



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE BAURU

**MONITORAMENTO DA DRESSAGEM NO
PROCESSO DE RETIFICAÇÃO**

ANDRÉ GUSTAVO OLIVEIRA SOUZA

BAURU – SP

Julho / 2009



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE BAURU

MONITORAMENTO DA DRESSAGEM NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

ANDRÉ GUSTAVO OLIVEIRA SOUZA

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 Mecânica.**

BAURU – SP

Julho / 2009

Souza, André Gustavo Oliveira.
Monitoramento da dressagem no processo de
retificação / André Gustavo Oliveira Souza, 2009.
70 f. il.


Orientador: Paulo Roberto de Aguiar

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2009

1. Dressagem. 2. Emissão acústica. 3. Retificação.
4. Monitoramento I. Universidade Estadual Paulista.
Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE ANDRÉ GUSTAVO OLIVEIRA SOUZA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 06 dias do mês de agosto do ano de 2009, às 14:00 horas, no(a) ANFITEATRO DA PÓS-GRADUAÇÃO, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. ERALDO JANNONE DA SILVA do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Universidade de São Paulo, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de ANDRÉ GUSTAVO OLIVEIRA SOUZA, intitulado "MONITORAMENTO DA DRESSAGEM NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO". Após a exposição, o discente foi argüido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR



Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI



Prof. Dr. ERALDO JANNONE DA SILVA

A Deus. A minha querida esposa Juliana,
eterna companheira. Aos meus filhos,
Felipe e Manuela, sempre compreensivos.
Aos meus pais, Jarbas e Ligia pelo apoio

Agradecimentos

Este trabalho teve a participação e colaboração de diversas pessoas. Elencar todos os nomes e contribuições é uma tarefa árdua, havendo a possibilidade de deixar alguém sem o devido reconhecimento expresso nessas linhas. Desde já me desculpo por alguma omissão. Sendo dever de ofício e tradição, atrevo-me a tentar.

Agradeço ao Prof. Dr. Paulo Aguiar pelo apoio, ajuda e compreensão durante todo tempo de execução deste trabalho e principalmente pela orientação que não foram apenas técnicas, mas sim para toda vida.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi pelo apoio, confiança e contribuições para este trabalho.

Ao Sr. Ícaro Henrique Thomazella, pelo auxílio e importantes contribuições que determinaram o rumo deste trabalho.

Ao Sr. Ricardo Robles Leite, pelo apoio nas pesquisas e contribuições a este trabalho.

Aos proprietários da empresa Carino Ingredientes Ltda, Sra. Maria Cristina Spressão Doretto e Sr. Valdinei Coneglian, pois possibilitaram e ainda incentivaram a realização deste sonho.

A minha família que sempre me apoiou principalmente minha esposa Juliana, meus filhos Felipe e Manuela.

À Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista - *campus* de Bauru, com distinção ao setor de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, por ter me aceito como pesquisador. Aos laboratórios, LUA – Laboratório de Usinagem por Abrasão e LADAPS – Laboratório de Aquisição e Processamento de Sinais, que possibilitaram a realização deste trabalho

Muitos dos fracassos da vida ocorrem com as pessoas que não reconheceram o
quão próximas elas estavam do sucesso quando desistiram.

Thomas A. Edison

Lâmpada para os meus pés é a tua palavra e, luz para os meus caminhos.

Salmo 119:105

SUMÁRIO

1	Introdução	14
2	Objetivo	16
3	Justificativas para realização da pesquisa	17
4	Revisão Bibliográfica.....	18
4.1	Introdução	18
4.2	O Processo de Retificação	19
4.2.1	<i>Introdução</i>	<i>19</i>
4.2.2	<i>Principais Variáveis do Processo de Retificação</i>	<i>20</i>
4.2.3	<i>Característica da Velocidade da Peça (V_w).....</i>	<i>22</i>
4.2.4	<i>Característica da Velocidade de Corte (V_s)</i>	<i>23</i>
4.2.5	<i>Característica da Profundidade de Corte (a).....</i>	<i>23</i>
4.2.6	<i>Espessura Equivalente de Corte (h_{eq}).....</i>	<i>24</i>
4.2.7	<i>Relação G.....</i>	<i>25</i>
4.2.8	<i>Ferramenta de Corte</i>	<i>26</i>
4.2.9	<i>Distribuição de Energia na Retificação</i>	<i>31</i>
4.2.10	<i>Desgaste do Rebolo</i>	<i>33</i>
4.3	A operação de Dressagem	34
4.3.1	<i>Ferramentas de Dressagem.....</i>	<i>35</i>
4.3.2	<i>Influência da Dressagem no Processo de Retificação.....</i>	<i>36</i>
4.3.3	<i>Grau de Recobrimento (U_d).....</i>	<i>37</i>
4.4	Sinais de Emissão acústica e Potência de Corte na Retificação	38
4.5	Parâmetros Estatísticos usados na Retificação	40
4.5.1	<i>Valor RMS do Sinal de Emissão Acústica</i>	<i>40</i>
4.5.2	<i>Parâmetro DPO.....</i>	<i>41</i>
4.5.3	<i>Parâmetro DPKS.....</i>	<i>41</i>
4.5.4	<i>Parâmetro FKS.....</i>	<i>42</i>

5	Material e Métodos	43
5.1	Escolha do Tipo de Operação de Retificação	43
5.2	Escolha do Rebolo	44
5.3	Fluido de Corte	45
5.4	Sensor de Emissão Acústica	46
5.5	Sensor de Potência Elétrica	47
5.6	Sistema de Aquisição de dados	48
5.7	Ensaio Experimentais	49
5.8	Determinação dos Parâmetros Estatísticos de Dressagem	52
6	Resultados e Discussão	54
7	Conclusões	65
	Referências Bibliográficas.....	66

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Variáveis de entrada e saída para máquinas e processos de retificação (Adaptado de King & Hahn, 1986)</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2 – Influência da velocidade da peça no tempo de contato e na força tangencial de corte (Aguiar, 1997).....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3 – Espessura de corte equivalente para uma operação tangencial plana do tipo pendular (Adaptada de Aguiar, 1997).....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 4 – Especificação de rebolos com abrasivos convencionais (Adaptada de Stemmer, 1992)</i>	<i>31</i>
<i>Figura 5. Distribuição de energia térmica na retificação (König apud Severiano, 2002).....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 6 – Esquema do processo de dressagem (Adaptado de Bianchi, 1990).....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 7 – Refratômetro utilizado na medição da concentração do fluido de corte</i>	<i>46</i>
<i>Figura 8 – Posicionamento do sensor de emissão acústica sobre a bancada de ensaios.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 9 – Sistema de monitoração de EA do fabricante Sensis</i>	<i>47</i>
<i>Figura 10 – (a) Janela Principal do software; (b) Janela de Base de Dados (Dotto et al., 2007). 49</i>	
<i>Figura 11 - Esquema do Banco de Ensaios</i>	<i>50</i>
<i>Figura 12 - Operação de retificação sem fluido de corte para o desgaste do rebolo</i>	<i>51</i>
<i>Figura 13. Cálculo do parâmetro DPO para o ensaio 1</i>	<i>55</i>
<i>Figura 14. Cálculo do parâmetro FKS para o ensaio 1</i>	<i>56</i>
<i>Figura 15. Cálculo do parâmetro DPKS para o ensaio 1</i>	<i>56</i>
<i>Figura 16. Cálculo do parâmetro DPO para o ensaio 2</i>	<i>57</i>
<i>Figura 17. Cálculo do parâmetro FKS para o ensaio 2</i>	<i>57</i>
<i>Figura 18. Cálculo do parâmetro DPKS para o ensaio 2</i>	<i>58</i>
<i>Figura 19. Cálculo do parâmetro DPO para o ensaio 3</i>	<i>58</i>
<i>Figura 20. Cálculo do parâmetro FKS para o ensaio 3</i>	<i>59</i>
<i>Figura 21. Cálculo do parâmetro DPKS para o ensaio 3</i>	<i>59</i>
<i>Figura 22. Cálculo do parâmetro DPO para o ensaio 4</i>	<i>60</i>
<i>Figura 23. Cálculo do parâmetro FKS para o ensaio 4</i>	<i>60</i>
<i>Figura 24. Cálculo do parâmetro DPKS para o ensaio 4</i>	<i>61</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Propriedades de alguns materiais abrasivos (Malkin, 1989).....</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 2 – Rebolo utilizado nos ensaios experimentais.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 3 – Parâmetros utilizados na aquisição do sinal de EA.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabela 4 – Parâmetros de usinagem.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabela 5 - Histórico dos passes de dressagem de acordo com os parâmetros DPO e DPKS</i>	<i>63</i>

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a - Penetração do rebolo	[mm]
a_d - Profundidade de dressagem	[μm]
Al₂O₃ - Óxido de alumínio	
A_{sd} – Área de dressagem	[mm ²]
b_d - Largura de atuação do dressador	[μm]
b_s - Largura do rebolo	[μm]
CBN - Nitreto boro cúbico	
d_s - Diâmetro do rebolo	[mm]
d_w - Diâmetro da peça	[mm]
DPO – Parâmetro definido pela multiplicação entre o desvio padrão do sinal RMS de emissão acústica e a potência elétrica máxima por passada do rebolo (ciclo)	
DPKS – Parâmetro definido pelo cálculo do desvio padrão da emissão acústica multiplicado pela somatória da potência subtraída do seu desvio padrão elevado à quarta potência por passada.	
EA – Sinal puro de emissão acústica	[V]
EA_{rms} - Emissão acústica em RMS	[V]
F_{cmax} – Força máxima de corte na passada	
F_t - Força tangencial de corte	[N]
FKS – Parâmetro definido pela força máxima de corte, dividida pelo produto da ferramenta estatística <i>skew</i> e pela <i>kurtosis</i> , ambas aplicadas ao sinal de emissão acústica de cada passada do rebolo.	
G - Relação entre o volume de material removido e o volume do rebolo gasto	
h_{eq} – Espessura equivalente de corte	[μm]
i – Índice de potência que varia de 1 até m pontos de cada passada	
Kurt(EA) – Estatística <i>kurtosis</i> do sinal RMS de EA por passada	
LADAPS – Laboratório de aquisição de dados e processamento de sinais (Unesp Bauru)	
m – Números de pontos ou amostras da passada	
MAX(POT) – Potência máxima por passada	[W]
P_{elétrica} - Potência elétrica ativa do motor de acionamento do rebolo	[W]
POT(i) – Valor instantâneo da potência	
RMS - <i>Root mean square</i> – valor médio quadrático	
S_d – avanço do dressador por revolução do rebolo ou Passo de dressagem	
S(EA) - Desvio-padrão da emissão acústica	[V]
Skew(EA) – Estatística <i>skewness</i> do sinal RMS de EA por passada	
SiC - Carbetto de silício	
S(POT) – Desvio padrão da potência na passada	
U_d – Grau de recobrimento	
V - Tensão de saída do módulo responsável pela medida de potência	[V]
V_c - Velocidade de corte	[m/s]
V_{fd} – Velocidade de penetração de dressagem	[mm/s]
V_s - Velocidade periférica do rebolo	[m/s]
V_w - Velocidade periférica da peça	[m/s]

V_{sd} - Velocidade de avanço de dressagem

[mm/min.]

ΔT - Constante de integração

Z_w - volume de material retificado

Z_s - volume de material do rebolo gasto

SOUZA, A. G. O. Monitoramento da dressagem no processo de retificação. Bauru, 2009. 70p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

RESUMO

A retificação tem sido uma das mais importantes operações usadas para obtenção de peças de alta precisão, sendo responsável por considerável parcela do total de operações de usinagem nos países industrializados. Porém, para manter as condições ideais neste processo, torna-se importante a operação de dressagem do rebolo em intervalos freqüentes para a remoção dos grãos gastos e manter o perfil de sua superfície. Entretanto, a carência de métodos confiáveis indicativos de uma dressagem adequada, de modo a prevenir desgaste excessivo do rebolo durante esta operação, direcionou este trabalho ao estudo de um método de monitoramento da dressagem no processo de retificação, baseado no processamento digital dos sinais de emissão acústica e potência elétrica do motor de acionamento do rebolo. Para isso, utilizou-se um aplicativo computacional, previamente desenvolvido em Visual Basic, no qual se realiza o processamento digital destes sinais e quando os parâmetros utilizados indicam dressagem adequada, gera-se um sinal de controle avisando o operador ou interrompendo o processo de dressagem. Ensaios de dressagem foram realizados numa retificadora plana tangencial utilizando-se rebolo de óxido de alumínio e dressador de ponta única de diamante. A aquisição dos sinais de emissão acústica e potência foi feita a uma taxa de 4 mil amostras por segundo e em seguida, estes sinais foram enviados ao software para análise. Os resultados obtidos foram de forma geral satisfatórios, sendo o parâmetro DPO o que apresentou maior uniformidade e sensibilidade ao ponto de boa dressagem.

ABSTRACT

Grinding has been one of the most important techniques used for obtaining high precision parts and responsible for considerable amount out of a total of machining operations in industrialized countries. However, the dressing operation is very important to occur regularly in order to remove the wear grits on the tool surface and maintain the ideal cutting conditions in the grinding process. On the other hand, the lack of reliable methods to indicate a proper dressing in order to prevent the grinding wheel from getting wear excessively has directed this work to study a method for monitoring the dressing operation. The method was based on the digital processing of the acoustic emission signal and electrical power signal of the electric motor that drives the wheel. To attain such a goal, specific software developed in Visual Basic was employed, in which digital processing of these signals was carried out and a control signal was sent to the machine operator when the studied parameter indicates proper dressing or the dressing operation is halted. Dressing tests were carried out in a surface grinding machine equipped with an aluminum oxide grinding wheel and a single point diamond dresser. The data acquisition of acoustic emission and electrical power signals was performed at 4 million samples per second and then the signals were sent to the mentioned software to be analyzed. In general, the results have shown quit good, but the DPO parameter presented better consistency and sensitivity to indicate suitable dressing moment.

1 Introdução

A retificação tem sido uma das mais importantes técnicas utilizadas para obter peças de alta precisão, sendo responsável por uma considerável parcela do total de operações de usinagem nos países industrializados.

Um grande número de componentes manufaturados são usinados por retificação ou são processados por máquinas-ferramentas, cuja precisão foi obtida através de operações abrasivas. Sabe-se que melhoramentos no processo levam a uma maior precisão, produção mais rápida e redução de custos.

O processo de retificação é a última etapa de fabricação e por isso, tem um grande valor agregado ao produto final. Durante anos, pesquisadores do mundo inteiro tentam controlar o processo de retificação, buscando ferramentas para a compreensão e desenvolvimento de parâmetros que representem fielmente este processo. Devido ao grande número de variáveis envolvidas no processo, o número de ferramentas hoje existentes abrange uma quantidade limitada de situações, sendo que muitas delas não se aplicam à prática.

Por outro lado, pesquisadores vêm incorporando as novas tecnologias existentes em ferramentas capazes de suprir deficiências, que antigamente eram difíceis de serem resolvidas. Estas novas tecnologias incorporam uma quantidade enorme de funções avançadas de processamento digital de sinais que processam, filtram, ou alteram características dos sinais para que parâmetros sejam aplicados. Desta forma, as possibilidades de associar sinais de sensores com as altas taxas de processamento tornam-se possíveis.

