, consumindo capacidade de máquina e mão-de-obra normalmente especializada, além de consumo de energia elétrica, de rebolo e do próprio dressador. As indústrias brasileiras que trabalham com retificação, não controlam de maneira criteriosa os parâmetros de dressagem dos rebolos, uma vez que seriam necessários projetor de perfis, controle de rotação do rebolo e do passo de dressagem.

Assim, este trabalho teve como objetivo monitorar a dressagem na retificação, propondo um conceito alternativo para esta operação, onde técnicas de monitoramento e processamento de sinais foram utilizadas sobre o sinal puro de emissão acústica captado durante a dressagem. Para isso, foi confeccionado um programa de aquisição de dados que amostrou os sinais de emissão acústica a uma taxa de 2,5 milhões de amostras por segundo.

Os ensaios foram realizados em uma retificadora tangencial plana utilizando rebolo do tipo convencional (óxido de alumínio), e um dressador de ponta única. Para a coleta dos sinais de emissão acústica foram utilizados uma placa de aquisição de dados de alta frequência de amostragem da National Instruments, e um sistema de emissão acústica dotado de um sensor fixo e um condicionador de sinais BM12 do fabricante Sensis. Ferramentas de processamento de sinais foram aplicadas sobre o sinal puro de emissão acústica, relacionando os parâmetros de entrada e as saídas da operação de dressagem (agressividade e continuidade do rebolo)

Verificou-se que o método do disco retificado é um bom indicador comparativo da agressividade. A constante de alarme falso (CFAR) foi a ferramenta estatística que apresentou o melhor desempenho entre os parâmetros observados. Adicionalmente, o valor médio quadrático (RMS) e a parte real da transformada de Fourier (FFT) também apresentaram bons resultados, podendo ser usados como indicadores de agressividade.

Palavras chave: retificação, dressagem, emissão acústica, agressividade, processamento de sinais

ABSTRACT

In grinding process with aluminum oxide grinding wheel the dressing operation brings preoccupation since it is a time-unproductive source, consuming machining capability and usually specialized operator work as well as electrical energy consumption and the wear of the grinding wheel and dresser itself. The Brazilian industries that employ grinding processes do not control the dressing parameters efficiently due to the need of profile measurement equipment, control of grinding wheel speed and dressing passes control.

Thus, this work aims to monitor the dressing operation and present an alternative concept for such operation, where digital signal processing and signal monitoring techniques were employed in the raw acoustic emission signal collected during the dressing operation. Dedicated software was developed to acquire the acoustic emission signal at 2.5 millions of samples per second rate.

A surface grinding machine with an aluminum oxide grinding wheel (conventional) and a single point dresser were used in the tests. In order to collect the acoustic emission signal a high frequency data acquisition board from National Instruments was utilized. In addition, an acoustic emission system having a fixed acoustic emission sensor and a signal amplifier and filter from Sensis were employed. Signal processing statistics were applied to the raw acoustic emission signal, relating the input and output dressing operation parameters (aggressiveness and continuity of the grinding wheel).

From the results, the method of the ground disc turned out to be a good indicator of the aggressiveness. The Constant of False Alarm (CFAR) has presented the best result among the studied parameters. Besides, the root square value (RMS) and the real part of the Fourier Transform (FFT) have also presented good results, which make them useful as aggressiveness indicators.

Keywords: grinding, dressing, acoustic emission, aggressiveness, signal processing.

1 INTRODUÇÃO

A retificação é um processo metalúrgico utilizado no acabamento de peças, porém, com o excessivo atrito entre rebolo e peça, a ferramenta começa a perder a agressividade.

Após a fabricação e uso, ferramentas para retificação não se encontram em condições normais para nova utilização. Podem apresentar gumes cegos, não estar numa forma desejada e os poros podem estar impregnados de cavaco, de modo que a absorção de novos cavacos com sucessiva remoção de material fica dificultada.

Isso resulta em um atrito excessivo e conseqüentemente uma geração de calor muito grande para a peça. Retificar sob estas condições é ineficiente e é necessário dressar o rebolo em intervalos freqüentes para remover os grãos gastos da superfície do rebolo (BOOTHROYD & KNIGHT, 1989).

Dressagem é a operação em que se desloca o dressador (uma ferramenta de diamante) transversalmente ao rebolo em movimento de rotação. A profundidade de dressagem (ad) é a medida de penetração do dressador e esta determina a largura de atuação de dressagem (bd). O deslocamento do dressador é feito com um passo de dressagem (Sd). Pela remoção de partículas de grãos abrasivos, o rebolo será dressado com uma área equivalente à área de dressagem (Asd), que é proporcional a ad e Sd .

2 JUSTIFICATIVAS E OBJETIVO

A retificação é um processo que apresenta grande importância na fabricação, sendo responsável por 25% dos processos de usinagem (MALKIN, 1989). É durante esta operação que se devem corrigir todos os erros de forma e fabricação. Além disso, o sucateamento de uma peça durante a retificação implica na perda de todos os processos anteriores, tornando o processo muito caro.

É fundamental que as condições de retificação sejam as melhores possíveis, desta forma, é imprescindível que o rebolo esteja adequadamente dressado de forma a obter os melhores resultados.

O processo de dressagem pode ser monitorado para produzir uma qualidade constante na superfície do rebolo. O sensor de emissão acústica (EA) é um dispositivo eficiente na monitoração da dressagem, além de ajudar na obtenção de uma superfície topograficamente uniforme do rebolo (INAZAKI e OKAMURA, 1985).

O objetivo desta pesquisa é monitorar a dressagem na retificação, propondo um conceito alternativo para esta operação, onde técnicas de monitoramento e processamento de sinais foram utilizadas sobre o sinal puro de emissão acústica captado durante a dressagem. Para isso, foi confeccionado um programa de aquisição de dados que amostrou os sinais de emissão acústica a uma taxa de 2,5 milhões de amostras por segundo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Durante os últimos anos os requisitos de qualidade e funcionalidade dos componentes fabricados industrialmente têm aumentado significativamente. Sendo assim, componentes têm sido fabricados com melhor qualidade e mais rapidamente, para compensar o custo do material utilizado e do processo de usinagem.

A retificação é uma operação de usinagem de alto custo que deveria ser utilizada tão eficientemente quanto possível, ao contrário dos processos de fabricação com ferramenta de geometria definida, como o fresamento e o torneamento. Na retificação a remoção de cavaco é precedida por uma infinidade de arestas de corte geometricamente não definidas; cada grão abrasivo da superfície do rebolo funciona como uma ferramenta de corte. Geralmente os ângulos de ataque e de corte são totalmente desfavoráveis, como é representado na figura 3-1. Têm-se seções e comprimentos de cavaco variáveis e distintos. Procedendo a uma análise estatística dos processos de remoção de cavaco, foram vistas leis equivalentes que podem ser deduzidas da cinemática do processo.

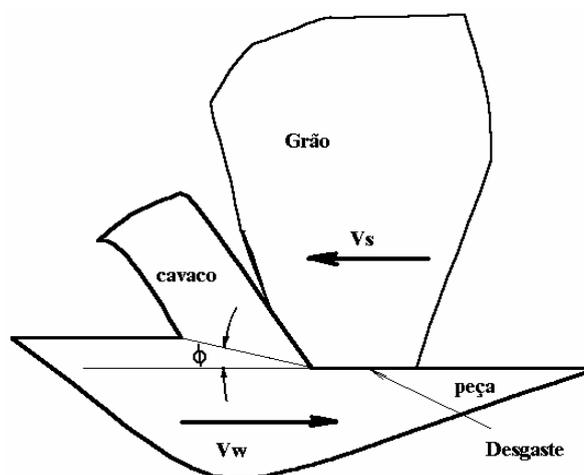


Figura 3-1 - Formação do cavaco por um grão abrasivo, caracterizado pelo ângulo de ataque negativo, pequeno ângulo de corte e desgaste do grão. (BOOTHROYD & KNIGHT, 1989).

3.1 Restrições do processo de retificação

A melhoria dos processos de usinagem usualmente requer a identificação de parâmetros operacionais que irão satisfazer um objetivo ou critério específico. Métodos analíticos de máquina-ferramenta-economia são freqüentemente usados para otimizar processos de corte de larga escala, como torneamento e fresamento, de acordo com um critério de máxima taxa de produção ou mínimo custo, podendo também ser aplicada uma aproximação similar à retificação. Para o uso destes métodos, é necessária uma relação entre a vida da ferramenta e os parâmetros operacionais, similar à equação de vida da ferramenta de Taylor para torneamento ou fresamento. Para retificação de precisão, a vida da ferramenta pode ser interpretada como o tempo útil de retificação entre os re-dressamentos do rebolo, no entanto, geralmente é mais conveniente expressar a vida da ferramenta em termos da quantidade de material removida entre o re-dressamento do rebolo ou número de peças por dressagem (MALKIN, 1989).

Segundo Aguiar (1997), um grande número de variáveis é envolvido no processo de retificação que podem influenciar no desempenho de uma dada operação, bastando apenas um desvio para comprometer todo o processo.

As taxas de produção que podem ser alcançadas pela retificação são limitadas por vários obstáculos. Algumas restrições comumente encontradas incluem: capacidade de potência da máquina, rigidez da máquina-ferramenta, danos térmicos na peça, desgaste excessivo do rebolo, rugosidade e tolerâncias geométrica e dimensional. Enquanto não é possível prever com exatidão a combinação de parâmetros operacionais prévias à retificação, as transgressões de restrições podem ser identificadas tanto durante a retificação ou após a mesma na inspeção da peça. É especialmente importante a prevenção quanto às restrições de produção e às possibilidades de relaxá-las (MALKIN, 1989). As restrições citadas anteriormente serão analisadas detalhadamente a seguir:

3.1.1 Capacidade de potência da máquina

Segundo Malkin (1989), a potência líquida disponível na retificadora é um pouco menor que sua potência total avaliada devido à ineficiência no sistema de transmissão. Para a operação da máquina no seu limite de potência do eixo, é necessário reduzir a energia específica do processo para relaxar as restrições e prosseguir para uma taxa de remoção

mais rápida. Isto pode ser feito dressando o rebolo mais grosseiramente, por exemplo, aumentando o avanço do dressador, mas isto resultará em uma superfície mais rugosa, e esta aproximação para reduzir a energia específica só é possível se a superfície é mais lisa do que o necessário. Outra maneira de diminuir a energia específica para relaxar as restrições de potência de corte inclui o uso de um rebolo mais macio ou um fluido de corte que lubrifique melhor. Uma desvantagem do uso de um rebolo mais macio é a possibilidade de aumento do desgaste.

A potência de acionamento do motor principal é composta em:

- potência do motor em vazio (existente devido ao atrito e perdas);
- potência de corte como decorrência da força tangencial.

A potência de corte ou de usinagem é obtida pelo produto da força tangencial e da velocidade de corte. As forças tangenciais e normais de corte diminuem com o aumento da velocidade de corte, a evolução da potência de corte depende do fato de o aumento da velocidade de corte poder compensar a diminuição da mesma. De uma forma geral, a potência de corte aumenta com o aumento da velocidade de corte. O aumento da potência de corte com o aumento da velocidade de corte leva a temperaturas mais elevadas.

3.1.2 Vibrações da máquina-ferramenta

A vibração pode causar baixa qualidade superficial e limitar a capacidade de produção. As vibrações são classificadas em dois tipos: vibrações forçadas e vibração auto-excitada (regenerativa). Vibrações forçadas podem ser eliminadas ou minimizadas, eliminando ou isolando a origem da vibração. Vibrações auto-excitadas não podem ser eliminadas na maioria dos casos, exceto em operações de baixas taxas de remoção. Contudo pode ser possível impedir o crescimento das oscilações para prolongar o tempo de retificação livre de vibração. Isto usualmente requer a redução das forças ou potências de corte, que pode ser alcançado por uma dressagem mais grosseira, baixa friabilidade (facilidade para fraturar o grão em pedaços, sob uma determinada força ou impacto) do rebolo ou uma melhor lubrificação (MALKIN, 1989).

A rigidez do sistema de retificação (máquina ferramenta/rebolo/peça) pode ajudar a evitar vibrações durante o processo de usinagem (evitar no sentido de se obter um nível que não afete o desempenho da retificação). Cada componente age como uma mola, e dependendo da constante elástica de cada uma delas, tem-se um sistema mais rígido ou

menos rígido. A figura 3-2 representa alguns elementos que podem ser comparados a molas.

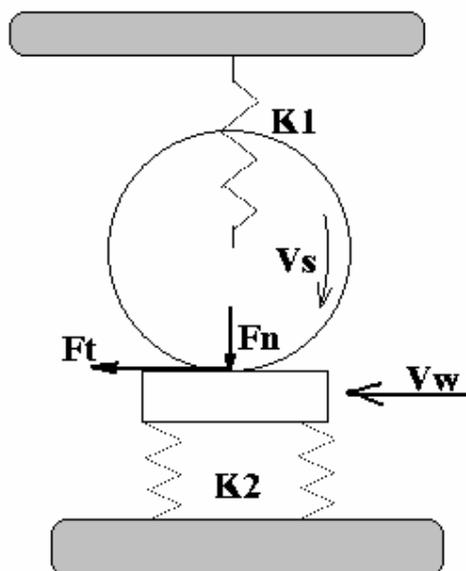


Figura 3-2 - Modelo idealizado de retificação plana. (Adaptado de KING & HAHN, 1986).

Onde K1 representa a rigidez da máquina (cabeçote) e K2 a rigidez da mesa e suporte da peça a ser usinada. Devem ser levadas em consideração ainda a rigidez do rebolo e a rigidez da peça. A rigidez equivalente para uma associação em série de molas segue a expressão 1:

$$\frac{1}{K_{eq}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_i} \quad (1)$$

Onde K_{eq} é a rigidez equivalente do sistema.

3.1.3 Danos térmicos

Os danos térmicos na retificação são entendidos como as modificações das características físicas e/ou químicas da superfície retificada como também das regiões que se encontram abaixo desta superfície. Distintos termos foram utilizados para poder denominar este fenômeno, Malkin (1989) o identifica como queima da peça, Shaw (1996) como *Haz* (*Heat Affected Zone*) e König (1980) como camada limite. As altas temperaturas geradas na zona de retificação podem causar vários tipos de danos térmicos à peça como,

por exemplo, queima (no caso de aços), redução da resistência à fadiga, e trincas. Para atenuar as restrições de danos térmicos, é geralmente necessário reduzir a potência de corte. O fluido de corte também tem um importante efeito como lubrificante. Lubrificação direta com fluidos de retificação torna-se importante principalmente na retificação *creep-feed*. Algumas análises de transferência de calor indicam que o uso de uma velocidade de corte mais rápida, mantendo a mesma taxa de remoção deveria abaixar a temperatura e reduzir o dano térmico, mas isto nem sempre ocorre na prática (MALKIN, 1989).

A queima ocorre quando a temperatura crítica na zona de usinagem é excedida, portanto, a energia específica crítica no limiar da queima é um indicativo de tal fenômeno. Tal energia é usualmente baseada na medição de força, sendo também possível através da medição da potência da máquina utilizando transdutores de potência de estado sólido (MALKIN apud AGUIAR, 1997).

Há diversos graus de severidade de dano térmico. Alguns inibem o desempenho da retificação e outros levam à fratura imediata da peça (BADGER & TORRANCE, 2000).

A queima visível em aços é caracterizada pelas colorações azuladas sob a superfície da peça, as quais são devido à formação de uma camada de óxido (TAROSOV apud AGUIAR, 1997). Porém, segundo Malkin (1989), a ausência de coloração na superfície usinada não significa necessariamente que a queima da peça não ocorreu.

Segundo Badger & Torrance (2000), com aumento da taxa de remoção de material da peça, a temperatura de corte tende a aumentar, isto provoca perda da resistência e também trincas nas peças.

3.1.4 Desgaste do rebolo

O desgaste do rebolo pode ser classificado em três tipos: atrito, fratura do grão e fratura do ligante. Todos os tipos de desgaste ocorrem simultaneamente, em um maior ou menor grau. O desgaste total pode ser expresso em termos da relação G , que é a taxa volumétrica de material removido em contraposição ao desgaste volumétrico do rebolo. Para operações típicas de retificação de precisão com rebolos convencionais (óxido de alumínio ou carboneto de silício), mais rebolo pode ser consumido pela dressagem do que pelo processo de retificação em si. Em tais casos o menor desgaste do rebolo, com a maior relação G , pode não ser a melhor situação, pois pode exigir maiores forças e energias do processo e isso conduz a temperaturas excessivas (MALKIN, 1989).

Segundo Malkin (1989), restrições de desgaste do rebolo são freqüentemente associadas à rugosidade e às tolerâncias necessárias. Com taxas de remoção mais elevadas, a relação G tende a decrescer, levando a uma mais rápida deterioração na forma e no acabamento da superfície. Se maiores forças e altas temperaturas podem ser toleradas, estas restrições de produção podem ser relaxadas usando um rebolo de desgaste lento, que usualmente significa uma maior friabilidade. Um fluido de corte mais adequado deve aumentar a relação G , diminuindo as forças e a temperatura de usinagem.

À medida que se procede a retificação, o número e as dimensões das áreas de corte do rebolo aumentam, aumentando assim a interferência ou atrito, resultando em um aumento da força agindo nos grãos (BOOTHROYD & KNIGHT, 1989).

O desgaste do rebolo pode ser dividido em desgaste diametral e de quina do rebolo. Se o desgaste radial não é compensado durante a retificação por um sistema de medição adequado, pode-se ter um erro de medida ou eventualmente surgir vibrações na superfície da peça.

Têm-se assim dois mecanismos de desgaste:

- cegamento do grão isolado por desgaste abrasivo mecânico, adesão, corrosão, difusão, bem como micro e microfissuras, em decorrência de tensões térmicas.
- quebra de grãos integrais ou grupos de grãos por uma solitação mecânica demasiada do ligante ou em decorrência da deterioração térmica ou química do ligante.

A interligação desses dois mecanismos de desgaste caracteriza o comportamento de desgaste do rebolo.

A topografia do rebolo varia diretamente com o aumento do tempo de retificação, uma vez que o rebolo está sujeito não só a desgaste macro geométrico radial e da aresta, mas o micro desgaste dentro do espaço de sua aresta de corte (KÖNIG & KNOP, 1991). A figura 3-3 mostra vários mecanismos de micro desgaste produzidos pelas cargas de retificação.

Em geral o desgaste é principalmente abrasivo, na forma de tirar a capacidade de corte dos grãos. As camadas de cristal na superfície do grão estão sujeitas à extrema tensão termomecânica alterada, reduzindo a resistência à abrasão (KÖNIG & KNOP, 1991).

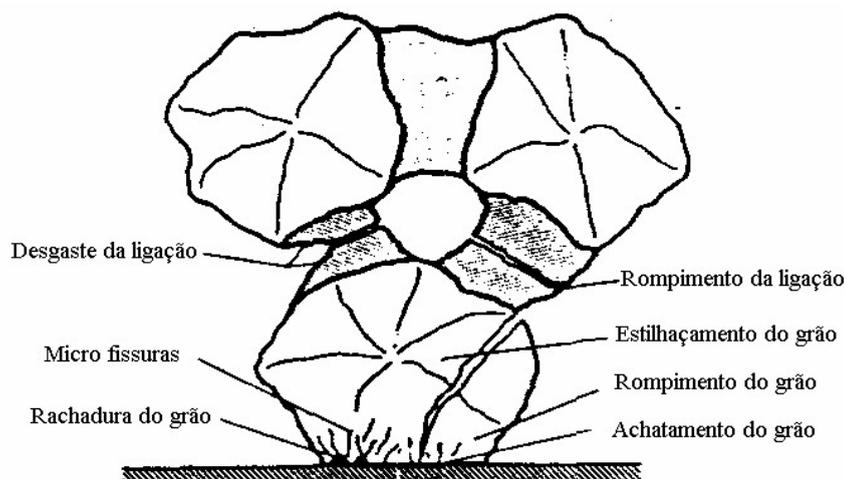


Figura 3-3 - Mecanismos do micro desgaste. (KÖNIG & KNOP, 1991).

Segundo Boothroyd & Knight (1989), os rebolos têm uma característica de auto afiação e a força que um grão pode suportar antes de ser arrancado do reboleto ou ser fraturado é um fator muito importante quando é considerado o desempenho do reboleto.

3.1.5 Rugosidade

Na retificação a rugosidade obtida depende, de uma maneira complexa, da rugosidade superficial do reboleto, dos parâmetros de retificação, e interações tribológicas entre a peça e pontos de corte do abrasivo (AGUIAR, 1997).

Segundo Malkin (1989), quando existe restrição de acabamento superficial, a taxa de remoção pode ser aumentada mantendo o mesmo acabamento, dressando o reboleto mais finamente. Dressagem mais fina pode causar maiores forças, as restrições de potência de retificação e danos térmicos não devem ser violadas. Superfícies mais lisas podem também ser obtidas usando rebolos de grãos mais finos, contudo este pode também conduzir a maiores forças ou maiores taxas de desgaste do reboleto.

A rugosidade depende tanto de parâmetros de retificação quanto de dressagem (XIAO & MALKIN, 1996).

3.1.6 Tolerâncias

Tolerâncias dimensionais e geométricas são medidas de uma superfície acabada para outra, enquanto que a rugosidade de uma superfície acabada é a medida de uma

incerteza na especificação exata de sua localização, há frequentemente uma relação direta entre a tolerância e a rugosidade superficial combinadas nos pontos de medidas. Entretanto, é geralmente necessário exigir acabamentos mais finos para manter melhores tolerâncias. Os fatores podem ser similarmente afetados pelas condições de retificação, outros fatores que afetam as tolerâncias dimensionais incluem deflexões da máquina, expansão e distorção térmica da máquina e da peça, desgaste do rebolo e vibrações.

3.2 Principais Variáveis e Parâmetros Envolvidos no Processo de Retificação do Tipo Tangencial Plana

As condições de *set-up* de máquina influenciam significativamente na qualidade final do produto, o que está diretamente relacionado com os custos do processo (VIEIRA & OLIVEIRA, 2001).

Segundo King e Hahn (1986), em operações de planejamento da retificação é necessário definir as entradas e saídas do processo e desenvolver relações entre elas. Para que isto seja feito é importante distinguir as variáveis de entrada da retificadora e entradas do processo de retificação que ocorrem na interação rebolo-peça. Os parâmetros de entrada típicos das máquinas retificadoras são: taxa de avanço, velocidade do rebolo e da peça, profundidade de dressagem e tempo de centelhamento (*spark-out*). Estes parâmetros são mostrados na figura 3-4.

Nas máquinas de retificação, a taxa de avanço é controlada. Como o rebolo interage com a peça, forças são induzidas entre a interface rebolo-peça; quanto maior a força, maior a remoção de material. É controlado o acabamento superficial, a deflexão da máquina e o princípio do dano térmico.

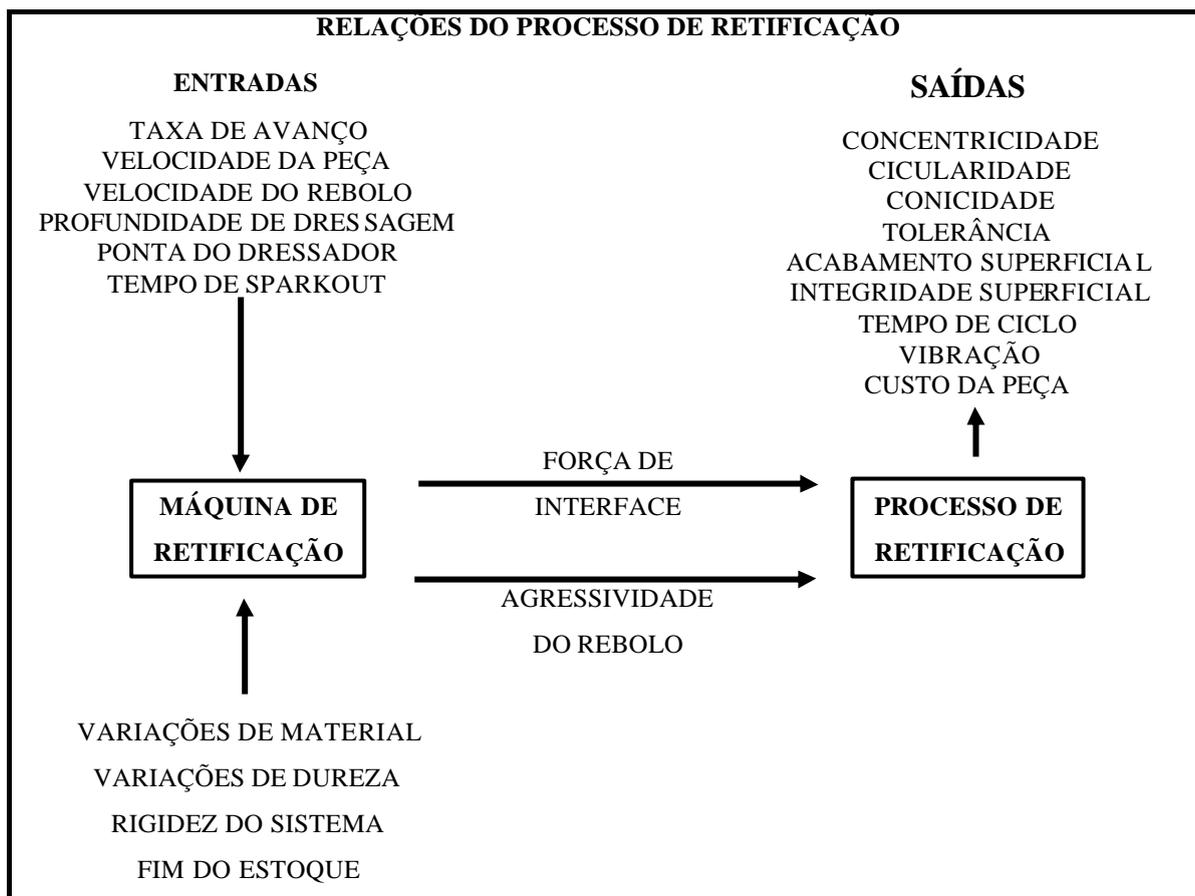


Figura 3-4 - Variáveis de entrada e saída para máquina e processos de retificação

(Adaptado de KING & HAHN, 1986).

