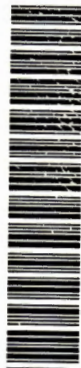


AVALIAÇÃO DA DUREZA DE REBOLOS EM
TRABALHO ATRAVÉS DO USO DA EMISSÃO
ACÚSTICA NA DRESSAGEM

Milton Vieira Junior - Eng^o M.Sc.

Orientador: Prof. Dr. João Fernando Gomes de Oliveira

DEDALUS - Acervo - EESC



31100017068

Tese Apresentada ao Departamento de
Engenharia Mecânica da Escola de
Engenharia de São Carlos - USP Como *parte de*
Requisito ~~Parcial~~ Para a Obtenção do
Título de Doutor

São Carlos, Junho de 1996

1996



Class.	TE. SP. - EESC
Cutt.	6237.4
Tombo	215/96

Eng. Mecânica

α 0746531

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

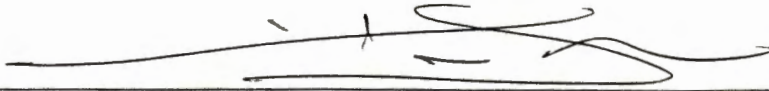
V658a Vieira Junior, Milton
Avaliação da dureza de rebolos em trabalho
através do uso da emissão acústica na dressagem /
Milton Vieira Junior. -- São Carlos, 1996.

Tese (Doutorado). -- Escola de Engenharia
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1996.
Orientador: Prof. Dr. João Fernando G.
Oliveira.

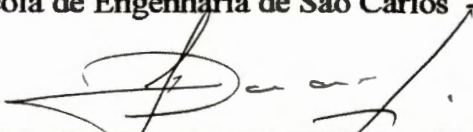
1. Retificação. 2. Dureza de rebolos.
3. Emissão acústica. I. Título

FOLHA DE APROVAÇÃO

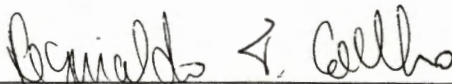
Tese defendida e aprovada em 26-7-1996
pela Comissão Julgadora:



Prof. Doutor **JOÃO FERNANDO G. DE OLIVEIRA (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



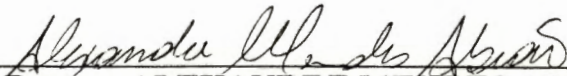
Prof. Doutor **JAIME GILBERTO DUDUCH**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)




Prof. Doutor **REGINALDO TEIXEIRA COELHO**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



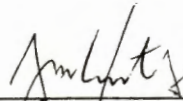
Prof. Doutor **NIVALDO LEMOS COPPINI**
(Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP)



Prof. Doutor **ALEXANDRE MENDES ABRÃO**
(Universidade Federal de Uberlândia)



Prof. Dr. **JOÃO LIRANI**
Coordenador da área de Eng^a Mecânica



Prof. Dr. **JOSE CARLOS A. CINTRA**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

AVALIAÇÃO DA DUREZA DE REBOLOS EM
TRABALHO ATRAVÉS DO USO DA EMISSÃO
ACÚSTICA NA DRESSAGEM

Dedicatória

- A minha esposa Raquel, ao meu filho
Bruno e a quem ainda está por vir.
- A meus pais.

São Carlos, Junho de 1996

Agradecimentos

Agradeço àqueles que direta ou indiretamente colaboraram para que este trabalho fosse possível:

- Ao Prof. Dr. João Fernando Gomes de Oliveira, meu orientador, por ter tido a paciência e o conhecimento necessários para a condução do trabalho;
- À CAPES, pela concessão da bolsa durante o período de realização do trabalho;
- À Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP) por propiciar as condições necessárias de dedicação para que o trabalho pudesse ser realizado;
- Ao Prof. Dr. Reginaldo Coelho, que também teve muita paciência e atenção no sentido de orientar e discutir alguns pontos importantes do trabalho;
- Aos companheiros do Grupo de Retificação do LAMAFE: Nelson, Juarez, Bicudo, João Jorge, Luiz, Eduardo, e todos os outros com quem tive o imenso prazer de conviver nos últimos sete anos;
- Aos amigos de república com quem tive a oportunidade de conviver até o ano de 1995;
- Ao Prof. Dr. Álvaro Abackerli, pela discussão em torno de uma idéia iniciada numa tarde de sexta-feira no ano de 1993 e que resultou nesta pesquisa;
- Aos técnicos do LAMAFE: Bruno, "seu" Adão, Zé Carlos e Botelho;
- Aos técnicos dos laboratórios de Processos e de Materiais do CT-UNIMEP, em especial ao Betinho, Marcelo e Beto, que foram os responsáveis pela confecção das peças para os ensaios;
- Aos técnicos do laboratório de Computação do CT-UNIMEP, em especial ao Rogério, que muito ajudaram na hora de compilar os resultados e escrever a tese;
- Aos professores da UNIMEP, colegas de trabalho com quem pude contar nos momentos de maior sufoco. Em especial aos Professores José Antonio Salles e Antonio

Godoy, respectivamente Diretor e Vice-diretor do CT, que souberam compreender as minhas ausências em determinados momentos;

- À Carborundum Abrasivos S.A., que cedeu os rebolos utilizados nos ensaios e propiciou a realização dos testes de dureza através do método utilizado pela empresa, na pessoa do Eng^o João Fogagnolo e na pessoa do Sr. Nilton Carlos Pinto;

- Às Indústrias Romi S.A., pelo balanceamento dos rebolos, através da pessoa do Sr. João Pacheco e da pessoa do Eng^o Paulo Lopasso;

- À Sensis que forneceu o equipamento para a aquisição do sinal de emissão acústica e também todo o suporte técnico necessário;

- Um agradecimento especial ao Eng^o João Jorge Gomes: sem a sua ajuda com o "Lab-View" não seria possível realizar os ensaios;

- Também agradeço em particular ao Eng^o Nelson Marinelli Filho, um companheiro sempre disposto a ajudar e colaborar;

- A meu Pai, Milton, minha Mãe, Cida, que propiciaram aquilo que ninguém poderá tirar da minha vida: a minha educação, o meu caráter e as minhas convicções;

- A D. Lourdes, Silvana e Mario, que deram o suporte necessário para minha família, procurando suprir a minha ausência;

- A minha esposa, Raquel, que sempre me apoiou e incentivou a realizar e concluir este trabalho, mesmo sabendo que isso significaria privá-la da minha presença em momentos importantes da nossa vida. Muito obrigado;

- A todas as pessoas que, injustamente, não foram citadas mas que tiveram alguma contribuição a dar; peço-lhes desculpas, mas infelizmente o "hardware" não acompanha o desenvolvimento do "software".

Lista de Símbolos

Símbolo	Significado (unidade de medida)
ρ	Densidade do rebolo (g/mm^3)
ν	Constante de Poisson
a	Avanço (mm)
a_d	Profundidade de dressagem (mm)
b	Largura do rebolo (mm)
b_d	Largura de dressagem (mm)
d_o	Diâmetro interno do rebolo (mm)
d_s	Diâmetro externo do rebolo (mm)
E	Módulo de Young (kgf/mm^2)
$E.A. / EA$	Emissão Acústica (V_{rms})
f	Largura do rebolo (mm)
F_h	Componente horizontal da força de retificação (N)
G	Relação de retificação
R_a	Rugosidade média (μm)
S	Estrutura do rebolo
S_d	Passo de dressagem (mm/rot)
u	Energia específica de retificação (J)
U_d	Grau de recobrimento de dressagem
V	Volume do rebolo (mm^3)
V_b	Volume de ligante no rebolo (mm^3)
v_b	Percentual de volume de ligante no rebolo
V_g	Volume de grãos abrasivos no rebolo (mm^3)
v_g	Percentual de volume de grão abrasivos no rebolo
V_p	Volume de poros no rebolo (mm^3)
v_p	Percentual de volume de poros no rebolo
v_s	Velocidade periférica (ou de corte) do rebolo (m/s)
V_s	Volume de rebolo gasto (mm^3)
v_w	Velocidade da peça (m/s)
V_w	Volume de material removido da peça (mm^3)

Sumário

Sumário	i
Índice de Figuras	iii
Índice de Tabelas	vi
Lista de Símbolos	vii
Resumo	viii
Abstract	ix
1. Introdução	1
2. Dureza de Rebolos	8
2.1. - Influência da dureza do rebolo na retificação	11
2.2 - Controle da dureza na fabricação de rebolos	15
2.3 - Métodos de verificação de dureza	21
2.3.1. - Verificação da dureza pelo teste de Rockwell	22
2.3.2. - Verificação da dureza pelo teste de desgaste abrasivo	22
2.3.3. - Verificação da dureza pelo teste de remoção física	23
2.3.4. - Verificação da dureza através do módulo de elasticidade	29
2.3.5. - Verificação da dureza através de outros métodos	33
2.3.6. - Conclusões iniciais	35
3. - Uso de Emissão Acústica em Retificação	37
3.1. - Emissão Acústica - conceituação e geração do sinal	39
3.2. - Algumas relações entre EA e desgaste de ferramentas.....	44
3.3. - Uso da EA no monitoramento do processo de retificação	45
3.3.1. - Uso da EA na dressagem de rebolos	46
3.3.2. - EA no monitoramento da integridade superficial de peças retificadas.....	53
3.3.3. - EA no monitoramento da vida de rebolos	55
3.3.4. - EA no monitoramento da retificação cilíndrica	57
3.3.5. - EA no monitoramento do contato entre rebolo e peça	59
3.3.6. - EA no controle do “Spark-out”	62
3.3.7. - EA na detecção de colisões	63
3.3.8. - EA no monitoramento de parâmetros de corte	63
4. - Proposta de Metodologia Para Avaliação de Dureza por EA (Aspectos Gerais).....	67
5. - Experimentação	70
5.1. - Projeto da experimentação	70
5.2. - Descrição dos testes	79
5.2.1. - Máquina utilizada	79
5.2.2. - “Hardware” e “software” para a aquisição de dados de EA	79
5.2.3. - Programação CN	80
5.2.4. - Ensaio para relacionar força e EA na dressagem	82
5.2.5. - Experimentação para relacionar dureza do rebolo em trabalho (“dureza dinâmica”) e EA na dressagem	82
6. - Resultados e Discussão	86
6.1. - Força x EA na dressagem	86
6.2. - EA na dressagem	87
6.3. - Desgaste do rebolo na retificação das peças	92
6.4. - Relação G em função da dureza do rebolo	95

6.5. - Relação G em função da velocidade de corte	97
6.6. - Comportamento da EA em função da profundidade de dressagem (a_d)	100
6.7. - Comportamento da EA em função da velocidade de corte	103
6.8. - Correlação de comportamentos entre Relação G e EA	105
6.9. - Fatores da fabricação do rebolo que influenciam a sua dureza localizada (dureza local)	109
6.10. - Aplicações possíveis dos resultados	111
7. - Conclusões	113
7.1. - Sugestões para trabalhos futuros	115
Bibliografia Citada	116
Bibliografia Consultada	124
Anexo I: Tabelas das normas JIS R6210 e JIS R6212 para a conversão dos valores medidos no teste pelo método Oghoshi em grau de dureza	129
Anexo II: Diagrama da VI programada em “Lab-view” para a aquisição da EA na dressagem	131
Anexo III: Programas CN utilizados	132
Anexo IV: Resultados obtidos dos ensaios e não expostos no corpo do trabalho	134

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Representação do domínio do operador sobre as decisões de ação nas operações de retificação (Oliveira et al, 1994)	02
Figura 1.2 - Quadro demonstrativo dos tipos de sensores que vêm sendo aplicados nas operações de retificação e os problemas que procuram monitorar (Oliveira, 1994)	03
Figura 1.3 - Relação dos sensores e dos atuadores dentro do processo de “retificação inteligente” (Westkämper, 1993)	05
Figura 2.1 - Relação entre friabilidade e tamanho do grão abrasivo	10
Figura 2.2 - Relação entre Relação G e dureza de rebolos com grão 46, na retificação de aços de diferentes durezas: 17hrc (sequência \diamond); 29hrc (sequência \square); 60 Hrb (sequência Δ) (Pande et al, 1980)	13
Figura 2.3 - Diagrama ternário de composição de rebolos	17
Figura 2.4 - Detalhe do diagrama ternário mostrando as linhas “iso-dureza” utilizadas pelos fabricantes de rebolos (Peters et al, 1968)	20
Figura 2.5 - Teste de Zeiss-Mackensen para verificação de dureza de rebolos (König, 1980).....	23
Figura 2.6 - Aparelho manual para “scratching test” (Nussbaum, 1988)	24
Figura 2.7 - Representação da máquina “pica-pau” para a verificação de dureza	25
Figura 2.8 - Método de medição por riscamento utilizado por Peklenik et al, 1964: a) esquema do teste; b) esquema da vista lateral do teste, destacando a geometria do teste	27
Figura 2.9 - Esquema do medidor de dureza do método Winterling (Nussbaum, 1988)	27
Figura 2.10 - Esquema do “grind-o-sonic”	29
Figura 2.11 - Esquema de funcionamento do “dina-grinder”	34
Figura 2.12 - Gráfico de força x velocidade apresentado por Colwell, 1962.....	35
Figura 3.1 - Comparação das faixas de frequência da EA e outros tipos de onda (Blum e Dornfeld, 1990)	41
Figura 3.2 - Identificação das zonas de geração de EA em processos de usinagem que utilizam ferramentas com aresta de corte com geometria definida (Dornfeld, 1988).....	42
Figura 3.3 - Fases da formação do cavaco na retificação (König, 1980)	43
Figura 3.4 - Representação de sinais de EA na dressagem de rebolos com perfil (a) irregular e (b) regular (Inasaki, 1985)	46
Figura 3.5 - Comportamento de saturação da EA em função da profundidade de dressagem (Inasaki, 1985)	48
Figura 3.6 - Influência do passo de dressagem sobre a ES, a rugosidade (Ra) da peça e a força de retificação (Inasaki, 1985)	49
Figura 3.7 - Comportamento da força de retificação em função da relação de velocidades identificado por Brinksmeier, 1993	50
Figura 3.8 - Representação do monitoramento de falhas na dressagem através da EA (König e Meyen, 1990)	51
Figura 3.9 - Comportamento do sinal de EA durante as três fases de interação entre dressador e rebolo (Oliveira et al, 1994)	52
Figura 3.10 - Sistema para avaliação do desgaste do rebolo e de deriva térmica através da EA no contato entre dressador e rebolo (Oliveira et al, 1994).....	53
Figura 3.11 - Sinal de EA medido durante a retificação de uma peça que apresenta sinais de queima e de uma peça sem defeitos de integridade superficial (Webster et al, 1994)	54

Figura 3.12 - Comportamento de força normal de retificação e de EA em função da profundidade de corte (Webster et al, 1994)	55
Figura 3.13 - Esquema da montagem utilizada para aquisição do sinal de EA através do fluido de corte (Chang et al, 1992)	59
Figura 3.14 - Variação do diâmetro apresentada pelas peças a serem retificadas (Kluft, 1994)	60
Figura 3.15 - Ciclos de retificação sem detecção de contato (“gap-less”) e com detecção de contato (Kluft, 1994)	61
Figura 3.16 - Comportamento do sinal de EA em relação à velocidade de corte (periférica) do rebolo (Dornfeld, 1990)	64
Figura 3.17 - Comportamento do sinal de EA em função do avanço (Dornfeld, 1990)	66
Figura 5.1 - Dispositivo idealizado inicialmente para a medição de “dureza dinâmica”	71
Figura 5.2 - Reresetnação do funcionamento do dispositivo idealizado inicialmente	72
Figura 5.3 - Esquema da montagem experimental para a aquisição de forças e EA na dressagem	74
Figura 5.4 - Forças e EA na dressagem (exemplo de resultado)	75
Figura 5.5 - Comportamento do desvio do valor medido de posição do rebolo em função da velocidade de aproximação do rebolo (Felipe, 1996).....	77
Figura 5.6 - Banco de ensaios para a aquisição de EA na dressagem e para a medição do desgaste do rebolo após a retificação de uma peça-padrão	78
Figura 5.7 - Tela de apresentação do instrumento virtual utilizado para a aquisição de dados nos ensaios realizados	80
Figura 5.8 - Esquema de funcionamento do programa CN para a aquisição da EA na dressagem do rebolo	81
Figura 5.9 - Esquema de funcionamento do programa de retificação e dos sub-programas de medição do desgaste do rebolo e “dressagem inteligente”	82
Figura 5.10 - Peça projetada para os ensaios de avaliação do relacionamento da dureza de trabalho do rebolo com EA na dressagem	84
Figura 6.1 - Comportamento da força e da EA na dressagem em várias velocidades periféricas do rebolo	87
Figura 6.2 - Comportamento do nível de EA na dressagem do rebolo dureza G com velocidade de corte 45 m/s	89
Figura 6.3 - Comportamento da EA na dressagem do rebolo dureza K com velocidade de corte 28 m/s	89
Figura 6.4 - Nível de EA na última dressagem do rebolo dureza K em velocidade de corte 45 m/s antes da retificação da peça com velocidade de avanço f100	90
Figura 6.5 - Nível de EA na última dressagem do rebolo dureza K em velocidade de corte 36 m/s antes da retificação da peça com velocidade de avanço f100	91
Figura 6.6 - Nível de EA na última dressagem do rebolo dureza K em velocidade de corte e 20 m/s antes da retificação da peça com velocidade de avanço f100.....	91
Figura 6.7 - Representação do desgaste apresentado no perfil dos três rebolos testados na velocidade de corte 20 m/s	93
Figura 6.8 - Representação do desgaste apresentado no perfil dos três rebolos testados na velocidade de corte 28 m/s	94