Com isso, a implementação de sistema de monitoramento do processo de dressagem, pode possibilitar uma melhoria na confiabilidade das operações, aliada a um aumento de qualidade e redução de custos. Porém, ainda são encontradas dificuldades na sua implantação devido à falta de critérios bem definidos para a sua perfeita aplicação prática.

Associando-se parâmetros utilizados na detecção da queima no processo de retificação desenvolvidos por Aguiar *et al.* (2002), Aguiar *et al.* (2005) e Dotto *et al.* (2006) com ferramentas de processamento digital de sinais, tornou-se

possível a proposta deste trabalho.

Na primeira parte deste trabalho apresenta-se toda a revisão bibliográfica, necessária para a compreensão do processo de retificação e da operação de dressagem no processo de retificação tangencial plana. Parâmetros utilizados na detecção da queima no processo de retificação e utilizados neste trabalho na detecção da boa dressagem são apresentados no final deste capítulo.

No capítulo “Material e Métodos” apresenta-se a escolha do tipo de retificação, escolha do rebolo, a utilização do fluido de corte, os sensores de emissão acústica e potência, o sistema de aquisição de dados, os ensaios experimentais, e a determinação dos parâmetros estatísticos de dressagem.

No capítulo “Resultados e Discussões” são mostrados os resultados obtidos para os parâmetros utilizados na detecção da boa dressagem, comparando-se seus desempenhos.

Por fim, as conclusões são apresentadas seguidas pelas referências bibliográficas.

2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é a detecção do ponto de boa dressagem durante o processo de retificação tangencial plana, utilizando-se parâmetros que utilizam o sinal RMS de emissão acústica e potência de corte, de forma a minimizar o tempo desta operação bem como evitar a remoção excessiva de material do rebolo.

3 Justificativas para realização da pesquisa

A retificação é um processo que apresenta grande importância na fabricação, sendo responsável por 25% dos processos de usinagem. Por ser normalmente a última operação de uma seqüência de fabricação, todos os problemas de tempo e qualidade gerados ao longo do processo de fabricação de um componente devem ser resolvidos na retificação. Além disto, o sucateamento de uma peça durante a retificação implica na perda de todos os processos anteriores, tornando o processo muito caro. Isto faz com que a retificação seja freqüentemente um gargalo numa seqüência de operações. Por isso, ressalta-se que qualquer benefício obtido na retificação tem grande valor em todo o processo (Oliveira *et al*, 2002).

Segundo Badger & Torrance (2000), os danos térmicos no processo de retificação podem ser extremamente reduzidos, usando os parâmetros de operação e estratégias de dressagem corretos. A eficiência da operação de retificação é altamente dependente da superfície do rebolo.

O processo de dressagem pode ser monitorado para produzir uma qualidade constante na superfície do rebolo. A vida do rebolo pode ser definida pelo monitoramento de mudanças da amplitude e freqüência característica do sinal de emissão acústica. Entretanto, ainda há carência no mercado de dispositivos que são capazes de avaliar a superfície do rebolo durante a operação de retificação em um ambiente de produção (Oliveira *et al*, 2000).

Xue *et al*. (2002) confirmaram através de uma série de experimentos que o sensor de emissão acústica é um mecanismo eficiente no monitoramento da dressagem tanto quanto para o processo de retificação, além de ajudar na obtenção de uma superfície topograficamente uniforme do rebolo.

A determinação do momento correto da dressagem é de fundamental importância, pois minimiza o tempo desta operação bem como evita a remoção excessiva de material do rebolo, e, portanto, reflete diretamente nos custos de produção.

4 Revisão Bibliográfica

4.1 Introdução

Atualmente, o mercado consumidor busca cada vez mais produtos com alta qualidade e preços competitivos. Para que as empresas permaneçam ou ainda aumentem sua participação neste mercado é preciso que tenham produtos com baixo custo de fabricação e com boa qualidade. A automatização nos processos produtivos, como por exemplo, a retificação e a operação de dressagem têm grande importância e podem contribuir significativamente para ganhos de produtividade, desempenho e qualidade.

Segundo Inasaki (1999), as três importantes características de um sistema de monitoramento são: detectar os problemas que ocorrem durante o processo; fornecer informação para otimizar o processo; e contribuir para se estabelecer um banco de dados necessário para determinar os parâmetros da usinagem.

Um dos grandes obstáculos para se obter automação de processos de usinagem em sistemas de manufatura flexível e integrada é o desenvolvimento do que pode ser chamado de usinagem não-assistida pelo homem. Isto significa ter um processo sem intervenção humana capaz de estabelecer o momento para a troca da ferramenta, fazer a própria troca da ferramenta e realizar mudanças nas condições de corte visando à sua otimização. Assim, o desenvolvimento de um sistema de monitoração e controle em tempo real é de fundamental importância (Aguiar *et al.*, 2002; Aguiar *et al.*, 2006).

Dressagem é o processo de condicionamento da superfície do rebolo visando sua remodelação quando o mesmo perdeu sua forma original pelo desgaste. O monitoramento online da operação de dressagem deve assegurar a qualidade final da superfície do rebolo e obter um acabamento superficial reproduzível (Xue *et al.*, 2002). Ainda, segundo Xue *et al.* (2002), o número de passes de dressagem depende do grau de carregamento do rebolo, tamanho dos grãos e do grau de desgaste a ser removido. Em geral, os efeitos das condições de retificação e dressagem anteriores podem ser eliminados através de três ou quatro

passes sucessivos. Erros de dressagem, no entanto, podem afetar diferentemente a qualidade da dressagem devido a flutuações da profundidade de dressagem real, desgaste do dressador e outros distúrbios. Essas condições indesejáveis podem ser detectadas por meio de um sistema online de monitoramento.

Técnicas de emissão acústica (EA) têm sido usadas para monitorar o processo de usinagem devido a sua característica não-intrusiva, facilidade na operação e rápida resposta dinâmica. O sensor de EA é pequeno e fácil para posicionar e o peso e tamanho da peça ou ferramenta não possui forte influência no efeito do sensor (Tsai & Hocheng, 2002). Adicionalmente, o sensor de potência de corte tem sido amplamente utilizado em pesquisas de retificação. O sinal pode ser monitorado pela corrente elétrica do motor elétrico de acionamento do rebolo ou pelo produto entre a tensão e corrente elétrica, que fornece a potência consumida pelo motor elétrico de acionamento do rebolo. Assim, uma estimativa da força de corte pode ser facilmente obtida se um modelo do motor elétrico for disponível (Aguiar *et al.*, 2002).

Os tópicos a seguir objetivam a formação de uma base teórica para o entendimento e aplicação na metodologia adotada neste estudo.

4.2 O Processo de Retificação

4.2.1 Introdução

Segundo König *apud* Severiano (2002) é difícil de ser determinado quando, pela primeira vez, foram usinados metais com remoção de cavaco. Certo é que, na Idade Antiga, os rebolos rotativos haviam sido usados para afiação de ferramentas e armas. No fim da antiguidade, o homem havia aprendido a usar a água como meio de acionamento para os rebolos. Com isto, já na Idade Média, iniciou-se a industrialização em pequenas escalas. Nas margens de rios e riachos, formaram-se verdadeiras comunidades de retificação. Nelas foram desenvolvidas as bases para uma tecnologia que, durante os séculos seguintes, se desenvolveu constantemente.

A Idade Moderna da usinagem com ferramentas de geometria de corte não definida inicia-se com a descoberta de ferramentas artificiais. Aproximadamente na metade do século XIX, na Europa, foram sintetizados os primeiros rebolos com abrasivos naturais. Em 1861, os americanos Acheson conseguem a sinterização do carboneto de silício. Com isso, iniciaram-se desenvolvimentos na área de materiais duros que até hoje não foram encerrados. Entre esses desenvolvimentos estão descobertas decisivas, como a sintetização do diamante artificial e do nitreto de boro cúbico (CBN). Ao passo que os desenvolvimentos de ferramentas e de máquinas-ferramentas já haviam sido submetidos pela pesquisa nas áreas da física, da química e da construção de máquinas, o desenvolvimento dos processos de fabricação, durante muito tempo, foi apenas apoiado no conhecimento do artesão (Severiano, 2002).

Dentre os principais processos de manufatura podemos destacar a retificação. Trata-se de um processo de acabamento muito utilizado na fabricação de componentes mecânicos de precisão. Entretanto, pode ser considerado como um processo de pouco domínio tecnológico se comparado aos processos convencionais de usinagem, além de ter a função de solucionar os problemas de qualidade e tempo de toda a seqüência de fabricação (Aguiar *et al.*, 2009; Dotto *et al.*, 2006; Aguiar *et al.*, 2005).

O processo de retificação visa melhorar o acabamento superficial e garantir a integridade das peças. Trata-se de um processo de alta precisão e importância, já que é inaceitável a perda de uma peça nesta etapa, pois o valor agregado ao material nesta fase já é muito elevado devido aos outros processos que o antecederam (Soares, 2002).

4.2.2 Principais Variáveis do Processo de Retificação

Segundo King & 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 reboło-peça. Os parâmetros de entrada típicos das máquinas

retificadoras são: velocidade de avanço, velocidade do rebolo, velocidade da peça e tempo de centelhamento. As variáveis do sistema são apresentadas no diagrama da Figura 1.

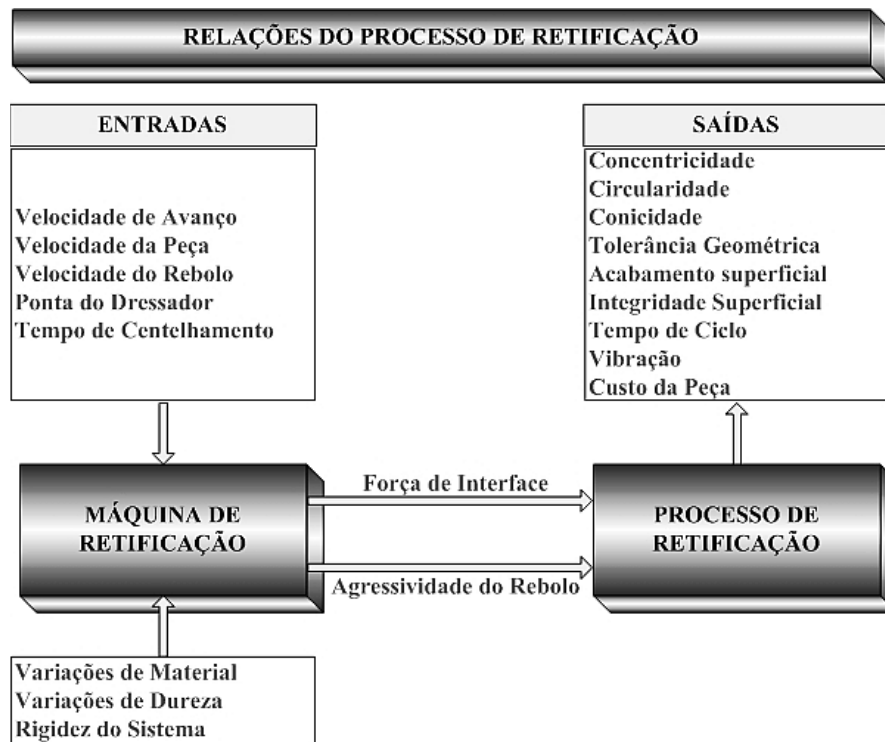


Figura 1. Variáveis de entrada e saída para máquinas e processos de retificação (Adaptado de King & Hahn, 1986)

Segundo Severiano (2002), teoricamente os problemas que se apresentam na retificação deveriam ter uma solução rápida através do estudo pormenorizado das variáveis envolvidas no processo de retificação. No entanto, isso não acontece na prática. O resultado desejado, em função do projeto da peça, de uma forma geral não pode ser obtido pela avaliação de um único parâmetro, mas sim por uma avaliação criteriosa da combinação de vários parâmetros simultaneamente.

O processo de retificação pode ser caracterizado por grandezas como as componentes da força de usinagem, a vida do rebolo (desgaste do grão abrasivo) e a temperatura. O resultado do processo deve ser avaliado em função da qualidade da superfície retificada e de aspectos econômicos, como custo de fabricação, que

estão diretamente ligados com a variável velocidade de remoção (Severiano, 2002).

4.2.3 Característica da Velocidade da Peça (V_w)

De acordo com Bianchi (1990), 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. Este comportamento pode ser observado com o auxílio do gráfico apresentado na Figura 2. 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 e devido ao 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, fato este também observado no gráfico apresentado pela Figura 2. 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.

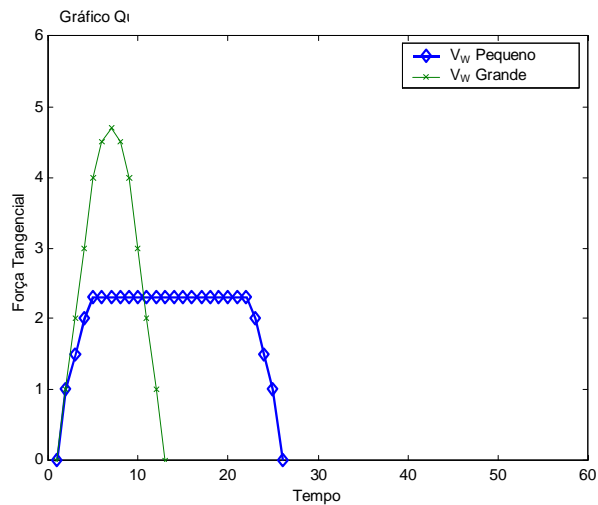


Figura 2 – Influência da velocidade da peça no tempo de contato e na força tangencial de corte (Aguiar, 1997)

4.2.4 Característica da Velocidade de Corte (V_s)

Segundo Bianchi (1990), 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 cavaco devido ao aumento da sua frequência de contato com a peça. Portanto, o número de grãos ativos é maior e 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, 1990).

4.2.5 Característica da Profundidade de Corte (a)

Segundo Bianchi (1990), 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 resultantes são mais alongados e finos. Há uma maior parcela de atrito e riscamento, desde o início da formação do cavaco até a sua expulsão. Desta forma, o atrito e o riscamento entre os cavacos removidos e a peça 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. Hassui (2002) apresentou em seu trabalho um modelo teórico para avaliar o empastamento do rebolo relacionando o mesmo com variáveis de processo. Este modelo baseia-se na adesão que ocorre na interface do grão abrasivo com o cavaco. O autor conclui que o empastamento aumenta com o aumento da profundidade de corte, mas não é influenciado pela velocidade da peça.

4.2.6 Espessura Equivalente de Corte (h_{eq})

De acordo com 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 teórico 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 pela Equação (1).

$$h_{eq} = \frac{aV_w}{V_s} \quad (1)$$

Onde: a : profundidade de corte;

V_w : velocidade periférica da peça;

V_s : velocidade periférica do rebolo.

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. A Figura 3 ilustra o parâmetro h_{eq} .