A capacidade da superfície de corte do rebolo de retificação de remover material, chamada de agressividade do rebolo, também é uma variável importante no processo de retificação.

3.2.1 Comportamento da Profundidade de Corte (a)

Segundo Bianchi et al. (1996a), a deflexão entre o rebolo e a peça aumenta quando a área de contato e, conseqüentemente, o número de grãos em contato com a peça aumentam. Sendo assim, a temperatura durante o processo também aumenta. Portanto, um aumento na profundidade de corte provoca um aumento no número de grãos ativos e no tempo de contato, fazendo com que cada grão abrasivo remova uma quantidade menor de metal. Os cavacos resultam mais alongados e finos. Há uma maior parcela de atrito e riscamento, desde o início da formação do cavaco até a sua expulsão, portanto elevam a

temperatura na região de corte tendo como consequência a elevação de rugosidade, nível de emissão acústica e forças de corte (normal e tangencial).

3.2.2 Comportamento da Velocidade de Corte (V_s)

Segundo Bianchi et al. (1996a), a velocidade de corte V_s exerce uma substancial influência sobre o comportamento das forças de corte, desgaste do rebolo, acabamento e queima superficial da peça, vibrações da máquina, entre outros.

Quando a velocidade de corte é elevada, um mesmo grão abrasivo passa a remover um menor volume de cavacos, pelo aumento da sua frequência de contato com a peça. Portanto, a espessura do cavaco removido é menor, diminuindo as forças de corte, rugosidade da peça e desgaste do rebolo, pela menor solicitação de cada grão. Em contrapartida, pelo aumento da intensidade de contato dos grãos com a peça, ocorre uma elevação da temperatura que pode ocasionar um dano térmico na peça (BIANCHI et al. 1996a).

3.2.3 Comportamento da Velocidade da Peça (V_w)

Segundo Bianchi et al. (1996b), a velocidade da peça V_w é coincidente com a velocidade da mesa da máquina retificadora. Esta velocidade está relacionada aos impactos que os grãos abrasivos provocam na peça.

Quando a velocidade da peça é baixa e a penetração é grande, os impactos dos grãos abrasivos do rebolo sobre a peça são pequenos e os cavacos são alongados. O tempo de contato grão/peça e o número de grãos ativos são maiores. Assim, a força em um grão abrasivo é pequena e atua durante um tempo longo (figura 1-5). Os grãos abrasivos tendem a permanecer mais tempo em contato com a peça, o que provoca um desgaste maior. As forças de corte (normal e tangencial) tendem a aumentar com o tempo de retificação, pelo desgaste das arestas cortantes. Com isto, o desgaste do rebolo tende a ser menor, considerando-se que os grãos abrasivos permanecem mais tempo presos ao ligante, o que minimiza a perda de grãos.

Quando a velocidade da peça é alta e a penetração do rebolo é pequena, os impactos dos grãos abrasivos do rebolo sobre a peça são grandes e os cavacos são curtos.

O tempo de contato grão/peça e o número de grãos ativos são menores, gerando uma força por grão abrasivo grande e por pouco tempo (figura 3-5). Os grãos tendem a se fraturar e a se desprender da superfície de corte do rebolo. Neste caso, as forças totais de corte tendem a uma estabilização pela troca constante de grãos abrasivos. O desgaste do rebolo tende a ser maior que no caso anterior.

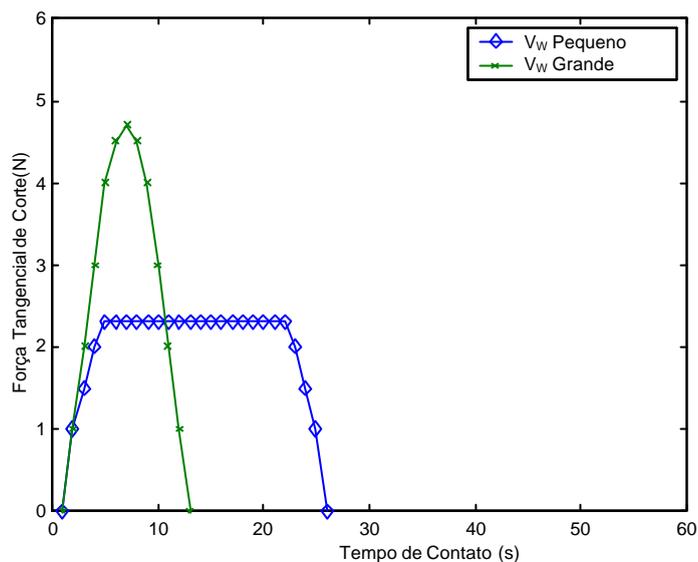


Figura 3-5 – Gráfico Qualitativo – Força Tangencial de Corte vs Tempo de Contato (AGUIAR, 1997).

3.2.4 Espessura Equivalente de Corte (h_{eq})

Segundo Bianchi (1990), a espessura equivalente de corte h_{eq} [μm] representa a espessura da camada de metal que é arrancada pelo rebolo numa volta completa. Trata-se de um parâmetro que permite quantificar uma condição de trabalho a partir das variáveis V_s e V_w , sendo, portanto, muito importante no processo de retificação. A espessura equivalente é expressa por:

$$h_{eq} = \frac{a \cdot V_w}{V_s} \quad (2)$$

O parâmetro h_{eq} está diretamente relacionado com o comportamento do processo de retificação em função de variáveis envolvidas como forças de corte, rugosidade, vida da ferramenta, entre outros.

3.2.5 Relação G

Segundo Bianchi (1992), o parâmetro G foi definido como sendo a relação entre o volume de metal retificado e o desgaste volumétrico do rebolo. Este parâmetro é representado pela equação:

$$G = \frac{Z_w}{Z_s} \quad (3)$$

Onde: Z_w é o volume de metal retificado (mm^3)

Z_s é o volume de rebolo gasto (mm^3)

Esta relação caracteriza o desgaste de um rebolo sob determinadas condições de trabalho. Se o desgaste do rebolo for grande, a relação G é pequena. Isto significa que está havendo auto-afiação e, portanto, o rebolo permanece agressivo pela renovação dos grãos abrasivos. Se o desgaste do rebolo for pequeno, a relação G é alta e, desta forma, não há liberação dos grãos gastos e o rebolo perde a agressividade pelo desgaste do topo dos grãos.

3.3 Conceitos de Retificação

Existem muitos tipos de retificação: de “desbaste” e “precisão”; interna, externa, plana, *center-less*; utilizando-se super-abrasivos ou abrasivos convencionais. Segundo King e Hahn (1986), todos os tipos agem de uma maneira semelhante. Quando uma superfície abrasiva em movimento entra em contato com a peça, e se a força é alta o bastante, o material é removido da peça e o rebolo se desgasta. Estes dois fatores sempre irão ocorrer, contudo, o nível da força determina o quão rápido as taxas de remoção de material serão, qual será a rugosidade superficial resultante, e se a peça será metalurgicamente danificada ou não.

3.3.1 Características Básicas do Sistema

É mais conveniente usar taxas volumétricas de remoção que taxas radiais. Isto permite relacionar sistemas de tamanhos diferentes entre si. Taxas volumétricas de remoção têm sido classificados de Z ou Q .

Existem duas forças: F_n normal a superfície de contato rebole-peça e F_t tangencial à superfície de contato. Multiplicando F_t pela velocidade do rebole tem-se a potência usada na retificação (quando uma constante apropriada relacionando força e velocidade em potência é usada). Convencionou-se internacionalmente usar quantidades “primárias” para ilustrar fatores “por unidade de largura”. Dessa forma taxas volumétricas de remoção por unidade de largura seriam escritas como: F'_n , F'_t , Z'_w , Z'_s (ou Q'_w e Q'_s).

A figura 3-6 mostra uma configuração da retificação plana que ilustra outra maneira de cálculo de taxas de remoção volumétricas. A profundidade de corte é a e a largura de contato é B , sendo a taxa de remoção dada por:

$$Z = a.V_w.B \quad (4)$$

Assim, taxa de remoção por unidade de largura é:

$$Z' = a.V_w \quad (5)$$

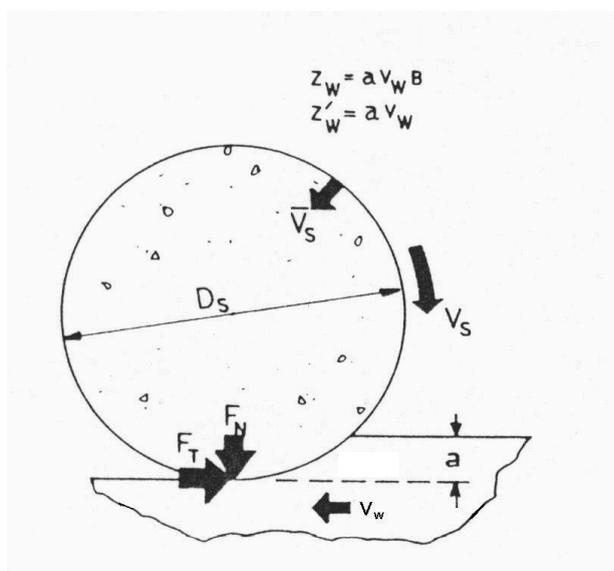


Figura 3-6 – Parâmetros envolvidos na retificação plana. (KING & HAHN, 1986).

3.4 Operação de Dressagem

A dressagem é considerada por diversos autores como diretamente responsável pela topografia dos rebolos, um dos fatores de maior importância na formação de cavaco durante as operações de retificação. A vida do rebolo, o tempo de ciclo de retificação e a qualidade final da peça são os itens mais afetados pela operação de dressagem (MARINELLI et al. 1998).

Após a fabricação e uso, os rebolos não se encontram em condições normais para nova utilização. Podem apresentar arestas cegas, não estarem numa forma desejada e os poros podem estar impregnados de cavaco, de modo que a absorção de novos cavacos com sucessiva remoção de material fica dificultada. Isto resulta em um atrito excessivo e, conseqüentemente, uma geração de calor muito grande para a peça. Retificação sob estas condições é ineficiente, sendo necessário dressar o rebolo em intervalos freqüentes para remover os grãos gastos de sua superfície (BOOTHROYD & KNIGHT, 1989).

Para tal operação, são utilizados diversos tipos de ferramentas denominadas dressadores ou retificadores que incluem: cortadores metálicos (rosetas), bastões retificadores, rodas retificadoras, pontas simples de diamante, dressadores de diamantes múltiplos e em matriz, roletes estacionários e giratórios de diamante e roletes de esmagamento. As principais finalidades da operação de dressagem são:

- obtenção de concentricidade da face de trabalho com o eixo de rotação;
- perfilamento da face de trabalho para uma operação de forma;
- arrancamento dos grãos abrasivos gastos para melhorar a agressividade da face de trabalho.

Devido à sua importância, os dressadores e os processos envolvidos têm sido estudados intensamente, procurando a melhoria do desempenho, redução de custo e aumento da confiabilidade (MARINELLI et al., 1998).

Nos rebolos convencionais, ou seja, aqueles onde são empregados abrasivos convencionais como Al_2O_3 e SiC, a dressagem é feita para corrigir a geometria do rebolo e renovar a agressividade da superfície de trabalho (MARINELLI et al., 1998). Na figura 3-7 são apresentados os principais parâmetros utilizados para descrever as operações de dressagem, com as seguintes grandezas envolvidas:

- b_{dr} -largura real de atuação do dressador
- b_d -largura de atuação do dressador
- W_t -ondulação teórica (macro efeito)
- S_d -passo de dressagem
- A_d -profundidade de dressagem
- A_{sd} -área de dressagem

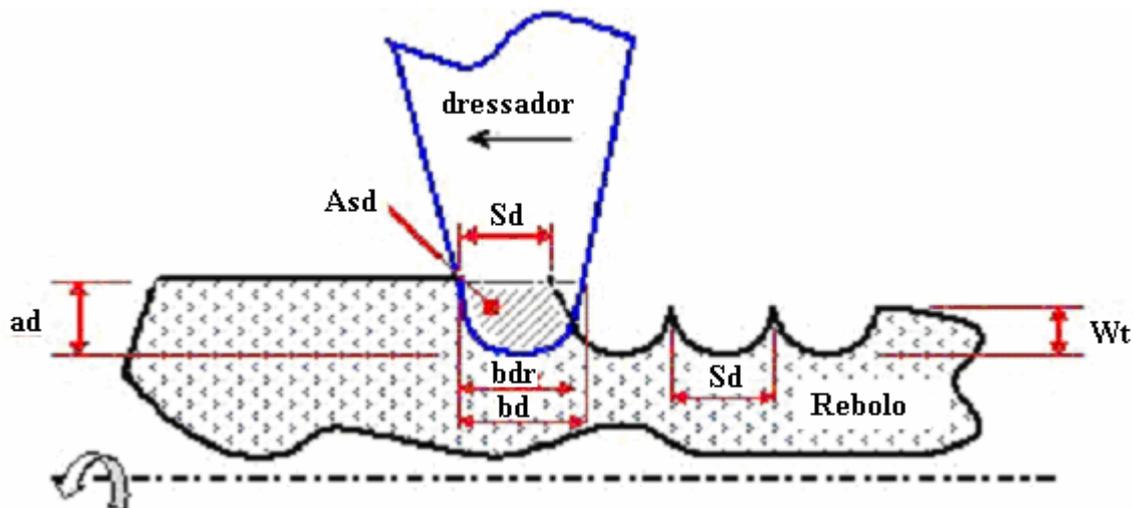


Figura 3-7 - Principais parâmetros de dressagem com ferramenta de ponta única.
(MARINELLI et al., 1998).

3.4.1 Ferramentas de Dressagem

Segundo König apud Aguiar (1997), as ferramentas de dressagem se classificam em: ferramentas estáticas e ferramentas rotativas.

Para as ferramentas estáticas, ao contrário das rotativas, não existe um movimento de rotação, apenas translação.

As ferramentas de dressagem fixas trabalham da mesma forma que uma ferramenta de torneamento onde o rebolo seria a peça a ser torneada. Esta ferramenta é geralmente fixa à mesa de trabalho ou sobre um dispositivo especial de dressagem e é deslocada com uma velocidade de avanço constante (V_{sd}). Entre dois passos de dressagem, a ferramenta é avançada de um valor de profundidade (a_d). As ferramentas com contato pontual ou na forma de uma linha também são adequadas para o perfilamento. O perfil é produzido pelo movimento da ferramenta de dressagem que é guiada por um sistema

copiador. Podem-se encontrar atualmente ferramentas de dressagem comandadas numericamente.

A ferramenta rotativa trabalha da mesma forma que a ferramenta estática, sendo avançada longitudinalmente ao longo do rebolo. As demais ferramentas não necessitam de um movimento de avanço, uma vez que têm uma largura de atuação do dressador (b_d) maior ou igual a largura de corte (b_s). A velocidade de penetração (V_{fd}) pode ser realizada através de um movimento intermitente nas ferramentas em bloco ou na forma de um movimento contínuo de dressagem por rolo. Em ambos os casos a ferramenta executa movimento de penetração radial em relação ao rebolo. O perfil da ferramenta de dressagem é reproduzido de forma recíproca na superfície do rebolo.

Para que seja possível a remoção de material do rebolo, as ferramentas de dressagem devem ser mais duras que o material do rebolo. Em decorrência disso, para a dressagem de rebolos convencionais são empregadas ferramentas de diamante. Além da dressagem do rebolo por corte, também é usual empregar-se uma sobrecarga de retificação sobre o rebolo, produzindo um efeito de remoção de material de sua superfície. Este procedimento permite que, retificação de materiais extremamente duros e sob condições extremas de usinagem, sejam produzidas grandes forças de cortes nos contornos dos grãos abrasivos. Estas forças fazem com que os grãos abrasivos cegos lasquem ou sejam expulsos do ligante.

3.4.2 Influência da Dressagem no Processo de Retificação

Ainda é pouco conhecida em sua totalidade a influência das condições de dressagem na retificação, pois a geometria do dressador é um fator de grande influência que freqüentemente não é levado em conta. São utilizados como variáveis do processo, a profundidade de dressagem (a_d) e o passo de dressagem (S_d).

São dois os efeitos resultantes da operação de dressagem: o macro-efeito e o micro-efeito. O macro-efeito é formado em função do formato do dressador, da profundidade de penetração deste e do passo de dressagem em que é realizada a operação. Este fenômeno determina a posição na qual as arestas dos grãos abrasivos estão localizadas. Pode-se dizer que o macro-efeito é a rosca que o dressador produz na face do rebolo. A figura 3-8 representa o esquema do processo de dressagem (BIANCHI, 1992). O microefeito é formado pelo arrancamento dos grãos debastados (com baixa ancoragem na liga) e fratura

dos grãos que não se desgastaram por completo, onde novas arestas de corte são geradas pelo dressador.

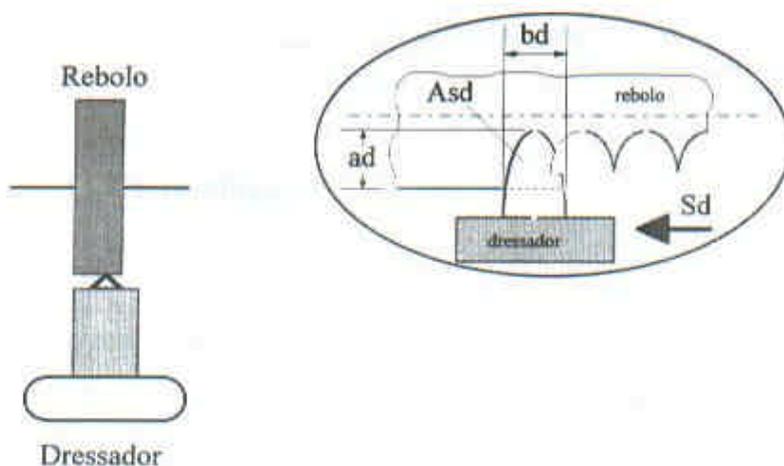


Figura 3-8 - Esquema do processo de dressagem (Adaptado de BIANCHI, 1996a).

Reduzir o número de ciclos de dressagem maximiza a produção, mas também resulta em um rebolo gasto, que não corta livremente. Quando o rebolo está gasto, ele produz um acabamento mais liso e aumenta a probabilidade de danos térmicos, de formação de lóbulos e de trepidação (SCHWARZ, 1999).

3.4.3 Grau de Recobrimento (U_d)

Segundo König apud Aguiar (1997), a forma de afiação que usualmente é utilizada, ou seja, ajustando-se o avanço do dressador em função do seu tipo, é inadequada, pois não leva em conta a largura de atuação deste no instante da operação. Tal largura varia ainda devido ao desgaste da ponta do dressador durante várias operações de dressagem.

König (1980) definiu o parâmetro denominado por grau de recobrimento (U_d) como sendo a relação entre a largura de atuação do dressador (b_d) e o passo de dressagem (S_d), conforme a expressão 6:

$$U_d = \frac{b_d}{S_d} \quad (6)$$

As condições de dressagem influenciam diretamente na taxa de remoção de material que por sua vez interfere na rugosidade da peça produzida. Em dressagens grossas, onde o grau de recobrimento é pequeno e o número de arestas atuantes é reduzido, provoca-se um aumento na profundidade dos sulcos que, conseqüentemente, fornece valores mais elevados na rugosidade. Na dressagem fina, com valores maiores de grau de recobrimento, um número significativamente maior de arestas atuantes divide os esforços e cada grão abrasivo penetra menos na peça, reduzindo assim os valores de rugosidade.

Valores de S_d maiores que os de b_d , não devem ser usados, uma vez que partes da superfície do rebolo não serão dressadas. Em outras palavras, para garantir que toda a superfície do rebolo seja dressada, U_d menor que 1,0 não deverá ser utilizado (MARINELLI et al. 1998).

3.4.4 Dressagem Inteligente

Quando as peças retificadas começam a apresentar algum problema de acabamento, erros de forma ou erros de tolerância, normalmente realiza-se a dressagem para corrigir o rebolo, devolvendo-lhe o perfil original e restabelecendo as características de afiação. Para garantir uma dressagem satisfatória, são realizados diversos passes em seqüência, o que acarreta o desgaste desnecessário do rebolo e do dressador. Além disso, se o rebolo estiver com desgaste radial acentuado os primeiros passes da dressagem serão efetuados em vazio, pois normalmente a dressagem é feita através de um programa CNC que compensa o valor dressado nas coordenadas do rebolo e mantém as coordenadas do dressador. Assim, na próxima dressagem o rebolo vai se deslocar para a posição anterior de dressagem, o que significa tempo de ciclo perdido (FELIPE E OLIVEIRA, 1998).

A dressagem inteligente ameniza estes problemas com a detecção da posição do rebolo e do monitoramento da operação, diminuindo a intervenção do operador no processo e permitindo a obtenção de uma maior regularidade no perfil e nas condições de afiação do rebolo. Com a calibração do rebolo abordada acima, a retificadora pode eliminar a dressagem em vazio, começando a dressar na posição que o rebolo for detectado. Conhecendo o processo pode-se determinar qual parte do rebolo deve estar mais evidente (menos gasta), caso o desgaste não seja uniforme, e então programar a máquina para realizar a detecção de contato nesta região. Uma vez determinada a posição do rebolo a dressagem é iniciada, sendo monitorada pelo sinal de emissão acústica para garantir um

perfeito restabelecimento do perfil. O nível de emissão acústica deve permanecer acima de um limite preestabelecido durante toda a dressagem (tal limite pode ser obtido com a dressagem de um rebolo previamente dressado sem falhas) (FELIPE E OLIVEIRA, 1998).

A dressagem é feita em duas etapas distintas. Na primeira, com o objetivo de otimizar o processo, a operação deve ser realizada com alta profundidade de dressagem a_d (da ordem de 50 μm) e máxima velocidade, com $U_d = 1$, ou seja, o passo de dressagem S_d (quanto o dressador anda por revolução do rebolo) é igual à largura de atuação do dressador b_d com o rebolo. Este procedimento é repetido automaticamente diversas vezes, até que o sistema de monitoramento indique que a dressagem não apresenta falhas. Após corrigir o perfil, um último passe de dressagem de acabamento é realizado, com profundidade a_D e grau de recobrimento U_D de acordo com as características do processo e a qualidade que se deseja obter na peça. Para realizar a detecção de falhas durante a dressagem é necessária a utilização de uma janela de tempo na qual o sinal é monitorado. Esta janela deve ter início imediatamente após o começo do contato entre o dressador e o rebolo e terminar pouco antes da saída do dressador (FELIPE E OLIVEIRA, 1998).

3.4.5 Agressividade

Segundo Bianchi (1996), a agressividade na superfície de corte pode ser definida como a quantificação da capacidade de um rebolo em remover material.