Figura 6.9 - Representação do desgaste apresentado no perfil dos três rebolos testados na velocidade de corte 36 m/s	94
Figura 6.10 - Representação do desgaste apresentado no perfil dos três rebolos testados na velocidade de corte 45 m/s	95
Figura 6.11 - Comportamento da relação G de retificação em função da dureza do rebolo na retificação com: f100	96
Figura 6.12 - Comportamento da relação G de retificação em função da dureza do rebolo na retificação com: f150	96
Figura 6.13 - Comportamento da relação G de retificação em função da velocidade de corte em rebolo de dureza R	98
Figura 6.14 - Comportamento da relação G de retificação em função da velocidade de corte em rebolo de dureza K	98
Figura 6.15 - Comportamento da relação G de retificação em função da velocidade de corte em rebolo de dureza G	99
Figura 6.16 - Comportamento da EA em função da variação da profundidade de dressagem nos diferentes rebolos testados na velocidade de corte de 20 m/s	101
Figura 6.17 - Comportamento da EA em função da variação da profundidade de dressagem nos diferentes rebolos testados na velocidade de corte de 28 m/s	102
Figura 6.18 - Comportamento da EA em função da variação da profundidade de dressagem nos diferentes rebolos testados na velocidade de corte de 45 m/s	102
Figura 6.19 - Comportamento da EA em função da velocidade de corte para os três rebolos testados	104
Figura 6.20 - Comportamento da relação G de retificação em função da velocidade de corte	106
Figura 6.21 - Comportamento da EA em função da velocidade de corte	106
Figura 6.22 - Correlação entre os comportamentos de relação G e EA para o caso do rebolo com grau de dureza G na retificação da peça com velocidade de avanço em mergulho f100	107
Figura 6.23 - Comportamento da relação G de retificação em função do nível de EA na dressagem do rebolo em retificação com velocidade de avanço em mergulho f100	108
Figura 6.24 - Comportamento da relação G de retificação em função do nível de EA na dressagem do rebolo em retificação com velocidade de avanço em mergulho f150	108
Figura II.1 - Diagrama do programa em "Lab-view" para a aquisição da EA na dressagem	131

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Valores de módulo de elasticidade (E) e constante de Poisson (ν) para rebolos diferentes (Nagao, 1985)	32
Tabela 3.1 - Fatores que influenciam a amplitude do sinal de Emissão Acústica (Dunegan e Green, 1972)	40
Tabela 5.1 - Sequência geral de realização de ensaios	84
Tabela 5.2 - Sequência de realização de ensaios por rebolo na dressagem	85
Tabela 6.1 - Resultados obtidos com a medição dos três rebolos testados através do método Oghoshi	97
Tabela I.1 - Conversão do valor medido no Método Oghoshi (em mm) para grau de dureza para rebolos vitirificados	129
Tabela I.2 - Conversão do valor medido no método Oghoshi (em mm) para grau de dureza para rebolos resinóides	130

Lista de Símbolos

Símbolo	Significado (unidade de medida)
ρ	Densidade do rebolo (g/mm^3)
ν	Constante de Poisson
a	Avanço (mm)
a_d	Profundidade de dressagem (mm)
b	Largura do rebolo (mm)
b_d	Largura de dressagem (mm)
d_o	Diâmetro interno do rebolo (mm)
d_s	Diâmetro externo do rebolo (mm)
E	Módulo de Young (kgf/mm^2)
$E.A. / EA$	Emissão Acústica (V_{rms})
f	Largura do rebolo (mm)
F_h	Componente horizontal da força de retificação (N)
G	Relação de retificação
R_a	Rugosidade média (μm)
S	Estrutura do rebolo
S_d	Passo de dressagem (mm/rot)
u	Energia específica de retificação (J)
U_d	Grau de recobrimento de dressagem
V	Volume do rebolo (mm^3)
V_b	Volume de ligante no rebolo (mm^3)
v_b	Percentual de volume de ligante no rebolo
V_g	Volume de grãos abrasivos no rebolo (mm^3)
v_g	Percentual de volume de grão abrasivos no rebolo
V_p	Volume de poros no rebolo (mm^3)
v_p	Percentual de volume de poros no rebolo
v_s	Velocidade periférica (ou de corte) do rebolo (m/s)
V_s	Volume de rebolo gasto (mm^3)
v_w	Velocidade da peça (m/s)
V_w	Volume de material removido da peça (mm^3)

Resumo

A automatização do processo de retificação requer que seja realizado o monitoramento tanto dos parâmetros de usinagem, como do comportamento do ferramental utilizado. Nesse último caso destaca-se a dureza do rebolo, característica importante para a definição do seu comportamento durante as operações de retificação. Durante a realização das operações o rebolo pode apresentar variações no seu comportamento de desgaste que resultam em inconsistências na determinação do processo dificultando sua automatização. Os métodos existentes atualmente não permitem uma avaliação da dureza do rebolo em situações de utilização, uma vez que apenas avaliam a dureza do rebolo de maneira estática e localizada. No presente trabalho esses métodos são revistos e analisados, e a dureza do rebolo é avaliada durante o processo de retificação, através do monitoramento do sinal de emissão acústica captado na dressagem do rebolo. A correlação que este sinal apresenta com a relação G de retificação determina o caminho para a avaliação. Também através do sinal de emissão acústica na dressagem é avaliada a influência da velocidade de corte sobre o comportamento de dureza do rebolo. Além disso, também é feita uma análise das influências que o método de fabricação de rebolos tem sobre a sua dureza, identificando problemas que surgem, geralmente, no decorrer das operações de retificação.

Abstract

Grinding automation requires the monitoring of machining parameters and tooling. In the latter, it is found that the wheel grade is an important characteristic to define wheel behavior during process. The wheel can behave differently from expected during grinding operations resulting in a non-consistent process from the view of automation. The grade methods currently in use do not allow to assess wheel hardness in a grinding condition. They only evaluate the wheel hardness out of operation and within a small range of its surface. This research makes a critical review of these methods, and evaluates the wheel hardness during grinding operation by the monitoring of the acoustic emission signal capted during the dressing of the wheel. The correlation between A.E. and G ratio is the path to the evaluation. The influence of wheel speed upon the hardness behavior during grinding is also evaluated. And, at last, the influences of the manufacturing process of wheel are discussed and then the causes of some troubles that appear during grinding operations are identified and related to the wheel hardness in process.

1. Introdução

O desenvolvimento do processo de retificação ocorrido nos últimos dez anos, aliado ao considerável aumento no número de pesquisas sobre o assunto, fez com que se buscasse técnicas e métodos de fabricação que garantissem precisão e qualidade superficial aliadas à automação do processo. Mori et al, 1992, e Oliveira et al, 1994, afirmam que a importância das operações de retificação cresce ainda mais quando é levado em conta que essas operações são, geralmente, as fases finais das seqüências de fabricação das peças.

No entanto, a garantia de precisão e qualidade necessárias às operações de retificação, implicam necessariamente no conhecimento e domínio das variáveis envolvidas no processo. Diversos trabalhos já trataram dos parâmetros de corte e de suas influências, dos efeitos causados pelas condições de dressagem nos resultados da retificação (Oliveira, 1988; Bianchi, 1990; Coelho, 1991), e das variações que mudanças na composição do rebolo podem causar no processo (Vieira, 1992).

Já a automação da retificação traz como premissa básica que a quantidade de decisões tomadas pelo operador seja reduzida ao mínimo possível. Em ambientes produtivos a maioria das ações ainda está sob o domínio do operador responsável pelo processo que, além de precisar apresentar grande experiência em retificação, ainda decide quais são as atitudes que devem ser tomadas sempre que um problema com a operação é detectado, conforme ilustra a figura 1.1 (Oliveira et al, 1994).

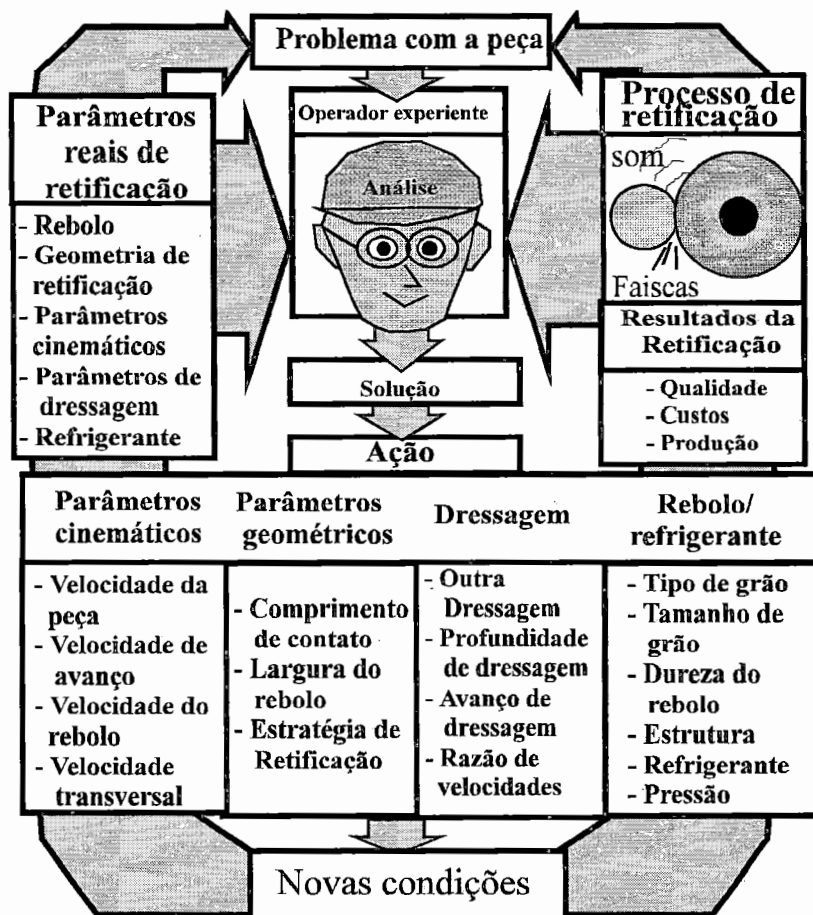


Figura 1.1 - Representação do domínio do operador sobre as decisões de ação nas operações de retificação (Oliveira et al, 1994).

As decisões do operador direcionam-se, inicialmente, para a alteração de alguns parâmetros operacionais (condições de dressagem, redução do avanço, por exemplo), e culminam, em geral, na solicitação de troca do rebolo. A obtenção de um bons resultados com as alterações condiciona a realização de novas tentativas. O maior problema que se verifica nesse processo decisório é a falta de critérios que indiquem o caminho mais coerente a ser percorrido. Isso se deve ao fato de que o operador baseia-se apenas nas ocorrências anteriormente vividas por ele (experiência).

Procurando resolver esse problema, que torna crítica a aplicação da retificação em ambientes automatizados, sistemas de monitoramento que têm por base diversos

tipos de medição foram desenvolvidos e testados no processo. A figura 1.2 mostra os tipos de sensores que vêm sendo aplicados nas operações de retificação e os problemas que se procura monitorar.

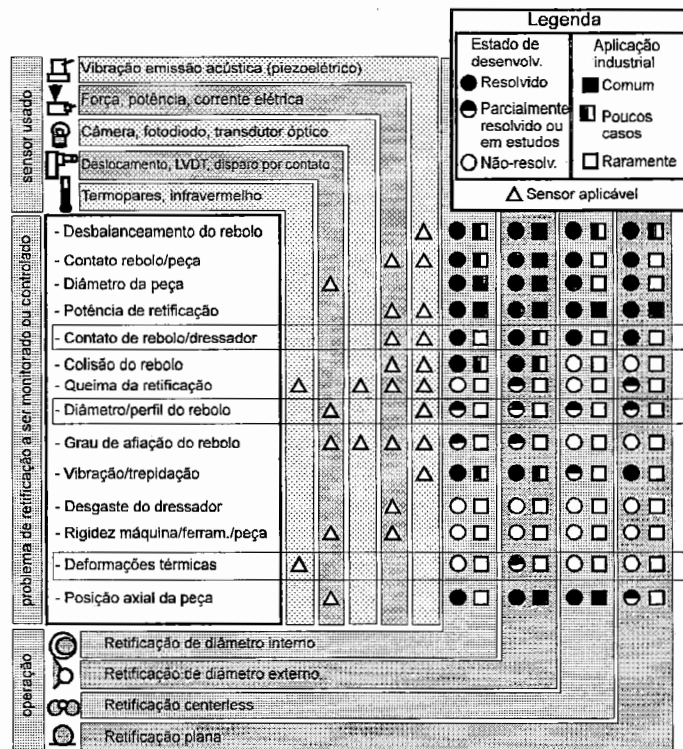


Figura 1.2 - Quadro demonstrativo dos tipos de sensores que vêm sendo aplicados nas operações de retificação e os problemas que procuram monitorar (Oliveira, 1994).

As situações onde o marcador do estado de desenvolvimento do monitoramento (círculo) está em branco representam os casos que ainda não estão resolvidos. A esses casos pode-se ainda juntar a avaliação do comportamento do rebolo em condições de trabalho.

O monitoramento de um processo pode ser feito tanto por via direta, quando a grandeza de interesse é medida diretamente pelo sensor (por exemplo, medidores dimensionais tipo “Marposs”, utilizados para o controle dimensional da peça em

processo), como por via indireta, quando a grandeza medida ainda deve ser associada com aquela que é de interesse (por exemplo, a medição de força através do uso da corrente do motor, onde o sinal elétrico é associado com a força). É importante ressaltar que, independente de se realizar medição direta ou indireta, o sensor utilizado deve apresentar algumas características básicas (Dornfeld, 1988): confiabilidade e repetibilidade, não intrusividade, isenção de influências externas ao processo e a dependência entre o parâmetro medido e o que se deseja monitorar.

Outra classificação que os tipos de monitoramento podem ter é a apresentada por Tönshoff e Wulfsberg, 1988, onde os sinais monitorados dividem-se em “controle de entrada” e “controle de saída” (“input control” e “output control”). Entende-se como controle de entrada a supervisão das condições dos elementos envolvidos no processo (condições de corte, desgaste da ferramenta, etc.), e como controle de saída a supervisão da peça após o processo.

O monitoramento do processo de retificação é parte da chamada “retificação inteligente”, segundo Westkämper, 1993. A “retificação inteligente” seria composta por sensores que captam sinais de diversos tipos e os enviam para os atuadores que realizam o monitoramento, o diagnóstico e o controle do processo, além de realizar simulações baseadas nos sinais recebidos dos sensores. A figura 1.3 mostra como se dá a relação desses sensores e atuadores com o processo de retificação.