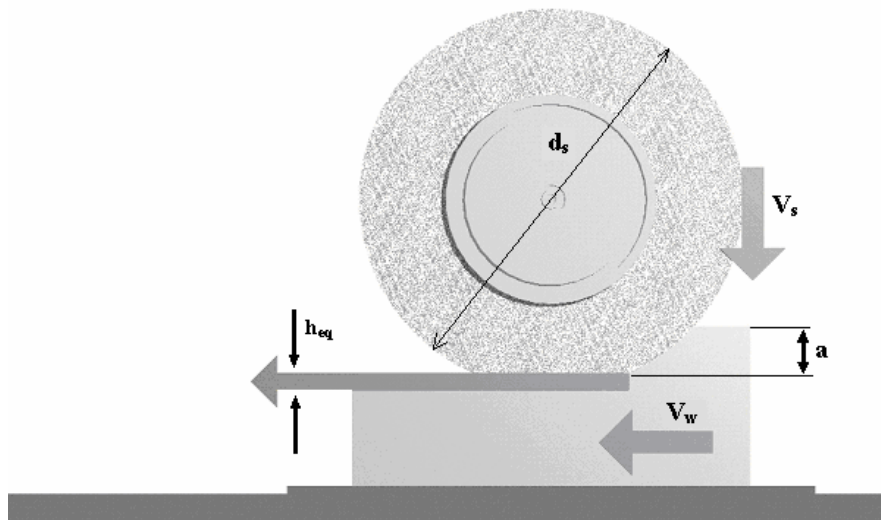


Figura 3 – Espessura de corte equivalente para uma operação tangencial plana (Adaptada de Aguiar, 1997)

4.2.7 Relação G

Segundo Bianchi (1990), 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 (2).

$$G = \frac{Z_w}{Z_s} \quad (2)$$

Onde: Z_w : volume de material retificado;

Z_s : volume de material do rebolo gasto.

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.

4.2.8 Ferramenta de Corte

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

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

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, e se foi tratado ou revestido. Segundo King & Hahn (1986), a dureza de um grão relativa à dureza do material a ser retificado é um fator determinante na capacidade do rebolo de remover tal material.

São necessárias cinco características para que se defina o tipo de rebolo: tipo de abrasivo; ligante; dureza dos grãos; granulometria e estrutura.

4.2.8.1 Tipos de Abrasivos

Os abrasivos são as ferramentas de corte da retificação. Podem ser subdivididos em 3 grupos: abrasivos naturais, abrasivos convencionais e superabrasivos (Krar, 1995).

4.2.8.1.1 *Abrasivos Naturais*

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

4.2.8.1.2 Abrasivos Convencionais

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 zircônio e carbetto 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. A alumina com zircônio é usada para desbaste de metais, particularmente metais ferrosos. Tem a maior resistência ao impacto dos abrasivos convencionais. Existem dois tipos básicos de alumina com zircônio: uma liga de 15% de zircônio e outra com maior percentagem de zircônio (comercialmente chamado de Norzon). O primeiro tem maior durabilidade e maior resistência ao impacto. O segundo é mais friável, com capacidade de microfratura e geração de novas superfícies agressivas. Alumina com zircônio não são geralmente usadas nas operações de acabamento devido a sua ineficiência sob forças pequenas.

O rebolo de carbetto 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 carbetto de silício: preto e verde. Carbetto de silício preto é menos puro, levemente mais durável, e geralmente mais barato que o tipo verde. Carbetto de silício verde tem pureza maior, é o abrasivo convencional mais agressivo e relativamente caro.

O carbetto 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 ocorre devido à composição química do abrasivo e o conteúdo de carbono dos aços e/ou a necessidade de resistência ao impacto na retificação dos mesmos.

4.2.8.1.3 Superabrasivos

Os superabrasivos são: diamante e CBN (Cubic Boron Nitride). O diamante está disponível tanto como abrasivo natural quanto abrasivo artificial. O

alto custo e disponibilidade limitada do diamante natural têm estimulado a sua troca pelo diamante artificial ou sintético. O diamante é usado para retificar carbetos, cerâmicas, vidros e outros materiais refratários. Há muitas formas e purezas de diamantes disponíveis. O CBN é um abrasivo artificial, sendo o segundo material mais duro conhecido. São usados para retificar materiais ferrosos, particularmente aços duros e ligas. Não é encontrado na natureza e é de duas a três vezes mais duro que o abrasivo de óxido de alumínio.

O termo “superabrasivo” é usado para diferenciar os abrasivos de diamante e CBN (nitreto de boro cúbico) dos “convencionais” carbetos 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.

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 (Hellmeister, 2004). Comparado ao diamante, o CBN tem resistência ao impacto, resistência ao calor e é quimicamente menos ativo (Khenaiques, 2006). Embora não sejam utilizados neste trabalho, os rebolos superabrasivos são de grande importância em qualquer estudo referente à retificação. A Tabela 1 mostra algumas características importantes de rebolos para diferentes tipos de abrasivos.

Tabela 1 – Propriedades de alguns materiais abrasivos (Malkin, 1989)

	MATERIAL			
	Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	Carbeto de Silício (SiC)	Nitreto de Boro Cúbico (CBN)	Diamante (C)
Estrutura Cristalina	Hexagonal	Hexagonal	Cúbica	Cúbica
Densidade (g/mm ³)	3.98	3.22	3.48	3.52
Ponto de Fusão	~ 2040 °C	~ 2830 °C	~3700 °C à 13 kbar (ponto triplo)	~ 3700 °C à 130 kbar (ponto triplo)
Dureza Knoop (kg/mm ²)	2100	2400	4700	8000

4.2.8.2 Ligantes

O ligante ou aglutinante tem a função de manter o grão preso, até que este esteja cego ou suficiente ou perca a capacidade de corte em decorrência do processo de usinagem. Segundo Stemmer (1992), o ligante deve satisfazer três exigências: deve ser suficientemente resistente; deve formar pontes entre grãos com seções transversais suficientemente grandes para suportar os esforços de corte entre o grão abrasivo e o ligante, e deve existir uma energia de ligação suficientemente elevada para garantir a fixação do grão.

Os ligantes são classificados em vitrificados, resinóides, galvânicos, entre outro.

4.2.8.3 Dureza

A dureza de um rebolo é a resistência oposta ao arrancamento dos grãos, ou seja, uma capacidade de reter os grãos. Essa capacidade depende do tipo de ligante, do tamanho do grão e dos vazios e da espessura das pontes de ligantes. Um rebolo macio solta facilmente os grãos e se desgasta mais rapidamente, logo, um rebolo duro retém fortemente os grãos abrasivos.

A dureza ideal a ser utilizada é aquela que os grãos gastos e arredondados

são arrancados por si só, de modo que o rebolo se reafia automaticamente, com mínima necessidade de utilizar a operação de re-afiação do rebolo (Krar, 1995).

4.2.8.4 Granulometria

As dimensões dos grãos e sua uniformidade são características importantes nos processos de usinagem com abrasivos. Grãos mais grossos são utilizados em rebolos para operações de corte e limpeza, enquanto os mais finos são utilizados para polimento e lapidação (Krar, 1995).

4.2.8.5 Estrutura

A estrutura do rebolo tem relação direta com a densidade e com o espaçamento médio entre os grãos abrasivos. A estrutura fechada é indicada pelos números 0, 1, 2, 3; a estrutura média pelos números 4, 5, 6; e de 7 a 12 a estrutura é aberta.

Uma estrutura fechada determina um aumento no número de arestas cortantes na periferia do rebolo. Rebolos com estrutura aberta oferecem mais espaços para alojamentos do cavaco reduzindo a tendência ao entupimento de porosidades.

A Figura 4 mostra a identificação padronizada de um rebolo convencional, o qual leva em conta as características do rebolo citadas anteriormente.



Figura 4 – Especificação de rebolos com abrasivos convencionais (Adaptada de Stemmer, 1992)

Na seleção do tipo de estrutura utilizada para cada operação, devem ser analisados três fatores: material a ser usinado, o acabamento desejado e o tipo de trabalho.

4.2.9 Distribuição de Energia na Retificação

A energia mecânica introduzida no processo pode ser dividida em quatro regiões conforme mostra a Figura 5. Em decorrência dos poucos gumes afiados, a maior parte da energia é transformada em energia térmica pelo atrito no flanco dos gumes e em deformação plástica na região superficial da peça. Além disso, tem-se a produção de calor ou a transformação de energia em calor, nas faces do grão, durante a remoção de cavaco propriamente dito. Por último, deve-se mencionar que uma parte da energia, principalmente quando se trata de rebolos ligados, é transformada em calor em decorrência do atrito do ligante sobre a

superfície da peça (König *apud* Severiano, 2002).

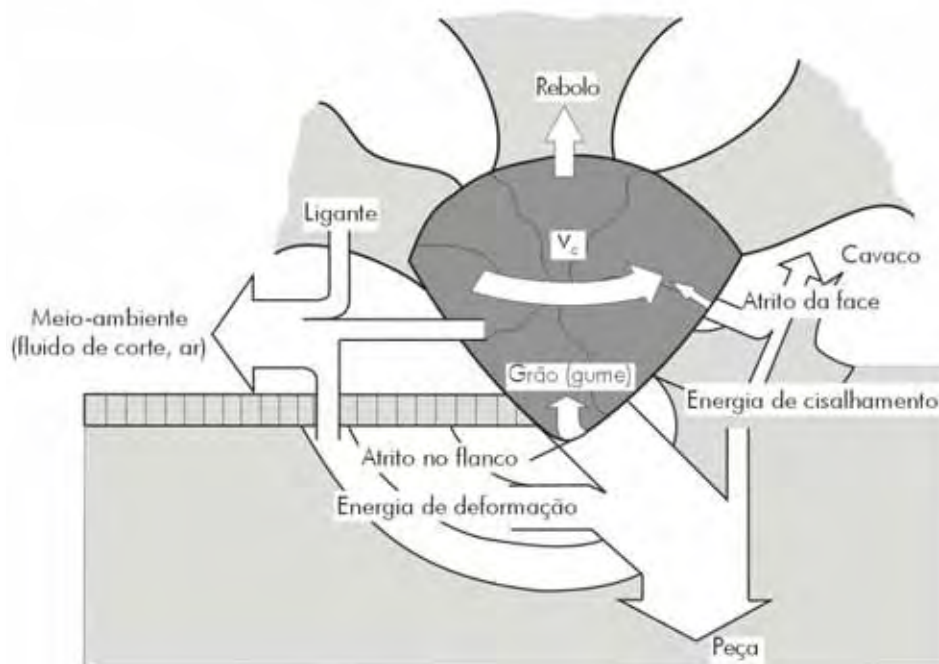


Figura 5. Distribuição de energia térmica na retificação (König *apud* Severiano, 2002)

Na usinagem com ferramentas de geometria não-definida, as principais fontes de calor se encontram abaixo do gume, de forma que a maior parte do calor, inicialmente, flui para dentro da peça e lá provoca um aumento localizado de temperatura. Esse aumento de temperatura pode, dependendo da sua ordem de grandeza e do tempo de atuação, provocar mudanças na estrutura cristalina do material da peça, bem como fenômenos de oxidação superficial da peça (camada termicamente afetada pelo calor). Pela utilização de fluidos de corte, é possível reduzir o tempo de atuação do calor e a magnitude do aumento de temperatura de uma maneira favorável. Assim, a lubrificação do fluido de corte leva a uma redução do atrito e, com isso, reduz a geração de calor, ao passo que o fluido, propriamente dito faz com que se dê uma remoção rápida do calor da peça. Além disso, a lubrificação traz outra vantagem como a redução do desgaste do grão abrasivo (König *apud* Severiano, 2002).

4.2.10 Desgaste do Rebolo

O desgaste do rebolo pode ser classificado em três tipos: abrasão do grão, fratura do grão e fratura do ligante. Todos os tipos de desgaste ocorrem simultaneamente em 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 do rebolo. Para operações típicas de retificação de precisão com rebolos convencionais (óxido de alumínio ou carbeto de silício) o custo do rebolo é geralmente insignificante, e 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 e isso conduz a temperaturas excessivas (Malkin, 1989).

Segundo Malkin (1989), restrições de desgaste do rebolo são freqüentemente associadas à rugosidade e tolerâncias necessárias. Com taxas de remoção maiores 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 menor friabilidade. Um fluido de corte melhor deve aumentar a relação G , diminuindo as forças e a temperatura.

O desgaste total do rebolo aumenta com o tempo de corte. Ele pode ser dividido em uma diminuição de raio e em desgaste 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 tipos 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

solicitação mecânica demasiada do ligante ou em decorrência da deterioração mecânica ou química do ligante.

A interligação desses dois tipos de desgaste caracteriza o comportamento de desgaste do rebolo. Fala-se em um efeito de auto-afiação quando as arestas cegas, em virtude de uma maior ação da força, quebram e permitem a ação de novos gumes.

4.3 A 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).

A operação conjunta de perfilamento e afiação dos rebolos convencionais na retificação é denominada dressagem (Sena, 2007; Marinescu *et al.*, 2007).

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. Isto resulta em um atrito excessivo e, conseqüentemente, uma geração de calor muito grande para a peça.

Na operação de dressagem 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. Cada tipo apresenta vantagens específicas.

As principais finalidades da operação de dressagem são: obtenção de concentricidade da face de trabalho do rebolo com o eixo de rotação; perfilamento da face de trabalho do rebolo para uma operação de forma; arrancamento dos

grãos abrasivos gastos para melhorar a agressividade da face de trabalho do rebolo.

Segundo Hassui (2002), a definição do momento correto de dressagem do rebolo é fundamental no processo de retificação. Isso pode ser feito de maneira conservadora, ou seja, antes do fim da vida do rebolo. Desta forma, ocorrerá um desperdício de abrasivo e principalmente, um aumento do tempo de processo, pelo maior número de dressagens realizadas. Vale lembrar que o tempo de corte na retificação normalmente é bastante curto em função dos baixos volumes de material removido. Por outro lado, uma utilização do rebolo além da sua vida poderá acarretar uma rejeição da peça retificada. Caso isso ocorra, o custo aumentará significativamente, já que as peças quando chegam neste estágio possuem alto valor agregado.

4.3.1 Ferramentas de Dressagem

Segundo Paula (2007), as ferramentas de dressagem se distinguem de acordo com o princípio cinemático de ação: ferramentas estáticas e ferramentas rotativas. Para as ferramentas estáticas, ao contrário das rotativas, não existe um movimento de rotação da ferramenta, 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 trabalho (b_d) que é maior ou igual à largura do rebolo (b_s). A velocidade de

penetração pode ser realizada por meio 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 durante a dressagem 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 seja, expulsos do ligante.

4.3.2 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. Grande número de trabalhos encontrados na bibliografia utiliza como variáveis do processo a profundidade de dressagem (a_d) e o passo de dressagem (S_d).

Segundo Thomazella *et al.* (2009), são dois os efeitos resultantes da operação de dressagem: o macroefeito e o microefeito.