Diversos métodos foram desenvolvidos para avaliar a agressividade da superfície de trabalho do rebolo. São relacionados parâmetros topográficos com a agressividade do rebolo e muitas destas técnicas baseavam-se na contagem das arestas de corte sobre a superfície do rebolo. Mais recentemente, surgiram métodos que permitem avaliar a influência das características topográficas do rebolo sobre o resultado final da operação. Alguns deles envolvem testes utilizando equipamentos e condições de corte muito comuns. A principal delas refere-se à repetibilidade dos resultados obtidos nos métodos propostos, independentemente de serem parâmetros estáticos ou dinâmicos. Uma das técnicas mais simples e diretas para a avaliação da agressividade de rebolos foi proposta primeiramente em 1980 por Nakayama e Takagui. Consiste na retificação de um corpo de prova padrão, trazendo a possibilidade de se avaliar a agressividade do rebolo de uma maneira bastante simples e rápida, além de encontrar uma relação linear, cuja inclinação é proporcional à agressividade do rebolo K ($\text{mm}^3/\text{N.s}$), sendo a topografia do rebolo, com todas as arestas

de corte avaliada apenas uma vez. Quando este método foi realizado pela primeira vez, o corpo de prova padrão era uma esfera de rolamento em aço endurecido. Havia, entretanto, algumas dificuldades em se avaliar a agressividade do rebolo em diferentes materiais, já que a esfera não é uma geometria fácil de ser manufaturada. Por isso, em 1991 foi proposta uma variação da técnica inicial de Nakayama, chamada de Método do Disco Retificado, onde a esfera de rolamento é substituída por um disco. Nesta versão, os cálculos e a regressão são feitos por um computador, objetivando acelerar e automatizar o processo (MARINELLI et al., 1998).

O método utilizado para a avaliação do desgaste entre os materiais está baseado no estudo do comportamento da agressividade, que é a capacidade de um material gastar o outro. Para a determinação da agressividade foi reproduzido e adaptado o método do disco retificado, desenvolvido por Coelho (1991), com base nos seguintes elementos: disco estático confeccionado em aço dúctil (ABNT 1020) e revestido em toda a sua circunferência com pequenos incrementos de resina polimerizados, tendo sua superfície regularizada com rebolo de óxido de alumínio. Este disco é então pressionado sob uma força constante, por uma carga pré-estabelecida contra a superfície do disco dinâmico que foi confeccionado em porcelana e retificado com rebolo diamantado.

O valor do deslocamento do disco estático contra o disco dinâmico (d) é registrado ponto a ponto em função do tempo, construindo-se uma curva de deslocamento com esses dados em função do tempo elevado a $2/3$, obtendo-se o coeficiente angular da reta de regressão linear.

Logo, com os dados da regressão, pode-se determinar k através da expressão:

$$k = \frac{2b\sqrt{4r}}{3F_n} (a_1)^{2/3} \quad (7)$$

Onde: -K ($\text{mm}^3/\text{N.s}$) representa a agressividade de um material contra outro material

- F_n (N) a força normal necessária para efetuar-se a remoção de material num determinado tempo

- b (mm) a largura dos discos fixos

- r (mm) o raio dos discos

- a_1 o coeficiente angular da reta de regressão linear

3.4.6 Avaliação da Dureza de Rebolos

Um dos problemas enfrentados no processo de retificação está ligado diretamente ao rebolo: a determinação da sua dureza e da influência desta durante o processo, nas operações de retificação. É comum identificar alterações na quantidade de peças que um rebolo retifica entre dressagens consecutivas. Na maioria dos casos isso resulta em parada do processo para novas dressagens e até mesmo para troca de rebolo. A dureza de um rebolo expressa a capacidade de retenção que o ligante tem sobre os grãos abrasivos, quanto mais o grão fica retido (ancorado) no ligante, mais duro é considerado o rebolo, caso o grão se solte facilmente do ligante, o rebolo é considerado mais mole. Um rebolo realmente duro é aquele que apresenta a capacidade de reter os grãos até torná-los desgastados a ponto de ser difícil controlar a agressividade do abrasivo (VIEIRA e OLIVEIRA, 2000).

No processo de retificação, a dureza de um rebolo tem grande influência sobre a sua vida útil. Um rebolo com maior dureza tende a reter mais o grão abrasivo na sua periferia. Conforme esse grão vai se desgastando e perdendo a capacidade de remoção, as forças de corte vão se elevando e o calor gerado pelo atrito entre grão e peça também aumenta. Como o grão desgastado permanece retido na liga, esse processo tende a ficar mais evidente à medida que o desgaste do grão se acentua (cegamento do rebolo). Esse processo pode ser acelerado ou retardado pelas características de friabilidade do grão abrasivo utilizado (VIEIRA e OLIVEIRA, 2000).

Em um rebolo com menor dureza, o grão abrasivo se desprende (às vezes inteiro) permitindo o surgimento de um novo grão abrasivo, num processo chamado de “auto-afiação”, à medida que se desgasta e provoca uma elevação das forças de corte. Portanto, a elevação dos esforços de corte, o aquecimento da peça e a perda do perfil do rebolo são fatores preponderantes para o fim da vida do rebolo. É importante ressaltar que as condições de operação, principalmente a velocidade de corte, também podem alterar significativamente o comportamento do rebolo em relação à dureza. Conforme a velocidade de corte é aumentada, o rebolo passa a apresentar comportamento mais duro. Com a diminuição da velocidade periférica, o rebolo passa a se comportar como mais mole, este fato pode influenciar inclusive no desgaste do dressador; apesar da importância da dureza do rebolo no processo de retificação, rebolos com o mesmo grau de dureza de diferentes fabricantes podem apresentar variações em seu comportamento durante o

processo. Os métodos mais utilizados são: remoção física (Winterling ou Oghoshi), ressonância de frequência (*grind-o-sonic*) e desgaste abrasivo (Zeiss-Mackensen). Estes testes são também chamados “*non-grinding tests*” (testes sem retificação) e que nenhum deles possibilita a sua utilização na máquina retificadora. A dureza local pode ser avaliada, mas não em condições de trabalho (VIEIRA e OLIVEIRA, 2000).

O grão abrasivo fica sustentado por pontes de liga que, à medida que a dureza do rebolo é aumentada, tornam-se mais reforçadas e resistentes, proporcionando uma maior retenção do grão. O rompimento das pontes mais resistentes demanda maior quantidade de energia do que no caso de pontes menos resistentes. Portanto, o pulso de emissão acústica emitido no momento em que ocorrer a fratura do ligante tende a ter maior intensidade quando a dureza do rebolo tem maior grau. Tal comportamento pode ser analisado mais especificamente na operação de dressagem, onde são promovidas tanto a fratura do grão abrasivo quanto a sua remoção (fratura da liga). Portanto, a variação na intensidade do sinal de emissão acústica pode, ser ocasionada não apenas pelas condições de dressagem, mas também por uma alteração localizada na dureza do rebolo ou ainda na sua estrutura. Assim, tais tipos de não-uniformidades podem ser controlados com o uso da EA durante a dressagem do rebolo (VIEIRA e OLIVIERA, 2000).

Na figura 3-9 é apresentada a forma de identificação de um rebolo convencional, com dados do abrasivo, da granulometria, da dureza, estrutura e ligante.

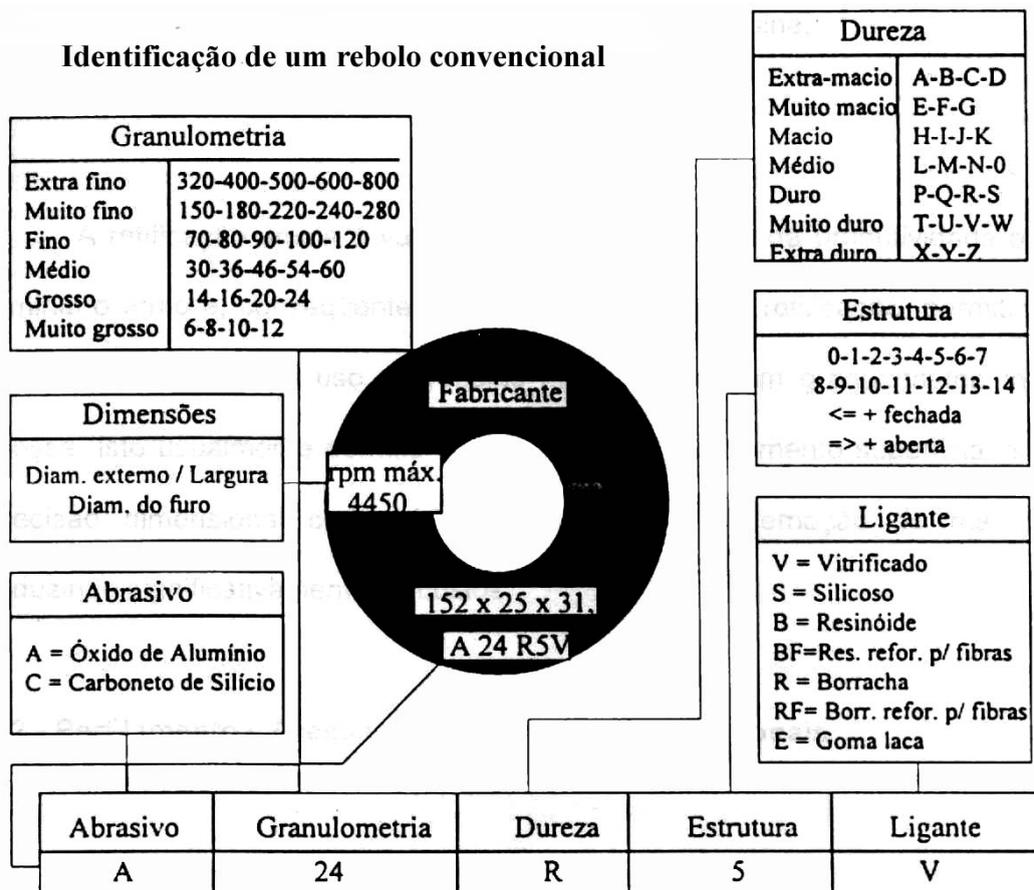


Figura 3-9 – Identificação de um rebolo convencional.

(Catálogo do Fabricante – NORTON Industria e Comércio Ltda.).

3.5 Rebolos e Abrasivos

O rebolo original foi feito de argila e pó abrasivo, torneado e aquecido por Frank B. Norton no final de 1800. O rebolo é uma pedra artificial moldada, denominada, vulgarmente, esmeril. É uma ferramenta de corte múltipla, formada por aglomeração compacta de cristais duros, que cortam o metal raspando-o com suas pontas agudas. São constituídos de abrasivos e aglomerantes (Figura 3-10).

Abrasivos são as ferramentas de corte ou produtores de cavaco do rebolo de retificação. O elemento abrasivo é um cristal natural ou artificial em forma de pontas-agudas. Os principais abrasivos são: óxido de alumínio, carboneto de silício, nitreto de boro cúbico e diamante.

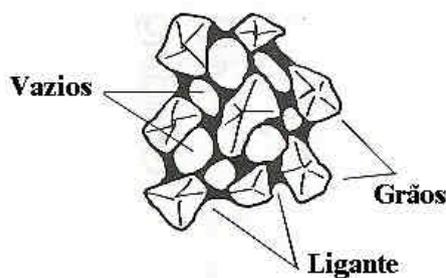


Figura 3-10 - Estrutura do Rebolo.
(BOOTHROYD & KNIGHT, 1989).

As características dos abrasivos que determinam sua eficiência na remoção de material são: dureza do cristal, estrutura do cristal, forma do grão, a friabilidade ou durabilidade do grão, a química do abrasivo, e se foi tratado ou revestido.

Segundo King e Hahn (1986), a dureza de um grão, relativa à dureza do material a ser retificado, é um fator na habilidade do rebolo de retificação de remover material. O diamante ainda é o abrasivo mais duro disponível, e sua dureza o torna extremamente eficiente em algumas operações de retificação. Outras características do diamante, como suas propriedades químicas, o tornam ineficiente em outras operações, como a retificação de aços, por exemplo. De qualquer forma, um abrasivo que é significativamente mais duro que o material a ser retificado tenderá a remover mais material antes de se desgastar.

A estrutura do cristal de um grão abrasivo afeta o modo do desgaste do grão. O grão abrasivo monocristalino tende a se desgastar mais consistentemente que uma partícula abrasiva que pode ter vários cristais fundidos juntos. Grãos abrasivos apresentam enormes variações em sua microestrutura (KING & HAHN, 1986).

A forma de um grão abrasivo afeta a agressividade do grão e as características de desgaste. Grãos atarracados ou esféricos, quando comparados com grãos irregulares ou finos de propriedades similares diferentes, necessitarão inicialmente mais força para penetrar o material e irão fraturar ou desgastar mais lentamente (KING & HAHN, 1986).

A dureza do abrasivo, estrutura do cristal e a forma do grão contribuem inteiramente para a relativa friabilidade ou durabilidade do abrasivo. Um grão friável é definido como um grão que fratura e expõe novos pontos agudos dentro do mesmo grão. Um grão durável pode resistir a altas forças na operação de retificação sem um desgaste muito alto. Estes dois termos (friabilidade e durabilidade) não são exatamente opostos, à medida que alguns grãos sofrem microfraturas que expõem novos pontos agudos de corte,

a capacidade de corte do grão em alguns rebolos (especialmente vitrificados), ocorre entre o abrasivo e o ligante. Sua capacidade de retificar materiais com os quais pode interagir em uma região de alta temperatura, interface de alta pressão, a tendência de o diamante oxidar em altas temperaturas, tanto quanto sua tendência de baixa resistência ao impacto, impede seu uso para operações de altas temperaturas e altas forças.

Grãos abrasivos revestidos com camadas cerâmicas, metálicas ou químicas podem afetar a capacidade do grão de se ligar a um tipo particular de ligante, podem ser usados para transmitir o calor para longe da superfície de retificação, ou podem fazer o grão retificar por mais tempo.

3.5.1 Tipos de Abrasivos

Os abrasivos usados na retificação podem ser subdivididos em 3 grupos: abrasivos naturais, abrasivos convencionais e superabrasivos.

Os abrasivos naturais não são normalmente usados nos rebolos de retificação, pois não possuem durabilidade para resistir às altas pressões da retificação. Estes abrasivos ainda são usados em algumas aplicações onde pressões baixas e abrasivos baratos e afiados têm utilidade.

Abrasivos convencionais são primariamente colocados em um forno e fundidos, contudo alguns abrasivos não-fundidos estão disponíveis. Os três abrasivos principais são óxido de alumínio, alumina com zircônia e carbureto de silício.

O óxido de alumínio é usado em rebolos para retificar materiais ferrosos. É o abrasivo convencional mais mole, mas é relativamente resistente ao impacto. Existem alguns tipos de grão de óxido de alumínio e suas variações são devido à pureza química, forma do grão, fundido e não-fundido, estrutura cristalina e revestimento.

Carbureto de silício é geralmente usado para retificar materiais não-ferrosos. É o mais duro dos abrasivos convencionais, mas tem menor resistência ao impacto que o óxido de alumínio, existem dois tipos básicos de carbureto de silício: preto e verde. Carbureto de silício preto é menos puro, levemente mais durável, e geralmente mais barato que o tipo verde. Carbureto de silício verde tem pureza maior, é o abrasivo convencional mais agressivo, e é relativamente caro. O carbureto de silício não é normalmente utilizado na retificação de aços, pois não é tão eficiente quanto o óxido de alumínio (não remove muito material antes do desgaste de suas arestas). Teoricamente, isto é devido à química do

abrasivo e o conteúdo de carbono dos aços e/ou a necessidade de resistência ao impacto quando se retificam aços.

Alumina com zircônia é usado para desbaste de metais, particularmente metais ferrosos. Tem a maior resistência ao impacto dos abrasivos convencionais. Existem dois tipos básicos de alumina com zircônia: um liga de 15% de zircônia e uma maior percentagem de liga de zircônia (de nome comercial Norzon). O primeiro tem um maior durabilidade e maior resistência ao impacto. O segundo é mais friável, com capacidade de microfratura e geração de novas superfícies agressivas. Alumina com zircônia não são geralmente usadas nas operações de acabamento devido a sua ineficiência sob forças pequenas (Cripton Industria e Comercio, 2004).

Os tipos de grãos superabrasivos são: diamante e CBN (*Cubic Boron Nitride*), nitreto de boro cúbico. O diamante está disponível tanto como abrasivo natural como abrasivo artificial. O alto custo e disponibilidade limitada do diamante natural têm estimulado a sua substituição pelo diamante artificial ou sintético. O diamante é usado para retificar carburetos, cerâmicas, vidros e outros materiais refratários. Há muitas formas e purezas de diamantes disponíveis.

O CBN é um abrasivo artificial usado para retificar materiais ferrosos, particularmente aços duros e ligas. Comparado ao diamante, o CBN tem resistência ao impacto, resistência ao calor e é quimicamente menos ativo.

Na Tabela 1 são apresentadas as propriedades de alguns materiais abrasivos.

Tabela 1 - Propriedades de alguns materiais abrasivos (MALKIN, 1989).

	Material			
	Óxido de alumínio (Al_2O_3)	Carbeto de silício (SiC)	Nitreto de boro cúbico (BN)	Diamante (C)
Estrutura cristalina	Hexagonal	Hexagonal	Cúbica	Cúbica
Densidade (g/mm^3)	3,98	3,22	3,48	3,52
Ponto de fusão	2040	~2830	~3700 A 130 kbar (ponto triplo)	~3700 a 130 kbar (ponto triplo)
Dureza Knoop (Kg/mm^2)	2100	2400	4700	8000

3.5.2 Retificação com Superabrasivos

O termo “superabrasivos” é usado para diferenciar os abrasivos de diamante e CBN (nitreto de boro cúbico) dos “convencionais” carbeto de silício (SiC) e óxido de alumínio (Al_2O_3). A principal propriedade de um abrasivo que diferencia o superabrasivo de um abrasivo convencional é sua dureza. Outras propriedades importantes são: resistência ao impacto, afinidade química e estabilidade térmica.

Diamante é o material mais duro conhecido e é usado extensivamente na retificação de carbureto de tungstênio e não metálicos, como rocha, concreto, cerâmica e vidro. Segundo King e Hahn (1986), o diamante tem alguma utilidade em materiais ferrosos, mas sua afinidade química geralmente limita sua performance. Materiais ferrosos têm uma afinidade com o carbono, e na temperatura do processo de retificação há uma erosão química (difusão) da partícula do abrasivo de diamante. As arestas de corte dos grãos arredondam deixando-os cegos, causando fricção e formação de cavacos ineficiente. Isto requer maiores forças de retificação que podem causar danos metalúrgicos na peça a ser retificada. Por isso o diamante, geralmente, não é o superabrasivo escolhido para materiais ferrosos.

CBN é fabricado com boro e nitrogênio, que previne o problema de afinidade do carbono na retificação de materiais ferrosos. É o segundo material mais duro conhecido, não é encontrado na natureza, é de 2 a 3 vezes mais duro que o abrasivo de óxido de alumínio. Devido a sua inércia química (não reage com facilidade), é o superabrasivo de escolha nas ligas ferrosas tanto quanto nas ligas de níquel e cobalto. O CBN foi sinterizado pela primeira vez em 1958 e comercializado somente em 1969. O uso do CBN na retificação tem se desenvolvido rapidamente no Japão, Europa e Estados Unidos, adotado para afiação de ferramentas de corte de aço de alta velocidade, mas sua penetração nas aplicações de produção em retificação têm levado mais tempo, pois é mais complexo adotar o CBN do que os abrasivos convencionais. O consumo de rebolos e pedras de afiar de CBN usados para retificação de produção já excede significativamente o gasto usado para manutenção de ferramenta (KING E HAHN, 1986).

Acredita-se que o CBN seja economicamente viável em uma faixa estimada de 25% do mercado de retificação de precisão, mas seu atual uso está bem acima disso e crescendo rapidamente. Como o custo do abrasivo cai e o custo do material da peça é elevado, o mercado potencial do CBN pode crescer ainda mais (KING & HAHN, 1986).

3.5.3 Óxido de Alumínio Cerâmico (Targa)

Grão abrasivo de formato alongado. Isto confere maior agressividade e porosidade ao rebolo, proporcionando maiores taxas de remoção e menor geração de calor permitindo trabalhar com maiores avanços, menores tempos de ciclo e maior produtividade quando comparado com rebolos de óxido de alumínio convencionais. A figura 10 mostra algumas diferenças e características das duas formas de óxido de alumínio após submetido a algum tempo de trabalho.

Cada grão abrasivo de TARGA (Figura 3-11) contém bilhões de microcristais, compostos de partículas submicrométricas de elevadíssima dureza. Os rebolos em TARGA sofrem menor desgaste e necessitam menores profundidades de dressagem. Conseqüentemente, reduz-se o número de dressagens, aumentando a vida útil do dressador e do rebolo. Além disso, há a eliminação ou redução drástica de rejeições por queimas ou trincas nas peças. A redução da área de contato entre o rebolo e a peça-obra gera menos calor.

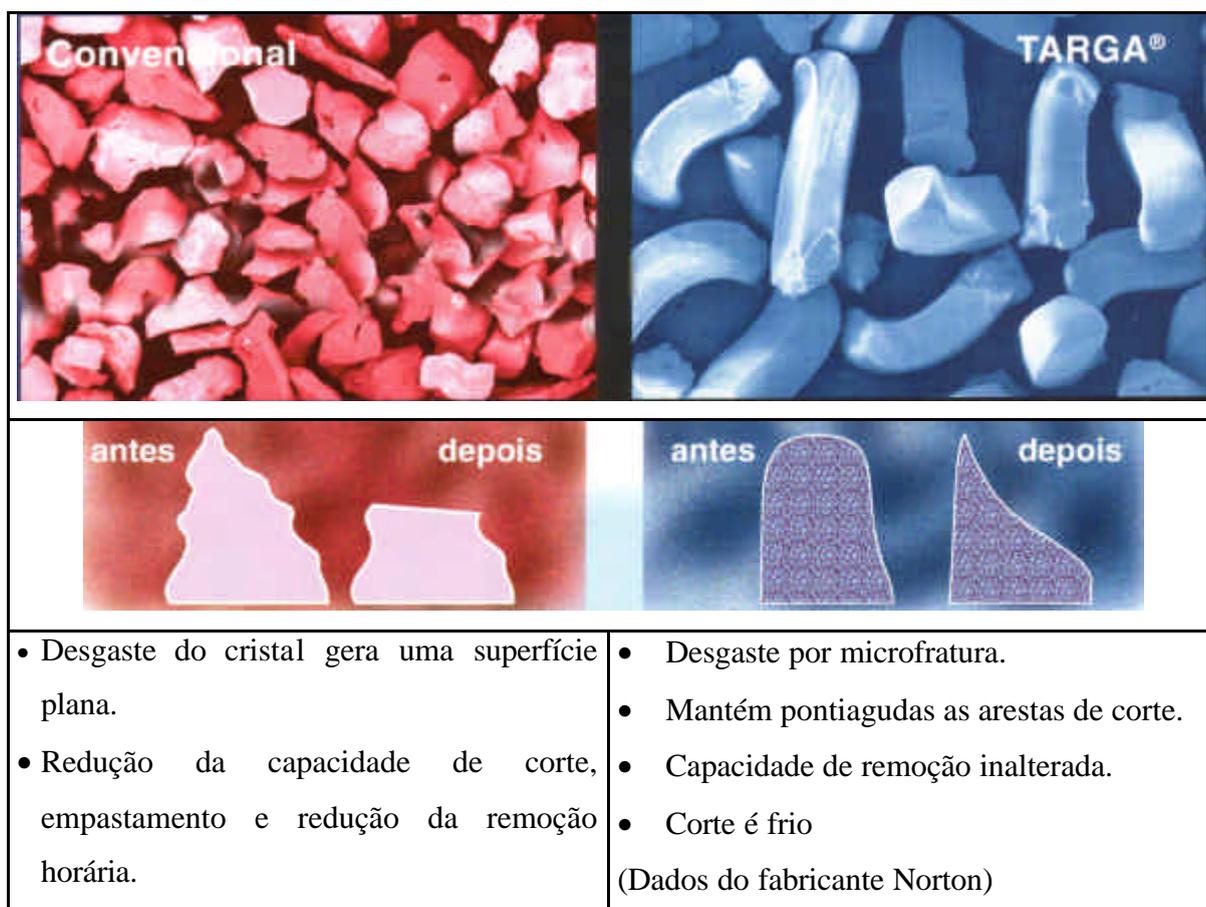


Figura 3-11 - Comparação entre grãos óxido de alumínio comum e cerâmico.