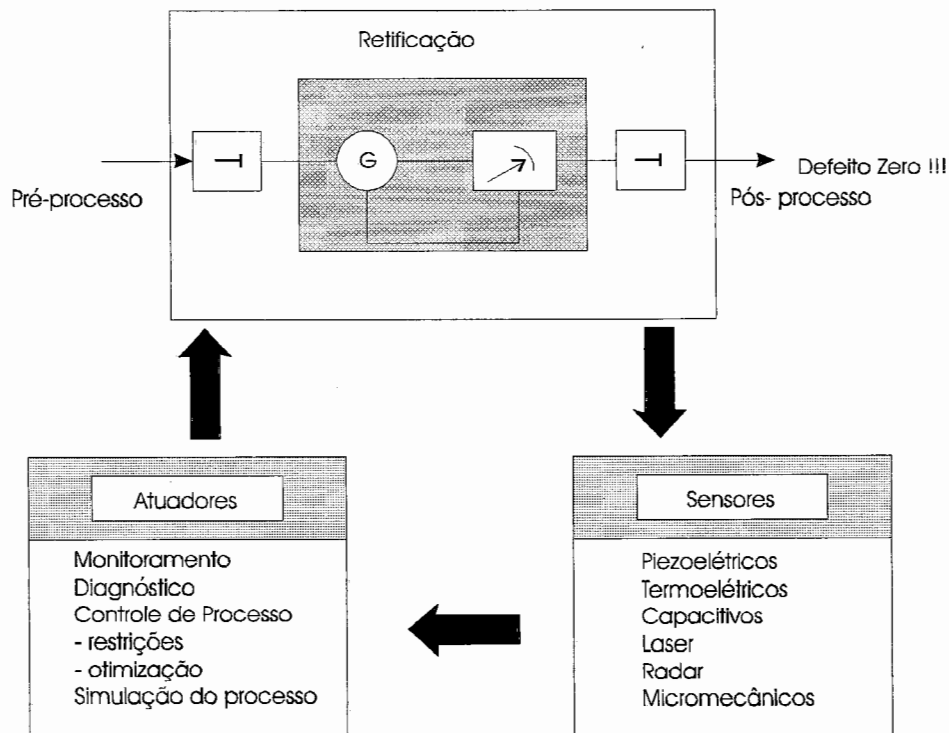


Figura 1.3 - Relação dos sensores e dos atuadores dentro do processo de “retificação inteligente” (Westkämper, 1993).

Um dos problemas enfrentados para a automação da retificação está ligado à ferramenta utilizada, ou seja, o rebolo. Trata-se da determinação da sua dureza e da influência desta durante o processo. A dureza procura expressar a capacidade que o ligante tem de reter o grão abrasivo no rebolo quando este é submetido a uma solicitação qualquer. Porém, em função do método de fabricação dos rebolos, a dureza pode apresentar variações localizadas que raramente são identificadas pelos atuais métodos de medição e controle da dureza atualmente empregados pelos fabricantes de rebole. As variações localizadas levam à instabilidade do processo no que se refere ao comportamento do rebole. É comum, dentro do ambiente de “chão-de-fábrica”, identificar alterações na quantidade de peças que um rebole retifica entre dressagens consecutivas. Na maioria dos casos isso resulta na parada do processo para novas dressagens e, até mesmo, para trocas de rebole. Portanto, a variação de dureza de um

rebolo é um problema que os recursos atualmente empregados não conseguem identificar e que compromete diretamente as propostas de automatização do processo de retificação.

Uma alteração no processo de fabricação de rebolos para evitar a ocorrência dessas variações é difícil. Torna-se, portanto, necessário que o comportamento de dureza do rebolo (aqui chamada de dureza local ou dureza de trabalho) seja controlado em processo. Isso pode permitir que a tomada de decisão no sentido de realizar ações corretivas, como a dressagem do rebolo ou a alteração de sua velocidade periférica, seja imediata à detecção de variações na dureza do rebolo.

Assim sendo, o presente trabalho apresenta como objetivos:

- contribuir para que seja conhecida com maior profundidade a dureza de rebolos, seu significado, suas influências, os métodos de medição e controle atualmente empregados e as influências que os métodos de fabricação do rebolo podem ter sobre essa propriedade;

- levantar as aplicações atualmente existentes do monitoramento por emissão acústica no processo de retificação;

- desenvolver e propor um método para avaliar a dureza de rebolos em condições de trabalho na máquina através do uso da emissão acústica.

Para tanto, no capítulo 2 é feito um estudo de dureza de rebolos e métodos atualmente empregados para a verificação e controle. O capítulo 3 apresenta uma breve revisão sobre as aplicações das técnicas de emissão acústica no processo de retificação. A proposta de uma metodologia para avaliar a dureza de rebolos com o uso de emissão acústica é feita no capítulo 4. O capítulo 5 apresenta a parte experimental desenvolvida para que a metodologia proposta possa ser avaliada, e os resultados obtidos são expostos e discutidos no capítulo 6. Finalmente, no capítulo 7 são relacionadas as

conclusões tiradas durante a elaboração do presente trabalho e também são indicados alguns temas de pesquisa que podem ser futuramente desenvolvidos no sentido de complementar o estudo aqui realizado. Ao final do trabalho são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas e anexos com os diversos resultados, programas CN utilizados e outras referências citadas no texto.

2. Dureza de Rebolos

O desgaste de um rebolo ocorrido durante a vida é o principal indicativo de uma característica inerente às ferramentas abrasivas ligadas: a dureza. Dentre os vários parâmetros da especificação dos rebolos, a dureza é, sem dúvida, o de maior dificuldade de ser determinado para uma aplicação exata (Bhateja, 1981).

A dureza (ou grau de dureza ou simplesmente grau) de um rebolo expressa a capacidade de retenção que o ligante tem sobre os grãos abrasivos. Quanto mais o grão abrasivo fica retido (ancorado) no ligante, mais duro é considerado o rebolo (menor desgaste). Caso o grão se solte facilmente do ligante, o rebolo é considerado mais mole (maior desgaste) (Malkin, 1989; King e Hahn, 1986; König, 1980). Outro

significado que a dureza de um rebolo pode expressar é a força necessária para fazer com que o grão abrasivo seja arrancado para fora do rebolo. Colwell et al, 1962, afirma que um rebolo realmente duro é aquele que apresenta a capacidade de reter grãos desgastados até torná-los mais desgastados e tornando difícil controlar a granulometria e a agressividade do abrasivo.

Ainda segundo Colwell et al, 1962, a dureza, sendo tida como propriedade de um rebolo, tem o mesmo significado que a dureza de um metal quantificada pelos métodos Brinell, Rockwell, Vickers ou outros. No caso do metal, a dureza expressa, entre outros, a capacidade de suportar carga, a capacidade de absorver choques e a resistência ao desgaste. Dentro de certos limites, isso também é válido para a dureza de um rebolo ou de outros abrasivos ligados. No entanto a similaridade de conceitos não pode ser mais estendida por envolver materiais de naturezas distintas: os metais são mais homogêneos, enquanto que os rebolos são uma combinação heterogênea de grãos abrasivos e ligante - um rebolo pode ter diferentes concentrações de grãos abrasivos na sua constituição.

Além dessa heterogeneidade, a dureza de um rebolo ainda sofre a influência de um outro componente que surge na fabricação da ferramenta, que é a porosidade (ou estrutura) do rebolo. Segundo Oda e Okada, 1979, a porosidade de um rebolo é um elemento inevitável que surge durante a fabricação da ferramenta em função de características do ligante e da compactação da massa, e que dificulta o controle da dureza do rebolo. Em decorrência disso, ainda segundo Oda e Okada, alguns fabricantes procuraram desenvolver novos tipos de rebolo que consistiam de apenas dois elementos: grãos e ligante. No entanto, o conceito de rebolos sem porosidade é conflitante com as necessidades apontadas por diversos autores como Felipe, 1992, e outros, para a retificação de elevadas porções de material (processos como “creep-feed”), onde a área de contato é grande e a transformação de boa parte da energia mecânica do processo em energia térmica faz com que as temperaturas na zona de contato entre rebolo e peça sejam elevadas, necessitando de boa refrigeração, o que se dá com o auxílio da porosidade do rebolo. Além disso, o cavaco gerado nesses tipos de retificação tem dimensões bem maiores que o gerado pelos processos convencionais de retificação, necessitando de um maior escoamento através dos poros do rebolo.

A estrutura pode ser entendida como uma relação entre a composição volumétrica do rebolo (grãos, ligante e poros) e a sua distribuição (König, 1980), ou como a concentração volumétrica de grãos abrasivos no rebolo (Malkin, 1989), ou ainda como a distância existente entre os grãos abrasivos do rebolo (King e Hahn, 1986). Independente do entendimento que se tenha sobre estrutura, todos os conceitos estão diretamente relacionados com os percentuais que grãos abrasivos, ligantes e poros possuem sobre o volume total do rebolo. Uma discussão mais aprofundada sobre isso é feita mais adiante, quando for exposto o diagrama ternário de composição do rebolo.

Outros pontos que podem influenciar diretamente na dureza de um rebolo são a friabilidade e o tamanho do grão abrasivo, sendo que o primeiro tem relação direta com o segundo. Quanto maior for o tamanho do grão abrasivo, maior a facilidade em fraturá-lo, enquanto que, conforme este vai ficando menor, mais difícil fica de se fraturar (figura 2.1). Como os grãos mais friáveis tendem a se fraturar com maior facilidade, acabam dando a impressão de que o rebolo tem menor grau de dureza. Isso ocorre até o limite onde o tamanho do grão permite a ocorrência da fratura, sem que o grão se desprenda do rebolo. Eiss, 1967, afirma que a falta de conhecimento sobre comportamento da carga aplicada sobre o grão abrasivo durante o processo dificulta a predição do comportamento de fratura do abrasivo. Isso fica ainda mais prejudicado quando se considera que a avaliação do comportamento de fratura dos grãos abrasivos é feita através de testes em moinhos de bolas e não através de testes onde o grão é submetido a cargas de tração, compressão e flexão, como ocorre durante a retificação.

Assim, quando os rebolos são fabricados com grãos abrasivos maiores ou mesmo mais friáveis (ou ambos), existe uma influência maior da fratura dos grãos sobre a dureza. Rebolos com grãos mais finos e menos friáveis tendem a se apresentar com maior grau de dureza.

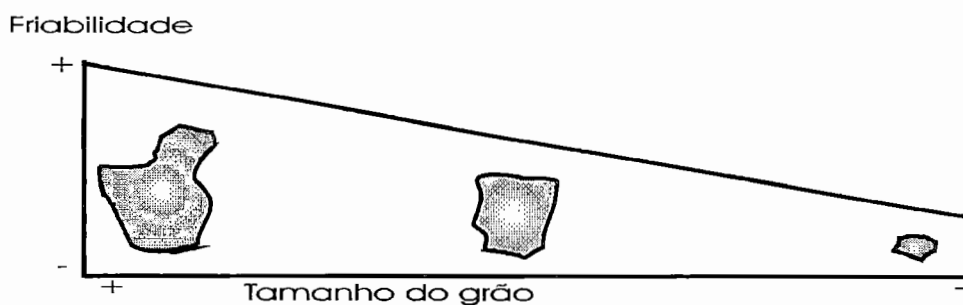


Figura 2.1 - Relação entre friabilidade e tamanho do grão abrasivo.

Mais uma possível influência sobre a dureza foi estudada, entre outros, por Colwell et al, 1962, por Nakayama et al, 1971, e por Saini,1980: a elasticidade dos rebolos. Essa elasticidade pode ser creditada tanto a uma deformação da liga, como dos grãos abrasivos. No entanto, segundo a pesquisa de Nakayama, nem o tamanho do grão (nos casos foram testados os grãos 24 e 46) e nem a dureza do rebolo afetaram de maneira significativa as deflexões identificadas nos ensaios, levando à conclusão de que, em rebolo vitrificado com granulometria maior, os grãos estão em contato direto entre si, não sendo separados pelas pontes de liga. Apesar disso, a elasticidade dos rebolos afeta diretamente a operação de retificação pois as deflexões chegam a ter a mesma magnitude que a “espessura de cavaco indeformado”, tendo forte influência no processo de formação do cavaco. Colwell, 1962 afirma que no caso da dureza de rebolos as propriedades elásticas têm um papel mais importante que as propriedades plásticas

2.1. - Influência da dureza do rebolo na retificação

No processo de retificação a dureza de um rebolo tem grande influência sobre a vida. Um rebolo com maior grau de dureza tende a reter mais o grão abrasivo na periferia do rebolo. Conforme esse grão vai se desgastando e perdendo a sua capacidade de remoção, as forças de corte vão se elevando e o calor gerado pelo atrito entre grão e peça também sobe. Como o grão gasto permanece retido na liga, esse processo tende a ficar mais evidente à medida em que o desgaste do grão se acentua (cegamento do rebolo). Caso o grão tenha característica de friabilidade elevada, essa elevação se dá de modo mais lento, uma vez que com o aumento das forças de corte o grão passa a ser submetido a maior esforço e acaba fraturando-se e formando novas arestas. Isso se

repete até que a parte exposta do abrasivo não seja suficiente para que ocorra a fratura, provocando o arredondamento do topo do grão e o conseqüente cegamento do rebolo.

Já em um rebolo com menor grau de dureza, o processo descrito acima dificilmente ocorre pois o grão abrasivo, à medida em que se desgasta e provoca uma elevação nos forças de corte, tende a ser arrancado do rebolo. Como a resistência oferecida pelo ligante é baixa, o grão abrasivo se desprende (às vezes inteiro) e permite o surgimento de um novo grão abrasivo, num processo chamado de “auto-afiação”. Nesse caso, muito mais que a elevação dos esforços de corte ou o aquecimento da peça, a perda do perfil do rebolo é um fator preponderante para o fim da vida do rebolo.

Os comportamentos descritos acima explicam a regra prática que é utilizada quando se faz necessária a escolha da dureza de um rebolo (Vieira, 1992; Kumar et al, 1980): para materiais duros o rebolo deve ser mole, enquanto que para materiais moles o rebolo deve ser duro. Ao retificar um material com alto nível de dureza o desgaste do grão é mais intenso e torna-se desejável a auto-afiação (para que o rebolo não tenha que ser dressado constantemente). Além disso, o desgaste da liga pelo cavaco não é tão evidente, uma vez que materiais duros normalmente produzem cavacos curtos e quebradiços. Já na retificação de um material de baixo nível de dureza, o desgaste do grão abrasivo é mais lento e, portanto, com menor necessidade de novas camadas de grão. Some-se a isso a possibilidade ocorrer o surgimento de novas arestas de corte através da fratura dos grãos (conforme a friabilidade do abrasivo), e o fato de que o cavaco produzido na usinagem de materiais moles é, em geral, longo e dúctil, atuando com maior intensidade sobre o ligante (o cavaco tende a atritar no ligante).

A necessidade de dressagem nas situações descritas acima se dá pelos seguintes motivos, principalmente:

- no caso de rebolos com baixo grau de dureza (moles), estes perdem o perfil devido ao desgaste e à auto-afiação;

- no caso de rebolos com elevado grau de dureza (duros), além da perda de afiação provocada pelo desgaste dos grãos (processo mais lento), é possível ocorrer um empastamento da superfície do rebolo devido à acomodação de partículas de cavaco nos poros do rebolo. Como, geralmente, utilizam-se rebolos com maior grau de dureza para retificar materiais moles, que produzem cavaco longo e dúctil, o cavaco tende a ficar alojado dentro da estrutura do rebolo e acaba, assim, causando o empastamento.

Quando a operação realizada é a retificação de perfis, faz-se necessário o uso de rebolos com maior grau de dureza, mesmo que o material retificado seja duro. Isso se explica pelo fato de que numa retificação de perfis existe a exigência de que o formato do rebolo seja mantido, o que seria inviabilizado caso fosse usado um rebolo com baixo grau de dureza.

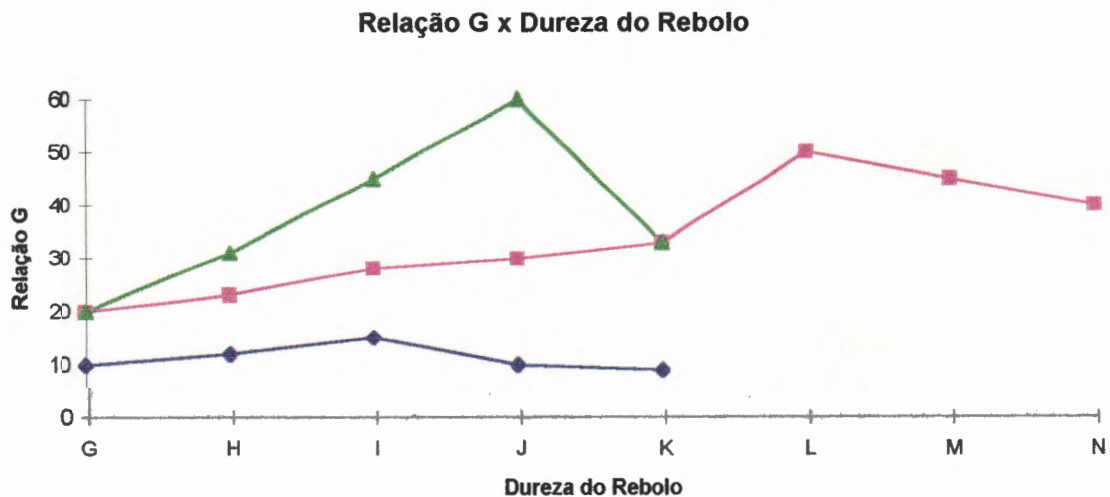


Figura 2.2 - Relação entre Relação G e dureza de rebolos com grão 46, na retificação de aços com diferentes durezas: 17 HRc (seqüência ◇); 29 HRc (seqüência □); 60 HRb (seqüência △) (Pande et al, 1980).