O macroefeito é formado em função do formato do dressador, profundidade e passo de dressagem, formando uma “rosca” sobre a superfície do rebolo. Este efeito determina o posicionamento das arestas dos grãos abrasivos no rebolo. Por outro lado, o microefeito consiste no arrancamento dos grãos com baixa ancoragem na liga (desgastados), e fratura daqueles que não se desgastaram por completo, gerando novas arestas de corte. A agressividade das arestas depende das condições de dressagem e friabilidade do grão abrasivo. A Figura 6 representa

o esquema do processo de dressagem.

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, formação de lóbulos e de trepidação (Schwarz, 1999).

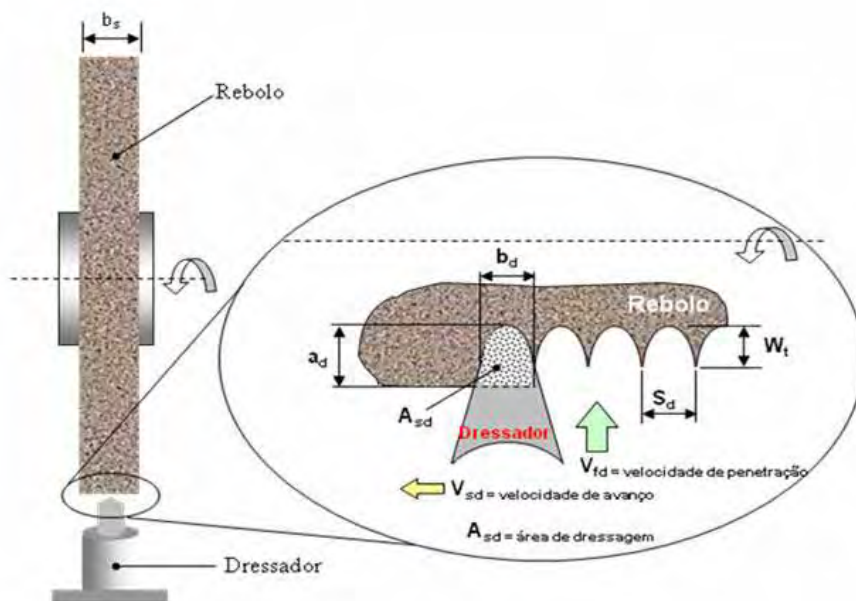


Figura 6 – Esquema do processo de dressagem (Adaptado de Bianchi, 1990)

4.3.3 Grau de Recobrimento (U_d)

Segundo Paula (2007), 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.

De acordo com Hassui & Diniz (2003) o grau de recobrimento (U_d) é definido pela Equação (3).

$$U_d = \frac{b_d}{S_d} \quad (3)$$

Onde: b_d : largura de atuação do dressador;

S_d : avanço do dressador por revolução do rebolo

Este parâmetro está diretamente relacionado com a afiação que o processo de dressagem produz no rebolo. O valor mínimo deste parâmetro deve ser 1, pois se fosse menor que 1 o dressador se moveria na direção do avanço em uma revolução mais do que a largura de atuação do rebolo. Desta forma, partes do rebolo não seriam dressadas.

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, é provocado um aumento na profundidade dos sulcos que, conseqüentemente, provocam 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 (Paula *et al.*, 2007).

4.4 Sinais de Emissão acústica e Potência de Corte na Retificação

Um dos métodos de monitoramento mais estudados em retificação nos últimos anos tem sido aquele que utiliza a análise do sinal de emissão acústica. O sinal de emissão acústica é o resultado de uma rápida liberação de energia que se propaga na forma de uma onda elástica longitudinal transiente em corpos sólidos e pode ser detectada por sensores de emissão acústica. Ela ocorre de modo semelhante em fluidos nos estados gasoso e/ou líquido. A fonte da emissão acústica em corpos sólidos pode ser um agente externo – impacto de um corpo externo sobre o corpo na qual está sendo verificada a emissão acústica – ou uma fonte interna – deformação plástica, fratura, formação de uma trinca, transformação de fase e outros (Sena, 2007; Liu *et al.*, 2006).

As ondas de emissão acústicas possuem freqüências na faixa de 50 kHz a 1000 kHz, o que supera a faixa de freqüência de muitos ruídos advindos de fontes

exteriores ao processo em análise. Por isto, é um método sensível e adequado para o monitoramento do processo de retificação (Sena, 2007).

Segundo Xue *et al.* (2002), os sensores de emissão acústica tem provado ser superiores a outros sensores no processo de retificação, tais como os sensores de força e de corrente. Além disso, o custo do sensor de emissão acústica é muito menor e mais fácil de posicioná-lo no processo.

Sensores de emissão acústica têm sido utilizados na detecção de contato entre o rebolo e dressador (Oliveira *et al.*, 1994; Karpuschewski & Inasaki, 2000), no monitoramento da profundidade de dressagem (Inasaki, 1985), monitoramento da ponta do dressador (Inasaki, 1985; Webster *et al.*, 1994) e no diagnóstico de falhas na dressagem (Karpuschewski & Inasaki, 2000; Konig & Meyen, 1990; Kwak & Ha, 2004; Lee *et al.*, 2006).

Por outro lado, o consumo da potência de usinagem e as forças de retificação são parâmetros característicos da transferência de energia na área de contato (Brinksmeier *et al.*, 1998). De acordo com Kwak & Ha (2004), a potência de usinagem tem sido usada como uma forma de monitoramento do processo de retificação. Chen *et al.* (1996) reportaram que o efeito das condições de retificação na força de corte e potência está relacionado com a espessura do cavaco, e observou-se que a força de corte e potência podem estar relacionados com a operação de dressagem considerando a densidade efetiva das arestas de corte na superfície do rebolo.

Kwak & Ha (2004) reportaram que o sinal de potência de corte observado consiste da potência estática e dinâmica, sendo que a primeira é a potência do ponto de início ao ponto de acomodação de acordo com o eixo vertical e apresenta um nível absoluto de potência gerado na zona de usinagem. Já a potência dinâmica é uma componente de potência de alta frequência e flutua em torno do nível da potência estática. Normalmente, a potência estática permanece constante com uma pequena variação do processo, mas quando uma falha ocorre o nível desta potência é alterado. Na ocorrência de vibração e queima, a potência estática e dinâmica uma amplitude bem diferente daquela do estado normal de operação. Assim, estados de usinagem podem ser detectados pelo monitoramento da

potência estática e dinâmica.

4.5 Parâmetros Estatísticos usados na Retificação

Muitas informações úteis acerca do processo de retificação são fornecidas pelos sinais de emissão acústica e potência de corte. No entanto, análises mais refinadas podem ser realizadas pelo tratamento desses sinais com técnicas estatísticas e formas de tratamento de sinais, a fim de possibilitar a interpretação correta do sinal de EA, de potência, ou de ambos atuando conjuntamente. Os parâmetros estatísticos de interesse deste trabalho envolvendo EA e potência de corte são apresentados a seguir.

4.5.1 Valor RMS do Sinal de Emissão Acústica

Entre certo intervalo Δt , o valor RMS do sinal puro de emissão acústica pode ser expresso pela Equação (4) (Kim *et al.*, 2001).

$$AE_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} AE^2(t) dt} \quad (4)$$

Onde: ΔT : constante de integração;
 AE : sinal puro de emissão acústica;

Tipos diferentes de tratamento de sinais podem ser aplicados ao sinal de emissão acústica, os quais podem estar disponíveis na saída do sistema de monitoramento. Os parâmetros mais importantes são o valor médio quadrático (RMS), o sinal puro, e análise de frequência. O valor RMS possui informação essencial acerca das condições do processo e pode ser considerado como uma quantidade física de intensidade do sinal acústico. Ele está diretamente relacionado com as forças (cargas) aplicadas no material, e, portanto, faz dele um sinal atrativo para muitos tipos de monitoramento. Entretanto, o sinal RMS é considerado um valor estatístico médio porque geralmente se utiliza um filtro

passa-baixa no sinal puro de EA para a sua obtenção. Se efeitos transitórios rápidos são de interesse de estudo, como os contatos dos grãos abrasivos, o sinal de EA puro sem qualquer filtro é mais atrativo. Avaliações no domínio da frequência são usadas para identificar padrões dominantes, que podem estar relacionados com condições específicas do processo como as vibrações auto-excitadas (Marinescu *et al.*, 2007).

4.5.2 Parâmetro DPO

Aguiar *et al.* (2002) tem demonstrado que o sinal RMS de emissão acústica e o sinal da potência de corte, combinados, podem fornecer parâmetros expressivos para a indicação da queima da peça na retificação plana. Sua configuração utilizou um sensor fixo de EA acoplado próximo da peça e um sensor de potência elétrica do motor de acionamento do rebolo para as medidas da força de corte. Da combinação entre os sinais, Aguiar *et al.* (2002) obtiveram um parâmetro indicativo para a queima da peça, denominado DPO, que consiste da relação entre o desvio padrão do sinal RMS de emissão acústica e a potência média de corte por passada do rebolo. O parâmetro DPO pode ser calculado conforme a Equação (5).

$$DPO = S(EA).MAX(POT) \quad (5)$$

Onde: $S(EA)$: desvio padrão do sinal de emissão acústica por passada [V];

$MAX(POT)$: potência máxima por passada [W].

4.5.3 Parâmetro DPKS

O parâmetro DPKS, desenvolvido por Dotto *et al.* (2006), surgiu da necessidade de se aumentar a sensibilidade do parâmetro DPO, entretanto, sem necessariamente se preocupar com a sua amplitude e sim com a variação entre as passadas. Por meio deste parâmetro, foi encontrado o momento exato onde a queima teve início num ensaio com várias passadas, aprofundando o rebolo

constantemente.

O DPKS é calculado pelo desvio padrão da emissão acústica multiplicado pela somatória da potência subtraída do seu desvio padrão elevado à quarta potência, e pode ser representado conforme a Equação (6).

$$DPKS = \left(\sum_{i=1}^{i=m} (POT(i) - S(POT))^4 \right) * S(EA) \quad (6)$$

Onde: i : índice da potência que varia de 1 até m pontos de cada passada;

m : número de pontos da passada;

$POT(i)$: valor instantâneo da potência;

$S(POT)$: desvio padrão da potência na passada;

$S(EA)$: desvio padrão da Emissão Acústica RMS da passada.

4.5.4 Parâmetro FKS

O parâmetro FKS é calculado pela máxima força de corte por passada dividida pelo produto da estatística *kurtosis* e *skewness*, ambas aplicadas ao sinal RMS de emissão acústica obtido por passada do rebolo (Aguiar *et al.*, 2005; Dotto *et al.*, 2006). A equação 7 representa o parâmetro FKS.

$$FKS = \frac{Fc_{max}}{skew(EA)kurt(EA)} \quad (7)$$

Onde: Fc_{max} é a força máxima de corte na passada;

$skew(EA)$: é a estatística *skewness* do sinal RMS de EA / passada;

$kurt(EA)$: é a estatística *kurtosis* do sinal RMS de EA / passada;

5 Material e Métodos

Para a realização deste trabalho foi necessária a elaboração de uma pesquisa experimental, selecionando-se um dentre os vários processos de usinagem existente, selecionando o material para o desgaste do rebolo, o tipo de rebolo e as condições de usinagem dos ensaios.

Após seleção dos parâmetros, procedeu-se à aquisição dos dados proveniente dos ensaios utilizando um software específico, efetuando-se posteriormente o tratamento das informações obtidas no referido software para a obtenção dos parâmetros de detecção da boa dressagem.

As etapas descritas a seguir foram seguidas ao longo do desenvolvimento da parte experimental do presente trabalho para que o objetivo principal deste trabalho fosse alcançado.

5.1 Escolha do Tipo de Operação de Retificação

As operações de retificação são classificadas por seis possíveis variações conforme norma alemã DIN 8589, parte 11: Retificação plana, retificação cilíndrica, retificação de rosca, retificação de geração de perfil guia, retificação de geração de perfil, e cópia de perfil por retificação (Sena, 2007).

O processo de retificação plana é um dos mais utilizados nas indústrias dependentes de processos de usinagem por abrasão. Sendo assim, optou-se pela retificação plana para realização dos ensaios em função de sua importância no processo produtivo e facilidade de fixação do sensor de emissão acústica. No entanto, uma máquina retificadora cilíndrica poderia ter sido utilizada nos ensaios sem comprometer a metodologia empregada neste trabalho.

Os estudos foram conduzidos em uma máquina retificadora tangencial plana da fabricante SULMECÂNICA. Esta máquina retificadora contém uma base magnética para fixação da peça e controle de velocidade tangencial (V_w). Na retificadora estão acoplados dois motores:

- ✓ Motor de Rotação do Rebolo: motor de 2 pólos, controlado pelo inversor de frequência WEG, modelo CFW-02, de 380V e 7,5cv. Este motor é responsável pela velocidade tangencial do rebolo (V_s).
- ✓ Motor do Fuso: controlado pelo inversor de frequência WEG, modelo CFW-02, de 5,0cv. Este motor é responsável pela velocidade do fuso (deslocamento transversal), acionado para fazer a dressagem.

5.2 Escolha do Rebolo

Os rebolos são freqüentemente escolhidos para uma determinada operação de retificação a partir de experiências vividas anteriormente pelo usuário e ou fornecedor. Entretanto, pode-se ter uma melhor oportunidade de acerto se forem observadas algumas orientações básicas como a correta determinação do tipo de grão abrasivo, granulometria, ligante, dureza e a porosidade do rebolo.

Neste trabalho, escolheu-se um rebolo convencional de óxido de alumínio de granulometria média e dureza macia visando obter, de maneira mais fácil, o desgaste do rebolo para os ensaios de dressagem. Foi selecionado um rebolo do fabricante Norton, conforme especificações constantes na Tabela 2.

Tabela 2 – Rebolo utilizado nos ensaios experimentais

REBOLO DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO (ART-FE-38A80KVS)	
Fabricante	Norton
Dimensões iniciais	355,2x25,4x31,75mm
ART	Tipo Reto
FE	Ferramentaria
38A	Rebolo de óxido de alumínio, indicado para aços sensíveis à queima
80	Granulometria média
K	Dureza (Macio)
VS	Liga vitrificada silicosa

5.3 Fluido de Corte

Todos os ensaios de dressagem foram realizados com a presença de fluido de corte para fins de lubrificação e refrigeração do conjunto.

O composto usado foi de uma emulsão com 4% em volume de óleo lubrificante e o restante de água, valor este largamente difundido nas operações de retificação nas empresas.

A importância da conservação desta proporção está relacionada à função de cada um de seus componentes, sendo a água responsável pela refrigeração e o óleo pela lubrificação. Para a manutenção deste valor sempre constante, visto que com os ensaios um grande volume de fluido se perdia, seja por evaporação ou por pequenos vazamentos, a cada reposição de solução no reservatório de fluido era feita a medição da concentração da solução. Para isto utilizou-se um refratômetro da marca Atago, modelo N1-E, mostrado na Figura 7.

A medição pôde ser feita pela observação contra a luz, em uma escala graduada, de uma pequena amostra da solução colhida com o auxílio de uma pipeta e espalhada sobre a lente do aparelho.

O óleo da marca Shell, tipo DMS 3200 F-1, foi usado na preparação da solução.