(Catálogo do Fabricante – NORTON Industria e Comércio Ltda)

3.6 Distribuição da energia durante o corte na retificação

Para rebolos de óxido de alumínio cerca de 65 a 85 % da energia mecânica total consumida é transferida como calor para a peça. Segundo Shaw (1994), a quantidade de energia (R) que é transferida para a peça depende principalmente de um fator chamado coeficiente de difusão de calor (β). A equação (8), que é válida para retificação a seco, mostra a relação entre “ R ” e o coeficiente de difusão de calor da peça (β_w) e do rebolo (β_s).

$$R = \frac{1}{1 + \frac{\beta_s}{\beta_w}} \quad (8)$$

A figura 3-12 representa a distribuição da energia durante o corte na retificação.

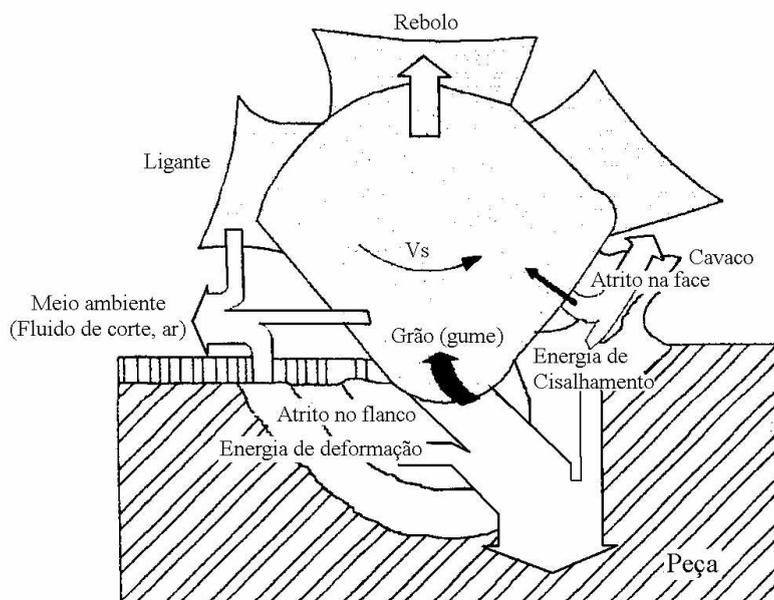


Figura 3-12 - Distribuição de energia durante o corte na retificação (KÖNIG, 1980).

3.7 Monitoramento e Controle do Processo de Retificação

Durante o progresso humano de um estado primitivo até o presente, o mundo tecnológico foi marcado pelo desenvolvimento e aperfeiçoamento de novos métodos de controlar o ambiente. O termo controle está relacionado com métodos de fazer com que valores específicos sejam atribuídos a determinado parâmetro do sistema a ser controlado (JOHNSON, 1997).

Os processos de manufatura de precisão, especialmente a retificação, têm requerido grande habilidade de sensoriamento e experiência do operador humano para assegurar boa qualidade superficial das peças e manter as precisões a elas exigidas. A falta de operadores habilidosos nos últimos anos vem acelerando a necessidade em estabelecer sistemas de retificação autônomos que minimizem a intervenção humana (INASAKI & OKAMURA, 1985).

Os sensores para monitoração em processo desempenham um importante papel de auxílio aos sistemas de manufatura quando se pretende atingir produtos a um custo acessível para o modelo de consumo em massa. Eles são usados para gerar sinais de controle que melhoram o controle e a produtividade dos sistemas de manufatura. Além disso, a consistência impõe mais técnicas quantitativas para a monitoração e controle dos processos (DORNFELD, 1999).

Um dos maiores obstáculos para se atingir a completa automatização do processo de usinagem dentro de sistemas integrados e flexíveis de manufatura é o desenvolvimento do que pode ser chamado usinagem não assistida pelo homem. Isto é, um processo no qual o estabelecimento do momento de troca da ferramenta, a própria troca da ferramenta e a mudança das condições de corte visando à otimização do processo não necessitam da intervenção do homem. Para isto, o desenvolvimento de um sistema de monitoramento e controle do processo, em tempo real, é de fundamental importância (DINIZ et al., 1991).

A implantação de processos inteligentes na indústria utilizando máquinas comandadas numericamente está crescendo. No entanto, o sistema denominado Controle Numérico Computadorizado (CNC) é insuficientemente confiável para operar sem a interação humana. É comum observar operadores de máquinas usando o sistema CNC simplesmente para corrigir os parâmetros do processo ou identificar o desgaste e o fim da vida da ferramenta (AGUIAR et al., 1999)

Segundo Inasaki (1999), existem três importantes objetivos no monitoramento do processo de retificação: detectar problemas que ocorrem durante o processo, fornecer informações para otimizar o processo e contribuir com o estabelecimento de um banco de dados necessário para determinar a configuração dos parâmetros de controle.

A ampla faixa de variáveis de influência que afetam o processo e os inúmeros parâmetros descritivos para a qualidade do produto, dificultam ainda mais a predição confiável do comportamento do processo (KÖNIG & KNOP, 1991).

Tomando como exemplo o processo de retificação cilíndrica de mergulho, existem muitos parâmetros a serem pré-determinados que estão relacionados com a seleção do rebolo e do fluido de refrigeração. Estes parâmetros são: velocidade do rebolo, velocidade da peça, e avanço. Dentre os parâmetros citados, o que mais influencia no resultado da retificação é a profundidade de corte. Outro fator preponderante é a definição do ciclo de retificação que consiste em determinar a rugosidade desejada, o término da operação e o período de *spark-out*. A informação obtida durante o monitoramento do sistema pode ser usada para minimizar o tempo do ciclo de retificação e aumentar a qualidade do processo (INASAKI, 1999).

3.7.1 Princípios e Elementos do Controle de Processos

A transformação de sensores individuais usados, principalmente como dispositivos de diagnóstico num processo de usinagem, em sensores como parte de um sistema inteligente para monitoração e controle de processos e ferramentas, ocorreu mais rapidamente na última década (DORNFELD, 1999).

Segundo Johnson (1997), no controle de processos, o objetivo básico é regular o valor de alguma variável envolvida. Regular significa manter a variável com um certo valor desejado, livre das influências externas. Este valor desejado é chamado de valor de referência.

O controle automático, segundo Aguiar (1997), consiste basicamente em substituir operações humanas por operações lógicas realizadas por circuitos eletrônicos e computadores. Um instrumento denominado sensor, mede sinais proporcionais à determinada variável do sistema e manda esta informação para os dispositivos citados anteriormente. Estes dispositivos processam o sinal a fim de controlar automaticamente o processo.

A seguir têm-se as definições dos elementos de um sistema de controle:

- **Processo** – Consiste em uma complexa reunião de fenômenos relacionados a uma seqüência de manufatura. Muitas variáveis podem estar envolvidas no processo e, algumas vezes, é necessário controlá-las ao mesmo tempo. A retificação é um exemplo de processo multi-variável.
- **Medição** – Para poder controlar determinada variável de um processo, é necessário obter alguma informação sobre ela. De um modo geral, o termo medição é referente à

conversão de um sinal analógico em um valor de tensão ou corrente proporcional à variável medida. Os sensores são os elementos que fazem a leitura dos sinais e serão detalhados mais adiante.

- **Conversão** - é necessário um condicionamento dos sinais para completar a função de medição. O resultado da medição é a transformação da medida analógica da variável em informação proporcional, numa forma usual para o controle do processo.
- **Controlador** – O próximo passo na seqüência de um sistema de controle é a avaliação do erro e a determinação da ação que será utilizada para corrigi-lo. A avaliação pode ser feita por processamento eletrônico ou pneumático dos sinais ou por um computador digital. Atualmente o uso de computadores em controle de processos é essencial, pois são facilmente adaptáveis às operações de tomada de decisão e possuem grande capacidade de controle de múltiplas variáveis.
- **Elemento de Controle** – O elemento final em um controle de processos é o mecanismo ou variável que influencia diretamente o processo. Este elemento aceita uma entrada proveniente do controlador e a transforma em alguma operação proporcional no processo. Este elemento é também chamado de Elemento Final de Controle.

3.7.2 Sensores

A incorporação de um sensor no processo requer um elevado grau de convicção relativa à sua habilidade em detectar, de modo confiável, a característica do processo desejada. Sem esta convicção, os fabricantes, compreensivamente, não têm como justificar a tecnologia de sensores para monitoração em processo para obter os altos níveis de qualidade que oferecem (DORNFELD, 1999).

O mercado dispõe de vários tipos de sensores para monitoração e controle dos ambientes de manufatura e usinagem. Os mais comuns no ambiente de usinagem industrial são os sensores de força, potência e emissão acústica (DORNFELD, 1999).

São necessários múltiplos sensores para o monitoramento e controle do processo de retificação, tomando como exemplo a determinação da vida do rebolo (INASAKI, 1999).

Os sensores são dispositivos que mudam seu comportamento sob a ação de uma grandeza física, podendo fornecer direta ou indiretamente um sinal que indica esta

grandeza. Quando operam diretamente, convertendo uma forma de energia em outra, são chamados transdutores. Os sensores de operação indireta alteram suas propriedades, como a resistência, a capacitância ou a indutância, sob ação de uma grandeza, de forma mais ou menos proporcional.

O sinal de um sensor pode ser usado para detectar e corrigir desvios em sistemas de controle, e nos instrumentos de medição, que frequentemente estão associados aos sistemas de controle de malha aberta (não automáticos), orientando o usuário.

Segundo Aguiar (1997), as principais características de um sensor são:

Linearidade: É o grau de proporcionalidade entre o sinal gerado e a grandeza física. Quanto maior, mais fiel é a resposta do sensor ao estímulo. Os sensores mais usados são os lineares, conferindo mais precisão ao sistema de controle. Os sensores não lineares são usados em faixas limitadas, em que os desvios são aceitáveis, ou com adaptadores especiais, que corrigem o sinal.

- **Faixa de atuação:** É o intervalo de valores da grandeza em que pode ser usado o sensor, sem destruição ou imprecisão.

Existem variados tipos de sensores, cada qual com sua aplicação específica. Os principais e mais empregados em processos de monitoramento da retificação são definidos a seguir.

- **Sensores de Temperatura** - O controle de temperatura é necessário em processos industriais ou comerciais, como a refrigeração de alimentos e compostos químicos, fornos de fusão, produção de metais e ligas, destilação fracionada (produção de bebidas e derivados de petróleo), usinas nucleares e aquecedores e refrigeradores domésticos (fornos elétricos e microondas, freezers e geladeiras). Na retificação, estes sensores são importantes na medição da temperatura da superfície usinada.

Os principais e mais utilizados sensores de temperaturas são os chamados termopares ou pares termoelétricos. Existem materiais que quando encostados e submetidos a uma temperatura, produzem nos extremos deles uma tensão proporcional à temperatura. Este fenômeno é denominado efeito Seebeck. A equação 9 representa a proporcionalidade entre tensão e temperatura.

$$V = K.T \quad (9)$$

Onde K é uma constante para cada par de metais, que é utilizável até seu limite térmico. A tabela 2 mostra os valores de temperatura máxima e da constante de proporcionalidade K para dois pares termoeletricos.

Tabela 2 - Valores de temperatura máxima e da constante K para dois pares termoeletricos (INASAKI, 1999).

Metal	Temperatura Máxima	Constante K
Cobre-constantán	375°C	0,1mV/ °C
Ferro-constantán	750°C	0,0514mV/ °C

- **Sensores de Luz** - Além de seu uso em fotometria (incluindo analisadores de radiações e químicos), é parte de sistemas de controle de luminosidade, como os relés fotoelétricos de iluminação pública e sensores indireto de outras grandezas, como velocidade e posição (fim de curso). São utilizados na retificação para determinar existência de contato ou afiação do rebolo devido a faiscamentos.

O LDR (*light dependent resistor*) é um sensor de luz que tem sua resistência diminuída ao ser iluminado. É composto de um material semicondutor, o sulfeto de cádmio, CdS. A energia luminosa desloca elétrons da camada de valência para a de condução (mais longe do núcleo), aumentando o número destes, diminuindo a resistência. Portanto, a resistência é alta no escuro e baixa na presença de luz.

Os usos mais comuns do LDR são em relés fotoelétricos, fotômetros e alarmes. Sua desvantagem está na lentidão de resposta, que limita sua operação.

Os sensores de luz denominados foto diodos possuem um diodo semicondutor em que a junção está exposta à luz. A energia luminosa desloca elétrons para a banda de condução, reduzindo a barreira de potencial pelo aumento do número de elétrons, que podem circular se aplicada polarização reversa.

A corrente nos fotodiodos é da ordem de dezenas de mili-ampéres com alta luminosidade, e a resposta é rápida. Há fotodiodos para todas as faixas de comprimentos de onda, do infravermelho ao ultravioleta, dependendo do material.

O fotodiodo é usado como sensor em controle remoto, em sistemas de fibra óptica, leitoras de código de barras, *scanner* (digitalizador de imagens para

computador), canetas ópticas (que permitem escrever na tela do computador), toca-discos CD, fotômetros e como sensor indireto de posição e velocidade.

As células foto-voltáicas são outros tipos de sensores de luz que convertem energia luminosa em elétrica.

O diodo iluminado intensamente na junção pode reverter a barreira de potencial em fonte de elétrons, produzindo energia. A eficiência do processo é baixa devido a pouca transparência da junção (somente as camadas superficiais são iluminadas). Seu uso principal está nos painéis solares.

Outro dispositivo é a foto-célula de selênio (um semiconductor), de operação similar. Usa-se em medidores de luminosidade e aparelhos de análise química (como fotocolorímetros).

- **Sensores de Velocidade** - Empregam-se nos controles e medidores de velocidade de motores dentro de máquinas industriais, eletrodomésticos como videocassete e CD, unidades de disquetes e *winchesters* de computadores, na geração de eletricidade (garantindo a frequência da corrente alternada), entre outros. Na retificação são utilizados para detectar vibrações e cinemática dos sistemas móveis da máquina.

O tacogerador é um pequeno gerador elétrico de corrente contínua, com campo fornecido por imã. A tensão gerada, pela Lei de Faraday é proporcional à velocidade com que o fluxo magnético é cortado pelo enrolamento do rotor. Assim, o Tacogerador é um transdutor mecânico elétrico linear cuja equação característica é:

$$V = K.n \quad (10)$$

Onde K é uma constante que depende do campo do imã, do número de espiras e pólos e das dimensões do rotor; n é a rotação do eixo (por minuto, rpm, ou por segundo, rps). A polaridade da tensão gerada depende do sentido de rotação.

O sensor de velocidade conhecido como interruptor de lâminas ou reed-switch, compõe-se de duas lâminas de ferro próximas, dentro de um pequeno envoltório de vidro. Ao se aproximar um imã ou solenóide as duas lâminas se encostam, fechando os contatos externos.

Instalando-se um imã na periferia de uma roda, que gira poucos milímetros em frente ao interruptor de lâminas, este fechará os contatos a cada volta.

Se este for ligado a uma tensão contínua, gerará pulsações numa frequência proporcional à rotação da roda.

Além de seu uso como sensor de velocidade, é encontrado em alarmes, indicando porta ou janela fechada (um ímã é instalado nesta e o *reeds-witch* no batente), e em sensores de fim-de-curso, em máquinas industriais, gavetas de toca-discos CD e videocassete, etc.

- **Sensores de Posição** - Dally et al. (1993), em aplicações em que se necessita monitorar a posição de uma peça, como tornos automáticos industriais, ou contagem de produtos, ou verificar a posição de um braço de um robô ou o alinhamento de uma antena parabólica com outra ou um satélite, usaram sensores de posição.

Os sensores se dividem em posição linear ou angular. Também se dividem entre sensores de passagem, que indicam que foi atingida uma posição no movimento, os detectores de fim-de-curso e contadores, e sensores de posição que indicam a posição atual de uma peça, usados em medição e posicionamento.

Os chamados sensores de fim de curso são interruptores que são acionados pela própria peça monitorada. Há diversos tipos e tamanhos, conforme a aplicação.

Como exemplo, existem as gavetas de toca-discos laser e videocassetes onde há chaves fim-de-curso que indicam que a gaveta está fechada, ou há fita. Estas informações são necessárias ao microprocessador, para o acionamento dos motores (e do LED laser).

Também se usam com motores, na limitação do movimento, como no caso de um *plotter* ou impressora, ou abertura / fechamento de um registro.

O sensor com interruptor de lâminas funciona como o anterior, mas usando um interruptor acionado pelo ímã.

Os dois últimos também se usam como sensores de posição angular. Uma aplicação interessante é o motor de corrente contínua sem escovas ("*brush-less*"), onde a comutação é eletrônica, feita quando o rotor, com ímãs, passa por um sensor Hall, que envia um sinal ao controlador, invertendo os pólos do motor. É usado em videocassetes, *CD Player's* e unidades de disco de computadores, pela grande precisão e facilidade de controle da velocidade.

Outro importante tipo de sensores de posição são os sensores ópticos. Há duas formas básicas de usar estes: por reflexão, onde detectam a posição pela luz que retorna a um foto-sensor (fotodiodo ou foto-transistor), emitida por um LED ou lâmpada e refletida pela peça, e. por interrupção, no qual a luz emitida é captada por um foto-sensor alinhado, que percebe a presença da peça quando esta intercepta o feixe.

Este sensor é usado para contagem de peças, numa linha de produção, além das aplicações como fim-de-curso.

- **Sensor Piezo-elétrico** – Dally et al. (1993) apresentam estudo sobre material piezo-elétrico, que produz uma carga elétrica quando é submetido a uma força ou pressão. O material piezo-elétrico, como um cristal simples de quartzo, contém moléculas com distribuição de cargas assimétricas, quando a pressão ou força é aplicada, o cristal deforma e ocorre uma liberação de cargas positivas e negativas internas ao cristal. Essa liberação interna de cargas produz cargas de sinais opostos externamente nas superfícies do cristal, que são recobertos por uma camada metálica (Eletrodos), conforme pode ser observado na figura 3-13.

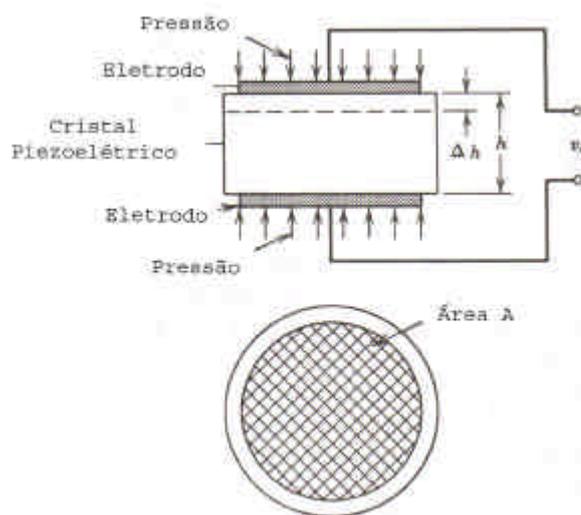


Figura 3-13 – Esquema de uma material piezo-elétrico (DALLY et al, 1993).

Quando cristais piezos-elétricos são utilizados como elementos sensores em transdutores, a impedância de saída é muito alta, mas é uma variável. A impedância de saída de um pequeno cilindro de quartzo depende da frequência ?

associada com a pressão aplicada. Considerando que o sensor atue como um capacitor, a impedância de saída é dada pela seguinte equação (DALLY et al. 1993):

$$Z_c = \frac{1}{j\omega C} = -\frac{j}{\omega C} \quad (11)$$

Onde C é a capacitância em Farads e j é a raiz quadrada de -1.

Um diagrama de um sensor piezo-elétrico típico é mostrado na figura 3-14.

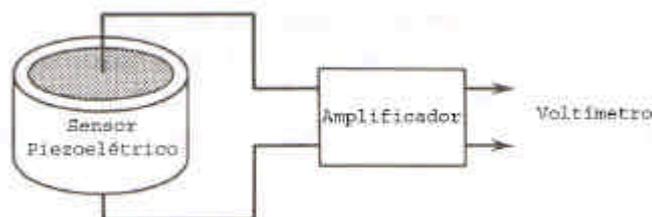


Figura 3-14 – Diagrama de um sensor piezo-elétrico típico (DALLY et al, 1993).

Utilizados, por exemplo, para medir emissão acústica, força e aceleração. Possuem uma pastilha de cerâmica piezelétrica montada em uma cápsula metálica, sendo que alguns sensores deste tipo possuem blindagem como proteção.

Os sensores piezelétricos se baseiam na propriedade de certos cristais que, quando excitados, geram um sinal de tensão elétrica. São largamente empregados no monitoramento de processos de retificação para medição de emissão acústica.

- **Encoders** - São sensores que atuam por transmissão de luz. Além dos já vistos, os *encoders* (codificadores) determinam a posição através de um disco ou trilho marcado. Em processos de retificação são muito utilizados para medir a velocidade do rebolo. Estes dispositivos dividem-se em: relativos, nos quais a posição é demarcada por contagem de pulsos transmitidos, acumulados ao longo do tempo; e absolutos, onde há um código digital gravado no disco ou trilho, lido por um conjunto de sensores ópticos (fonte de luz e sensor). Os códigos adotados são os de Gray, nos quais de um número para o seguinte só muda um bit, o que facilita a identificação e correção de erros.

A demarcação do disco ou trilho é feita através de furo ou ranhuras, ou por pintura num disco plástico transparente, que podem ser feitos por técnicas fotolitográficas, permitindo grande precisão e dimensões micrométricas.

A fonte de luz é geralmente o LED, e o sensor um fotodiodo ou foto-transistor. Estes sensores são muito precisos e práticos em sistemas digitais (*encoder* absoluto), e usam-se em robôs, máquinas-ferramenta, CNC e outros.

- **Sensores de Corrente de Efeito Hall** - Em 1879, E. H. Hall descobriu o desenvolvimento de uma diferença de potencial entre os lados de um condutor através do qual passava uma corrente quando um campo magnético era aplicado. Este fenômeno foi chamado de Efeito Hall em mérito ao descobridor. Uma das aplicações práticas deste fenômeno é o sensor de corrente que fornece uma tensão de saída proporcional à corrente que circula através do condutor, sendo que este passa através de um núcleo magnético semelhante neste aspecto aos transformadores de corrente. Este sensor é utilizado na retificação para medir potência de corte.

3.7.3 Aquisição de Dados e Processamento de Sinais

Alguns autores (PANSANATO et al. 2003; PANSANATO et al. 2002; AGUIAR et al. 1999; WANG 1999; AGUIAR 1997; BERKOVITS & FANG, 1995; BIFANO & YI, 1992) utilizaram-se de técnicas de aquisição de dados e processamento de sinais no monitoramento do processo de retificação. Utilizando-se técnicas de processamento de sinais, Aguiar et al. (1999, 2002) descobriram duas relações matemáticas e estatísticas que relacionam o sinal RMS (*root mean square*) de EA e o sinal de potência de retificação com o fenômeno da queima de peças durante a usinagem.

O sistema de aquisição de dados de um processo se baseia na coleta e condicionamento de sinais provenientes dos sensores. A implementação de sistemas de aquisição de dados é feita utilizando microcomputadores e placas de aquisição de dados. No processo de retificação, os sinais provenientes dos sensores geralmente são analógicos. Para que se torne possível a manipulação e interpretação destes dados, é necessário que sejam convertidos na forma digital. Para fazer a conversão analógico/digital utiliza-se placas de conversão A/D. A placa trabalha com sinais de tensão e isto ocorre da seguinte

forma: um sinal de tensão aplicado numa das entradas da placa de aquisição é transformado em um número pela placa de conversão de acordo com a escala unipolar ou bipolar (AGUIAR, 1997).

Segundo Johnson (1997), o processo de selecionar um canal da placa e iniciar a entrada de dados, necessita de uma interface entre o sistema de aquisição e o microcomputador. Esta interface é facilitada por um software criado pelo usuário com a definição da frequência de amostragem, número de pontos a serem adquiridos e arquivos onde serão armazenados os dados. Um dos *softwares* mais utilizados atualmente para aquisição de dados é o Labview. Ele permite a comunicação, manipulação e armazenamento dos dados coletados por rotinas compactas, relativamente fáceis.

Além de serem coletados e convertidos em sinais digitais, os dados provenientes dos sensores devem ser condicionados ou tratados de forma que se obtenha um sinal tão fiel quanto possível, ou seja, sem ruídos indesejáveis causados por outros elementos do sistema, e também num nível de tensão elétrica compatível com os instrumentos de aquisição de dados (AGUIAR, 1997).

Existem muitas ferramentas e formas de condicionamento e processamento de sinais, sendo que algumas das principais são descritas a seguir.