Outro aspecto interessante com relação à dureza do rebolo foi descrito por Pande et al, 1980, onde esta é relacionada com a relação G de retificação ($G = V_w / V_s$) na avaliação do desempenho de rebolos. Nessa avaliação foi detectado um comportamento de crescimento da relação G juntamente com a elevação da dureza até determinado grau (que varia com o tamanho de grão). Após esse grau, a relação G passa a cair conforme a dureza aumenta. A figura 2.2 mostra como esse comportamento se dá.

Esse comportamento da relação G como função da dureza do rebolo pode ser explicado com os mesmos argumentos que foram utilizados acima na descrição da regra para a escolha do rebolo. Em rebolos mais moles, ocorre a auto-afiação e o desprendimento do grão abrasivo do rebolo, causando maior desgaste. Mesmo que o rebolo apresente-se agressivo e que remova um volume significativo de material, esse desgaste acentuado faz com que a relação G seja baixa. Já nos rebolos mais duros o desgaste do rebolo é relativamente menor, mas com a ocorrência do empastamento da superfície do rebolo (“wheel loading”) e com o desgaste do grão abrasivo, e a conseqüente perda de agressividade, o volume de material removido também é menor, resultando assim em um valor baixo de relação G. É interessante destacar que o comportamento da relação G também pode ser influenciado pelo tamanho de grão, uma vez que conforme esse tamanho é diminuído a ocorrência de fraturas nos grãos também tende a diminuir, mesmo nos grãos mais friáveis.

É importante ressaltar que também as condições de operação podem alterar de maneira significativa o comportamento do rebolo no que se refere à dureza. Dentre essas alterações de comportamento, a que maior destaque merece é a dureza dinâmica, que tem relação direta com a velocidade de corte (Wilson, 1977; Vieira, 1992). Conforme a velocidade de corte é aumentada, o rebolo passa a apresentar comportamento de mais

duro. Por outro lado, com a diminuição da velocidade periférica o rebolo passa a se comportar como mais mole. Esses comportamentos, tema principal do presente trabalho, são analisados com maior detalhamento mais adiante.

Apesar da reconhecida importância que a dureza do rebolo tem sobre o processo de retificação, e mesmo tendo os níveis de dureza definidos por normas técnicas, rebolos com o mesmo grau de dureza de diferentes fabricantes podem apresentar variações no seu comportamento em processo. Isso, normalmente, é creditado aos diferentes métodos de avaliação de dureza de rebolos existentes e que são expostos e discutidos a seguir.

2.2. - Controle da dureza na fabricação de rebolos

A fabricação de rebolos é feita através da mistura e prensagem dos elementos que o compõem, todos colocados em proporções pré-determinadas para resultar na combinação desejada de grãos, ligante e estrutura. Um desses resultados deve ser a dureza do rebolo. Depois de prensados, os rebolos são submetidos ao processo de queima (caso dos rebolos vitrificados) ou de cura (caso dos rebolos com ligante resinóide), e sua dureza deve ser verificada para que seja possível avaliar os resultados da fabricação. A seguir serão expostos os diversos métodos que podem ser utilizados para controlar e avaliar a dureza de rebolos, começando pela exposição do “Diagrama Ternário”.

Durante a fabricação de rebolos o uso do diagrama ternário (ou diagrama de fase) é a referência inicial para a determinação da dureza (Peters et al, 1968; Malkin, 1989; König, 1980). Trata-se de um diagrama cujos eixos quantificam os volumes de

grão abrasivo (V_g), de ligante (V_b) e de poros existentes no rebolo (V_p), e que mostra graficamente a seguinte equação:

$$V_g + V_b + V_p = V \quad \dots\dots\dots(1),$$

onde $V \implies$ volume total do rebolo (mm^3).

A equação (1) pode ser escrita também na forma percentual, trazendo assim a formulação da composição de um rebolo, independente das suas dimensões:

$$v_g + v_b + v_p = 100 \% \quad \dots\dots\dots(2),$$

onde: $v_g \implies$ percentual de volume de grão abrasivo na composição do rebolo;

$v_b \implies$ percentual de volume de ligante na composição do rebolo;

$v_p \implies$ percentual de volume de poros na composição do rebolo.

A figura 2.3 mostra um diagrama ternário de percentuais de grãos, ligante e poros em um rebolo.

De acordo com Peters et al, 1968, na fabricação do rebolo, uma vez que os ingredientes (grão e liga) não sejam modificados e que o processo esteja controlado, um rebolo teria características de estrutura (porosidade) e dureza bem definidas. Mudanças na composição do rebolo alterariam essas características, estando assim a dureza diretamente relacionada com essa composição.

No diagrama ternário, cada canto representa uma quantidade de 100% do componente considerado e zero dos outros componentes. Cada ponto do diagrama representa, a princípio, uma composição de rebolo bem definida.

Nesse diagrama podem ser encontrados três lugares geométricos de especial interesse (Peters et al, 1968; Malkin, 1989). São linhas perpendiculares a um dos três eixos (porosidade, volume de grãos e volume de ligante), chamadas de “linhas iso”, que são:

- linha iso porosidade (linha 1, no diagrama);

- linha iso volume de grãos (linha 2, no diagrama);
- linha iso volume de ligante (linha 3, no diagrama).

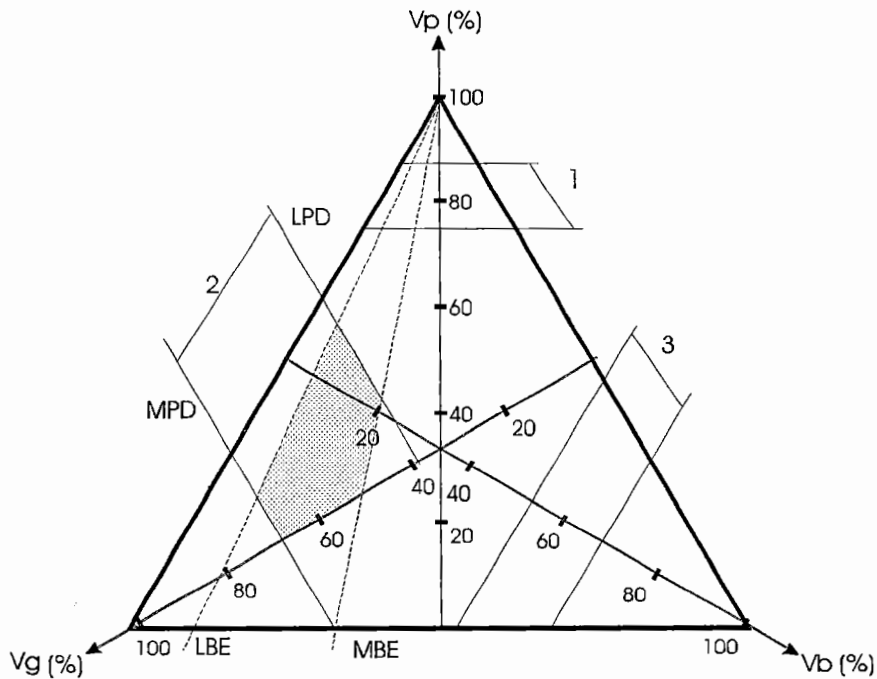


Figura 2.3 - Diagrama ternário de composição de rebolos

Nessas “linhas iso” o percentual do componente considerado é mantido constante. Assim, na linha iso volume de grãos a porcentagem de abrasivos é constante (mesmo “packing”). Na linha iso porosidade mantém-se constante o percentual de poros no rebolo. E na linha iso volume de ligante a porcentagem de liga é que se mantém constante.

Como foi citado anteriormente, a princípio qualquer ponto do diagrama representa uma composição de rebolo. No entanto, uma composição com apenas grãos e poros é impossível por não existir a coesão entre os grãos, proporcionada pelo ligante. Segundo Malkin, 1989, os limites para cada linha iso são:

- porosidade entre 75% e 86%;

- grãos entre 68% e 38% (linhas MPD e LPD, respectivamente);
- ligante entre 54% e 68%.

Segundo Peters et al, 1968, alguns fabricantes de rebolo consideram as linhas MPD (“maximum packing density”) e LPD (“lower packing density”) como linhas de “iso-estrutura”, uma vez que as estruturas de rebolos têm limites (superior e inferior) que estão diretamente relacionados com o tamanho e formato do grão abrasivo. Vale destacar que, no caso de rebolos com MPD, a ocorrência da fratura de uma certa quantidade de grãos durante a fabricação, principalmente na fase de prensagem do rebolo, provoca um fechamento na estrutura do rebolo. Também é interessante destacar que o valor do LPD pode ser alterado na fabricação através da adição de elementos que aumentam a estrutura do rebolo e que desaparecem na fase de queima (ex: naftalina, casca de coco, isopor, etc.), deixando em seu lugar espaços vazios.

Também têm importância as linhas LBE e MBE do diagrama. Essas linhas representam combinações com proporções iguais entre os volumes de grãos e de ligante, variando o percentual de poros. A linha LBE (“least bond equivalent” - mínimo equivalente de liga) apresenta uma proporção entre volume de grãos e de ligante da ordem de 12:1, enquanto que a linha MBE (“maximum bond equivalent” - máximo equivalente de liga) apresenta proporção de 3:1, sempre com diferentes quantidades de poros. Nos rebolos com MBE a quantidade de ligante deve ser suficiente apenas para cobrir os grãos abrasivos, e não para formar pontes de liga; já nos rebolos com LBE a quantidade de ligante deve ser suficiente para proporcionar a adesão necessária dos grãos abrasivos, sem que seja preciso recobri-los por completo (Malkin, 1989).

A região delimitada pelas linhas iso volume de grão LPD (“least packing density” - mínima densidade de grãos) e MPD (“maximum packing density” - máxima densidade de grãos), juntamente com as linhas LBE e MBE, acima do eixo Vg (região hachurada

na figura 2.3), representa praticamente a maioria das composições de rebolo possíveis de serem feitas. Isso se deve a limitações práticas e tecnológicas da fabricação de rebolos (Peters, 1968; Malkin, 1989; König, 1980).

Alguns fabricantes, segundo Peters et al, 1968, utilizam as linhas de “isoporosidade” (linha 1 do diagrama ternário) como linhas de “iso-dureza”, assumindo que a dureza permanece constante dentro de uma mesma porosidade. A figura 2.4 mostra um detalhe do diagrama ternário onde as linhas de porosidade são mostradas como linhas de “iso-dureza”. Um detalhe dessa figura é a quebra existente nas linhas indicando o ponto onde a estrutura dos rebolos começam a apresentar-se mais fechadas devido ao maior volume de grãos envolvido na mistura. Isso ocorre quando o volume de grãos fica acima de 60%. Nos casos onde utiliza-se menor proporção de grãos abrasivos, o percentual de porosidade pode ser calculado em função do volume de grãos e da dureza desejada do rebolo:

$$vp = [2 \times (99,5 - 2 \times n) - vg] / 3 \quad \dots\dots\dots(3),$$

onde n ---> n° inteiro (1, 2, 3, ...) correspondente a um grau de dureza (E, F, G, ...), respectivamente.

O volume proporcional de grãos utilizado para a composição de um rebolo, segundo Malkin, 1989, pode ser determinado em função da estrutura que se deseja, uma vez que esta indica maior concentração de abrasivo (quando for mais fechada) ou menor concentração de abrasivo (quando for mais aberta):

$$vg = 2 \times (32 - S) \quad \dots\dots\dots(4),$$

onde S ---> estrutura do rebolo (1, 2, 3, ..., 12).

Substituindo a eq. (4) na eq. (3), chega-se a:

$$v_p = 45 + (S - 2 \times n) / 1,5 \dots\dots\dots(5).$$

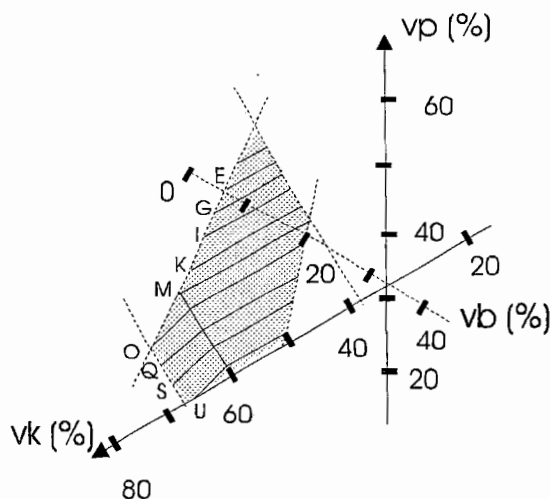


Figura 2.4 - Detalhe do diagrama ternário mostrando as linhas “iso-dureza” utilizadas pelos fabricantes de rebolos (Peters et al, 1968).

De acordo com as eq. 4 e 5 , rebolos com a mesma dureza mas com quantidade de grãos diferentes (estruturas diferentes) deverão apresentar porosidades diferenciadas também, o que está correto segundo o diagrama ternário.

No entanto, nem todos os fabricantes usam as mesmas linhas de “iso-dureza” mostradas no diagrama da figura 2.4, preferindo utilizar padrões próprios de caracterização. Assim, fica claro que apenas o uso do diagrama ternário e das equações 3, 4 e 5 para a determinação e controle do grau de dureza de um rebolo não impede que diferentes fabricantes possam utilizar a mesma indicação de dureza em rebolos com comportamentos e durezas distintas. Outros fatores também podem fazer com que a dureza mude, como a qualidade dos materiais de liga utilizados ou ciclos de queima

diferentes (Nussbaum, 1988). Além disso, a indicação da dureza através do código alfabético, cujas referências dependem de cada fabricante, não cobre plenamente a definição física de dureza - a força requerida para arrancar os grãos da superfície do rebolo - deixando espaço para que os fabricantes estabeleçam níveis de dureza praticamente particulares.

2.3. - Métodos de verificação de dureza

Para minimizar as dúvidas que o uso isolado do diagrama ternário pode trazer quanto ao real nível de dureza que um rebolo pode ter após a fabricação é comum que alguns testes de medição e controle da dureza sejam utilizados. Esses testes são realizados, na maioria dos casos, para conferir o grau de dureza preestabelecido com o auxílio do diagrama ternário e das equações para a formulação do rebolo antes da fabricação, no momento da determinação das quantidades envolvidas na mistura da massa do rebolo. A seguir serão expostos os testes de medição e controle de dureza que são utilizados pelos fabricantes de rebolos, a saber: os testes de remoção física (“scratching-test”), o teste de resposta de frequência (“grind-o-sonic”), o teste de desgaste abrasivo (“Zeiss-Mackensen”) e o teste de dureza Rockwell. É importante ressaltar que esses testes são também chamados “non-grinding tests” (testes sem retificação), ou seja, são testes estáticos que verificam apenas algumas características inerentes ao rebolo, e não o seu desempenho em processo.

2.3.1. - Verificação da dureza pelo teste de Rockwell

Esse teste é semelhante ao utilizado para a verificação da dureza de metais (König, 1980). Com uma esfera metálica (ou ponta de diamante) provoca-se uma impressão na superfície do rebolo. Essa impressão é então medida e em função das suas dimensões é determinada a dureza do rebolo.

É um teste extremamente simples, mas cuja imprecisão pode ser elevada. Por se tratar de um esmagamento localizado dos grão abrasivos (primeiramente) e da liga (em segundo plano), o teste de Rockwell fica sujeito a interferência direta do tamanho do grão abrasivo utilizado e de sua friabilidade, cuja influências já foram discutidas anteriormente, e também da distribuição dos grãos abrasivos na superfície do rebolo (raramente feita de maneira regular).

2.3.2. - Verificação da dureza pelo teste de desgaste abrasivo

O teste de desgaste abrasivo consiste em aplicar sobre a superfície lateral do rebolo um volume (Q) de 48 cm³ de grãos de carbeto de silício (SiC), com tamanho entre 0,6 e 0,85 mm de diâmetro, através de um jato constante de 1,5 bar de pressão (P), provocando assim a formação de uma cratera. A profundidade dessa cratera (a) é então medida e relacionada com a dureza do rebolo. A figura 2.5 mostra como funciona o teste de desgaste abrasivo (ou “Zeiss-Mackensen”) para a verificação da dureza de rebolos (König, 1980).