Figura 7 – Refratômetro utilizado na medição da concentração do fluido de corte

5.4 Sensor de Emissão Acústica

O sensor de emissão acústica usado foi um sensor de alta sensibilidade da marca Sensis. Seu posicionamento, para correta aquisição dos ensaios, foi no suporte do dressador. Devido à elevada sensibilidade do sensor foi preciso ajustes no módulo responsável pela amplificação e filtragem do sinal de maneira que se permitisse leitura satisfatório do sinal de emissão acústica nas condições mais brandas de ensaio (profundidades de corte de $5\mu\text{m}$) bem como nas condições mais severas sem ocorrer à saturação do sinal. A Figura 8 apresenta uma fotografia retirada em laboratório demonstrando a posição de fixação do sensor.



Figura 8 – Posicionamento do sensor de emissão acústica sobre a bancada de ensaios

O sinal colhido no sensor era transmitido até o módulo de aquisição, também da marca Sensis, modelo DM42, conforme apresentado na Figura 9.



Figura 9 – Módulo de monitoramento de EA do fabricante Sensis

As configurações que melhores atenderam as condições de usinagem, e, portanto, utilizadas no módulo de EA são apresentadas conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados na aquisição do sinal de EA

PARÂMETROS DO MÓDULO DE EA	
Fabricante	Sensis
Modelo	DM42
Ganho de Sinal	1
Ganho de Entrada	1
Redução de Ruído	0
Filtro Passa Alta	500 Hz
Filtro Passa Baixa	Sem filtro passa baixa
Constante de Tempo	1ms

5.5 Sensor de Potência Elétrica

Para a medição de potência elétrica do motor de indução trifásico de 7,5cv, responsável pelo acionamento do eixo árvore da retificadora, utilizou-se um

sensor de corrente de efeito Hall do fabricante Nana Eletronics Co. Ltd, bem como um transdutor de tensão de efeito Hall LV 25-P do fabricante LEM Components.

A corrente e a tensão do inversor de frequência foram monitoradas por um módulo desenvolvido pelo Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais (LADAPS), da UNESP de Bauru. O módulo converte os valores na potência conforme a Equação (8).

$$P_{elétrica} = 1341,1 * V - 7,5 \quad (8)$$

Onde: V: tensão de saída do módulo, em Volts;

$P_{elétrica}$: potência elétrica ativa do motor, em Watts.

Neste trabalho a potência elétrica do motor de acionamento do rebolo foi utilizada no lugar da potência ou força de corte, pois ela representa bem o comportamento dessas grandezas com as devidas proporções. Além disso, os parâmetros que utilizam esta variável na sua determinação serão analisados em relação a sua tendência e não em relação aos seus valores absolutos.

5.6 Sistema de Aquisição de dados

Para a aquisição dos sinais provenientes dos sensores de emissão acústica e potência foi utilizada uma placa de aquisição de dados, DAQ, com 16 bits de resolução, do fabricante National Instruments, modelo PCI 6035E, com máxima frequência de amostragem de 200 mil amostras por segundo, instalada no interior de um computador dedicado a realização dos ensaios. A taxa de amostragem utilizada para os sinais foi de 4000 amostras por segundo. Os sinais dos sensores de emissão acústica e de potência entravam no bloco terminal NI BNC-2110 da National Instruments, o qual efetuava a interface dos módulos com a placa de aquisição.

Os arquivos gerados pela aquisição dos dados de emissão acústica e

potência foram obtidos com o auxílio do software “Dressing Analysis”, desenvolvido pelo Grupo de Usinagem por Abrasão da Faculdade de Engenharia da UNESP, Campus de Bauru. Este software possui muitas funcionalidades, sendo que as seguintes foram utilizadas neste trabalho: coleta dos dados de potência elétrica e emissão acústica durante os ensaios; armazenamento em arquivos de dados; filtragem dos sinais através da escolha de filtros; extração das passadas (Dotto *et al.*, 2007); cálculo dos parâmetros estatísticos estudados para a detecção da boa dressagem; visualização gráfica dos parâmetros estatísticos para comparação.

A Figura 10 ilustra duas janelas do software utilizado.

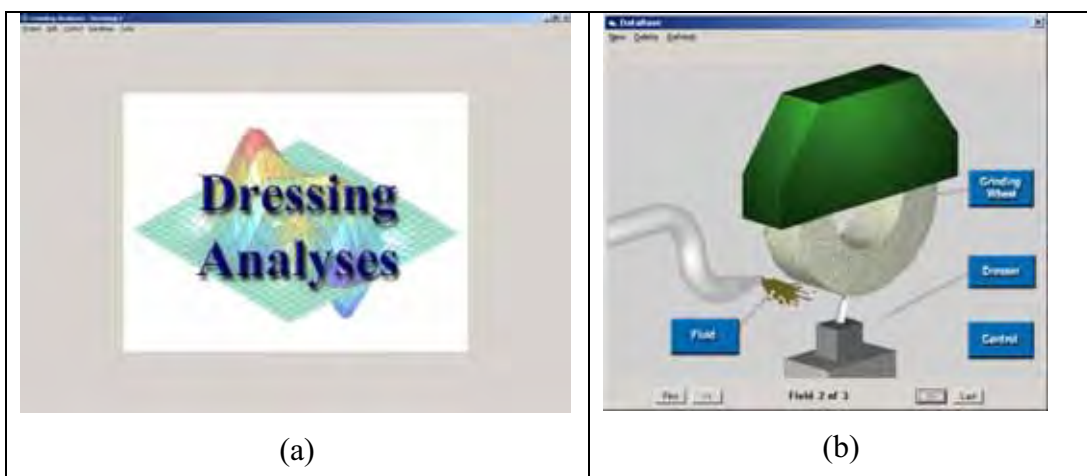


Figura 10 – (a) Janela principal do software; (b) Janela de base de dados (Dotto *et al.*, 2007)

5.7 Ensaios Experimentais

Os ensaios experimentais realizados neste trabalho visaram, principalmente, à aquisição dos sinais de emissão acústica e potência elétrica do motor de acionamento do rebolo durante a operação de dressagem, para posterior análise do comportamento dos parâmetros estatísticos de dressagem. O esquema do banco de ensaios utilizado é ilustrado na Figura 11.

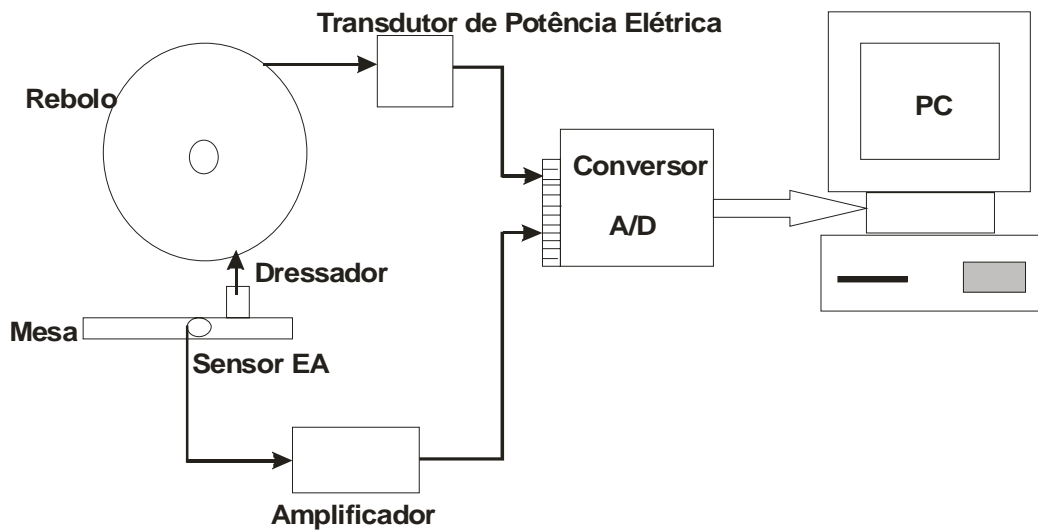


Figura 11 - Esquema do banco de ensaios

Para que um ensaio seja completo e obtenha sucesso, as seguintes etapas foram seguidas: ajustes iniciais, correto posicionamento dos equipamentos, operação de retificação para desgaste do rebolo, e por fim a operação de dressagem propriamente dita.

Inicialmente, o rebolo é utilizado para uma operação de retificação com ausência de fluido refrigerante a fim de que seja atingido um alto grau de desgaste do mesmo. O corpo de prova de aço ABNT 1020 é retificado até que seja observada a queima da superfície da peça de trabalho, conforme mostra a Figura 12.



Figura 12 - Operação de retificação sem fluido de corte para o desgaste do rebolo

Após a operação de desgaste do rebolo, o ensaio de dressagem propriamente dito é iniciado com a medição e ajustes dos seguintes parâmetros: velocidade do dressador, velocidade periférica do rebolo, diâmetro do rebolo e determinação da largura de atuação do dressador (b_d). A largura de atuação do dressador foi realizada utilizando-se um projetor de perfis da marca Nikon, modelo 6C, localizado no laboratório de Metrologia da UNESP – Campus de Bauru, e equipado com uma lente que permite o aumento de 1000 vezes a superfície.

Com a exceção do diâmetro do rebolo, para os quatro ensaios realizados, os demais parâmetros permaneceram constantes. A Tabela 4 mostra as condições de usinagem utilizadas nos ensaios de dressagem.

Tabela 4 – Parâmetros de usinagem

PARÂMETROS DE USINAGEM DO BANCO DE ENSAIOS	
Velocidade Periférica do Rebolo (V_s)	30 m/s
Velocidade do dressador	36,81 mm/s
Quantidade de Passadas	21
Tipo de Fluido Refrigerante	Emulsão Água-óleo 4 %
Rebolo	ART-FE-38A80KVS – Norton
Diâmetro inicial do Rebolo	355,2mm
Largura Original do Rebolo	31,75mm
Grau de Recobrimento (U_d)	1

O ensaio propriamente dito é iniciado com uma profundidade de dressagem de 0 μm . A cada passe a profundidade de dressagem é aumentada de 5 μm , precisão mínima da máquina, até que seja atingida a profundidade total de 105 μm (21 passes de dressagem), profundidade na qual o rebolo dever estar em boa situação de dressagem, pois de acordo com Xue *et al.* (2002) os efeitos das condições de retificação e dressagem anteriores podem ser eliminados através de três ou quatro passes sucessivos. O avanço do dressador foi feito manualmente na retificadora.

Todo o procedimento descrito anteriormente foi repetido para cada novo ensaio, onde a largura do dressador foi medida e a velocidade transversal da mesa (do dressador) ajustada para se manter o grau de recobrimento (U_d) constante.

5.8 Determinação dos Parâmetros Estatísticos de Dressagem

Utilizando o software “Dressing Analysis” na função de processamento de dados on-line, realizou-se a determinação dos parâmetros estatísticos DPO, DPKS e FKS descritos na revisão bibliográfica. Esses parâmetros foram escolhidos em função da sua eficácia na detecção da queima no processo de retificação (Aguiar *et al.*, 2002; Dotto *et al.*, 2006; Aguiar *et al.*, 2005). Além disso, espera-se que esses parâmetros respondam bem na detecção de boa dressagem, pois eles

aproveitam conjuntamente a característica de variação do sinal RMS de emissão acústica e a previsibilidade do sinal de potência durante o processo.

Vale ressaltar que as principais fontes de emissão acústica no processo de retificação são: impacto elástico, riscamento sem remoção de cavaco, remoção de cavaco, quebra de cavaco, fratura de grão, fratura do ligante, rachaduras, e indução térmica de mudanças estruturais (Schuhli, 2007). Assim, o sinal de EA deve possuir, portanto, informações importantes sobre o processo de dressagem, e contribuir significativamente na detecção da boa dressagem.

6 Resultados e Discussão

Nesta seção são apresentados os diversos resultados dos parâmetros estatísticos de dressagem obtidos do processamento de sinais, através do software “Dressing Analysis”, e as devidas discussões sobre os resultados obtidos.

Como já mencionado, quatro ensaios de dressagem foram realizados, e cada ensaio foi finalizado apenas quando se atingia a profundidade de corte de 105 μm , que em termos práticos é uma profundidade considerada plenamente satisfatória para a restauração da agressividade da superfície do rebolo. Para a análise dos resultados, foram descartados os sinais de *sparkout* (passada ocorrida no retorno do dressador sem qualquer avanço).

Depois de certo número de passadas, o dressador remove todo o cavaco impregnado no rebolo. A partir daí, cada passe remove apenas material do próprio rebolo, o que mantém o nível dos sinais de potência e emissão acústica constantes e elevados. Considerando que no último passe o rebolo já está dressado, uma análise do nível do sinal de emissão acústica das passadas anteriores possibilita a determinação de quando a boa dressagem de fato ocorreu, ou seja, quando a dressagem poderia ter sido finalizada.

Para o controle *on-line* do processo, a dressagem é finalizada quando o parâmetro escolhido supera um nível pré-estabelecido, caracterizando que o dressador a partir deste ponto estaria removendo material em excesso do rebolo.

As figuras de 13 a 24 apresentam o sinal RMS de emissão acústica, potência elétrica do motor de acionamento do rebolo, e do parâmetro calculado para cada um dos ensaios realizados.

Deve-se notar que a partir do software “Dressing Analysis” três gráficos foram gerados para cada teste, sendo que: o gráfico superior representa o sinal RMS de emissão acústica, incluindo as passadas correspondentes ao “spark-out”; o gráfico intermediário representa o sinal de potência do motor, incluindo também as passadas de “spark-out”; o gráfico inferior representa o resultado por passada do parâmetro escolhido.

O eixo vertical desses gráficos corresponde à magnitude dos sinais dos parâmetros calculados em Volts multiplicados por uma constante, enquanto que o eixo horizontal corresponde ao numero de pontos (amostras) coletados ou numero de passadas. A linha tracejada corresponde ao ponto onde a boa dressagem foi considerada, partindo da estabilização de um determinado nível do sinal RMS de emissão acústica nas passadas subseqüentes.