- **Amplificação** – Promove um ganho do sinal através de amplificadores operacionais e transistores para que este fique compatível com o sistema de aquisição de dados.
- **Filtragem** – Para eliminar ruídos provenientes da medição, é necessário a utilização de circuitos que bloqueiam certas frequências ou bandas de frequência. Estes circuitos são denominados filtros e são constituídos basicamente por resistores e capacitores (JOHNSON, 1997). A filtragem procura extrair a característica física do sinal mais relacionada com o fenômeno.
- **Retificação** – Consiste em transformar o sinal alternado em um sinal contínuo ou pulsante, geralmente utilizando diodos retificadores para esse tratamento.
- **Valor RMS** – É a média quadrática de uma banda de frequência selecionada do sinal. Este tratamento de sinal é muito utilizado em sinais de emissão acústica. E_{RMS} para

qualquer instante de tempo (t) pode ser calculado pela expressão (WEBSTER et al., 1996).

$$EA_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t EA_{raw}^2(l) dl} \approx \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} EA_{raw}^2(t - i\Delta \mathbf{I}_i)}, \quad (12)$$

Onde T é o tempo de integração, N é o número de dados discretos dentro do limite de tempo T e EA_{raw}, o sinal puro de emissão acústica.

- **Transformação Discreta de Fourier** – Também denominada de DFT (Discrete Fourier Transform) é uma das ferramentas mais comuns e poderosas no campo de processamento digital de sinais. A DFT possibilita a análise, manipulação e síntese de sinais de uma maneira que não é possível com processamento de sinais contínuos. Esta ferramenta é um procedimento matemático utilizado na determinação de harmônicas ou conteúdo de frequência de uma seqüência discreta de um sinal. A origem da DFT está na transformada contínua de Fourier X(f) definida por:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (13a)$$

Onde x(t) é um sinal qualquer no domínio do tempo.

No campo de processamento de sinais contínuos, a equação (13a) é usada para transformar uma expressão no domínio do tempo x(t) em uma função no domínio da frequência X(f). A avaliação de X(f) possibilita a determinação do conteúdo de frequência de qualquer sinal de interesse e abre um campo grande de análise de sinais e possibilidades de processamento nos campos da engenharia e física. Em geral, a transformada de Fourier é referenciada como um mecanismo matemático mais dominante e mais empregada para análise de sistemas físicos.

Com o advento dos computadores digitais, as primeiras pesquisas em processamento digital de sinais levaram ao desenvolvimento da DFT definida como a seqüência no domínio da frequência discreta X(m) definida por:

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi mn/N} \quad (13b)$$

onde e é a base do logaritmo natural, $j = \sqrt{-1}$, n é o índice das amostras de entrada no domínio do tempo, $n=0,1,2,3,\dots,N-1$, N é o número de amostras da seqüência de entrada e o número de pontos de freqüência na saída da DFT, e m é o índice da saída da DFT no domínio da freqüência, $m=0,1,2,\dots,N-1$ (LYONS, 1997).

- **Transformada Rápida de Fourier (FFT)** – Embora a DFT é um procedimento matemático mais direto para a determinação do conteúdo harmônico de uma seqüência no domínio do tempo, ele é muito ineficiente. Conforme o número de pontos da DFT aumenta para centenas ou milhares, o número de operações necessárias se torna extremamente excessivo. Em 1965, foi publicado um artigo por Cooley e Turkey, o qual descrevia um algoritmo muito eficiente para implementar a DFT. Aquele algoritmo é agora conhecido como FFT (Fast Fourier Transform). Antes do advento da FFT, centenas de pontos da DFT levavam tanto tempo para serem processados que o seu emprego era restrito apenas a grandes centros de pesquisa e universidades (LYON, 1997). Publicaram-se numerosos artigos com melhorias, modificações e realizações do assim chamados algoritmos de transformada rápida de Fourier (FFT) (YANG & CHEN, 2002).
- **Média e Desvio Padrão** – Empregados para a determinação do valor médio e a dispersão do sinal, respectivamente. Deseja-se descrever muitas vezes a amplitude da distribuição, a simetria e a sua forma. Todas essas características são resumidas pelos momentos da distribuição, ou derivadas.

O desvio padrão (este termo foi originalmente usado por Pearson, 1894) é comumente usado na medida da variação. O desvio padrão de uma população de valores é definido como:

$$s = \left(\frac{(x_i - m)^2}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

Onde:

μ é a média da população

N é o tamanho da população.

A amostra estimada do desvio padrão da população é calculada como:

$$S = \left[\frac{\sum (x_i - \mathbf{m})^2}{n-1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

Onde:

μ é a média da amostra

n é o tamanho da amostra.

- **Skewness** – O termo Skewness foi primeiramente utilizado por Pearson, 1895. Ele mede o desvio da distribuição da simetria. Se o Skewness é claramente diferente de 0 (zero), então a distribuição é assimétrica, enquanto a distribuição normal é perfeitamente simétrica. O skewness é calculado por:

$$S = \frac{\sum (X - \mathbf{m}_X)^3}{N \mathbf{s}_X^3} \quad (16)$$

- **Zero-crossing rate (ZCR)** – Este método conta o número de vezes de passagens por zero que ocorrem em bloco de dados observado. Para um sinal monocromático, duas vezes o tempo entre passagens por zero é o recíproco da frequência; para os sinais complicados como EA, isto não é claro (WANG et al, 2001).
- **Ratio of power (ROP)** – é instintivamente para examinar o comportamento do espectro de potência de EA, com a idéia de que a frequência se comporta “bem” ou “mal” para diferentes retificações (WANG et al, 2001). Para cada bloco de dados, o ROP pode ser calculado do espectro de potência normalizado, como:

$$ROP = \frac{\sum_{k=n_1}^{n_2} |X_k|^2}{\sum_{k=0}^{N-1} |X_k|^2} \quad (17)$$

Onde o denominador elimina o efeito da potência local.

- **CFAR da lei da potência** – Aplicado para a detecção de eventos transientes, um detector que atrai muita atenção e interesse é a estatística da lei de potência de Nuttall.

$$T_{pl}(X) = \sum_{k=0}^{M-1} X_k^v \quad (18)$$

Onde o X_k é o k -ésimo blocos de magnitudes de FFT elevado ao quadrado, v é um expoente variável e $2M$ é o número total de cestos de FFT (devido ao conjunto simétrico, somente metade do bloco de magnitude de FFT ao quadrado necessita ser investigado). Respectivamente $v = 1$ e $v = 8$ corresponde ao detector de energia e $\max\{X_k\}$; $2 < v < 3$ proporciona boa performance nas séries amplas (WANG et al, 2001). Embora seja efetiva em alguns modelos e de fácil implementação, esta estatística confia em dados pré-normalizados. Devido a flutuações do sinal EA durante o processo de retificação, uma constante de taxa de alarme (CFAR – Constant False Alarm-Rate) da estatística da lei da potência é usada.

$$T_{cpl}(X) = \frac{\sum_{k=0}^{M-1} X_k^v}{\left(\sum_{k=0}^{M-1} X_k\right)^{v'}} \quad (19)$$

Onde T_{cpl} é claramente não afetado pela amplitude do sinal.

- **MVD** – processado no domínio da frequência, a estatística CFAR do desvio do valor médio (MVD) é definido como:

$$T_{mvd}(X) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \log \left[\frac{\bar{X}}{X_k} \right] \quad (20)$$

Onde \bar{X} é o valor médio de $\{X_k\}$; M e X_k têm o mesmo significado no CFAR da lei da potência. A estatística de MVD tem provado ser efetivo na detecção de transientes em algumas aplicações. O MVD parece ser útil para a detecção de queima no processo de retificação (WANG et al, 2001).

- **Kurtosis** – O quarto momento da média está relacionado com a forma da área da distribuição, que pode ser alongada ou achatada em relação a uma distribuição normal. Pode ser utilizado como indicador de variações no sinal de emissão acústica. O kurtosis (o termo usado primeiramente por Pearson, por 1905) mede a "indisposição" de uma distribuição. Se o kurtosis for claramente diferente de 0 (zero), então a distribuição é achatada ou mais pronunciada que o normal; o kurtosis da distribuição normal é 0. O kurtosis é computado como:

$$K = \frac{\sum (X - m_x)^4}{N S_x^4} - 3 \quad (21)$$

- **Estatística de Nuttall** – Segundo Aguiar et al. (1999), uma ferramenta de processamento de sinais que vem sendo muito estudada é a chamada Estatística da Lei da Potência de Nuttall. A forma desta estatística é a seguinte:

$$T(x) = \frac{\sum_k |X_k|^5}{\left[\sum_k |X_k|^2 \right]^{2.5}} \quad (22)$$

Onde cada elemento X_k representa o k -ésimo elemento da Transformada Rápida de Fourier.

Essencialmente, a Estatística da Lei de Potência mede o momento do domínio de frequências. De fato, se os expoentes forem 4 e 2, e não 5 e 2,5, observa-se que a estatística se torna uma Kurtosis. A Estatística de Nuttall é derivada da Kurtosis e pode realçar eventos transientes (de qualquer natureza) presentes no bloco de dados a serem processados. Na retificação, fenômenos físicos como *film-boiling*, quebra, e afiação natural dos grãos (mecanismo de desgaste natural), podem ser considerados eventos transientes de “explosão” de energia.

- **Correlação** – é uma média móvel intensificada dada pela equação (23)

$$r[n] = \sum x[k]y[n+k] \quad (23)$$

Um sinal fornece a função intensificada. A figura 3-17 mostra como um único ponto da função é calculado:

- Primeiramente um sinal é deslocado em relação ao outro
 - A quantidade do deslocamento é a posição do ponto da função de correlação a ser calculado
 - Cada elemento de um sinal é multiplicado pelo elemento correspondente do outro sinal
- A área sob a curva resultante é integrada.

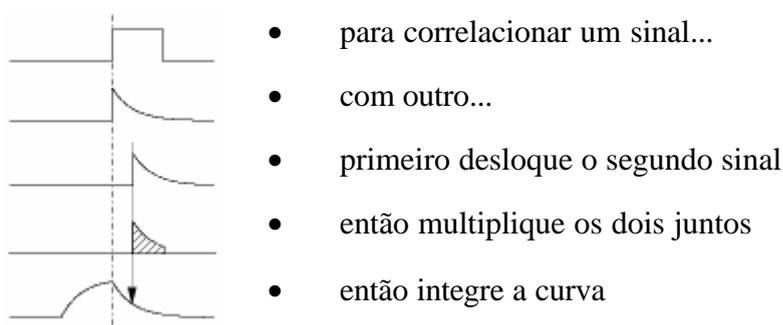


Figura 3-15 - Cálculo da correlação.

A correlação requer muitos cálculos. Se um sinal for de comprimento M e o outro for de comprimento N , a seguir serão necessárias $(N * M)$ multiplicações, para calcular a função de correlação inteira.

Após a aquisição de dados e do processamento dos sinais, devem-se determinar métodos de diagnósticos para o monitoramento do processo. Deve-se determinar uma condição de comportamento normal para o sinal e observar quando este comportamento se desvia do normal indicando então um problema. A partir daí, um modelo é determinado entre a saída do sensor e a mecânica do processo utilizando as informações coletadas, para detectar algum problema e até mesmo prever o comportamento do processo.

Dois métodos promissores de monitoramento de processos industriais são Redes Neurais (WANG et al., 2001) e Lógica Fuzzy (INASAKI, 1999). Estes métodos utilizam multisensores para obter um modelo do comportamento do processo e analisam a relação entre as entrada e as saídas deste processo podendo, por exemplo, prever fenômenos ocorridos na retificação como queima superficial, quebra, trincas e tensões residuais.

Os sinais EA são altamente não-reproduzíveis no domínio no tempo e da frequência. No processamento do sinal de EA, o problema comum está em identificar características discriminatórias do interesse em usar métodos avançado e relacionar as características às fontes de emissão acústica (WANG, 1999).

3.7.4 Emissão Acústica

A dificuldade fundamental na completa automatização do processo de retificação é a falta de um método confiável em fornecer informação em tempo real durante o processo.

A sensibilidade da emissão acústica em processos abrasivos e as interações de atrito inerentes são conhecidas há algum tempo (DORNFELD, 1999). Webster et al. (1996), tem mostrado que a medida do sinal de emissão acústica é significativamente mais sensível às variações das condições de retificação do que medidas de força e potência e, portanto fornece uma técnica mais promissora para o monitoramento 'on-line' do processo. A emissão acústica (EA) pode ser definida como sendo ondas de tensão elástica gerada como um resultado da liberação rápida de energia de deformação dentro de um material submetido a um estímulo externo, devido ao rearranjo de sua estrutura. Estas ondas de tensão produzem deslocamentos na superfície do material o que pode ser detectado por um sensor piezolétrico que transforma estes deslocamentos em sinais elétricos (DINIZ et al,1991).

Sua faixa de frequência gira em torno de 50 kHz a 1000kHz, que está acima da faixa de muitos ruídos vindo de fontes exteriores ao próprio processo de retificação. Sendo assim, é um método sensível e adequado para monitorar o processo de retificação (FELIPE et al, 1998).

Para Diniz et al. (1991), o monitoramento de processos de usinagem utilizando emissão acústica apresenta algumas vantagens em relação a outros métodos, dentre elas:

- O sensor é simples, barato e pequeno (pouco intrusivo);
- As fontes de emissão acústica estão diretamente relacionadas com o processo de corte;
- Não sofre influência de ruídos e vibrações mecânicas por captar um sinal em alta frequência (50 kHz a 1MHz).

A confiabilidade do sistema de diagnóstico baseado em EA depende da habilidade do projetista em considerar todas as fontes potenciais do processo (DORNFELD, 1999). As origens da emissão acústica no processo são decorrentes principalmente da fratura do grão e do ligante, fissura do grão e fricção entre o grão abrasivo e a peça-obra, todos diretamente ligados ao processo de formação de cavaco e desgaste do rebolo. Com o sinal de emissão acústica é possível determinar o fim do *spark-out*, que é muito importante para diminuir o ciclo de retificação.

As primeiras aplicações pretendiam detectar o centelhamento e contato na retificação. As aplicações em monitoração de processos de retificação, como a caracterização dimensional do rebolo e o desenvolvimento de sistemas de retificação inteligentes baseados em sensores, foram propostas e vêm sendo avaliadas na prática. A sensibilidade fundamental da emissão acústica à ação abrasiva encorajou estudos adicionais (DORNFELD, 1999).

Emissão Acústica tem sido usada como um método de teste não destrutivo para avaliação da integridade estrutural de materiais desde o fim da década de 1960, mas o sinal de EA no processo de monitoramento de retificação é uma tecnologia relativamente nova (BLUM & DORNFELD 1990, DORNFELD 1986, INASAKI & OKAMURA 1985, KOENIG E MEYEN 1990, KOENIG E KLUMPEN 1993, TONSHOFF 1988). Artigos técnicos da Alemanha, Japão e EUA têm mostrado pesquisas que tentam relacionar sinais de emissão acústica a aspectos mais complicados do processo de retificação, incluindo a detecção de quebra, queima e trincas (BLUM & DORNFELD 1990, KOENIG & KLUMPEN 1993), e a transição do modo dúctil/frágil (BIFANO & YI 1992). Estudos tem sido realizados também no monitoramento do desgaste da ferramenta (WASCHKIES 1994) e na detecção de trincas devido à fadiga (BERKOVITS & FANG 1995).

É possível fazer um diagnóstico do processo pelo monitoramento e detecção de falhas ocorridas durante a retificação “*center-less*” a partir dos diferentes padrões gráficos gerados pelos sinais de emissão acústica. Existe uma correlação gráfica entre os padrões gráficos e as falhas provocadas na retificadora (VIEIRA E OLIVEIRA, 2001).

O parâmetro predominantemente estudado em pesquisas prévias usando emissão acústica tem sido o valor médio quadrático (RMS) do sinal de emissão acústica filtrado (EARms) sobre uma banda de frequência cuidadosamente selecionada. Este sinal tem sido um parâmetro razoável de estudo, pois o processo de retificação é muito rico em ondas sonoras, contendo, portanto muita informação acústica disponível, sendo por isso utilizado como foco de pesquisas anteriores e atuais, e também por limitações tecnológicas.

Aguiar (1997) tem demonstrado que o sinal RMS de emissão acústica e o sinal de potência de corte combinados podem fornecer parâmetros expressivos para a indicação da queima da peça na retificação plana. Usando um sensor fixo de emissão acústica acoplado próximo da peça obra e um sensor de potência elétrica do motor de acionamento do rebolo para as medidas da força de corte, da combinação entre os sinais, obteve um parâmetro indicativo para a queima da peça, denominado DPO, o qual consistia da relação entre o

desvio padrão do sinal RMS de emissão acústica e a potência média de corte por passada do rebolo. Embora para a maioria dos ensaios realizados, o parâmetro denominado DPO tenha se mostrado um indicador da queima, para alguns casos não se comportou da mesma maneira para outros.

Várias pesquisas têm sido publicadas mostrando aplicações da emissão acústica também no monitoramento da dressagem. Para os dressadores de diamante de ponta única, a agressividade do rebolo K é proporcional ao aumento da profundidade de dressagem (a_d) e ao grau de recobrimento (U_d). Este mesmo comportamento é verificado com relação ao nível do sinal EA_{RMS} durante a dressagem. Além disso, foi encontrada uma proporcionalidade direta entre a agressividade K do rebolo e o nível do sinal EA_{RMS} . A área de atuação do dressador, também se mostrou diretamente proporcional ao nível de EA_{RMS} (MARINELLI et al., 1998).

O sinal bruto de emissão acústica também tem sido explorado recentemente no monitoramento do processo de retificação. PANSANATO et al. (2002), WANG et al. (2001), AGUIAR et al. (1999), JEMIELNIAK (1997), WEBSTER et al. (1995), mostraram que a utilização de ferramentas de processamento de sinais e redes neurais são eficientes no monitoramento da retificação.

4 MATERIAL E MÉTODO

Foram definidos os rebolos, dressadores, os métodos que foram utilizados nos ensaios de dressagem, as formas de avaliação da agressividade obtida, e as técnicas de emissão acústica.

Os parâmetros de dressagem foram estabelecidos de acordo com os recursos disponíveis nos laboratórios da Faculdade de Engenharia da UNESP – Campus de Bauru, satisfazendo os objetivos propostos neste trabalho. As etapas descritas a seguir foram seguidas para a correta experimentação.

- Escolha do tipo de retificadora (tangencial plana ou cilíndrica) onde o controle da operação de dressagem com o melhor posicionamento do sensor de emissão acústica.
- Escolha do rebole, do tipo de dressador e dos parâmetros de dressagem.
- Desenvolvimento de um software para aquisição de dados.
- Desenvolvimento de um método eficaz de medição da agressividade obtida.
- Montagem do banco de ensaios.
- Realização de ensaios preliminares para verificação do funcionamento do software de aquisição.

4.1 Retificadora

As operações de retificação foram subdivididas da seguinte maneira: retificações cilíndricas, planas e de forma. O Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) da Faculdade de Engenharia da UNESP de Bauru dispõe de uma retificadora tangencial plana. Esta é equipada com uma mesa magnética que permite o bom posicionamento do dressador e do sensor de emissão acústica. Um inversor de frequência permite o controle da velocidade rotacional do rebole e outro inversor controla a velocidade do movimento transversal do rebole, permitindo obter diversas condições de dressagem, para a realização deste trabalho.

Todo o procedimento se deu a seco, para facilitar os ensaios no monitoramento.

4.2 Rebolo, dressador e parâmetros de dressagem

O rebolo escolhido para ser utilizado nos experimentos desta pesquisa foi do tipo convencional de óxido de alumínio, do fabricante Norton, AA46M6V. Apesar do desenvolvimento do CBN e de outros superabrasivos, os rebolos convencionais ainda são largamente empregados na indústria mecânica. A operação de dressagem é determinante quando se utiliza este tipo de rebolo devido ao desgaste mais rápido dos grãos abrasivos e da deterioração da forma do rebolo.

O dressador utilizado foi de ponta única de diamante. Este tipo de dressador foi escolhido por apresentar uma única área frontal de dressagem, o que facilitará o estudo do sinal de emissão acústica gerado dos impactos dos grãos abrasivos do rebolo com a ponta do dressador durante a dressagem.

Foram realizados duas condições distintas de ensaios. O primeiro foi mantido o grau de recobrimento (U_d) variou-se a profundidade de dressagem (a_d). Na segunda, a profundidade de dressagem foi constante, variando-se o grau de recobrimento (U_d).

Nos ensaios em que variou-se a profundidade de dressagem, mediu-se o valor de (b_d) para cada ensaio. Com o valor de U_d fixo e igual a 1, ajustou-se a velocidade de dressagem. As profundidades de dressagem (a_d) foram 20, 30 e 40 μm .

Os ensaios em que foi mantida a profundidade (a_d) e variado U_d foram mais simples. Variando somente a velocidade de dressagem, foram utilizados U_d igual a 1, 1,5 e 2.

4.3 Aquisição do sinal de Emissão Acústica

A emissão acústica gerada na operação de dressagem foi medida por intermédio de um sensor do tipo piezo-elétrico do fabricante Sensis acoplado ao suporte do dressador, que foi isolado do restante da máquina por uma placa de Nylon localizada entre o suporte do dressador e a placa de aço fixada a mesa da máquina, para garantir uma aquisição de sinais livre de ruídos indesejáveis. Para evitar a saturação do sinal foi alojada uma arruela de borracha entre o sensor e o suporte. Sendo assim, o parafuso de fixação do sensor é o único caminho para as ondas acústicas. A figura 4-1 mostra o suporte do dressador com a descrição dos componentes e a figura 4-2 mostra uma foto do sensor de emissão acústica.

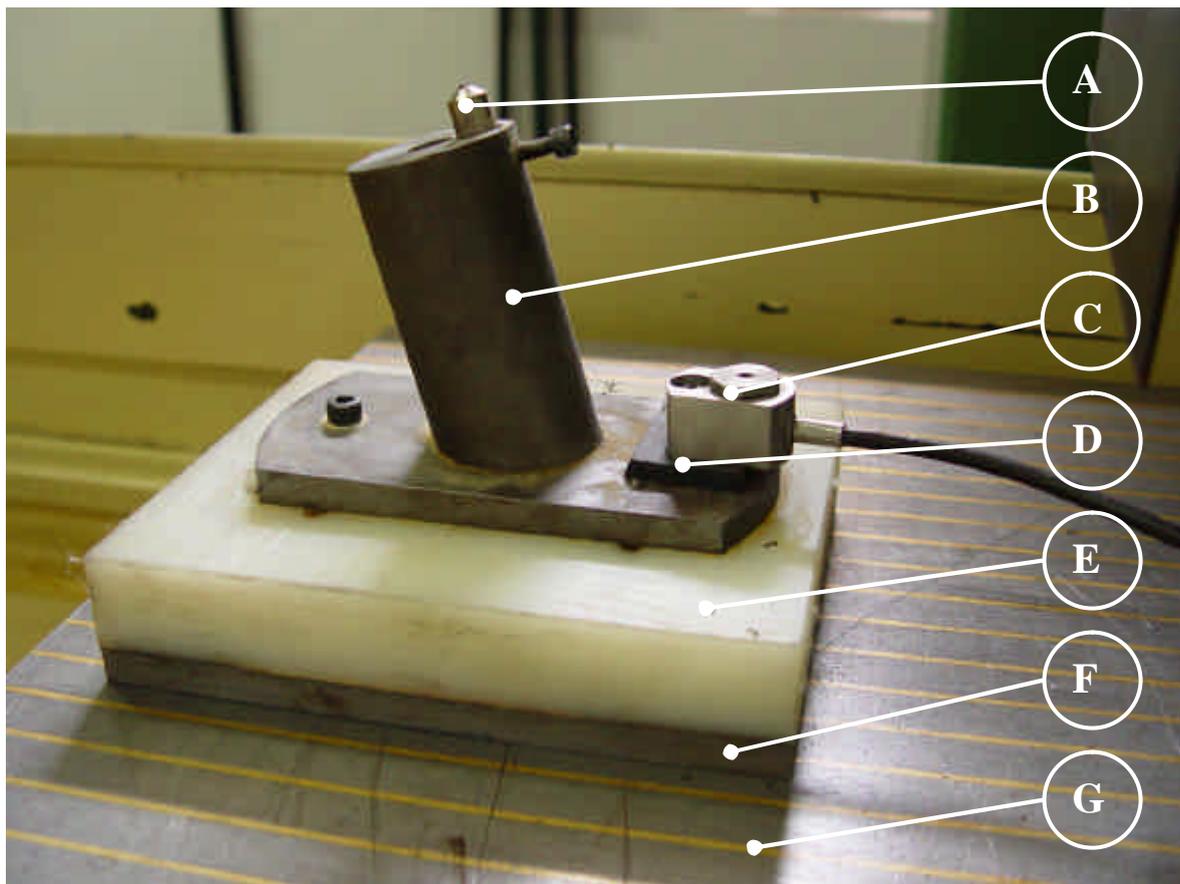


Figura 4-1 - Suporte do dressador utilizado nos ensaios

A – Dressador

B – Suporte do dressador

C – Sensor de Emissão Acústica

D – Borracha para atenuar o sinal EA

E – Placa de Nylon

F – Placa de aço

G – Mesa magnética



Figura 4-2 - Sensor de emissão acústica em detalhe

A figura 4-3 mostra o sistema de aquisição de dados e a figura 4-4, o módulo de processamento do sinal de emissão acústica utilizado nos ensaios.