Aqui, as maiores dúvidas com relação aos resultados ficam por conta da variação do tamanho dos grãos de SiC que são jateados contra o rebolo (de até 25%), mas o teste

é praticamente isento da influência da friabilidade dos grãos abrasivos do rebolo. Além disso, nesse teste mede-se a resistência que o ligante oferece à abrasão, e não a sua resistência a solicitações no sentido de promover arrancamento do grão abrasivo.

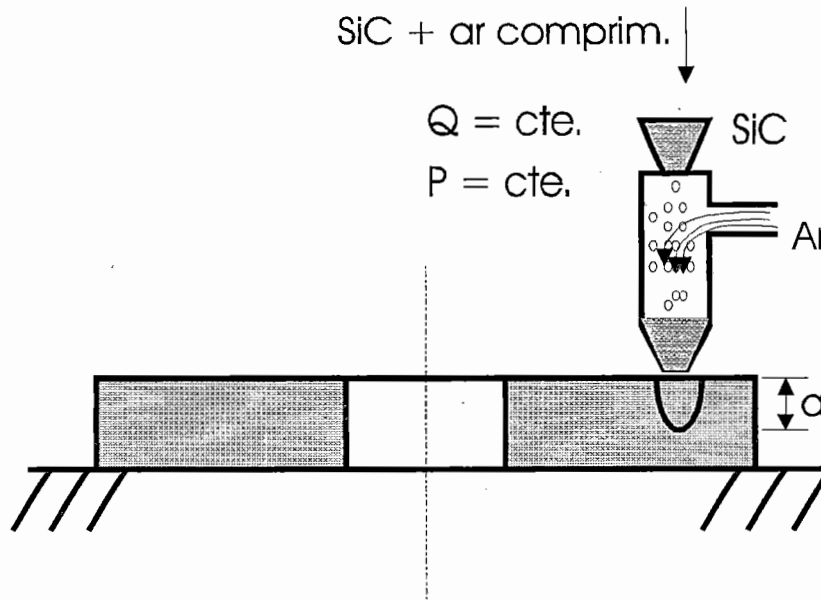


Figura 2.5 - Teste de Zeiss-Mackensen para verificação da dureza de rebolos (König, 1980).

2.3.3. - Verificação de dureza pelo teste de remoção física

Esse teste era a princípio feito utilizando uma ferramenta como a chave de fenda para promover o arrancamento dos grãos do rebolo (Malkin, 1989; König, 1980; Nussbaum, 1988). Conforme o esforço necessário para esse arrancamento determinava-se o nível de dureza do rebolo. No entanto, por não utilizar equipamento algum para a realização do teste, o resultado era proveniente de avaliações subjetivas da pessoa responsável pela execução do teste.

Na tentativa de aprimorar esse tipo de ensaio, segundo Nussbaum, 1988, em 1942 foi desenvolvido um aparelho manual, onde a força aplicada seria controlada por um sistema de molas e rolamentos (como um torquímetro). Em uma janela situada na parte inferior do aparelho é mostrado o grau de dureza do rebolo testado, identificado no momento do arrancamento dos grãos. A ponta de penetração deve ser de aço e com espessura variável conforme o tamanho de grão do rebolo. A figura 2.6 mostra um esquema de funcionamento desse aparelho.

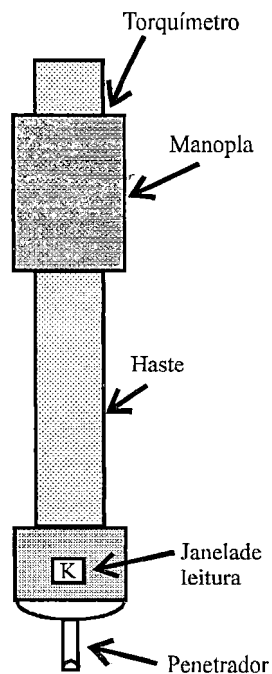


Figura 2.6 - Aparelho manual para “scratching test” (Nussbaum, 1988).

Apesar de procurar isolar a influência da avaliação subjetiva sobre os resultados do teste, esse aparelho não possibilita uma verificação uniforme e precisa, visto que a força aplicada pela pessoa que executa o ensaio pode apresentar variações; mesmo com o sistema de controle de torque disponível, a força de penetração não sofre controle algum, possibilitando que diferentes penetrações da ponta de aço levem a resultados não confiáveis.

Para tentar solucionar a falta de confiabilidade que um aparelho manual poderia trazer, foi desenvolvida a máquina para a medição de dureza conhecida como “pica-pau”, mostrada na figura 2.7.

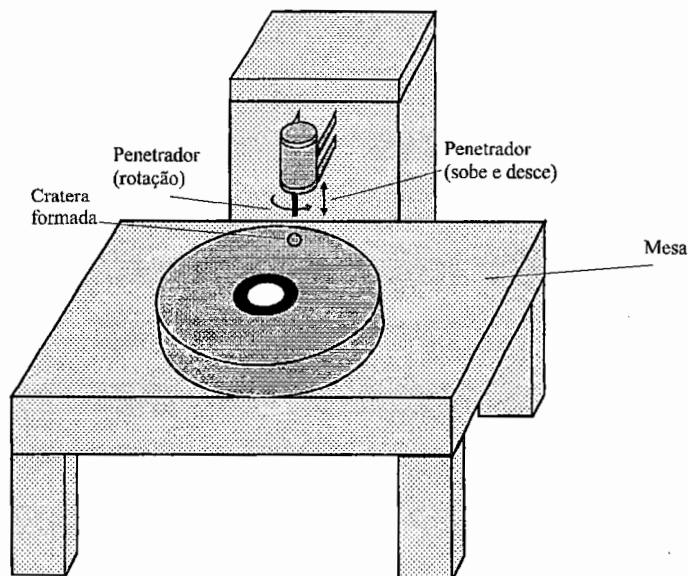


Figura 2.7 - Representação da máquina “pica-pau” para a verificação de dureza.

Nessa máquina o penetrador é levado para cima e deixado cair contra o rebolo diversas vezes, sempre sofrendo uma pequena rotação durante o movimento de elevação, provocando a formação de uma cratera na superfície do rebolo. Ao final de um determinado número de pancadas, a cratera é medida e esse resultado é associado com a dureza através de uma tabela de conversão. Esse sistema está em desuso pois não existe uma padronização no que se refere ao penetrador e nem quanto à quantidade de pancadas que devem ser dadas no rebolo para a obtenção dos resultados.

Peklenik et al, 1964, apresenta também uma variação deste método de medição, onde um penetrador com ponta de metal duro ou de diamante com perfil em V (ângulo de 52°) mergulha sobre a superfície do rebolo com velocidade controlada (aproximadamente 0,15 m/min) e provoca a formação de uma ranhura (figura 2.8a). O

penetrador é acoplado a um dinamômetro que mede o esforço necessário para remover os grãos abrasivos. O formato da ponta do penetrador possibilita que a profundidade de penetração seja igual à largura da ranhura (figura 2.8b). Dos valores medidos pelo dinamômetro, é extraído um valor médio de força (P_b) que é associado à escala de dureza.

Segundo Peklenik et al, 1964, esse método apresenta uma boa definição de resultados quando aplicado em rebolos com granulometrias e durezas diferentes, mas quando é utilizado para a verificação de rebolos com durezas diferentes e granulometrias iguais sensibilidade é reduzida. Isso se deve aos seguintes fatos: o método mede o esforço necessário para a remoção dos grãos apenas na direção em que ocorre o movimento do penetrador, desconsiderando que a ancoragem dos grãos nem sempre ocorre de maneira uniforme; além disso, o método sofre grande influência da fratura dos grãos, ou seja, mede em grande parte a força necessária para fraturar o abrasivo e não para removê-lo do rebolo. E, finalmente, o método não descreve uma profundidade padrão para a penetração. Supostamente esta deve ser correspondente ao tamanho do grão abrasivo, mas nada é explicitado.

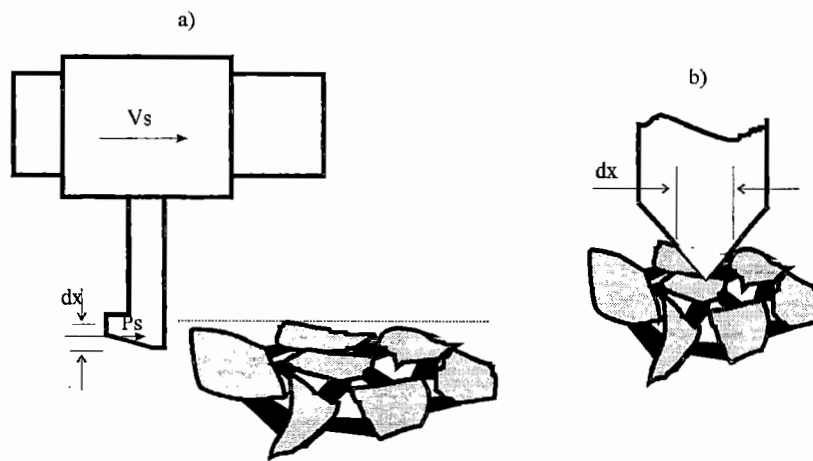


Figura 2.8 - Método de medição por riscamento utilizado por Peklenik et al, 1964: a) esquema do teste; b) esquema da vista lateral do teste, destacando a geometria do teste.

Uma outra variação de aparelho para o “scratching test” é o baseado no método Winterling, mostrado na figura 2.9.

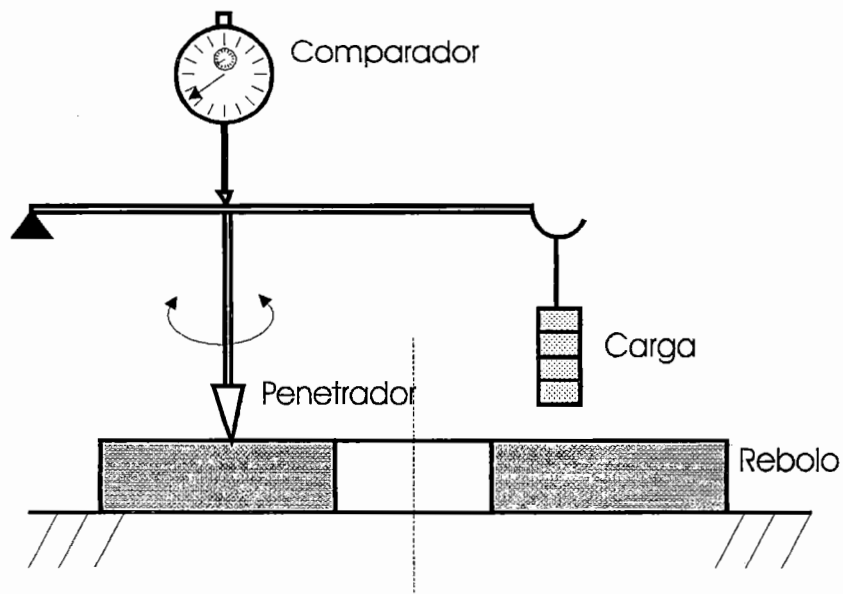


Figura 2.9 - Esquema do medidor de dureza do método Winterling (Nussbaum, 1988)

Nessa montagem, a carga aplicada é mantida constante durante o teste. Essa carga é aplicada sobre um penetrador de metal duro. Já carregado, o penetrador é então

rotacionado 180° sobre o rebolo, deixando assim impressa uma marca. A profundidade dessa marca é então medida (pelo comparador instalado no alto do aparelho) e associada com a dureza do rebolo através de uma tabela de conversão, elaborada em função da carga aplicada, do tamanho de grão do rebolo e do formato do penetrador utilizado. A carga e o formato do penetrador (e dimensões) são padronizados de acordo com normas internacionais.

O método Oghoshi, padronizado pelas normas JIS R6210 e JIS R6212, é uma variação do método Winterling. A grande diferença entre os métodos encontra-se na rotação do penetrador, que no caso do método Oghoshi é de 120°.

Apesar de mostrar-se mais confiável que as demais montagens para ensaios de remoção física, esses métodos também apresentam o problema de desconsiderar a influência que a friabilidade dos grãos abrasivos pode ter sobre os resultados do teste. É possível que durante o giro do penetrador os grãos sejam mais fraturados do que removidos, mascarando assim o resultado de uma medição. Isso pode ocorrer com maior frequência em rebolos feitos com grãos mais grossos e friáveis.

Outro problema que pode afetar o resultado é o desgaste da ponta do penetrador, que tende a ficar arredondada conforme uso (desgaste abrasivo). Com a ponta desgastada, a tendência é de que a penetração seja menor e que o resultado não reflita exatamente a realidade.

Além disso, as tabelas de conversão apresentam faixas de profundidade relacionadas à dureza. Assim, é possível que uma medida resultante de um teste seja enquadrada em mais de uma faixa de dureza. Por exemplo, se em um teste foi obtida uma profundidade X, essa profundidade pode estar enquadrada dentro da faixa de dureza K, dentro da faixa L ou ainda M ou N. Desse modo, o rebolo testado pode ser entendido como sendo de um determinado grau de dureza ou até mesmo de um ou dois

graus acima ou abaixo, deixando uma grande margem de incerteza quanto ao resultado. As tabelas padronizadas pelas normas JIS são mostradas no anexo I.

2.3.4. - Verificação de dureza através do módulo de elasticidade

Este método de verificação de dureza, que também é conhecido por “Grind-o-sonic”, foi proposto por Peters e Snoeys em 1965 (apud Peters et al, 1968), e consiste na associação da dureza do rebolo com o seu módulo de elasticidade E (módulo de Young). Partindo-se do princípio de que o módulo de Young expressa a rigidez de um sólido, seria correto associá-lo à rigidez dada ao rebolo pelos seus constituintes (grãos e ligante), conciliando as necessidades apresentadas por fabricantes (verificar a correção da formulação utilizada e graduar corretamente o rebolo) e por usuários (conferir as características operacionais do rebolo), uma vez que os métodos utilizados até então não satisfaziam essas necessidades.

O método consiste na medição da frequência de resposta de um rebolo submetido a uma excitação controlada, conforme mostra o esquema da figura 2.10.

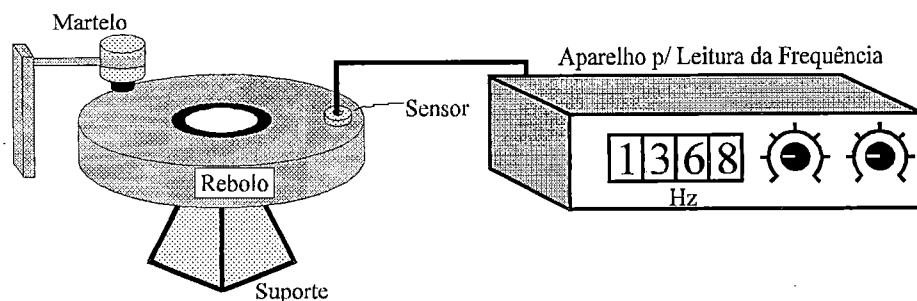


Figura 2.10 - esquema do grind-o-sonic

Um transdutor (geralmente piezelétrico) colocado na superfície do rebolo capta a frequência de resposta apresentada após o rebolo sofrer uma excitação causada por um choque mecânico provocado por uma ferramenta do tipo de um martelo com a ponta de borracha. O choque tem carga controlada para que a excitação seja sempre uniforme e não provoque danos ao rebolo (trincas ou falhas). A frequência de resposta à excitação é medida com o uso do transdutor colocado na superfície do rebolo e então utilizada para calcular o módulo de elasticidade deste, com o auxílio da seguinte equação:

$$E = \frac{1,07 \cdot (1 - \nu) \cdot \rho \cdot d_s^2 \cdot f^4}{b^2 \cdot [1 - (d_o/d_s)^2]} \dots\dots\dots (6),$$

onde: ρ ---> densidade do rebolo;

ν ---> constante de Poisson - determinada em função da frequência de resposta;

f ---> largura do rebolo;

d_s ---> diâmetro externo do rebolo;

d_o ---> diâmetro interno do rebolo.

O valor calculado para o módulo de elasticidade **E** é então associado aos níveis de dureza através de gráficos e tabelas que estabelecem a graduação alfabética.