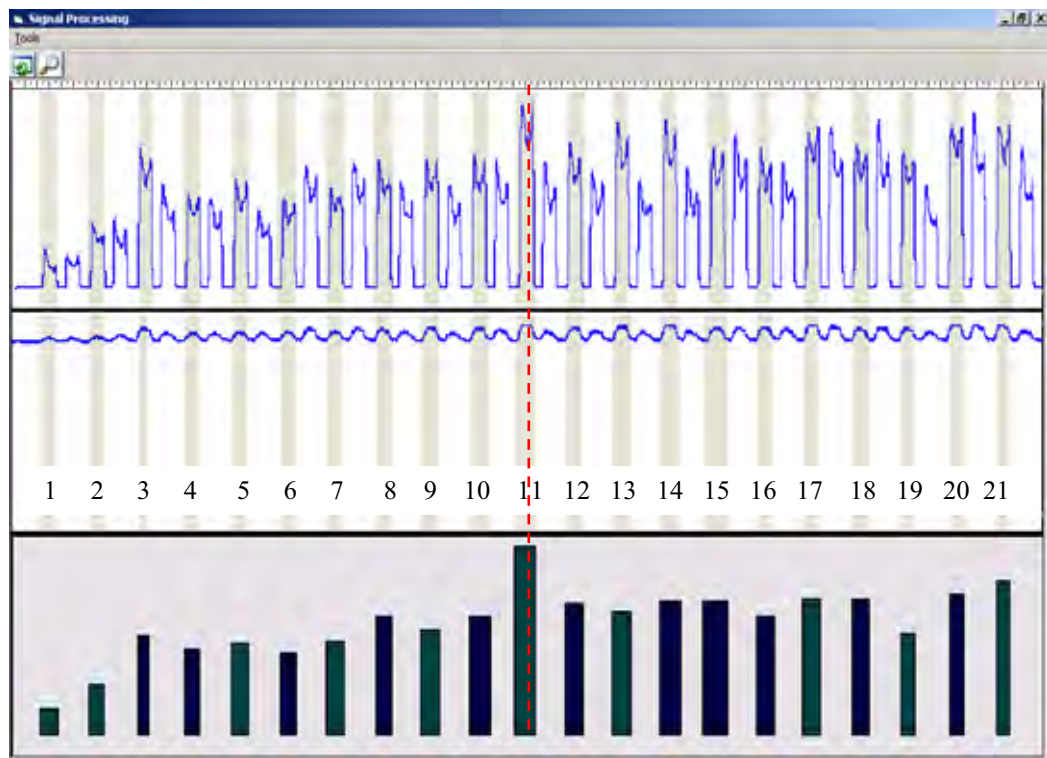


Figura 13. Cálculo do parâmetro DPO para o ensaio 1

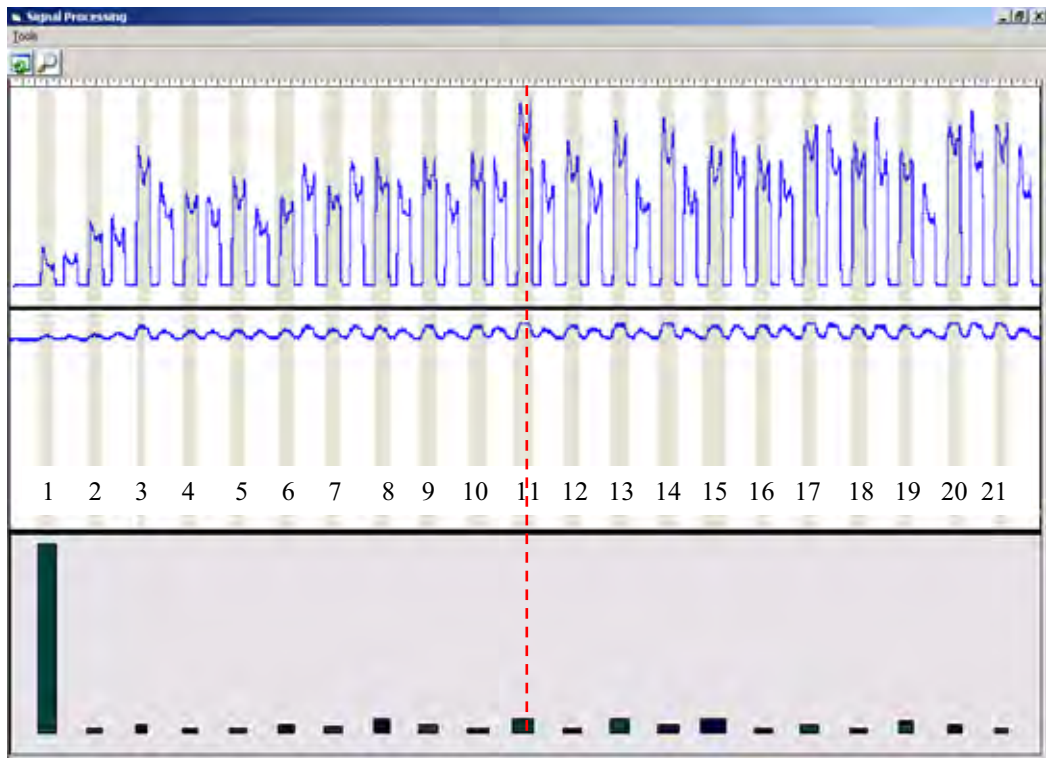


Figura 14. Cálculo do parâmetro FKS para o ensaio 1

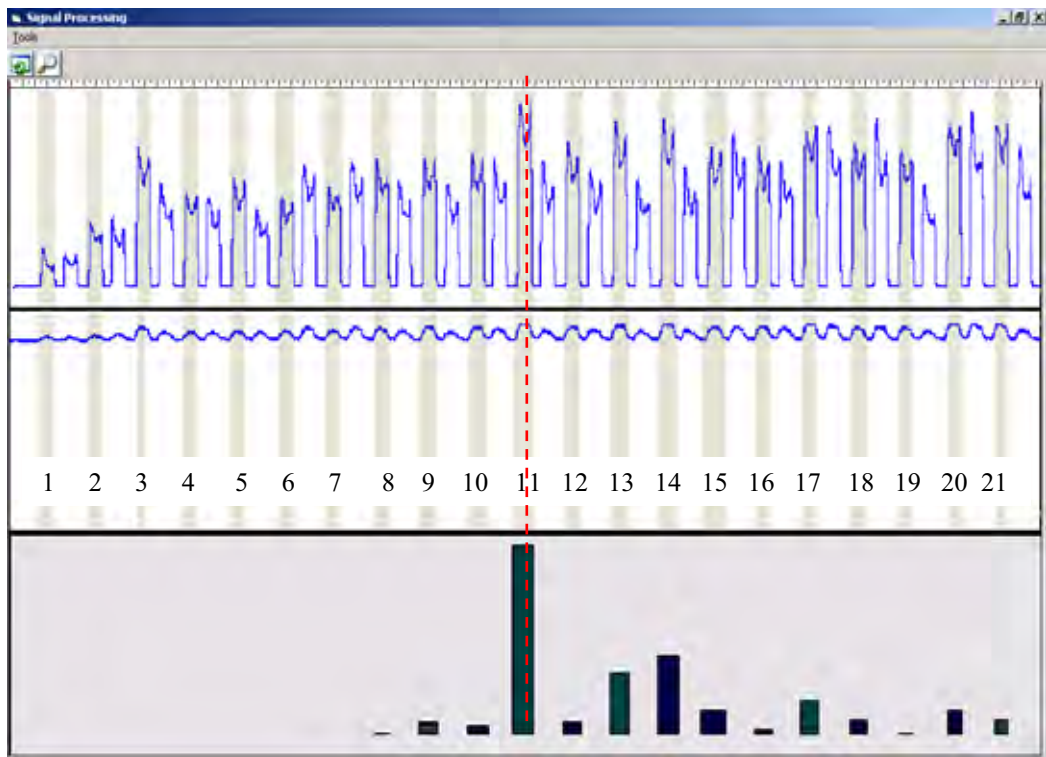


Figura 15. Cálculo do parâmetro DPKS para o ensaio 1

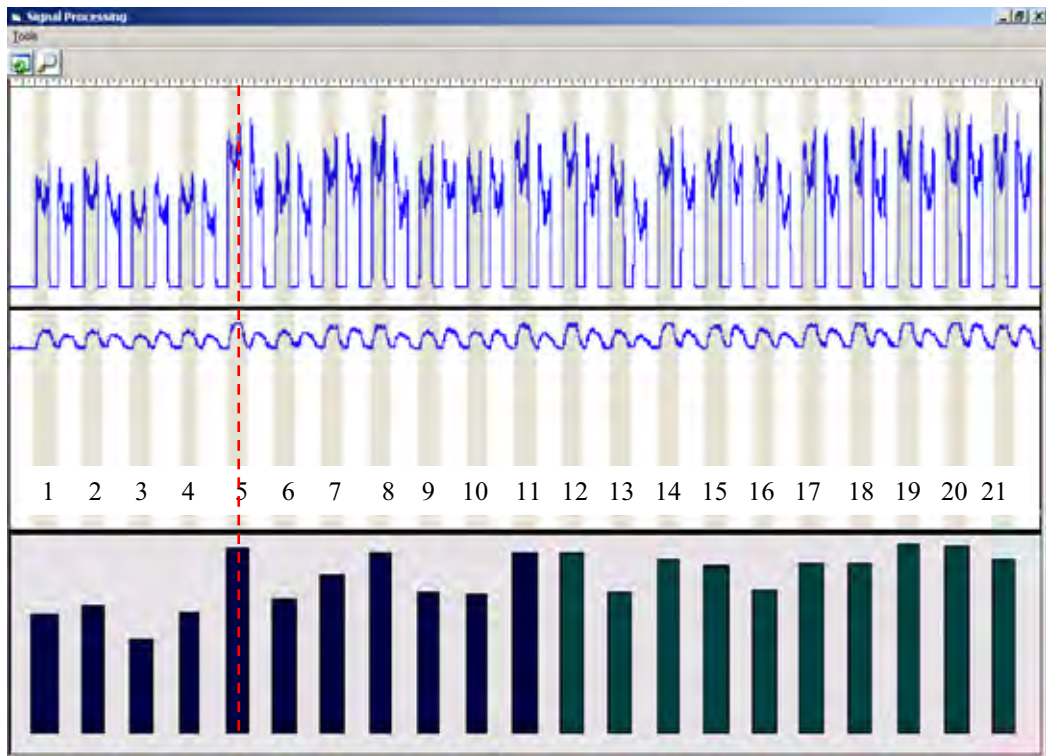


Figura 16. Cálculo do parâmetro DPO para o ensaio 2

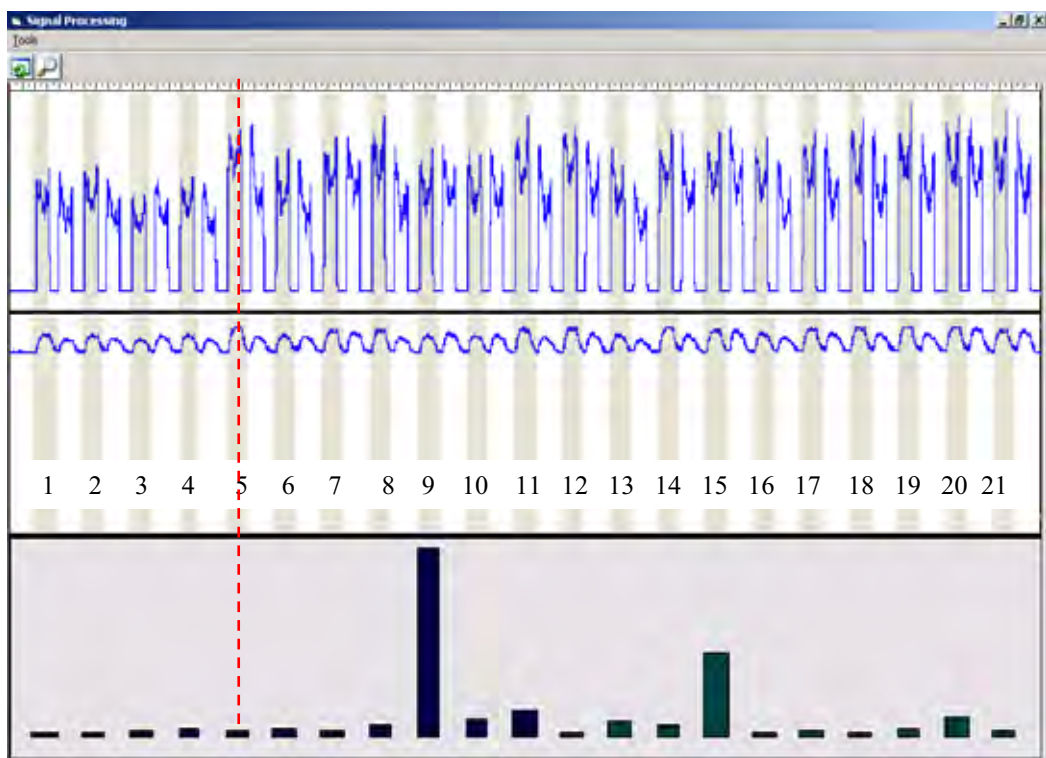


Figura 17. Cálculo do parâmetro FKS para o ensaio 2

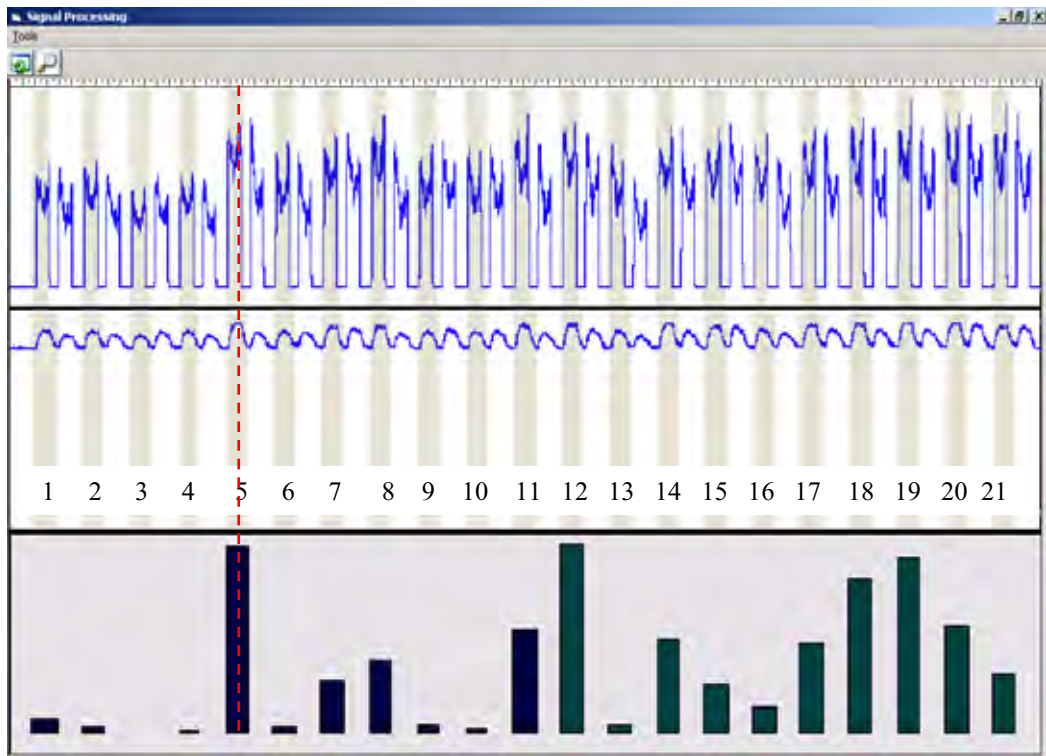


Figura 18. Cálculo do parâmetro DPKS para o ensaio 2

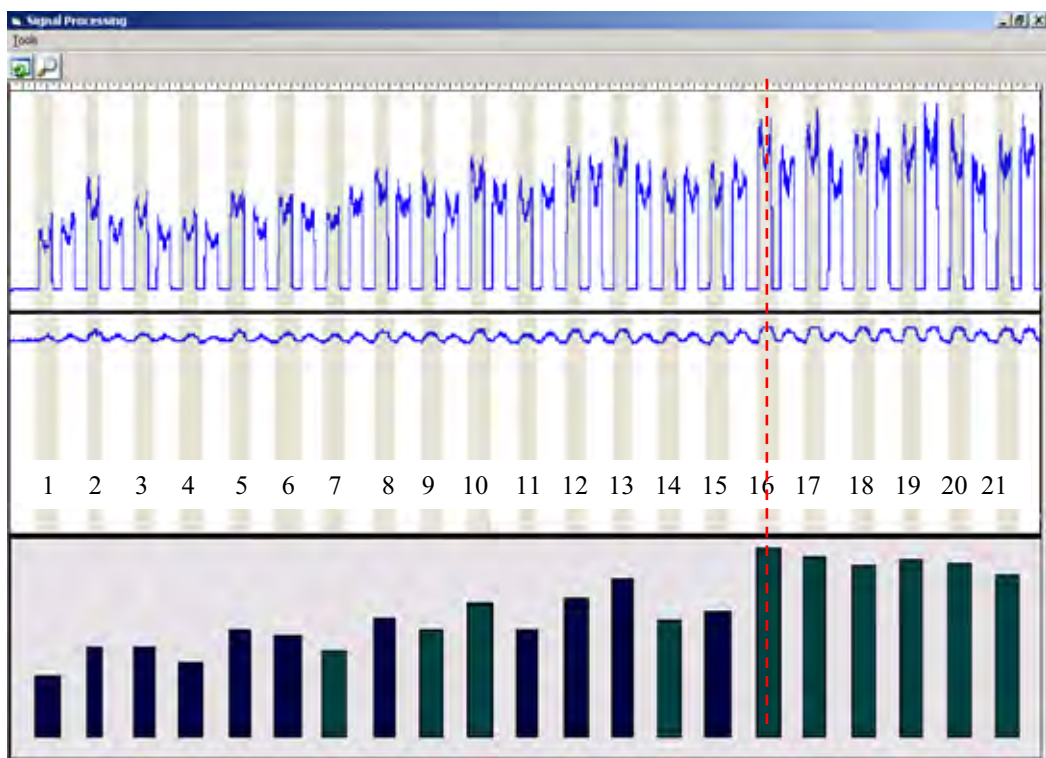


Figura 19. Cálculo do parâmetro DPO para o ensaio 3

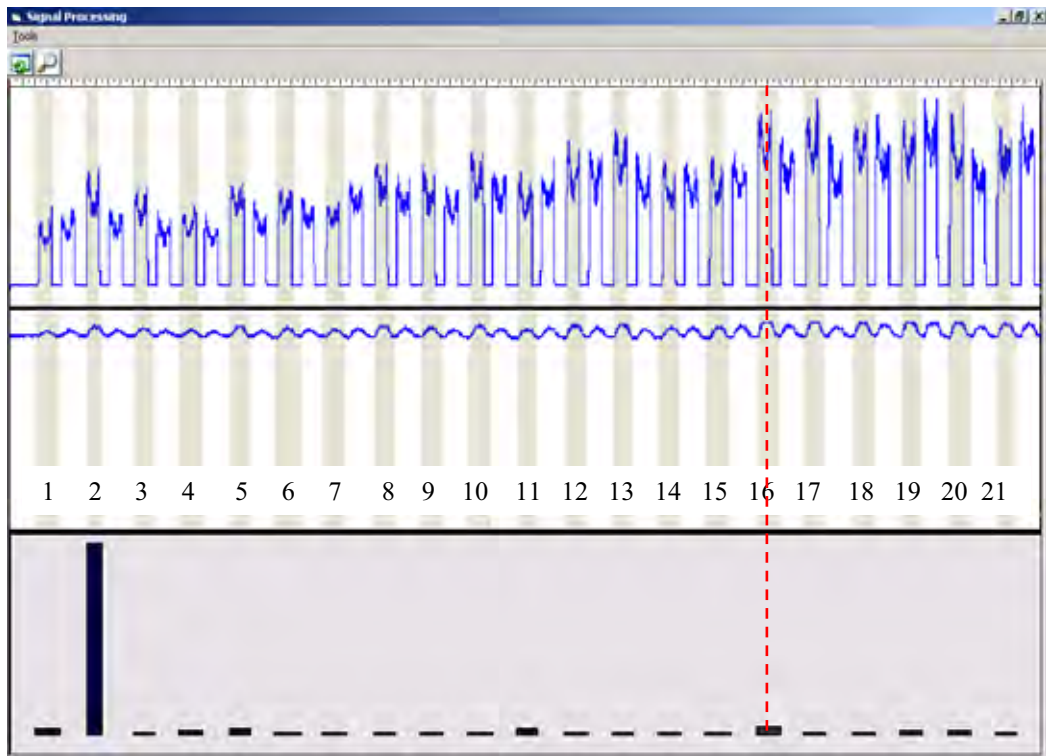


Figura 20. Cálculo do parâmetro FKS para o ensaio 3

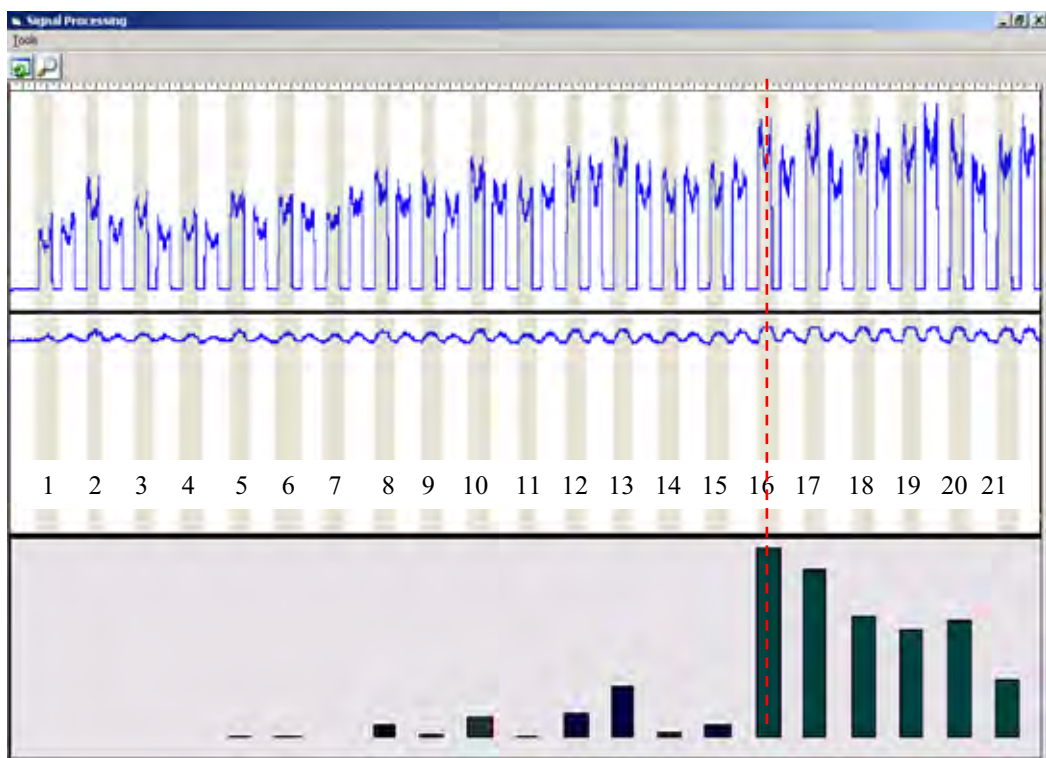


Figura 21. Cálculo do parâmetro DPKS para o ensaio 3