Figura 4-3 - Sistema de aquisição de dados.



Figura 4-4 - Módulo do sensor de emissão acústica.

Os dados advindos dos sensores de emissão acústica sofrem uma conversão do modo analógico para o modo digital. Foi utilizado uma placa de conversão de dados de 12 bits do fabricante National Instruments, cuja especificação é PCI-6111E com frequência máxima de amostragem de 5 milhões de amostras por segundo, a qual foi instalada num microcomputador do tipo PC Pentium III, 700 MHz, HD SCSI de 20 GB. Além da instalação física, a placa deve ser iniciada via software para armazenamento dos dados em arquivos do tipo binário. O software de interface entre placa e computador é descrito a seguir.

4.4 Descrição do *Software* Desenvolvido para Aquisição de Dados

A aquisição de sinais durante a operação de dressagem deve seguir alguns passos necessários para o programa funcionar sem erros e consiga captar os dados de interesse. O fluxograma representando o procedimento utilizado para a aquisição de dados durante os ensaios é mostrado a seguir na figura 4-5.

Foi desenvolvido um programa de aquisição de dados para altas taxas de amostragem. O programa utilizado para desenvolvimento do software de aquisição de dados foi o LABVIEW 6. A vantagem deste programa é que ele não utiliza uma linguagem escrita para programação, mas sim uma linguagem gráfica denominada G. Este tipo de linguagem facilita a implementação das rotinas.

Os softwares criados neste programa são chamados de “*Virtual Instruments*” (V.I.s), pois a interface se assemelha a instrumentos de medidas.

A programação se divide em duas partes no Labview. A primeira consiste em construir o chamado “*Front Panel*”, ou seja, a interface gráfica entre microcomputador e usuário; a segunda parte consiste em implementar a rotina propriamente dita no chamado “*Block Diagram*”. Nesta etapa são selecionadas e organizadas as estruturas e funções necessárias para o funcionamento correto do programa. Não deve haver nenhuma dúvida sobre o comportamento do programa, pois isto pode ocasionar aquisição de dados inválidos para a análise final do fenômeno da queima. Para que isto não ocorra, devem ser realizados vários testes para verificação do funcionamento do *software*.

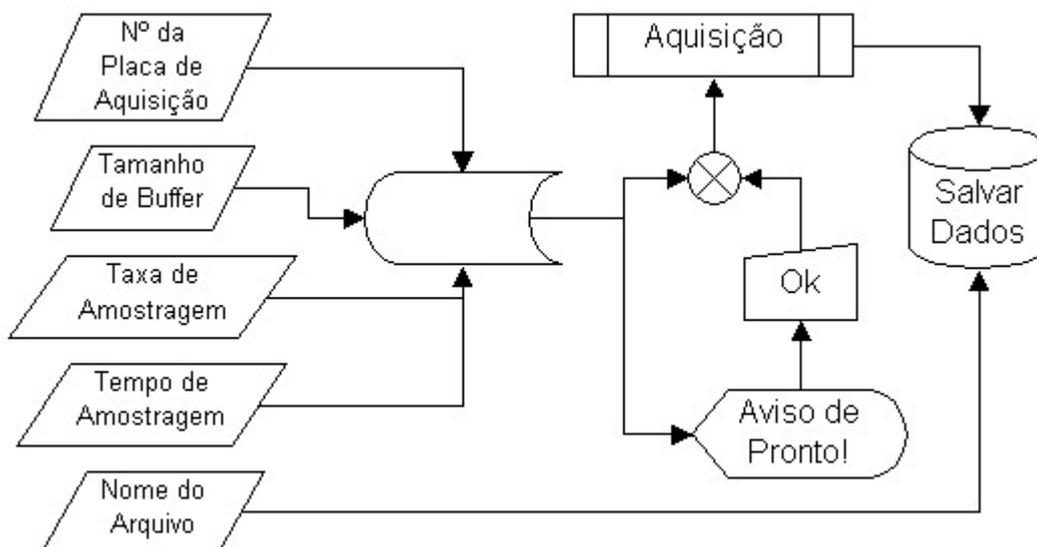


Figura 4-5 - Fluxograma representando a lógica para a aquisição de dados.

Este programa comanda a placa A/D (analogico / digital) durante a aquisição, salvando os dados do canal de entrada de emissão acústica em arquivo do tipo binário I16 (inteiro de 16 bits).

Foram realizados testes a uma taxa de amostragem de 2,5 MHz com aquisições de 16 segundos de duração. O tempo de amostragem foi limitado pela capacidade de memória do microcomputador (380 Mb).

Devido à rapidez exigida, todos os dados são armazenados na memória durante a aquisição e só após são gravados em disco. Nenhum dado pode ser mostrado na tela durante a aquisição devido à alta frequência de amostragem. O programa de aquisição deve estar em primeiro plano durante o tempo de aquisição para evitar erros causados pelo sistema Windows durante a troca de tela.

Observou-se uma melhora significativa da performance do programa com o gerenciamento da memória. Este pôde ser feito com um pequeno programa chamado RamBooster v1.6 que é distribuído gratuitamente pela Internet e pode ser visto na figura 4-6. A visualização dos dados, após serem gravados no disco, pode ser feita através do software MatLab utilizando rotinas especiais para arquivos em formato binário. O formato binário I16 foi escolhido por ocupar pouco espaço em disco, pela quantidade de dados adquirida em cada ensaio.

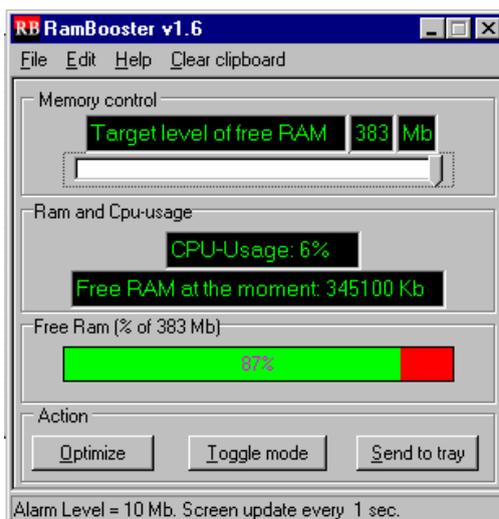


Figura 4-6 - Interface do programa RamBooster.

No próprio painel do programa é possível informar qual a taxa de aquisição, o tempo em segundos, a placa, o canal que se deseja obter o sinal e em qual arquivo devem ser salvos os dados. Após as configurações iniciais, o programa envia um aviso ao usuário de que está pronto para fazer a aquisição e fica aguardando que o botão “Início” seja pressionado. A interface gráfica do programa desenvolvido para este trabalho é mostrada na figura 4-7.

O painel frontal da “VT” é só uma interface micro/usuário, as rotinas devem ser implementadas no “Diagram”.



Figura 4-7 - Interface gráfica do programa de aquisição de dados.

No “Diagrama” (figura 4-8), uma rotina do próprio Labview denominada, “AI Config”, faz toda a configuração inicial e envia um sinal para um “loop”, dentro de uma seqüência, para que o usuário saiba que o programa está pronto (um “led” acende no painel). Depois de pressionado o botão “Início”, no painel, o programa sai do “loop” e passa para a próxima seqüência, onde há outra rotina, a “AI Start”, que faz a aquisição do sinal e o guarda na memória. Uma outra rotina, a “AI Read”, lê os dados da memória. Os dados são então salvos em disco, no arquivo indicado no painel frontal pelas rotinas “Index Array” e “Write to I16 File”, respectivamente. As rotinas “Close File” e “AI Clear”, fecham o arquivo e limpam a região da memória usada, respectivamente. Se houver algum erro durante a execução do programa, uma mensagem é enviada ao usuário com as possíveis causas da falha pela rotina “General Error Handler”.

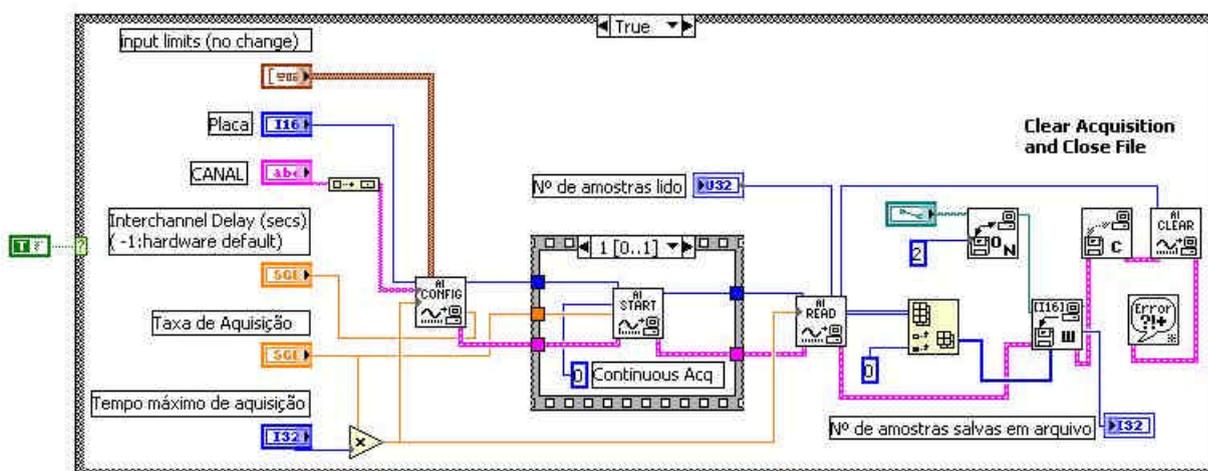


Figura 4-8 - Diagrama do Programa de Aquisição de Dados.

4.5 Montagem do Banco de Ensaio

Visando a aquisição de dados experimentais durante a operação de dressagem, para posterior análise do comportamento do sinal de emissão acústica, e para que um ensaio seja completo e obtenha sucesso, devem-se seguir as seguintes etapas: ajustes iniciais e correto posicionamento dos equipamentos, correção da forma do rebolado, determinação da velocidade de dressagem, operação de dressagem com os parâmetros previamente determinados e teste de agressividade. O banco de aquisição de dados é mostrado nas figura 4-9 e 4-10.



Figura 4-9 - Banco de Ensaio e Sistema de Aquisição de Dados.



Figura 4-10 – Banco de ensaios, dressador e balança de agressividade.

4.6 Operação de Dressagem

4.6.1 Medição da largura de atuação do dressador (b_d)

A determinação da largura de atuação do dressador (b_d) é importante pois, a partir deste parâmetro é calculado o valor do passo de dressagem de acordo com o grau de recobrimento (U_d) utilizado no ensaio e conseqüentemente, o valor da velocidade e tempo de dressagem.

Foram utilizadas diversas larguras de atuação e várias profundidades de dressagem, mediu-se o (b_d) para várias profundidades de dressagem para que fossem atendidas quaisquer condições de dressagens adotadas futuramente.

Em um projetor de perfil foi medida a largura do dressador em diversas profundidades de dressagem. Segundo a figura 4-11, deslocava-se, a partir da ponta, a profundidade teórica de atuação do dressador e , perpendicularmente, mede a largura do dressador (b_d) naquela posição.

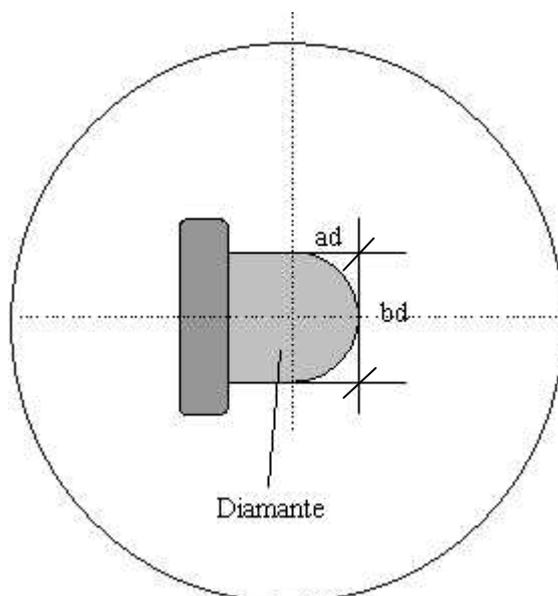


Figura 4-11 - Esquema da medição do b_d no projetor de perfil.

Mediu-se a largura do dressador para cada 5 μm de profundidade, obtendo-se os resultados mostrados na Tabela 3.

Tabela 3- Variação do bd em relação à profundidade de dressagem

ad (profundidade) [μm]	bd (largura) [μm]
5	68,6
10	87,0
15	103,6
20	116,1
25	130,4
30	144,2
35	153,2
40	164,2
45	178,0
50	190,0
55	200,0
60	210,0

4.6.2 Tempo de Dressagem

Na prática, o conceito de “grau de recobrimento” é inserido no processo de dressagem através do controle do tempo de dressagem. Isto é, o tempo que o dressador leva para percorrer toda a largura do rebolo. Através da equação 24, é possível se calcular o tempo de dressagem relativo ao grau de recobrimento e profundidade de dressagem (consequentemente a largura do dressador) escolhidos para cada caso.

$$t_d = \frac{L_R U_d 60}{n b_d} \quad (24)$$

onde: t_d é o tempo de dressagem em segundos

L_R é a largura do rebolo em milímetros

U_d é o grau de recobrimento de dressagem

n é a rotação do rebolo em rpm

b_d é largura de atuação do dressador em milímetros

4.6.3 Controle do tempo de dressagem

O tempo de dressagem pode ser facilmente calculado no próprio software de aquisição de emissão acústica com base nas taxas de amostragem aplicadas e observando a variação do nível do sinal coletado para se determinar o início e o fim da dressagem. Fez-se somente uma constatação do tempo. Para a realização dos ensaios propostos desta pesquisa o tempo de dressagem deve ser controlado e não apenas medido.

4.6.4 Medição do tempo

Utilizou-se do próprio banco de ensaios já montado para a medição do tempo de dressagem. Um sistema simplificado de aquisição de dados que coleta os sinais de emissão acústica RMS (disponível no mesmo módulo que fornece o sinal puro) durante uma pseudo-dressagem (ad, a profundidade muito pequena para reduzir o desgaste do rebolo). Em tempo real, o sinal é comparado com padrões de início e fim de dressagem. A diferença entre o início e o fim dessa falsa dressagem determina o tempo de contato do dressador com o rebolo.

Elaborou-se um programa em Labview para realizar esta tarefa. O “Panel” e o “Diagram” deste programa podem ser vistos na figura 4-12 e 4-13 respectivamente.

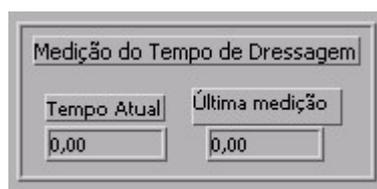


Figura 4-12 - Painel do programa para medir o tempo de dressagem.

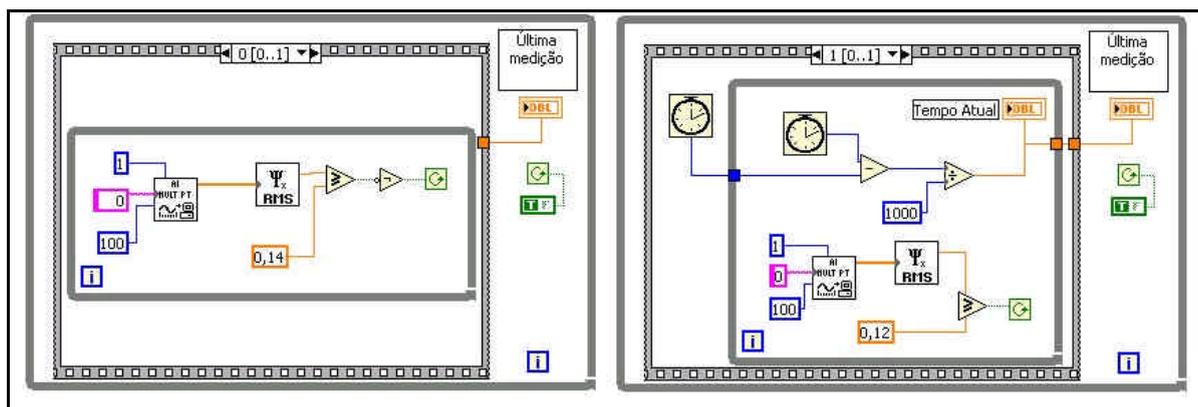


Figura 4-13 - Diagrama do programa para medir o tempo de dressagem.

4.6.5 Controlando o tempo de dressagem via inversor de frequência

O motor de indução trifásico que realiza o movimento transversal do rebolo da retificadora utilizada pode ser acionado por um inversor de frequência como os mostrados na figura 4-14. Neste caso, variando-se a frequência do inversor é possível variar a velocidade deste movimento.



Figura 4-14 - Inversores de Frequência utilizados.

Uma curva do tempo de dressagem versus a frequência do inversor foi levantada medindo-se o tempo com o programa descrito acima para diversas frequências como pode ser observado na figura 4-15.

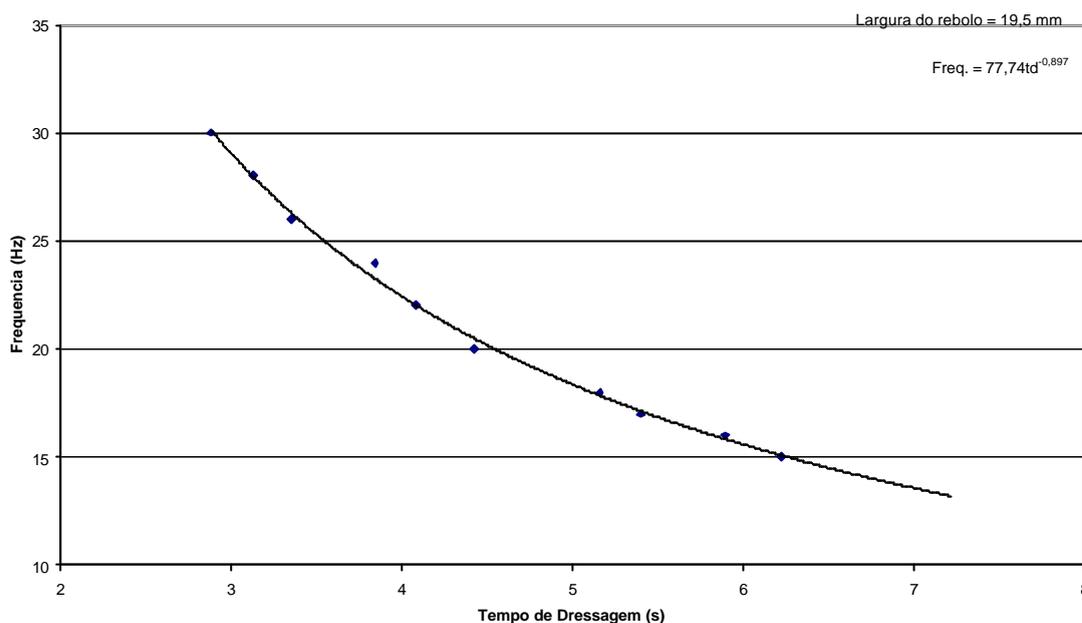


Figura 4-15 - Curva de calibração da frequência versus o tempo de dressagem para $L_R = 19,5$ mm.

Para a realização dos ensaios, basta calcular o tempo de dressagem de acordo com os parâmetros desejados e substituí-lo na equação 25 que retornará a frequência que deve ser fornecida ao motor.

$$Freq. = 77,74 * td^{-0,897} \quad (25)$$

Esta equação foi levantada empiricamente sendo válida para a máquina retificadora e o rebolo empregados neste trabalho. Sendo este método aplicado a outros casos.

4.7 Avaliação da Agressividade

A agressividade foi levantada após cada dressagem como parâmetro de comparação entre as ferramentas aplicadas sobre o sinal de emissão acústica. Foi utilizado o método do disco retificado já descrito na revisão bibliográfica.

A figura 4-16 mostra o posicionamento do rebolo, do disco, do sensor de deslocamento e da balança com os contra pesos.

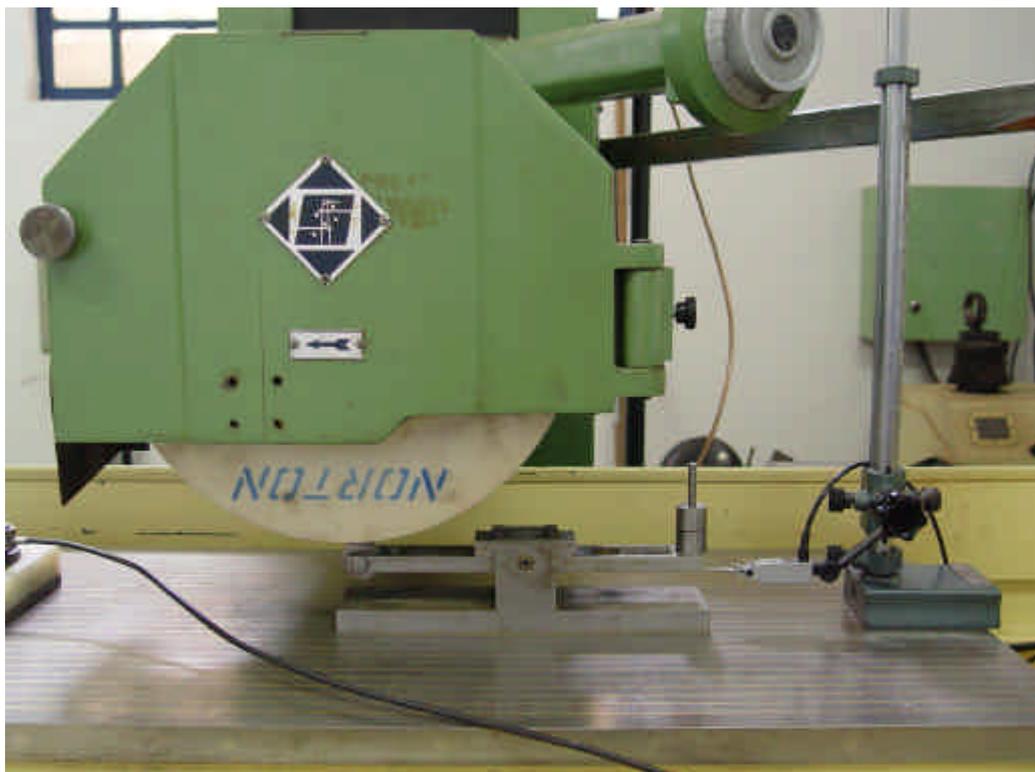


Figura 4-16 - Banco de teste de agressividade do rebolo

O método parte do princípio de que quanto mais agressivo o rebolo estiver, maior será a taxa de remoção. Portanto, mais rápido o disco vai se desgastar. No decorrer do teste a balança compensa o desgaste do disco. Este movimento da balança é captado pelo sensor posicionado na outra extremidade. A figura 4-17 mostra o sensor em destaque.



Figura 4-17 - Sensor de deslocamento utilizado no teste de agressividade.

O sinal deste sensor é amplificado e enviado para a placa de aquisição de dados por um aparelho TT60 da Tesa mostrado na figura 4-18.



Figura 4-18 - Módulo TT60 usado no teste de agressividade.

Um programa desenvolvido no Labview lê o sinal e o salva em disco para posterior levantamento da agressividade. O “Panel” e o “Diagram” deste programa são apresentados na figura 4-19 e 4-20.