Este método de verificação de dureza apresenta algumas vantagens em relação aos demais métodos descritos anteriormente. A padronização das condições de teste é uma delas, e garante maior repetibilidade aos resultados, assegurando que elementos externos ao processo de medição não terão interferência no teste. Além disso, ainda pode-se destacar que a aparelhagem utilizada também não influencia o resultado. Outra vantagem é a pequena variação apresentada pelas medições da resposta de frequência,

que é da ordem de 5%. Segundo Peters, 1968, isso representa uma variação menor que 20% dentro da faixa de definição de um grau de dureza, o que representa uma definição mais precisa para o resultado final. Bhateja, 1981, afirma que o uso do módulo de elasticidade apresenta grande sensibilidade a variações na dureza do rebolo, e que por isso deve ser preferido para a verificação em detrimento dos outros métodos menos sensíveis.

Uma questão que surge neste método é quanto ao fato de que rebolos com as mesmas dimensões podem ter diferentes valores de E em função de uma mudança na sua massa ou na resposta de frequência. No entanto, considerando-se que tanto a massa do rebolo como a resposta de frequência estão diretamente relacionadas com a densidade do rebolo, e que esta por sua vez é relacionada com a porosidade do rebolo, a concepção de que uma variação no módulo E pode representar uma alteração na dureza do rebolo é coerente com o que descreve o diagrama ternário apresentado anteriormente.

Apesar de apresentar-se como o método mais coerente dentre os analisados até o presente momento deste trabalho, o uso do “Grind-o-sonic” não considera que alguns fatores podem influenciar o resultado. Nagao et al, 1985, estudou o comportamento do módulo de elasticidade de rebolos fabricados com as mesmas dimensões e com constituições praticamente iguais, variando apenas o tipo de grão (óxido de alumínio branco e carbetto de silício verde) e a variedade do ligante (ambos com liga vitrificada, mas com características mais apropriadas para cada tipo de grão). O resultado obtido mostra que o módulo de elasticidade apresenta valores diferenciados para cada rebolo, conforme mostra a tabela II.1. Essa variação indica que os rebolos devem ter valores diferentes de dureza, de acordo com o princípio do “grind-o-sonic”. No entanto, as formulações utilizadas por Nagao et al, 1985, para a fabricação dos rebolos foram estipuladas de modo a manter o mesmo grau de dureza em ambos.

Característica analisada	WA60K8V4U	GC60K8VG76
Módulo de elasticidade do grão abrasivo (E_g)	25000 kgf/mm ²	38500 kgf/mm ²
Constante de Poisson do grão abrasivo (ν_g)	0,19	0,18
Módulo de elasticidade do ligante (E_b)	7500 kgf/mm ²	7000 kgf/mm ²
Módulo de elasticidade do rebolo (E_s)	5050 kgf/mm ²	3790 kgf/mm ²

Tabela II.1- Valores de módulo de elasticidade (E) e constante de Poisson (ν) para rebolos diferentes (Nagao et al, 1985).

De acordo com os resultados obtidos por Nagao, 1985, um rebolo com grão **WA** apresenta maior valor de **E** quando comparado a um rebolo com grão **GC**, mesmo que estes tenham as mesmas porcentagens de grão e de porosidade, a mesma granulometria, a mesma quantidade de ligante e as mesmas dimensões. Isso pode ser creditado a características inerentes aos materiais que constituem o rebolo (grão e ligante), conforme se observa na tabela II.1 (módulo de Young do grão e do ligante, por exemplo).

Além disso, ainda segundo Nagao et al, 1985, as relações tensão-deformação apresentam-se dependentes da tensão, o que significa que o módulo de elasticidade pode também variar em função do valor da tensão, e não apenas em função das características do rebolo, como sugere o método.

Outra dúvida que surge sobre os resultados do método do “Grind-o-sonic” é com relação ao comportamento do módulo de elasticidade quando a composição do ligante é alterada. Ogawa e Okamoto, 1986, verificaram que quando as porcentagens de liga, grãos e poros e as dimensões do rebolo são mantidas e a composição do ligante é alterada, o valor do módulo de Young não apresenta variações. Porém, variar as

porcentagens de feldspato, cerâmica e argila (componentes da liga) significa alterar o poder de aglomeração e retenção do ligante, ou seja, alterar a dureza do rebolo. Isso pode trazer inconsistências quando à confiabilidade dos resultados do método.

2.3.5. - Verificação da dureza através de outros métodos

Alguns outros métodos para a verificação da dureza de rebolos foram desenvolvidos mas que não chegaram a atingir alcance de uso pelos fabricantes e pelos usuários. Dentre estes métodos, o que teve maior difusão é o proposto por Colwell, 1962, chamado de “Dina Grinder”, onde um rebolo em movimento é retificado por uma ferramenta em formato de copo cônico (que pode ser outro rebolo ou feita em aço ou metal duro) tendo um ângulo de 90° entre as paredes do rebolo e da ferramenta (cortador) na região de contato. O cortador é montado em um eixo-motor posicionado sobre um dinamômetro de duas componentes (vertical e horizontal), conforme mostra a figura 2.11. As velocidades periféricas do rebolo e do cortador são iguais, e a profundidade de penetração recomendada é equivalente ao diâmetro médio dos grãos abrasivos (Peklenik et al, 1964). O esforço para retificar o rebolo medido pelo dinamômetro seria então dado pela composição de três outros esforços que Colwell denominou de “crushing component” (componente de esmagamento dos grãos), “elastic component” (componente elástica de grãos e liga) e “packing component” (componente de empacotamento da liga).

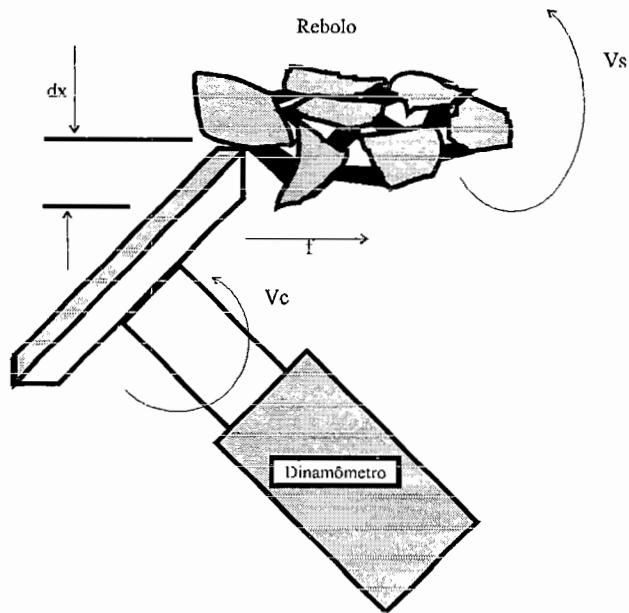


Figura 2.11 - Esquema de funcionamento do “dina grinder”

Apesar de ser um dos poucos métodos que leva em consideração tanto o fato de que o rebolo em movimento tem suas características de dureza afetadas (a chamada dureza dinâmica ou dureza efetiva, conforme denominação dada por Colwell), como o fato de que existe um componente de deformação elástica da liga e do grão cuja influência sobre a dureza do rebolo é considerável, o uso do “Dina Grinder” não se popularizou entre usuários e fabricantes. Peklenik et al, 1964, afirma que esse método não distingue claramente diferenças entre níveis de dureza que os rebolos possam apresentar, e que não fornece informação suficiente para ser utilizado na graduação de dureza.

Uma informação interessante diz respeito a uma influência aparente da velocidade do rebolo. Segundo Colwell, 1962, a influência da velocidade sobre a componente de esmagamento dos grãos (“crushing component”) seria pequena, apresentando um decréscimo da ordem de 7% (sete por cento) quando a rotação do rebolo foi alterada de 70 para 700 RPM (figura 2.12). Tal queda poderia ser em grande parte creditada a uma

atenuação do sinal obtido pela aparelhagem utilizada. Como a influência da velocidade de corte sobre os resultados da retificação vêm sendo amplamente discutidos e estudados por pesquisadores e usuários do processo, e como a dureza dinâmica é um dos temas tratados no presente trabalho, mais adiante a influência da velocidade do rebolo sobre o comportamento do rebolo será melhor discutida e analisada.

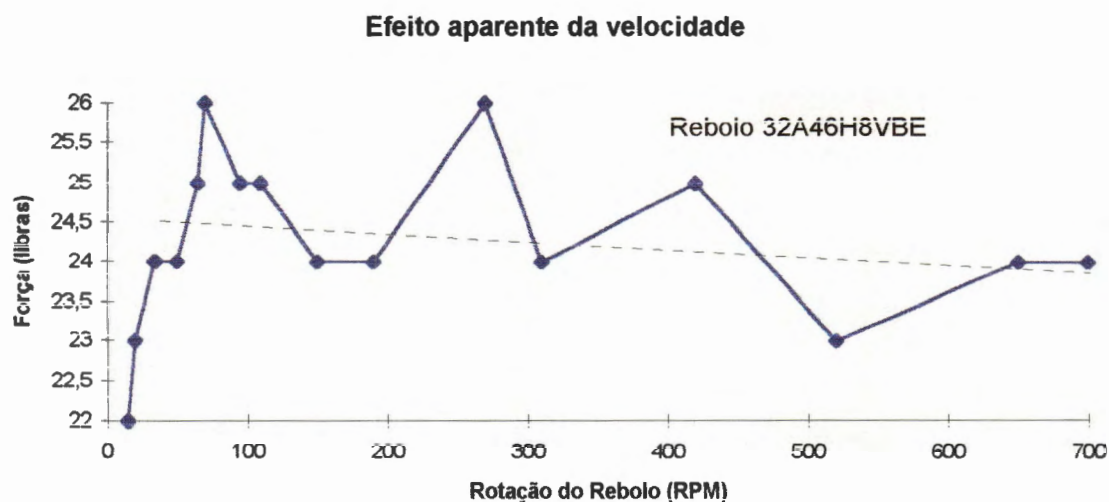


Figura 2.12 - Gráfico de força x velocidade apresentado por Colwell, 1962.

2.3.6. - Conclusões iniciais

Praticamente nenhum dos métodos vistos no presente capítulo possibilita a sua utilização na máquina retificadora, exceção feita ao “dina-grinder” que, no entanto, apresenta grande intrusividade ao processo. A dureza local do rebolo pode ser avaliada pelos métodos Winterling ou Oghoshi, mas esses métodos são inviáveis de serem aplicados com o rebolo em condições de trabalho, além de avaliarem apenas a superfície lateral do rebolo. Portanto, a dureza do rebolo não pode ser avaliada dentro das condições que efetivamente interessam para o processo de retificação, ou seja, em condições reais de trabalho.

Partindo-se do princípio de que o presente trabalho tem como objetivo propor um método que possibilite a avaliação da dureza do rebolo em condições de operação, a seguir é feita uma revisão sobre as aplicações de técnicas de emissão acústica (E.A.) no processo de retificação. Essa revisão visa proporcionar maior embasamento para a proposta que se deseja apresentar.

3. Uso de Emissão Acústica em Retificação

As técnicas de emissão acústica (EA) foram muito utilizadas nas décadas de 60 e 70 como uma fonte potencial de informação sobre a integridade estrutural de materiais (Blum e Dornfeld, 1990). Por tratar-se de um método não destrutivo de avaliação que, até então, já havia passado por mais de duas décadas de desenvolvimento (Hartbower et al, 1972), ensaios com o uso de emissão acústica passaram a ser largamente utilizados nos estudos de fadiga e fratura dos materiais sólidos e no monitoramento da propagação de trincas.

No início da década de 70, a “American Society for Testing and Materials” realizou um simpósio sobre emissão acústica, onde foram apresentadas aplicações das técnicas acústicas em monitoramento do crescimento de micro-trincas (Tetelman e Chow, 1972), em análise da mecânica de deslocamento das rochas (Haedy, 1972), na análise da formação da martensita em aços-liga (Speich e Fisher, 1972), e na inspeção de peças soldadas (Hartbower et al, 1972), entre outras também citadas por Hutton, 1972 (testes hidrostáticos, verificação da integridade de peças feitas em cerâmicas e madeiras, monitoramento de vazamentos em vasos de pressão, etc.).

Hutton, 1972, afirmou ainda que, para um sistema de monitoramento via emissão acústica ser aplicável, este deveria ter, entre outras, as seguintes características:

- detectar e localizar a origem do sinal acústico nos materiais analisados;
- distinguir ruídos causados por fontes elétricas e mecânicas de interferência;
- captar sinais bem definidos em estruturas com formas complexas como vasos de pressão com estrangulamentos, paredes com espessura elevada, locais de difícil acesso, etc.

Desde então, a emissão acústica também passou a ser uma potencial ferramenta para o controle e monitoramento de processos de fabricação (Dornfeld, 1992a), e vem tendo seu uso para o monitoramento de processos de usinagem se desenvolvendo desde o final da década de 70 (Diniz, 1992). Dentre as aplicações mais comuns da EA na usinagem encontram-se a detecção do desgaste e quebra de ferramentas de geometria definida (Liang e Dornfeld, 1987; Lan e Naerheim, 1985), e o controle do mecanismo de formação do cavaco (Dornfeld, s.d.) dentre outras diversas que Dornfeld, 1992a relaciona como possibilidades de uso no monitoramento de processos.

De um modo mais particular, a emissão acústica vem sendo largamente utilizada no processo de retificação para monitorar diversos fatores que afetam o resultado do processo: desgaste e empastamento do rebolo (Inasaki, 1985; Dornfeld e Cai, 1984; Mendizabal, 1991), dressagem (Oliveira et al, 1994; König e Meyen, 1990; König e Klumpen, 1993; Brinksmeier, 1993), acabamento (Chang e Dornfeld, s.d.), detecção de contato entre rebolo e peça e controle do avanço em retificação por mergulho (Blum e Dornfeld, 1990). Além disso, Oliveira et al, 1994, afirma que também é possível aplicar as técnicas de emissão acústica para a detecção do contato entre dressador e rebolo, para o controle do desgaste e perda do perfil do rebolo e para a correção de deformações térmicas ocorridas nas retificadoras durante o processo (deriva térmica).

A disseminação do uso de técnicas de EA no monitoramento dos processos convencionais de usinagem, e em especial o de retificação, pode ser creditado alguns fatores como (Liang e Dornfeld, 1987):

- a relação direta que as fontes de EA apresentam com o processo de separação do material durante a usinagem da peça;

- captando sinais de alta frequência (entre 15 KHz a 1MHz), a EA não sofre a influência indesejada de outras fontes sonoras do ambiente de trabalho. Além

disso, com o auxílio de um filtro de frequências é possível eliminar contaminações que o sinal possa sofrer;

- trata-se de um método não intrusivo para o monitoramento de processos, uma vez que o sensor pode ser colocado fora da região onde ocorre o corte de material, bastando apenas que haja contato físico entre a peça ou a ferramenta e o local de colocação do sensor para a propagação do sinal;

- o custo dos sensores de EA e da aparelhagem para o tratamento do sinal é baixo e de fácil manuseio.

Para melhor discutir as aplicações que já existem e as que vêm sendo propostas, inclusive a deste trabalho, é feita a seguir uma breve exposição sobre os conceitos de emissão acústica e sobre as informações que esta pode fornecer.

3.1. - Emissão Acústica - conceituação e geração do sinal

A emissão acústica pode ser entendida como sendo ondas de tensão geradas por atuações dinâmicas sobre os materiais (Liptai et al, 1972; Diniz, 1992). Conforme o material é submetido a um estímulo externo qualquer como a formação do cavaco, o atrito entre ferramenta e peça ou mesmo o simples contato, ocorre a deformação e o rearranjo da sua estrutura cristalina (Blum e Dornfeld, 1990). Isso libera uma quantidade de energia suficiente para produzir ondas de tensão que provocam mais deslocamentos sobre a superfície do material. Apesar da afirmação feita por Gillis, 1972, de que tais deslocamentos são geralmente assumidos como “sem importância” (“unimportant”), eles são a principal fonte de geração da EA.

Dunegan e Green, 1972, identificaram alguns fatores que podem influenciar a amplitude do sinal de emissão acústica. Alguns desses fatores, relacionados diretamente com o material estudado, são mostrados na tabela 3.1. A proposta apresentada pela pesquisa de Dunegan e Green não foi a discussão aprofundada da ação de cada um dos fatores listados, mas apenas a sua identificação e um alerta indicativo de sua influência sobre o sinal de EA.