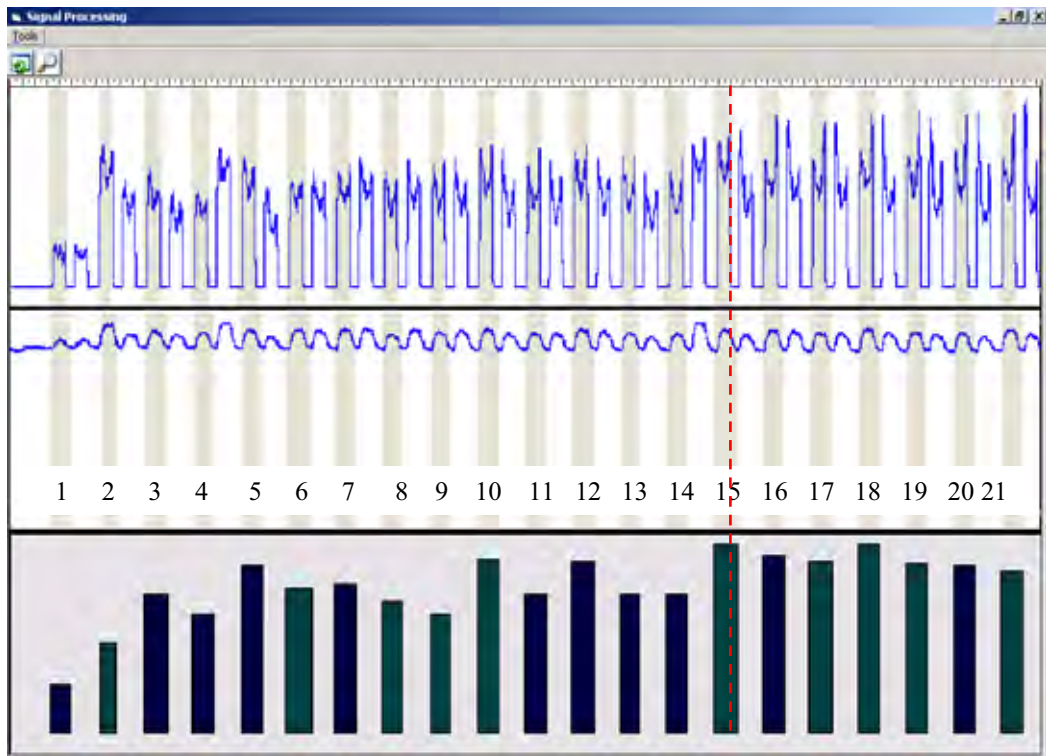


Figura 22. Cálculo do parâmetro DPO para o ensaio 4

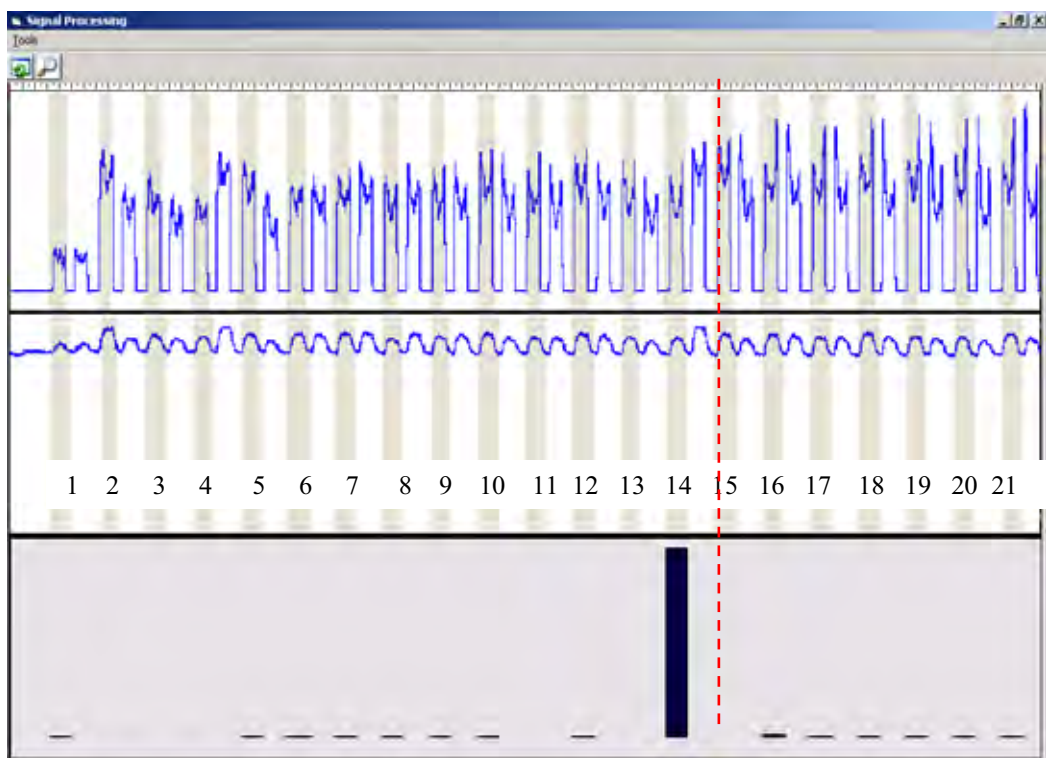


Figura 23. Cálculo do parâmetro FKS para o ensaio 4

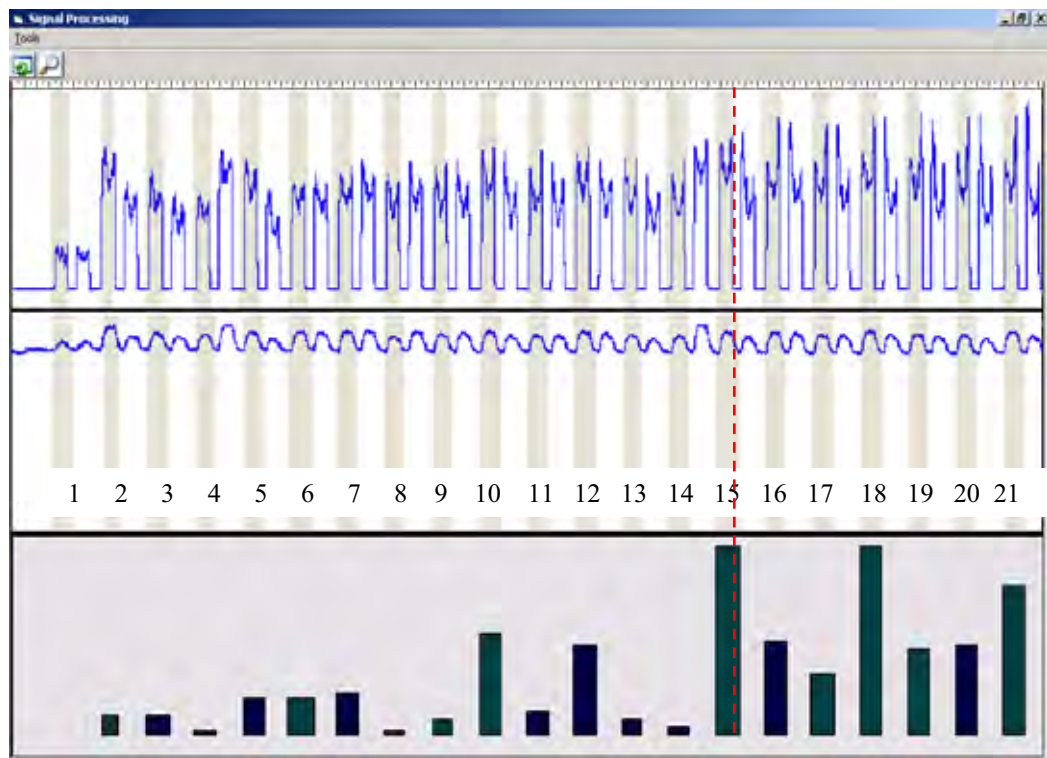


Figura 24. Cálculo do parâmetro DPKS para o ensaio 4

Baseado nos resultados apresentados nas Figuras 13 a 24 é possível encontrar a passada na qual aconteceu à boa dressagem analisando-se o nível do sinal RMS de emissão acústica. Isso pode ser visto nas Figuras 13, 14 e 15 para o ensaio 1, onde o nível do sinal RMS de emissão acústica foi estabilizado na passada de numero 11. Da mesma forma, para o ensaio 2 (Figuras 16, 17 e 18), ensaio 3 (Figuras 19, 20 e 21) e ensaio 4 (Figuras 22, 23 e 24), as passadas em que a operação de dressagem deve ser finalizada são 5, 16 e 15 respectivamente.