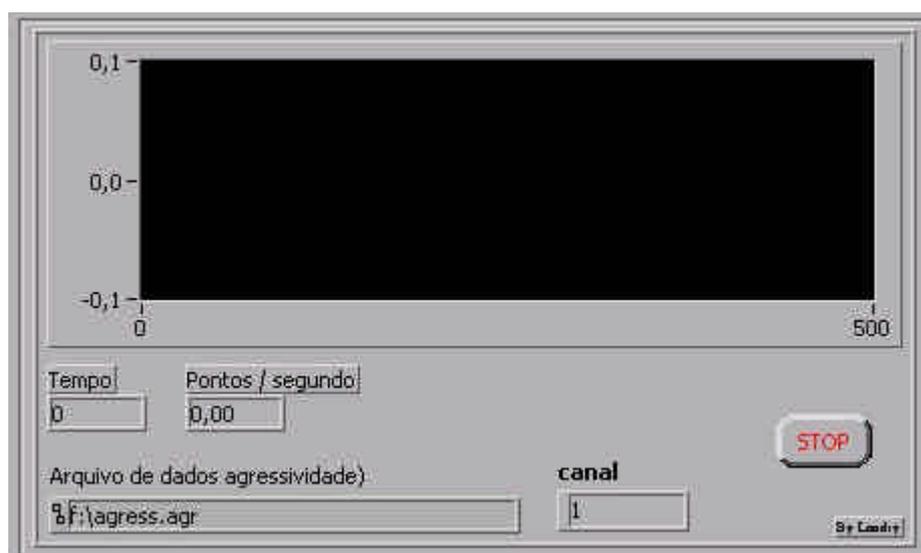


Figura 4-19 – Painel Frontal do Programa usado no teste de agressividade.

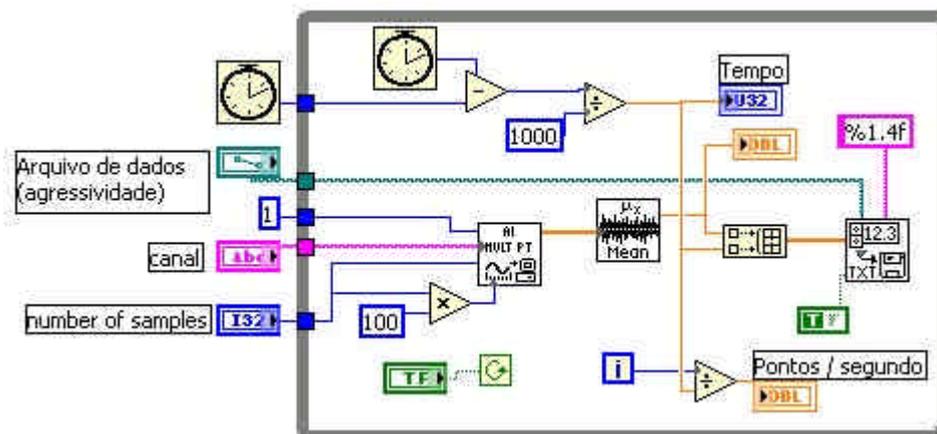


Figura 4-20 – Diagrama do Programa usado no teste de agressividade.

Depois de terminado os ensaios, os sinais foram processados e filtrados, para adequação de escala e eliminação de ruídos, no Matlab.

No entanto, antes que este sistema pudesse ser usado foi necessário calibrar as saídas do TT60 para os valores de deslocamento. O esquema montado para a calibração é mostrado na foto da figura 4-21.

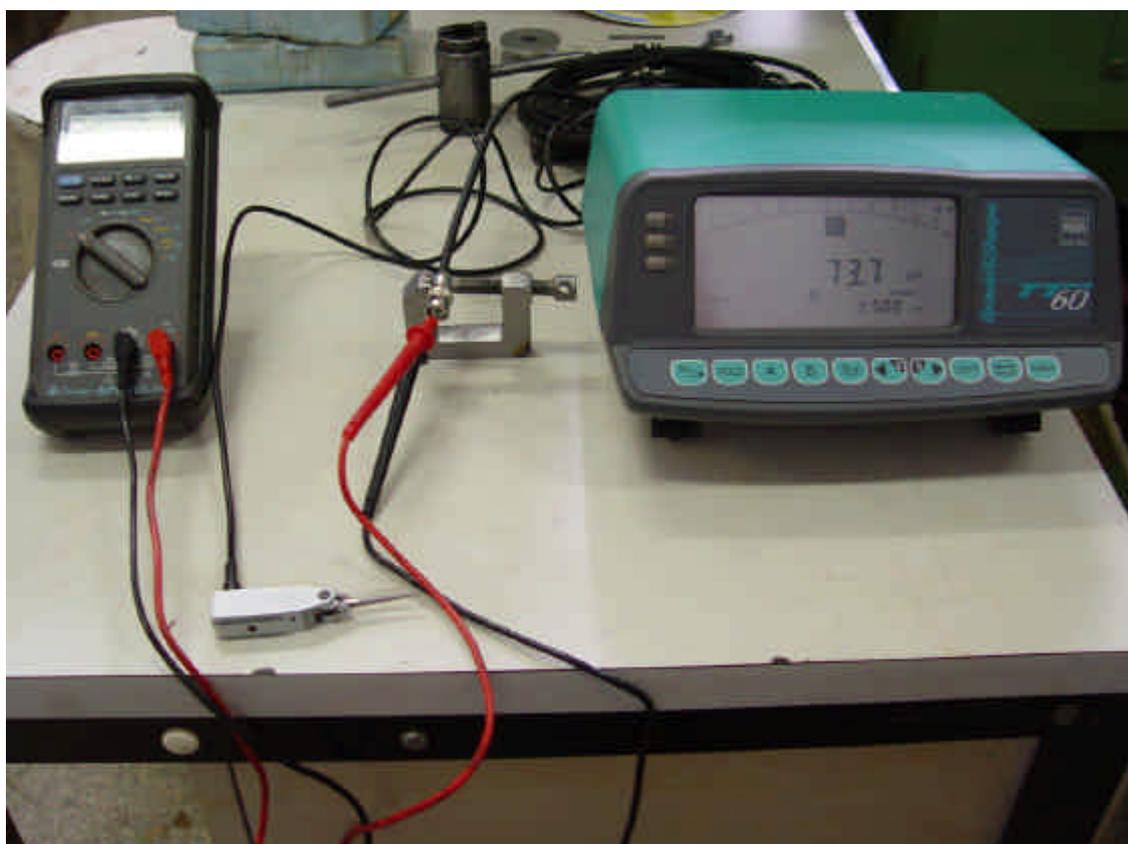


Figura 4-21 - Calibração do sistema de teste de agressividade.

4.8 Processamento de Sinais

Foram utilizadas várias rotinas de processamento de dados e relações entre elas no desenvolvimento deste trabalho.

Do sinal puro de emissão acústica (EA_{raw}) adquirido à taxa de amostragem de 2,5 milhões de amostras por segundo, foram extraídos os valores RMS, CFAR, FFT, MVD, Nuttall e ROP, sendo calculados para cada 2000 amostras utilizando-se rotinas desenvolvidas no software Matlab.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a realização dos ensaios e processamento dos sinais de emissão acústica e cálculo da agressividade realizou-se as observações a seguir.

5.1 Agressividade

A agressividade é proporcional à tangente da curva do deslocamento versus o tempo levantado durante os testes com a balança de agressividade. Os resultados levantados são apresentados nas figuras 5-1 e 5-2. A figura 5-1 mostra a agressividade obtida nos ensaios com U_d constante e a figura 5-2, a dos ensaios com U_d variável.

Pela observação das figuras 5-1 e 5-2, é possível notar que a agressividade aumenta com o aumento da profundidade de dressagem e tende a diminuir com o aumento do valor do U_d , o que já era esperado, segundo a literatura.

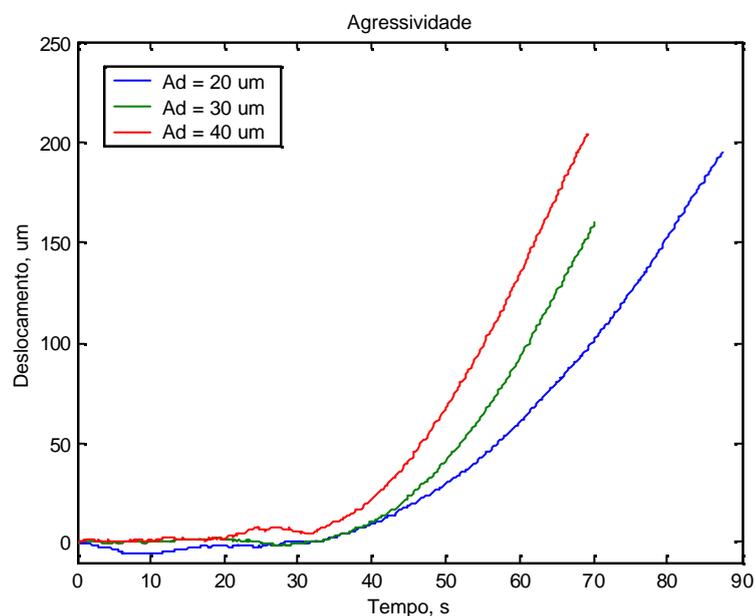


Figura 5-1 - Variação da agressividade com a profundidade de dressagem.

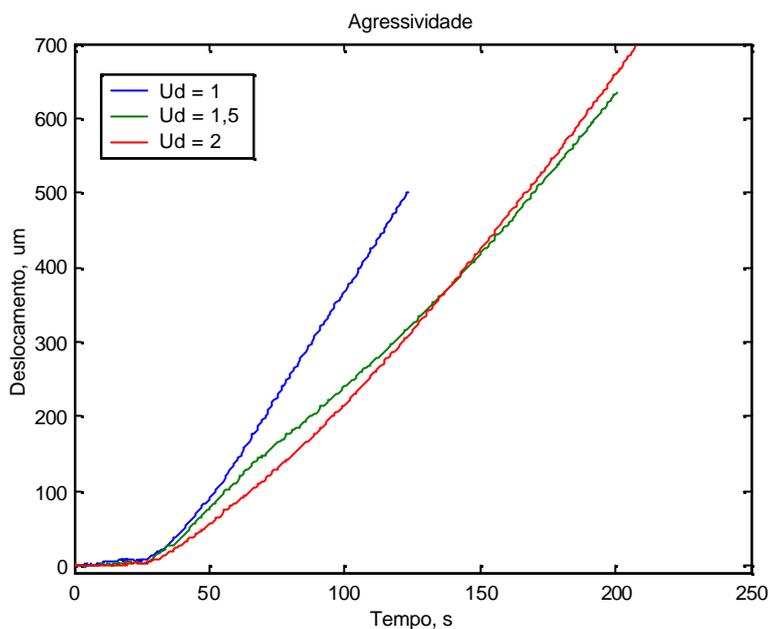


Figura 5-2 - Variação da agressividade com o grau de recobrimento (U_d).

5.2 Emissão Acústica

O sinal puro de emissão acústica não tem muito sentido em ser mostrado, dado sua complexidade e necessidade de um tratamento estatístico. Mas após o processamento mostrou bons resultados.

Todas as estatísticas calculadas a partir do sinal puro de emissão acústica e mostradas nas Figuras 5-3 a 5-8 foram obtidas processando-se o sinal de EA em blocos de 2000 pontos. Assim, para cada ponto calculado de uma determinada estatística corresponde a 2000 pontos do sinal puro de emissão acústica, ou 0,8 milissegundos.

A Figura 5.3 mostra os resultados obtidos no processamento do sinal puro de emissão acústica para a estatística RMS.

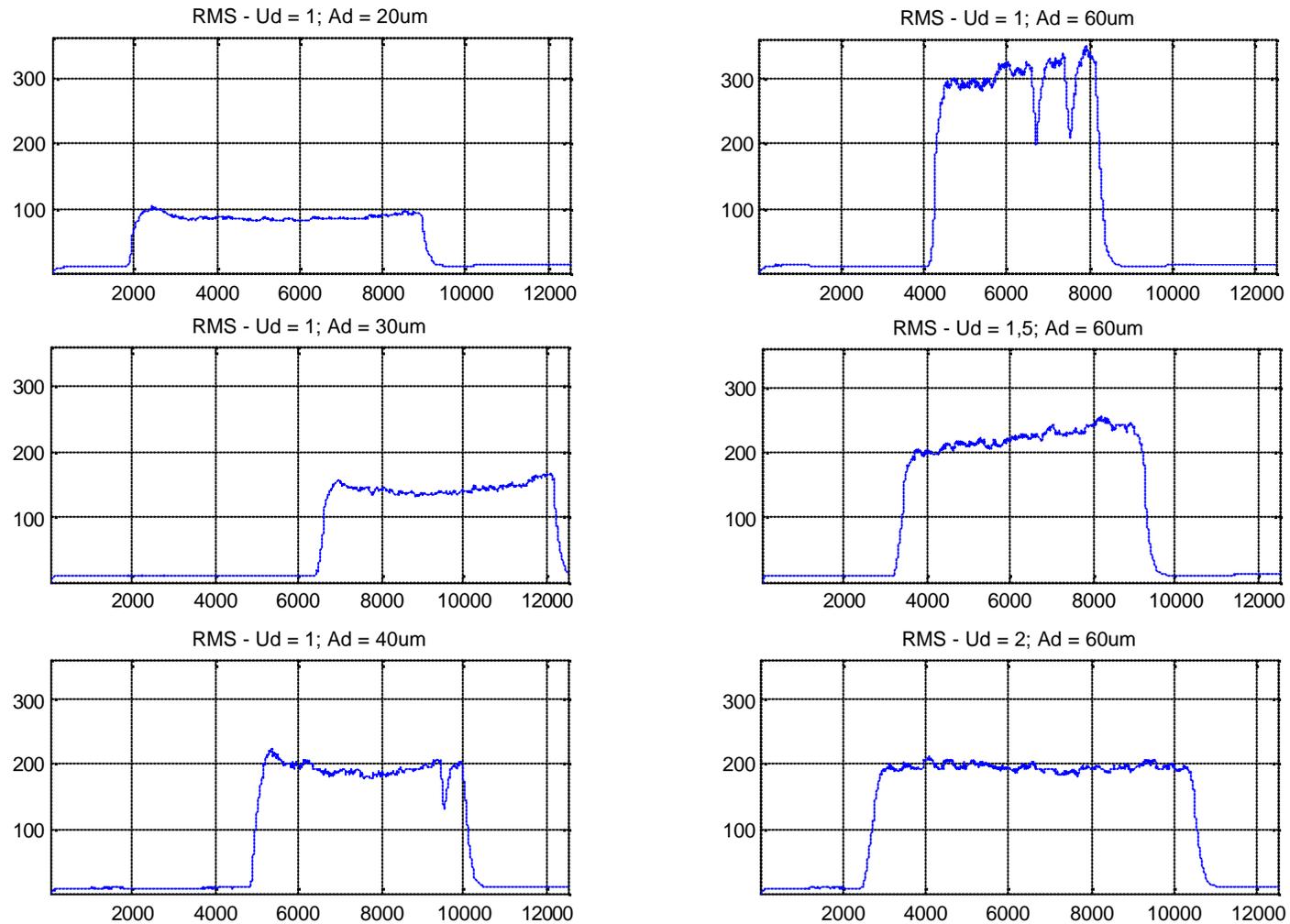


Figura 5-3 - RMS do sinal de emissão acústica. Eixo vertical (Volts*constante); Eixo horizontal (No. Pontos calculados).

Os gráficos da esquerda representam os ensaios realizados com U_d constante e os da direita os ensaios com U_d variável.

É possível observar que o nível RMS aumenta com o aumento da profundidade de dressagem e diminui com o aumento do U_d . Este fenômeno pode ser facilmente explicado, pois quanto maior a área de atuação do dressador no rebolo maior será a intensidade dos choques entre os grãos do rebolo e o diamante do dressador e, portanto, maior a energia liberada na forma de ondas.

A figura 5-4 mostra o CFAR. Esta ferramenta também se mostrou sensível à variação dos parâmetros de dressagem e se comportou de modo muito parecido ao RMS.

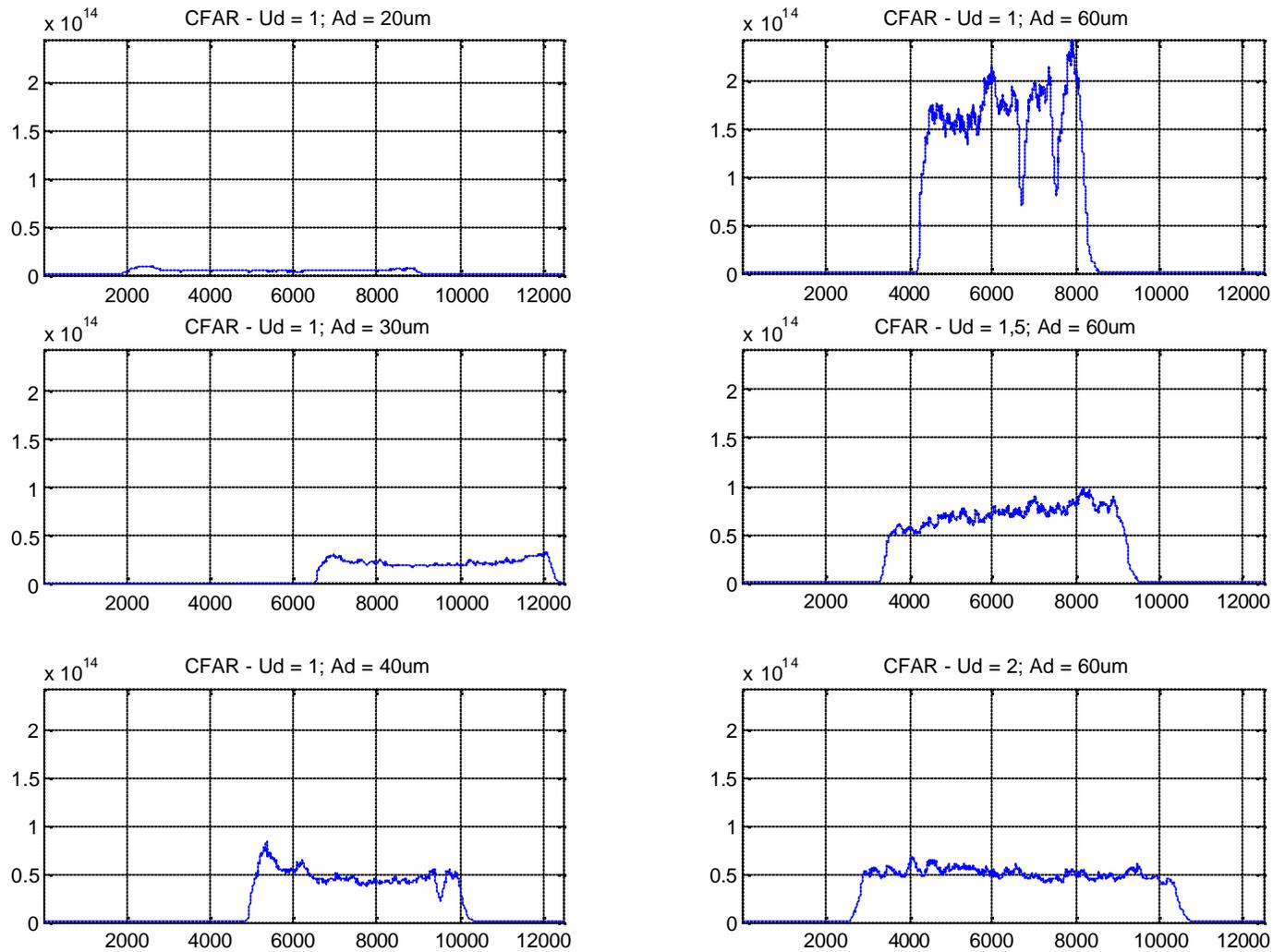


Figura 5-4 - CFAR do sinal de emissão acústica. Eixo vertical (Volts*constante); Eixo horizontal (No. Pontos calculados).

Devido ao teste de agressividade, o rebolo ficou com algumas marcas de desgaste que não foram removidas antes dos ensaios com $U_d = 1$ e profundidade de dressagem $a_d = 60 \mu\text{m}$ (Gráfico do canto superior direito das figuras de emissão acústica) e com $U_d = 1$ e $a_d = 40 \mu\text{m}$ (canto inferior esquerdo). É possível observar que o RMS (figura 5-3), o CFAR (figura 5-4) e a parte real da FFT (figura 5-5) apresentaram quedas sensíveis nos pontos onde havia desgaste. É recomendado um estudo mais aprofundado destas ferramentas, mas, a princípio, pode se dizer que elas seriam capazes de detectar defeitos na superfície do rebolo durante a dressagem.

A figura 5-5 mostra a parte real da FFT da emissão acústica calculada a partir do sinal puro.

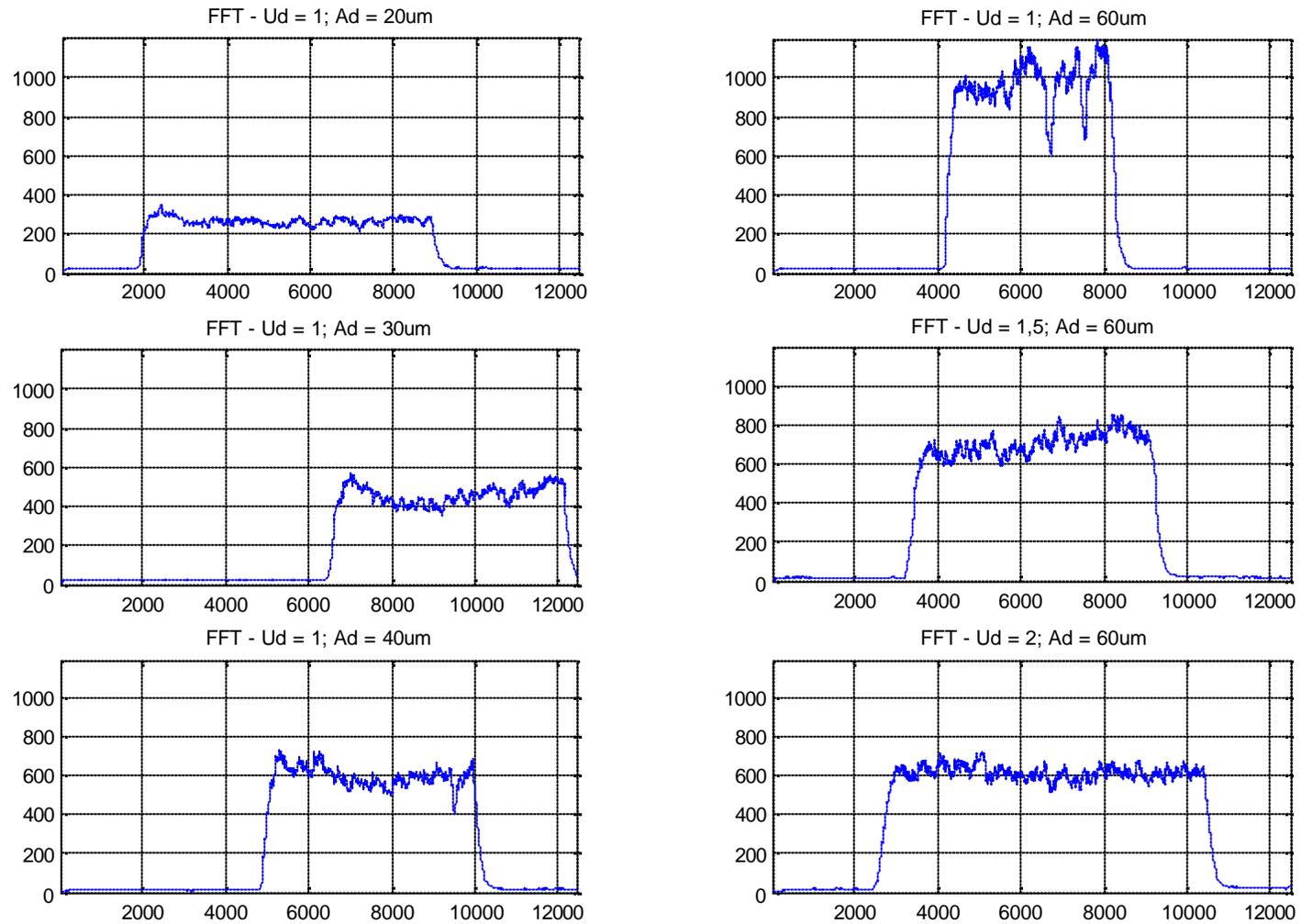


Figura 5-5 - FFT do sinal de emissão acústica. Eixo vertical (Volts*constante); Eixo horizontal (No. Pontos calculados).

Assim como o RMS e o CFAR, esta ferramenta apresentou bons resultados quanto à variação da profundidade de dressagem. No entanto, quanto à variação do U_d ela foi pouco expressiva quando comparada ao RMS e ao CFAR.