Fatores que aumentam a amplitude da EA	Fatores que reduzem a amplitude da EA
Anisotropia	Isotropia
Não homogeneidade do material	Homogeneidade do material
Formação de fase martensítica	Difusão controlada de fase
Propagação de trinca	Deformação plástica
Tamanho de grão grande na estrutura	Tamanho de grão pequeno na estrutura
Tensão residual alta	Tensão residual baixa

Tabela 3.1 - Fatores que influenciam a amplitude do sinal de emissão acústica (Dunegan e Green, 1972).

A emissão acústica diferencia-se de sinais comuns de vibração pelo fato de que a frequência dessas ondas atinge valores superiores a 15 KHz, e que os deslocamentos não provocam necessariamente uma movimentação física do material, apenas deslocamentos estruturais. Além disso, a sua faixa de frequência ocorre onde vibrações mecânicas estruturais não podem ser captadas. A figura 3.1 mostra uma comparação entre as frequências dos sinais de EA e outros tipos de onda de rádio ou luminosas.

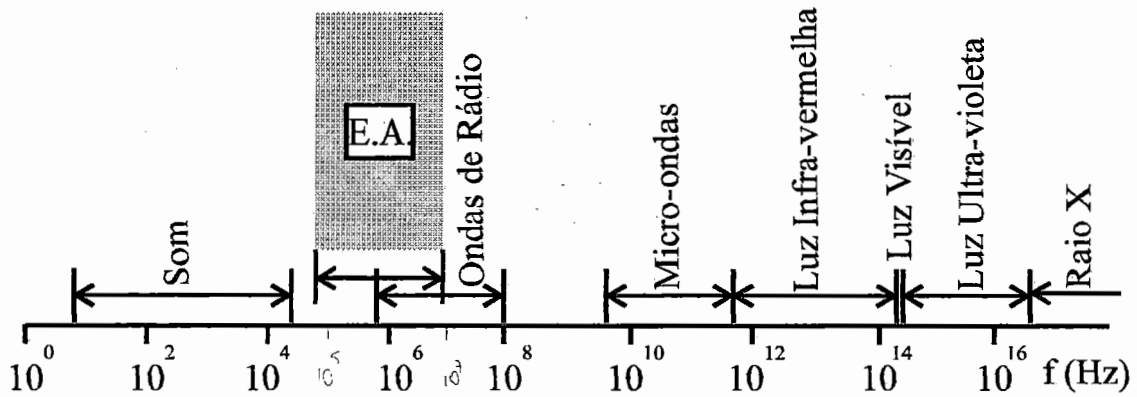


Figura 3.1 - Comparação das faixas de frequência da EA e outras tipos de onda (Blum e Dornfeld, 1990).

Outra diferenciação feita por Diniz, 1992, é com relação aos sinais de ultra-som, com os quais a EA poderia ser confundida. Enquanto o ultra-som pode ser gerado por uma fonte externa ao material e transmitido para o seu interior, inclusive com o seu sinal podendo ser controlado em termos de amplitude e frequência, a emissão acústica é inerente à excitação externa que o material sofre, permitindo que a sua frequência e intensidade sejam controlados apenas pelo controle da excitação (ex: fricção entre dois materiais ou ainda um choque mecânico).

Uma vantagem que Blum e Dornfeld, 1990, apresentam é com relação ao posicionamento do sensor de EA durante o monitoramento do processo. Por tratar-se de um sinal que se propaga tanto longitudinalmente como transversalmente na estrutura do material, a EA permite que o transdutor seja colocado em qualquer posição, desde que em contato com o material e em uma localização onde não ocorram muitas interfaces mecânicas. Essas interfaces tendem a distorcer e enfraquecer o sinal, dificultando a sua avaliação. Moriwaki (apud Diniz, 1992) afirma que os sinais de EA podem ser associados à deformação plástica dos materiais (sinal do tipo contínuo) ou ao crescimento de trincas nos materiais (sinais de pico). A formação do cavaco está

associada a sinais contínuos, enquanto que o rompimento do cavaco é a quebra e lascamento da ferramenta se associa aos sinais de pico.

Em um processo de usinagem que utiliza ferramenta com aresta de corte com geometria definida (torneamento, fresamento, por exemplo) a formação do cavaco é uma das fontes de geração de sinais de EA, conforme é mostrado na figura 3.2. Segundo Dornfeld, 1988, na zona primária de deformação se dá a formação do cavaco propriamente dita, com o cisalhamento do material; na zona secundária ocorre o contato entre cavaco e ferramenta; e na zona terciária, o contato entre ferramenta e peça. As três regiões de deformação são associadas à geração de sinais do tipo contínuo e a quebra do cavaco se associa à geração de sinais de pico.

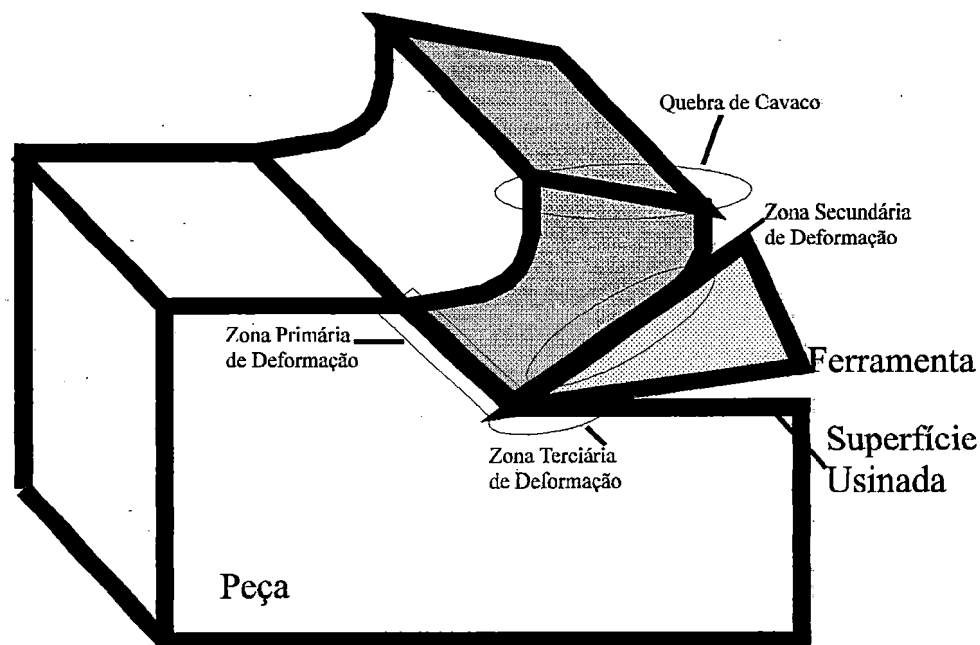


Figura 3.2 - Identificação das zonas de geração de EA em processos de usinagem que utilizam ferramentas com aresta de corte com geometria definida (Dornfeld, 1988).

Já no processo de retificação as principais fontes de geração de EA podem ser divididas nas três fases de formação do cavaco descritas por König, 1980. A figura 3.3

mostra essas três fases, onde ocorrem as deformações elástica (fase I) e plástica do material (fase II) e a separação do cavaco (fase III).

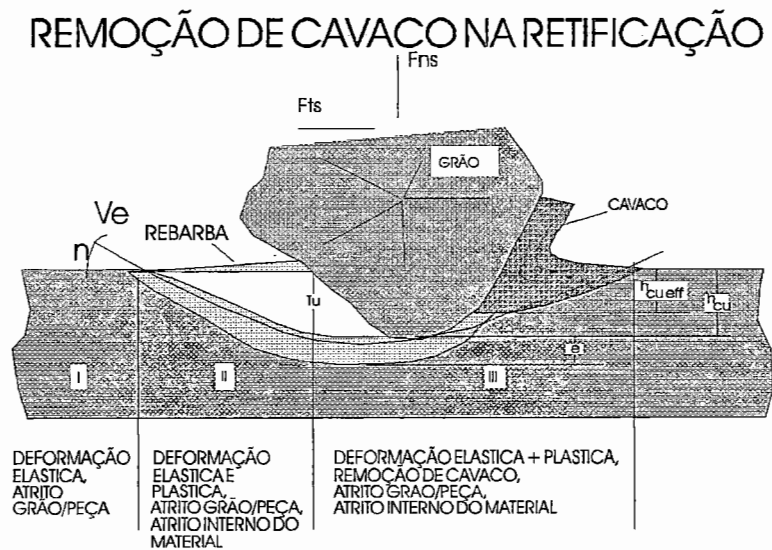


Figura 3.3 - Fases da formação do cavaco na retificação (König, 1980).



o problema em desgaste / se.

Um dos grandes problemas identificados nos processos de usinagem como o torneamento e o fresamento é o desgaste da ferramenta. Segundo Liang e Dornfeld, 1987, o desgaste da ferramenta promove a queda da qualidade da superfície usinada e provoca alterações indesejáveis e não preditíveis na geometria da peça. Assim, muitas atenções se voltaram para a solução desse problema usando as mais variadas metodologias, mas no presente trabalho apenas as que se utilizaram de técnicas de monitoramento via EA são abordadas.

3.2. - Algumas relações entre E.A. e desgaste de ferramentas

Liang e Dornfeld, 1987, verificaram que o sinal de EA vai sofrendo alterações conforme o desgaste de flanco da ferramenta no torneamento vai crescendo; o monitoramento do sinal permite identificar diferentes níveis de desgaste. A calibração dos parâmetros de controle poderia ser feita através de uma determinada condição de operação, não sendo necessária uma calibração específica para cada conjunto de parâmetros de corte utilizados. Isso permitiria que, com uma pequena margem de erro e pouca necessidade de parâmetros padronizados, o desgaste de flanco fosse controlado, evitando-se os resultados indesejados.

O desgaste da ferramenta já havia sido objeto de estudo de Lan e Naerheim, 1985, que também procuraram identificar outras influências sobre o sinal de EA no processo de torneamento. Como a emissão acústica apresenta-se sensível às deformações plásticas ocorridas no material durante a usinagem, os pesquisadores identificaram que alterações no ângulo de saída (poderiam ser controladas com o auxílio do sinal, uma vez que com o desgaste da ferramenta o referido ângulo torna-se menos agudo e provoca maior deformação no material em detrimento da remoção. Lan e Naerheim ainda identificaram que o sinal de EA apresenta grande sensibilidade a alterações na velocidade de corte, mas não indicaram concretamente nenhum comportamento.

O monitoramento da influência dos parâmetros de corte sobre o sinal de E.A. também foi estudado por Blum e Inasaki, 1990, onde foi indicado um aumento da E.A. com o aumento da velocidade de corte, a redução do sinal com o aumento do avanço e a indiferença do sinal às alterações na profundidade de corte. O crescimento da E.A. com o aumento da velocidade de corte explica-se pelo fato de que a energia consumida durante o corte sofre um acréscimo e que o surgimento do sinal de E.A. é decorrente da

liberação de energia provocada por deformações do material durante o processo de corte do material. Parte da energia mecânica do corte transforma-se em energia acústica, fazendo com que o sinal aumente de intensidade. Já o aumento do avanço faz com que a ocorrência de deformações no material diminua, fazendo a E.A. também cair.

Dornfeld, 1992, afirma que nos processos convencionais de usinagem que utilizam ferramentas com aresta de corte com geometria definida, a E.A. possibilita a detecção de desgaste e fratura da ferramenta, falhas na lubrificação do processo, formação do cavaco e vibrações. A ocorrência desses fenômenos está relacionada aos seguintes defeitos que podem ser encontrados nas peças: aresta postiça, acabamento superficial deficiente e variações dimensionais. Assim, com o uso da E.A. no monitoramento dos processos de usinagem os fenômenos citados acima poderiam ser evitados e, conseqüentemente, os defeitos também.

No fresamento ocorre ainda a influência dos sinais periódicos típicos do processo, como por exemplo a entrada e a saída da ferramenta (Diniz, 1992). Para evitar que esses sinais interfiram no monitoramento do processo alguns pesquisadores utilizaram técnicas matemáticas para a filtragem do sinal. Diei e Dornfeld (apud Diniz, 1992) usaram a “média no domínio do tempo” (“time domain averaging”) para eliminar as perturbações causadas no sinal de E.A. pelos ruídos do processo. Já Altintas (apud Diniz, 1992) utilizou-se de séries temporais.

3.3. - Uso da EA no monitoramento do processo de retificação

Nas operações de retificação a E.A. vem sendo utilizada como uma importante fonte de informação para o monitoramento e o controle do processo, principalmente com

a grande difusão que as máquinas retificadoras CNC tiveram no meio industrial (Oliveira et al, 1995). A seguir são apresentadas as aplicações das técnicas de E.A. no monitoramento do processo de retificação que foram propostas até o presente momento.

3.3.1. - Uso da E.A. na dressagem de rebolos

Inasaki, 1985, identificou que na dressagem o uso da E.A. poderia trazer informações importantes sobre a topografia do rebolo. Considerando que durante o processo de retificação o desgaste irregular do rebolo provocava alterações no seu perfil, Inasaki propôs que através do uso da E.A. o perfil do rebolo fosse verificado. A parte onde o desgaste ocorreu de forma mais notável apresentaria sinal de E.A. com menor intensidade, enquanto que na parte onde o desgaste foi menor, o sinal seria mais intenso. A figura 3.4 apresenta um exemplo desse tipo de verificação, mostrando um rebolo com perfil uniforme e o sinal de E.A. na dressagem desse rebolo (a) e um rebolo com perfil irregular e o seu respectivo sinal de E.A. na dressagem (b).

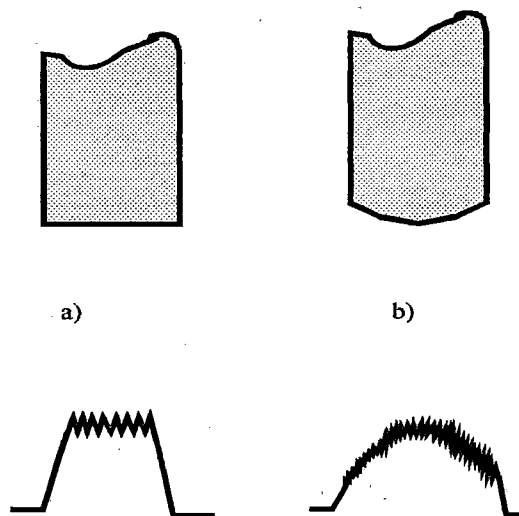


Figura 3.4 - Representação de sinais de E.A. na dressagem de rebolos com perfil (a) uniforme e (b) irregular (Inasaki, 1985).

No entanto, Inasaki, 1985, afirma que a variação na intensidade do sinal de E.A. durante a dressagem pode ser ocasionada também por uma alteração na dureza do rebolo ou ainda na sua estrutura. Tais tipos de não uniformidades também poderiam ser controladas com o uso da E.A. durante a dressagem do rebolo, uma vez que os rebolos mais duros apresentaram sinal de E.A. com maior intensidade. Esse tipo de relação entre dureza do rebolo e E.A. será melhor explorado adiante, por tratar-se de um dos objetivos do presente trabalho. Vale a pena ressaltar que Inasaki já citava que o comportamento de desgaste do rebolo em função da sua dureza poderia ser avaliado através do uso das técnicas de E.A. durante a operação de dressagem.

Ainda durante a dressagem, Inasaki, 1985, verificou que a distribuição dos grãos abrasivos na superfície do rebolo pode ser avaliada através dos picos que ocorrem no sinal de E.A., uma vez que cada choque entre o dressador e um grão abrasivo provoca uma elevação no sinal de E.A. captado durante a dressagem. Em sua pesquisa, Inasaki afirma ser possível avaliar a distância média entre grãos na superfície do rebolo, e constatou que em rebolos de dureza Q e com granulometria 60 esta distância é da ordem de 0,90 a 0,95 mm. Para outras durezas e outras granulometrias não existe nenhuma avaliação indicada. Brinksmeier, 1993, também indicou o uso da E.A. na dressagem como uma maneira de avaliar a topografia do rebolo.

Também no campo da dressagem, König e Klumpen, 1993, propuseram controlar o valor real do avanço de dressagem através da E.A.. Considerando que durante o processo de retificação ocorrem variações dimensionais na máquina devido ao efeito do aquecimento de certas partes do equipamento, o avanço de dressagem, bem como o posicionamento dos eixos da retificadora, seriam de certa forma duvidosos quanto ao seu real valor. Assim, a proposta de König e Klumpen foi estabelecer níveis de intensidade do sinal de E.A. ("threshold levels") para o valor correto da profundidade de

dressagem desejado. Desse modo, uma vez que o avanço de dressagem foi dado e o sinal de E.A. não foi compatível com o patamar estabelecido previamente, ficaria identificada a incorreção da dressagem devido aos problemas de deformação térmica da máquina. Inasaki, 1985, verificou que existe uma tendência do sinal de E.A. a se estabilizar em um determinado nível, mesmo com o aumento da profundidade de dressagem (figura 3.5). Isso pode ocorrer devido a uma saturação do sinal. Além disso, é importante o conceito de profundidade limite de dressagem ($a_{d \text{ lim}}$) estabelecido por Coelho, 1992, onde o valor da profundidade de dressagem deve ser suficiente apenas para promover o arrancamento dos grãos desgastados e a fratura dos grãos com boa ancoragem na liga, e não o arrancamento de grãos ainda praticamente inteiros.