Pode-se observar, entretanto, que existem determinadas variações no nível dos sinais de emissão acústica mesmo depois do momento de boa dressagem, mas isso não impediu a escolha certa da passada dos ensaios, mesmo que o sinal às vezes parecesse confuso. Também é importante salientar que o comportamento irregular dos sinais de emissão acústica ao longo das passadas é devido à maior concentração do fluido de corte estar no centro do rebolo durante os testes. Este fenômeno pode ser verificado no trabalho de Thomazella *et al.* (2009), em que os autores mostram a influência do fluido de corte no sinal de emissão acústica,

sendo esta influência eliminada ou atenuada pela utilização de filtros digitais sem o comprometimento da análise.

De acordo com os resultados obtidos para as condições de dressagem adotadas, os parâmetros DPO e DPKS foram bastante coerentes e seus resultados foram aproximadamente os mesmos. Esses parâmetros conseguiram determinar o mesmo ponto de boa dressagem em todos os ensaios realizados.

No caso do parâmetro DPO, os resultados mostram um elevado nível no sinal quando se atinge o momento de boa dressagem e certa estabilização nas passadas seguintes. Esta característica apresenta-se como um bom comportamento porque reforça o fato de quando a dressagem deva ser encerrada. Por outro lado, o parâmetro DPKS também apresentou um nível maior de sinal quando o momento de boa dressagem é atingido, alternando os níveis de sinais de maneira aleatória nas passadas seguintes. Este comportamento, entretanto, ainda faz do parâmetro DPKS um indicador da boa dressagem. Portanto, um limiar pode ser estabelecido para detectar o momento certo de boa dressagem para ambos os parâmetros.

O parâmetro FKS não apresentou coerência nos resultados, com pode ser observado claramente nas Figuras 14, 17 e 20, com exceção do ensaio 4, Figura 23, quando aparentemente indicou por um pico o ponto de boa dressagem na passada 14. Porém, de acordo com os parâmetros DPO e DPKS, este ponto ocorreu no 15º passe.

O sinal de potência mostrado nos gráficos das Figuras 14 a 24 mostrou variações mínimas que aparentemente poderiam ser úteis na avaliação da dressagem. Contudo, quando este sinal é combinado com o sinal RMS de emissão acústica de forma conveniente, essas pequenas variações podem ser levadas em conta de alguma forma. Assim, o parâmetro resultante pode ser efetivamente usado na operação de dressagem, como visto para os parâmetros DPO e DPKS.

A Tabela 5 mostra o histórico das passadas para cada ensaio em que o parâmetro DPO e o parâmetro DPKS indicaram o momento da boa dressagem. A palavra “continua” nesta tabela significa que a operação de dressagem ainda não foi terminada e que, portanto, ela deve continuar. Por outro lado, a palavra “dressado” significa que a dressagem pode ser finalizada neste ponto.

Tabela 5 - Histórico dos passes de dressagem de acordo com os parâmetros DPO e DPKS

Passada	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4
1	Continua	Continua	Continua	Continua
2	Continua	Continua	Continua	Continua
3	Continua	Continua	Continua	Continua
4	Continua	Continua	Continua	Continua
5	Continua	Dressado	Continua	Continua
6	Continua		Continua	Continua
7	Continua		Continua	Continua
8	Continua		Continua	Continua
9	Continua		Continua	Continua
10	Continua		Continua	Continua
11	Dressado		Continua	Continua
12			Continua	Continua
13			Continua	Continua
14			Continua	Continua
15			Continua	Dressado
16			Dressado	
17				
18				
19				
20				
21				

Como pode ser observado na Tabela 5, para cada ensaio a superfície do rebolo se encontrava numa situação inicial diferente. No ensaio 1 foram necessários 11 passes para que a dressagem pudesse ser finalizada. No segundo ensaio o número de passadas caiu para 5, no terceiro foram 16, e no último ensaio

foram necessárias 15 passadas para a finalização da dressagem. Essa variação se deve ao fato de que em alguns casos o desgaste do rebolo na usinagem que antecedeu o ensaio de dressagem foi maior que em outros. Essa variação aconteceu aleatoriamente, uma vez que seria praticamente impossível estabelecer padrões iniciais de desgaste do rebolo.

A caracterização da situação inicial do rebolo foi realizada através da análise dos parâmetros de dressagem. De acordo com o número de passadas necessárias para se atingir o ponto de boa dressagem o rebolo foi classificado como “pouco desgastado”, “parcialmente desgastado” e “muito desgastado”.

Assim, podem ser feitas algumas comparações:

- No ensaio 1 o rebolo estava em um nível intermediário de desgaste comparado aos demais, sendo necessário metade do número total de passes pra dressá-lo. Portanto, pode-se considerá-lo como “parcialmente desgastado” inicialmente;
- No ensaio 2, o rebolo atingiu o ponto de boa dressagem rapidamente, ou seja, após 5 passes apenas a dressagem poderia ser finalizada. Isso significa que o rebolo não perdeu muito da sua agressividade durante a usinagem, e pode ser considerado como “pouco desgastado” no início da dressagem;
- Os ensaios 3 e 4 tiveram um nível de desgaste muito próximo, uma vez que o número de passes necessários foram 15 e 16 respectivamente, o que pode caracterizá-los como “muito desgastados” em relação aos demais e também ao número total de passes adotado (105 μm).

Para cada nova situação de dressagem todos os parâmetros devem ser analisados a fim de se conhecer seu comportamento. Isto é importante para se poder determinar o limiar de dressagem e aplicá-lo no monitoramento da operação. Porém, vale ressaltar que outros parâmetros podem ser adicionados ao software para que qualquer condição de dressagem possa ser monitorada.

7 Conclusões

Com base nos resultados obtidos pode-se dizer que os parâmetros apresentaram bons resultados, exceto o FKS que falhou em todas as análises. Tanto o parâmetro DPO quanto o parâmetro DPKS apresentaram uma eficácia muito boa, podendo assim ser aplicados no monitoramento da boa dressagem no processo de retificação.

O parâmetro DPO foi o que apresentou mais uniformidade nos seus resultados sem grandes variações, ao contrario do parâmetro DPKS, o qual apresentou grandes picos em resposta às pequenas variações dos sinais. Entretanto, com base nas análises dos gráficos apresentados, o parâmetro DPKS mostrou um comportamento na sua variação ao longo das passadas que um operador, por exemplo, tomaria uma decisão mais acertada e rápida acerca do momento da boa dressagem.

Embora o sinal de emissão acústica tenha sido considerado a referencia da boa dressagem neste trabalho, ficou evidenciado que os parâmetros DPO e DPKS foram mais eficientes na detecção da boa dressagem, e, portanto, são parâmetros importantes que podem ser utilizados no monitoramento e controle das operações de dressagem.

Por fim, os parâmetros DPO e DPKS podem ser usados em conjunto para oferecer resultados mais precisos, evitando que alguma decisão precipitada seja tomada.

Referências Bibliográficas

- 1) Aguiar, P. R., Souza, A. G. O., Bianchi, E. C., Leite, R. R. & Dotto, F. R. L. “Monitoring the dressing operation in the grinding process”. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, Vol. 5, No. 1, pp. 3-22, 2009.
- 2) Aguiar, P. R., Serni, P. J. A., Dotto, F. R. L. & Bianchi, E. C., “In-process grinding monitoring through acoustic emission”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering*, Vol. 28, No. 1, pp. 118–124, 2006.
- 3) Aguiar, P. R., Dotto, F. R. L. & Bianchi, E. C., “Study of threshold to burning in surface grinding process”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering*, Vol. 27, no. 2, pp. 150-156, 2005.
- 4) Aguiar, P. R., Bianchi, E. C. & Oliveira, J. F. G., “A method for burning detection in grinding process using acoustic emission and effective electrical power signals”, *CIRP Journal of Manufacturing Systems*, Paris, Vol. 31, No. 3, pp. 253–257, 2002.
- 5) 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 (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- 6) Brinksmeier, E., Tönshoff, H. K., Czenkusch, C. & Heinzl, C., “Modeling and optimisation of grinding process”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 9, pp. 303–314, 1998.
- 7) Bianchi, E. C., “Ação das condições de dressagem na retificação de precisão”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1990.
- 8) Chen, X., Rowe, B., Mills, B. & Allanson, D. R., “Analysis and simulation of the grinding process. part III: comparison with experiment”,

- International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 36, No. 8, pp. 897–906, 1996.
- 9) Dotto, F. R. L., Aguiar, P. R., Bianchi, Serni, P. J. A. & Thomazella, R., “Automatic system for thermal damage detection in manufacturing process with internet monitoring”, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering, Vol. 28, No. 2, pp. 153-160, 2006.
 - 10) Dotto, F. R. L., Aguiar, P. R., Thomazella, R. & Bianchi, E. C., “Methodology for automatic selection of passes in surface grinding”, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Engineering, São Paulo, Vol. 29, No. 1, pp. 7–13, 2007.
 - 11) Hassui, A. & Diniz, A. E., “Correlating surface roughness and vibration on plunge cylindrical grinding of steel”. International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 43, pp. 855–862, 2003.
 - 12) Hassui, A., “Estudo de vibração durante o corte e centelhamento na retificação cilíndrica de mergulho”. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.
 - 13) Hellmeister, C. F. L. P., “Monitoramento da dressagem na retificação através do sinal puro de emissão acústica”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2004.
 - 14) Inasaki, I., “Monitoring of dressing and grinding processes with acoustic emission signals”. Ann CIRP, vol. 34 (1), pp. 277–280, 1985.
 - 15) Inasaki, I., “Sensor fusion for monitoring and controlling grinding processes”, The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, pp. 730-736, 1999.
 - 16) Karpuschewski, M. W. & Inasaki I., “Grinding monitoring system based on power and acoustic emission sensors”, Proceedings of the 50th CIRP General Assembly Conference, pp. 235-240, 2000.
 - 17) Khenafes, M., “Investigação de novas ferramentas estatísticas e utilização de microcontrolador no monitoramento da queima na retificação plana

- tangencial”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2006.
- 18) Kwak, J. & Ha, M., “Neural network approach for diagnosis of grinding operation by acoustic emission and power signals”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 147, pp. 65–71, 2004.
 - 19) Kim, H. Y., Kim, S. R., Ahn, J. H. & Kim, S. H., “Process monitoring of centerless grinding using acoustic emission”, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 111, pp. 273-278, 2001.
 - 20) King, R. I. & Hahn, R. S., “Handbook of modern grinding technology”. 3. ed. New York: Chapman and Hall, 1986.
 - 21) König, W. & Meyen, H. P., “AE in grinding and dressing: accuracy and process reliability”, *Proc. of 4th Int. Grind. Conference*, MR90-526, 1990.
 - 22) KRAR, S. F., “Grinding technology”. 2 ed, New York: Thomson Delmar, 1995.
 - 23) Lee, D. E., Hwang, I., Valente, C. M. O., Oliveira, J. F. G. & Dornfeld, D. A., “Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, pp. 176–188, 2006.
 - 24) Liu, Q., Chen, X. & Gindy, N., “Investigation of acoustic emission signals under a simulative environment of grinding burn”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, pp. 284-292, 2006.
 - 25) Malkin, S., “Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives”. 1. ed. England: Ellis Horwood Limited, 1989.
 - 26) Marinelli, N., Coelho, R. T. & Oliveira, J. F. G., “Emissão acústica no monitoramento da dressagem de rebolos de alumina”. *Revista Máquinas e Metais*, Vol. 1, n. 388, pp. 56-73, 1998.
 - 27) Marinescu, I. D., Hitchiner, M., Uhlmann, E., Rowe, W. B. & Inasaki, I., “Handbook of machining with grinding wheels”. 1a. Ed. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007.

- 28) Oliveira, J. F. G., Dornfeld, D. A. & Winter, B., “Dimensional characterisation of grinding wheel surface through acoustic emission”, *Annals of the CIRP*, Vol. 43, No. 1, pp. 291–294, 1994.
- 29) Paula, W. C. F., “Análise de superfícies de peças retificadas com o uso de redes neurais artificiais”. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) - Universidade Estadual Paulista – Júlio de Mesquita Filho, Bauru, 2007.
- 30) Schwarz, J., “O ótimo superacabamento começa pelo acabamento certo”. *Revista Máquinas e Metais*, pp. 126-L33, dez. 1999.
- 31) Schuhli, L. A., “Monitoramento de operações de retificação usando fusão de sensores”. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção Mecânica) - Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, 2007.
- 32) Severiano, A. C., “Retificação de aços com rebolos de CBN ligado galvanicamente sobre corpo de alumínio”. (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- 33) Sena, L., “Avaliação do sistema de posicionamento do carro porta-rebolo numa retificadora CNC Flexa 600-L com o auxílio de sinais de emissão acústica”. (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- 34) Soares, D. D. & Oliveira, J. F. G., “Diagnóstico de processos de retificação pela análise de sinais”. *Revista Máquinas e Metais*, Ano XXXVIII, nº 436, pp. 140-157, 2002.
- 35) Stemmer, C. E. Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos. 1. ed. Florianópolis: Editora da UFS, 1992.
- 36) Thomazella, I. H., Aguiar, P. R., Bianchi, E. C., Souza, A. G. O., Canarim, R. C. & Bouju, M., “Study of the cutting fluid influence on acoustic emission signal during the dressing operation”. 2nd International Researchers Symposium 2009 on Innovative Production Machines and Systems, Ischia, Italy, 2009.

- 37) Tsai, H. H. & Hocheng, H., "Online identification of thermally-induced convex deformation of the workpiece in surface grinding", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 121, pp. 189–201, 2002.
- 38) Webster, J., Marinescu, I. & Bennet, R., "Acoustic emission for process control and monitoring of surface integrity during grinding", *CIRP, Annals of the CIRP*, Vol. 43/1, pp. 299-304, 1994.
- 39) Xue, L., Naghdy, F. & Cook, C., "Monitoring of wheel dressing operations for precision grinding", *IEEE International Conference on Industrial Technology*, Bangkok, pp. 1296-1299, 2002.