A figura 5-6 mostra o MVD do sinal de emissão acústica. Assim como as demais ferramentas apresentadas até agora, esta teve uma certa sensibilidade à variação da profundidade de dressagem. Mas não apresentou variação perceptível quando é aumentado o U_d .

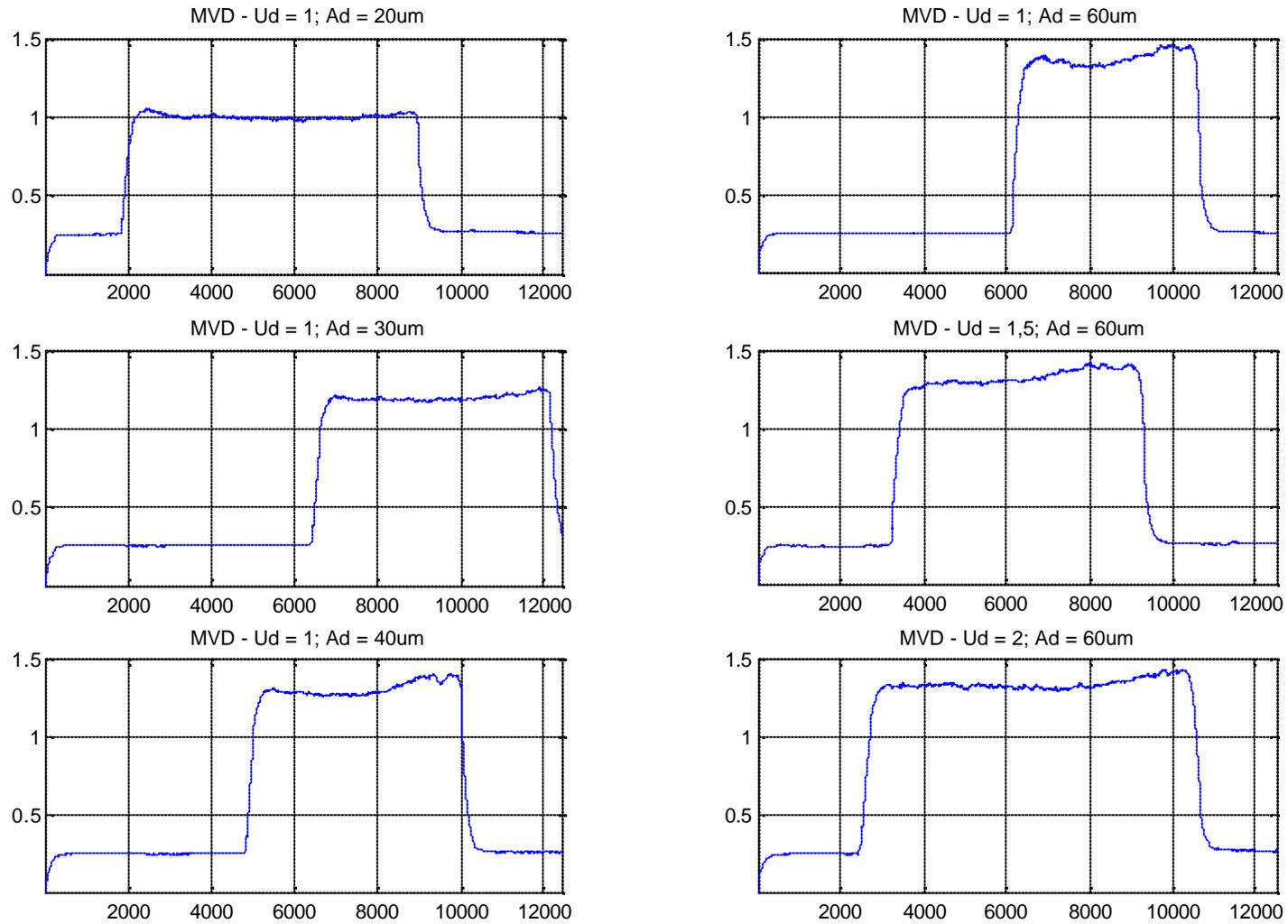


Figura 5-6 - MVD do sinal de emissão acústica. Eixo vertical (Volts*constante); Eixo horizontal (No. Pontos calculados).

A figura 5-7 mostra o ROP do sinal de emissão acústica. Esta ferramenta não apresentou bons resultados, pois é difícil até identificar o intervalo do sinal em que houve realmente a dressagem, no entanto, se compararmos com as outras ferramentas ainda é possível a identificação.

A figura 5-8 apresenta o Nuttall do sinal de emissão acústica. Esta foi a ferramenta que apresentou os piores resultados. O sinal é muito confuso e chega a se confundir com os ruídos.

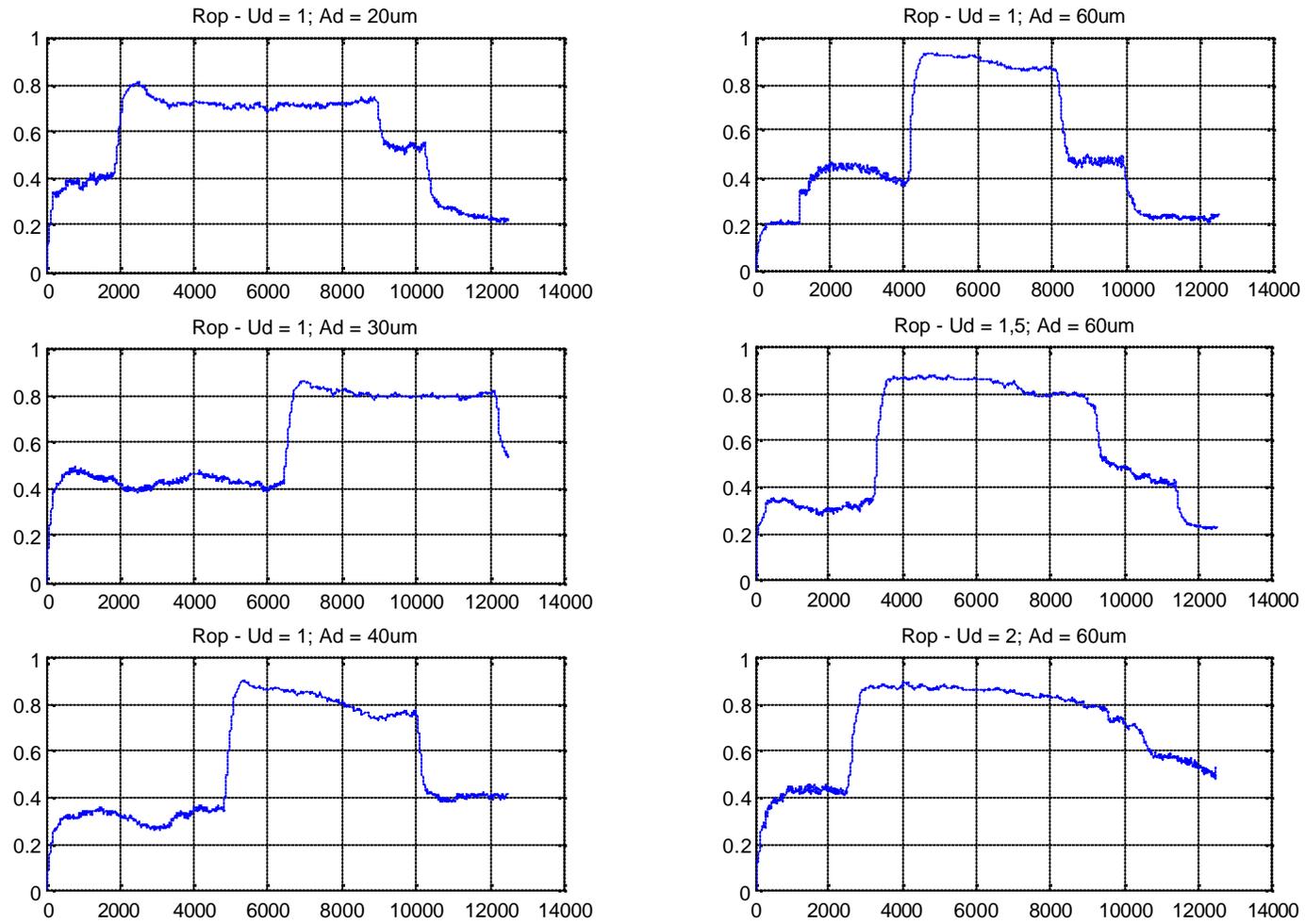


Figura 5-7 - ROP do sinal de emissão acústica. Eixo vertical (Volts*constante); Eixo horizontal (No. Pontos calculados).

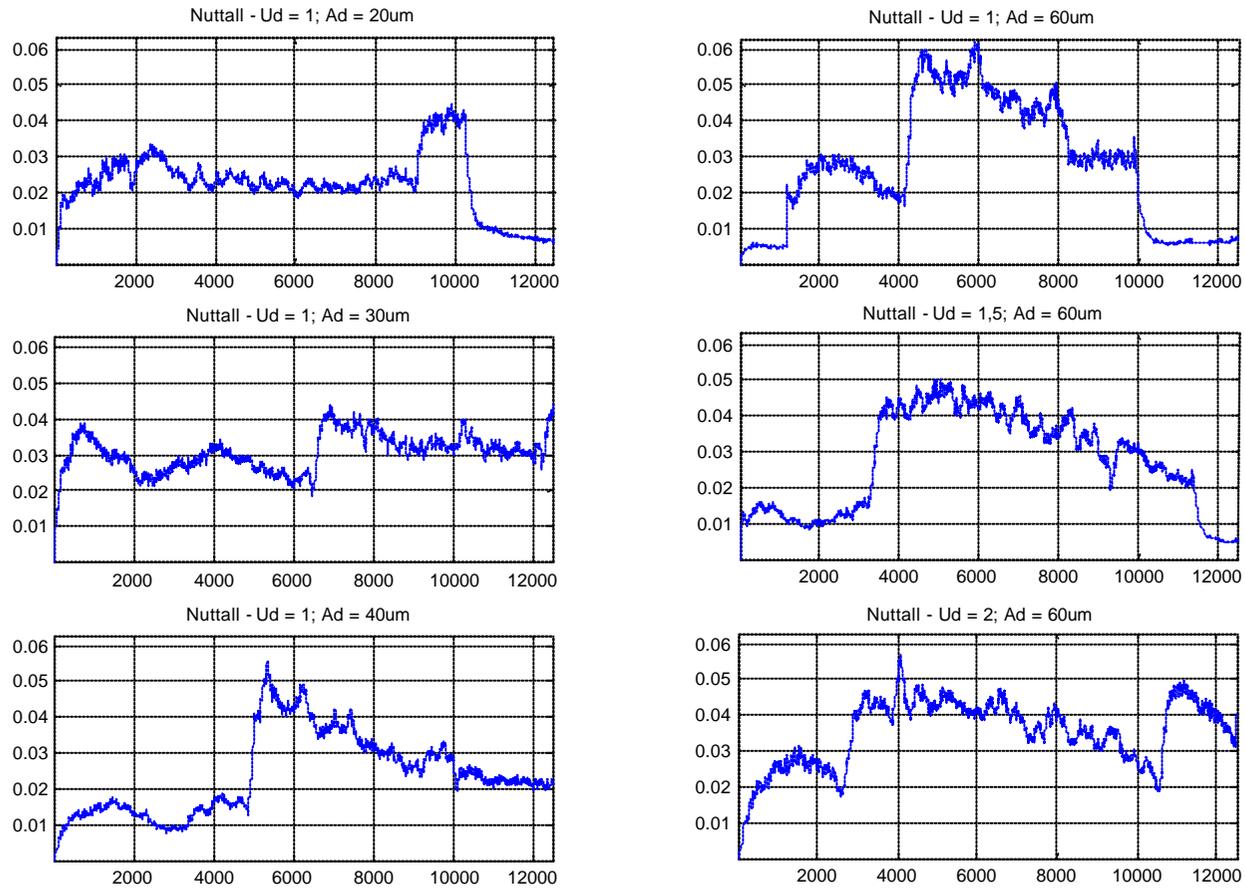


Figura 5-8 - Nuttall do sinal de emissão acústica. Eixo vertical (Volts*constante); Eixo horizontal (No. Pontos calculados).

Um resumo da análise das ferramentas é apresentado na tabela 4.

Tabela 4- Resultado das ferramentas testadas

Ferramenta (estatística)	Parâmetro observado (variação)	Ótimo	Bom	Ruim
CFAR	a_d	*		
	U_d	*		
	Defeito		*	
RMS	a_d	*		
	U_d		*	
	Defeito		*	
FFT	a_d	*		
	U_d		*	
	Defeito		*	
MVD	a_d		*	
	U_d			*
	Defeito			*
ROP	a_d			*
	U_d			*
	Defeito			*
Nuttal	a_d			*
	U_d			*
	Defeito			*

6 CONCLUSÃO

1. O método do disco retificado apresentou-se com um bom indicador da agressividade.
2. A agressividade do rebob aumenta com o aumento da profundidade de dressagem e diminui com o aumento do grau de recobrimento.
3. Além do RMS, podem ser obtidas várias ferramentas a partir do sinal puro de emissão acústica, sensíveis à variação dos parâmetros da dressagem.
4. As ferramentas CFAR e RMS apresentaram os melhores desempenhos com os parâmetros observados.
5. As demais ferramentas testadas apresentaram bons resultados para somente uma ou nenhuma característica observada.
6. Se a agressividade aumenta com a profundidade de dressagem e diminui com o U_d e o CFAR, o RMS e a parte real da FFT do sinal de emissão acústica percebem as variações destes parâmetros, estas ferramentas também podem ser usadas como indicadores de agressividade.

SUGESTÃO PARA NOVOS TRABALHOS

Como sugestão para futuros trabalhos, poderão ser exploradas outras ferramentas estatísticas como as utilizadas no trabalho de Aguiar (2003), bem como se usar outros sinais para o monitoramento da operação de dressagem, como a velocidade periférica do rebolo e a potência de corte. A combinação destes sinais também poderá trazer informações importantes do processo de dressagem. Adicionalmente, ensaios que caracterizem melhor a agressividade e a condição superficial do rebolo poderiam ser realizados de forma a enriquecer as comparações dos resultados.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, P. R. “Controle Automático de Danos Térmicos na Usinagem por Abrasão através do Processamento de Sinais de Emissão Acústica e Potência Elétrica”, Tese de Livre Docência, Unesp, Bauru-SP, 2003.

AGUIAR, P. R., WILLETT, P., WEBSTER, J. “Acoustic Emission Applied to Detect Workpiece Burn During Grinding”, International Symposium on Acoustic Emission: Standards and Technology Update, S. Vahaviolos, Ed., Fort Lauderdale, FL, January 1999.

AGUIAR, P. R. “Monitoramento da Queima Superficial em Processo de Usinagem por Retificação usando a Potência Elétrica do Motor de Acionamento e Emissão Acústica”, Tese de Doutorado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, 1997.

AGUIAR, P. R., BAGAGLI, R. P., BIANCHI, E. C., MONICI, R. D. “A integridade superficial da peça monitorada por emissão acústica e potência elétrica no processo de retificação”. 8as Jornadas Portuguesa de Tribologia, 2002, Aveiro, Portugal, 2002. p. 245-249.

BADGER, J. A., TORRANCE, A. “Understanding the causes of grinding burn helps alleviate the problem”, Cutting Tool Engineering CUTTING TOOL ENGINEERING Magazine, U.S., December 2000/volume 52/ number 12.

BERKOVITS, A. e FANG, D. “Study of Fatigue Crack Characteristics by Acoustic Emission”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 51(3), pp. 401-416, 1995.

BIANCHI, E. C. “Ação das Condições de Dressagem na Retificação de Precisão”, Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1990.

- BIANCHI, E. C. “O desempenho de rebolos pode ser controlado pela dressagem”. Revista Máquinas e Metais. , n.317, p.12 - 25, 1992.
- BIANCHI, E. C., SANCHES, L. E. A., FERNANDES, O. C., MOGAMI, O., SILVA JR, C. E. & AGUIAR, P. R. ”Análise do Comportamento de Rebolos Convencionais na Retificação de Aços Frágeis”, Congresso Norte Nordeste de Engenharia Mecânica, IV, Recife/PE, pp. 335-340, 1996a.
- BIANCHI, E. C., SANCHES, L. E. A., FERNANDES, O. C., MOGAMI, O., SILVA JR, C. E. & AGUIAR, P. R. ”Análise do Comportamento de Rebolos Convencionais na Retificação de Aços Dúcteis”, Congresso Norte Nordeste de Engenharia Mecânica, IV, Recife/PE, pp. 387-392, 1996b.
- BIANCHI, E. C. “A otimização da agressividade de rebolos pelas condições de dressagem” Revista Máquinas e Metais, v.1, n. 364, p. 70 – 83, 1996.
- BIFANO, T. G., YI, Y. “Acoustic Emission as an Indicator of Material-Removal Regime in Glass Micro-Machining”. Precision Engineering, Vol 4, No 4, October 1992, pp. 219-227.
- BLUM, T. & DORNFELD, D. A. “Grinding Process Feedback using Acoustic Emission”, in: 4th International Grinding Conference, Dearborn (Detroit), Michigan, October 1990.
- BOOTHROYD, G. & KNIGHT, W. A. “Fundamentals of Machining and Machine Tools”, in second edition, ed. Marcel Dekker, inc., New York, 1989.
- CHANG, C. C., SZERI, A. Z. “A thermal analysis of Grinding”, Wear 216 (1998) 77-86.
- COELHO, R.T. “Estudo experimental da profundidade de dressagem em rebolos através do método do disco retificado em usinagem de precisão. São Carlos, EESC, USP, 1991, 106 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1991”.

- DALLY, W.J.; RILEY, W.F.; McCONNEL, K.G. Instrumentation for Engineering Measurements. 139-140, 1993.
- DINIZ, A. E., CUPINI, N. L.; VILELLA, R. C. “Monitoramento do processo de usinagem por emissão acústica”. XI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, São Paulo, dezembro de 1991.
- DORNFELD, D. A. “Monitoração de processos por emissão acústica”, Revista Máquinas & Metais, Maio/1999, pp. 64 – 81.
- DORNFELD, D. “Acoustic Emission Process Monitoring for Untended Manufacturing” Japan-USA Symposium on Flexible Automation, Osaka, Japan, pp. 831-836, 1986.
- FELIPE, J., OLIVEIRA, J. F. G. “A retificação inteligente é mais confiável e menos dependente do operador”, Revista Máquinas e Metais, Março/1998, pp. 80 – 98.
- INASAKI, I. “Sensor Fusion for Monitoring and Controlling Grinding Processes”. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1999, pp. 730-736.
- INASAKI, I. & OKAMURA, K. “Monitoring of dressing and grinding processes with acoustic emission signals” Annals of the CIRP, volume 34/1, 1985. p. 277-280.
- JEMIELNIAK, K. “Some Aspects of Acoustic Emission Signal Processing”. Annals of the CIRP, 1997, pp. 1-8.
- JOHNSON, C. D. “Process Control Instrumentation Technology”, Prentice Hall, 5 ed. New Jersey, 1997, 638 p.
- KING, R. I. & HAHN, R. S. “Handbook of modern technology” 3 New York, Chapman and Hall, 1986.

- KOENIG, W. e KLUMPEN, T. “Monitoring and Sensor Concepts for Higher Process Reliability”, 5th Int. Grinding Conf., Cincinnati, Ohio, October 26-28, 1993.
- KOENIG, W., MEYEN, H. P. “AE in Grinding and Dressing: Accuracy and Process Reliability”, 4th Int. Grinding Conf., SME Paper MR90-526, October 9-11, 1990.
- KÖNIG, W., MESSER, J. “Afição de rebolos de corundo (Óxido de alumínio) com ferramentas de afiação estáticas” Tradução da empresa Bosh, Campinas. 12p.
- KÖNIG, W. “Monitoring and Sensor Concepts for Higher Process Reliability”, In: 5th International Grinding, October 1990, Dearborn, Michigan.
- KÖNIG, W. “Fertigungsverfahren Band 2, Schleifen, Honen, Laeften” VDI Verlag, Dusseldorf, 1980.
- KÖNIG, W., KNOP, M. “Retificação: métodos para prever o comportamento do processo”, Tradução: Norberto de Paula Lima, Adaptação: Alexandre T. Simon, Revista Máquinas & Metais, Fevereiro/1991 pp. 48 – 62.
- LYONS, R. G. “Understanding Digital Signal Processing”. Addison-Wesley, 517p., 1997, ISBN 0-201-63467-8.
- MALKIN, S. “Grinding technology: theory and applications of machining abrasives”. England: Ellis Horwood Limited, 1989, 275p.
- MARINELLI, N., COELHO, R. T., OLIVEIRA, J. F. G. “Emissão acústica no monitoramento da dressagem de rebolos de alumina”, Revista Máquinas e Metais, Maio/1998, pp. 56 – 73.
- PANSANATO, L., AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C., DOTTO, F. R. L. “O processamento do sinal bruto de emissão acústica e velocidade de corte na detecção de dano térmico na retificação plana”. Revista Ciência e Tecnologia dos Materiais. Portugal: v.1, p.1 - 10, 2003.

PANSANATO L, AGUIAR P. R.; BIANCHI E. C.; MORI A. K. “O processamento do sinal bruto de emissão acústica na detecção da queima superficial na retificação plana”
In: XI Congresso e Exposição Internacionais de Tecnologia da Mobilidade – SAE Brasil – 2002 – São Paulo, SP.

SALMON, S. C. “Unpublished work”, University of Bristol, 1988.

SCHWARZ, J. “O ótimo super-acabamento começa pelo acabamento certo”, Revista Máquinas e Metais, Dezembro/1999, pp. 126 – 133.

SHAFTO, G. R. “Creep Feed Grinding”, Ph.D. Thesis, University of Bristol, 1975.

SHAW, M. C. “Heat-Affected Zones in Grinding Steel”. Annals of the CIRP, Vol.43/1/1994, pp. 279-282.

SHAW, M. C. “Principles of abrasive processing”, Oxford Science on Advanced Manufacturing, New York, USA, 1996, 574p.

SPAIN, P. G. “A Discrete Variation on Kronecker’s Theorem”, NORTH-HOLLAND, 1994.

TÖNSHOFF, H. K. “Development and Trends in Monitoring and Control of Machining Processes”, Annals of the CIRP, Vol. 37/12/1988. pp. 611-621.

TSO P.L. “Study on the Inconel 718”, Journal of Processing Technology 55 (1995) 421-426.

VIEIRA, J. M., OLIVEIRA, J. F. G. “Diagnóstico da técnica de mergulho por emissão acústica”, Revista Máquinas & Metais, Julho/2001, pp. 118 – 126.

VIEIRA, J. M., OLIVEIRA, J. F. G. “Método para avaliar a dureza de rebolos em trabalho”, Revista Máquinas & Metais, Agosto/2000, pp. 208 – 221.

WANG, Z. "Surface Grinding Monitoring by Signal Processing of Acoustic Emission (AE) Signals", A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Master of Engineering at The University of Connecticut 1999.

WANG, Z., WILLETT, P., AGUIAR, P. R., WEBSTER, J. "Neural Network Detection Grinding Burn from Acoustic Emission". International Journal of Machine Tools & Manufacture, volume 41, 2001, pp. 283-309.

WEBSTER, J., DONG., W. P., LINDSAY, R. "Raw Acoustic Emission Signal Analysis of Grinding Process". Annals of the CIRP, Vol.45/1/1995, pp. 335-340.

WEBSTER, J.; MARINESCU, I.; BENNET, R. "Acoustic emission for process control and monitoring of surface integrity during grinding". Annals of the CIRP, volume 43/1, 1994. p. 299-304.

XIAO, G. & MALKIN, S. "On-line optimization for internal grinding process". Annals of the CIRP, volume 45/1, 1996. p. 287-292.

YANG, J. F., CHEN, F. K. "Recursive discrete Fourier transform with inified IIR filter structures", Signal Processing 82 (2002) 31 – 41.

YASUI, H. & TSUKUDA, S. "Influence of Fluid Type of Wet Grinding Temperature". Bull. Japan Soc. of Prec. Eng., Vol. 17, No. 2, pp. 133-134, 1983.

OUTRAS REFERÊNCIAS

http://www.bibvirt.futuro.usp.br/textos/tem_outros/cursprofissionalizante/tc2000/metrologia/metr25.pdf

CATÁLOGO NORTON INDUSTRIA E COMÉRCIO LTDA.-
<http://www.nortonabrasives.com>.

Página da Internet da Empresa Cripton – <http://www.cripton.ind.br/abrasivos.html>.