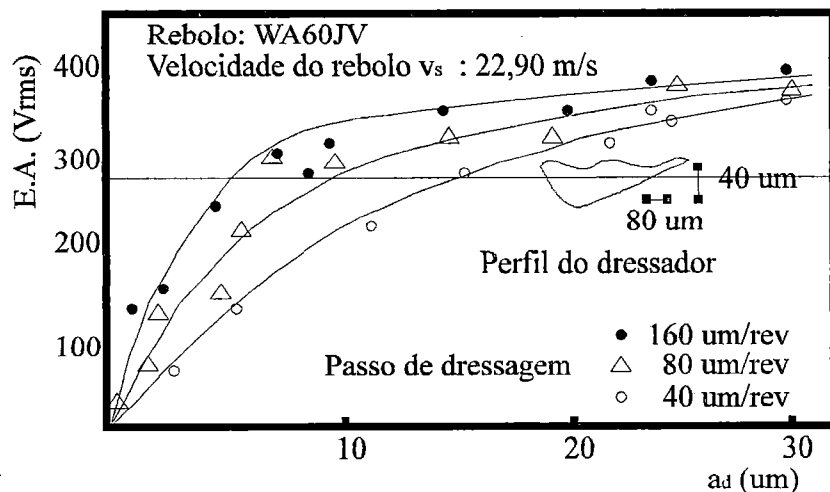


Figura 3.5 - Comportamento de saturação da E.A. em função da profundidade de dressagem (Inasaki, 1985).

Além do avanço de dressagem, Inasaki, 1985, estudou o comportamento do sinal de E.A. na dressagem com a alteração do passo de dressagem (S_d), verificando uma relação direta entre S_d e a E.A., conforme mostra o gráfico da figura 3.6, onde é possível observar que o comportamento da rugosidade (R_a) da peça em relação ao passo

de dressagem é semelhante ao do sinal acústico. Isso indica a possibilidade de prever o acabamento superficial de peças através do controle da E.A. na operação de dressagem. Essa possibilidade confirma-se pelo fato de que um aumento no passo de dressagem não apenas traz um acréscimo na E.A., mas também faz crescer a agressividade do rebolo diminuindo o grau de recobrimento de dressagem (U_d), conforme verificou Oliveira, 1988.

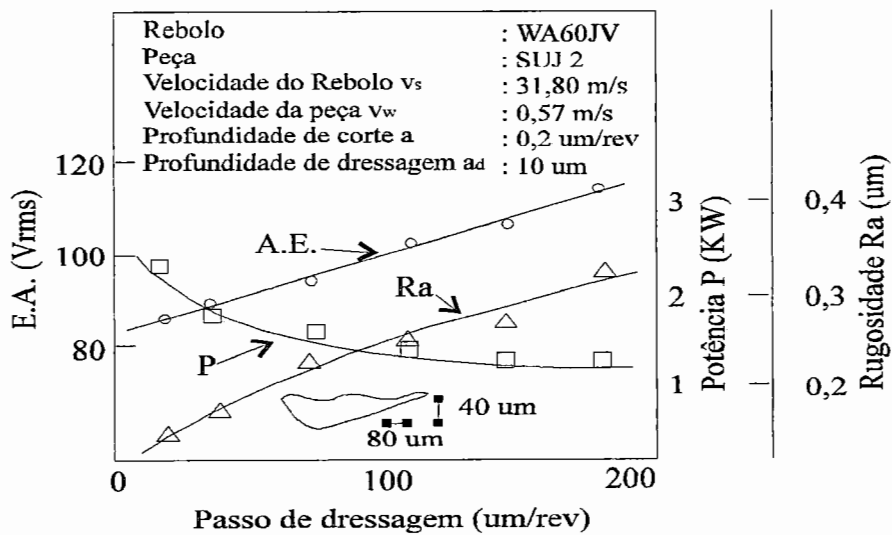


Figura 3.6 - Influência do passo de dressagem sobre a E.A., a rugosidade (Ra) da peça e a força de retificação (Inasaki, 1985).

Na operação de dressagem com o uso de disco dressador rotativo em passagem, estudada por Brinksmeier, 1993, foi verificada a tendência de que o sinal de E.A. na dressagem e a força de retificação tenham o mesmo comportamento em diversas combinações de velocidade do rebolo e do dressador (relação de velocidades) e para três condições de grau de recobrimento. A figura 3.7 mostra como se dá o comportamento da força.

Influência dos parâmetros de dressagem q_d e U_d sobre a força normal

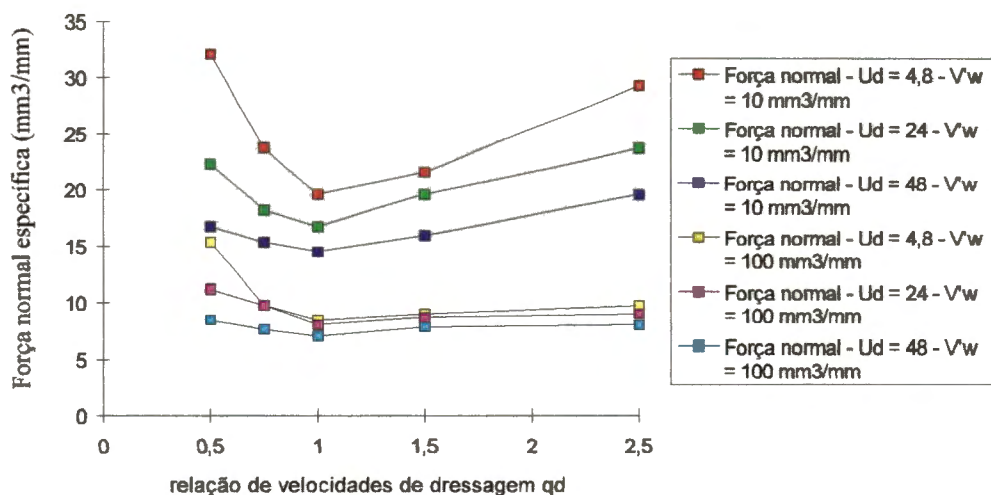


Figura 3.7 - Comportamento da força de retificação em função da relação de velocidades identificado por Brinksmeier, 1993.

O desgaste irregular que ocorre no rebolo durante o processo de retificação também foi objeto de estudo de König e Meyen, 1990, que partiram da constatação de que após uma operação de retificação o rebolo pode apresentar perfil com abaulamento ou com concavidade, ou ainda com um outro tipo de falha qualquer (um buraco, por exemplo). A correção desses defeitos deve-se dar através de dressagens onde o número de passadas do dressador seja o menor possível, evitando-se assim o desperdício de rebolo. Para identificar se o defeito foi corrigido com a dressagem, König e Meyen propuseram observar se o sinal de E.A. gerado durante a passagem do dressador sobre o rebolo era uniforme ou se apresentava alguma irregularidade. Essa irregularidade poderia ser um corte no sinal (caso de rebolo com buraco), ou sinal mais intenso no meio (caso de rebolo com perfil abaulado), ou ainda sinal com menor intensidade no meio (caso de rebolo com perfil côncavo). Esses tipos de sinal são mostrados na figura 3.8.

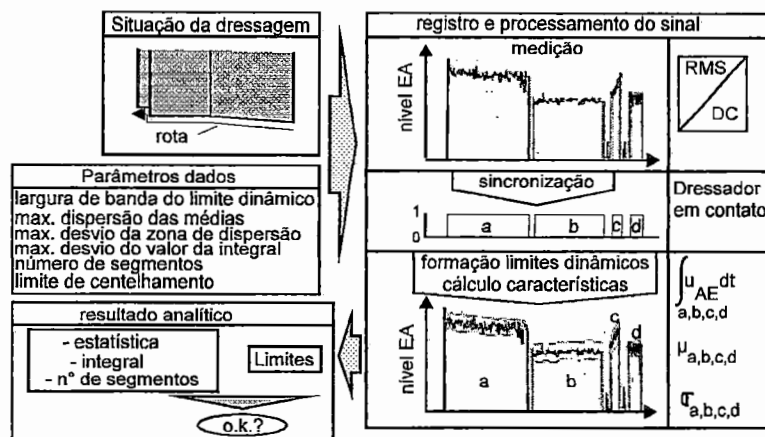


Figura 3.8 - Representação do monitoramento de falhas na dressagem através da E.A. (König e Meyen, 1990).

Outro estudo sobre as condições de desgaste do rebolo utilizando técnicas de E.A. e dressagem foi conduzido por Oliveira et al, 1994. A proposta foi identificar o momento em que ocorre o contato entre o dressador e o rebolo em diferentes posições da superfície de corte do rebolo, partindo do princípio de que a interação entre dressador e rebolo passa por três fases, a saber: uma fase de turbulência, onde o contato ainda não foi iniciado e o surgimento de um leve sinal de E.A. pode ser creditado à turbulência gerada no dressador pela camada de ar arrastada devido ao atrito entre o rebolo e o ar; uma fase de contato elástico, onde começam a ocorrer choques entre o dressador e o rebolo sem que a superfície do rebolo seja afetada, uma vez que acontece a deformação elástica tanto no grão abrasivo como no ligante; e uma fase de contato friável, onde começam a ocorrer fraturas nos grãos abrasivos mais salientes. A fase de contato elástico é afetada pela dureza do rebolo e pelo perfil do dressador, não sendo influenciada pela velocidade de aproximação do rebolo em relação ao dressador. Rebolos mais duros e dressadores desgastados (ou seja, com maior área de contato) apresentam sinais de E.A. mais intensos. A figura 3.9 mostra como essas fases ocorrem e qual é a intensidade do

sinal de E.A. obtido em cada uma delas. Caso o momento de contato seja diferente em alguma posição, ou seja, caso o sinal de E.A. demore algum tempo a mais para acusar o contato, o desgaste fica caracterizado. Além de identificar o desgaste do rebolo, o método proposto por Oliveira et al, 1994, também possibilita identificar a ocorrência de dilatações térmicas na máquina que provoquem o afastamento do cabeçote do rebolo de sua posição nominal (deriva térmica). A figura 3.10 mostra como a montagem experimental para que a posição do rebolo possa ser identificada com o uso de E.A., tanto para controlar o desgaste do rebolo, como para a deriva térmica da máquina.

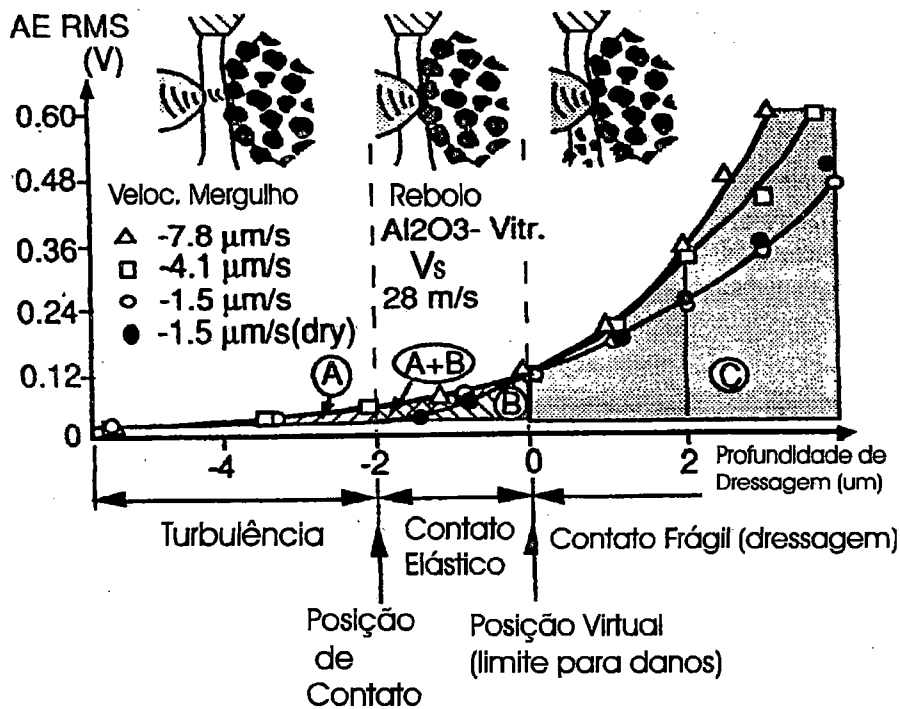


Figura 3.9 - Comportamento do sinal de E.A. durante as três fases de interação entre dressador e rebolo (Oliveira et al, 1994).

Oliveira et al, 1995, também sugerem que o sinal de E.A. seja utilizado para detectar o contato entre o dressador e o rebolo nos casos em que se deseja realizar um novo "set-up" da posição de dressagem, seja devido a uma troca de rebolo, ou então

devido à necessidade de alterar o posicionamento do dressador (quando este fica preso junto ao cabeçote do contra-ponto).

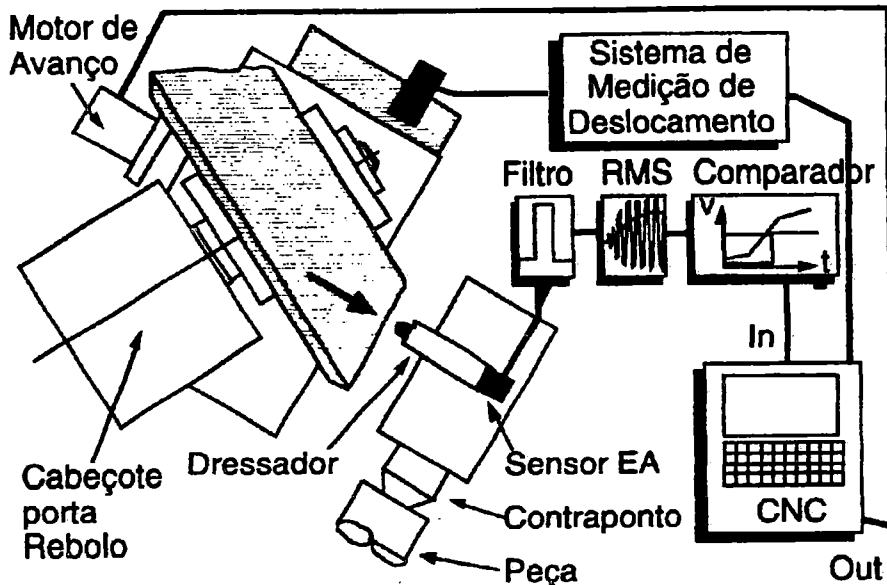


Figura 3.10 - Sistema para avaliação de desgaste de rebolo e de deriva térmica através da E.A. no contato entre dressador e rebolo (Oliveira et al, 1994).

3.3.2. - E.A. no monitoramento da integridade superficial de peças retificadas

Deixando o campo da dressagem e passando para o campo do corte de material na retificação, a E.A. também foi bastante utilizada para monitorar o processo. Webster et al, 1994, propuseram que o sinal de E.A. fosse utilizado para monitorar a integridade superficial de peças. A figura 3.11 mostra que o sinal de E.A. obtido durante a retificação de uma peça que apresenta sinais de queima é mais intenso do que o sinal de E.A. de uma peça onde não ocorrem problemas de integridade superficial. Essa situação pode ser explicada pelo fato de que o corte em fim de vida consome mais energia e

provoca a queda da qualidade superficial de peças retificadas (queima, elevação na rugosidade, etc.). Como a força normal de retificação cresce conforme o rebolo atinge o fim de vida, tendência verificada por diversos autores, entre eles Bianchi, 1990, e como o comportamento do sinal de E.A. ao longo da vida apresenta-se semelhante ao comportamento da força (Mendizabal, 1991), a E.A. poderia ser utilizada para detectar o momento em que o rebolo começa a perder a sua capacidade de corte, provocando falhas na integridade superficial da peça (sinais de queima, rugosidade elevada, etc.). A figura 3.12 mostra também que a tendência de crescimento da força normal de retificação conforme aumenta-se a profundidade de corte é seguida pelo sinal de E.A. (Webster et al, 1994).

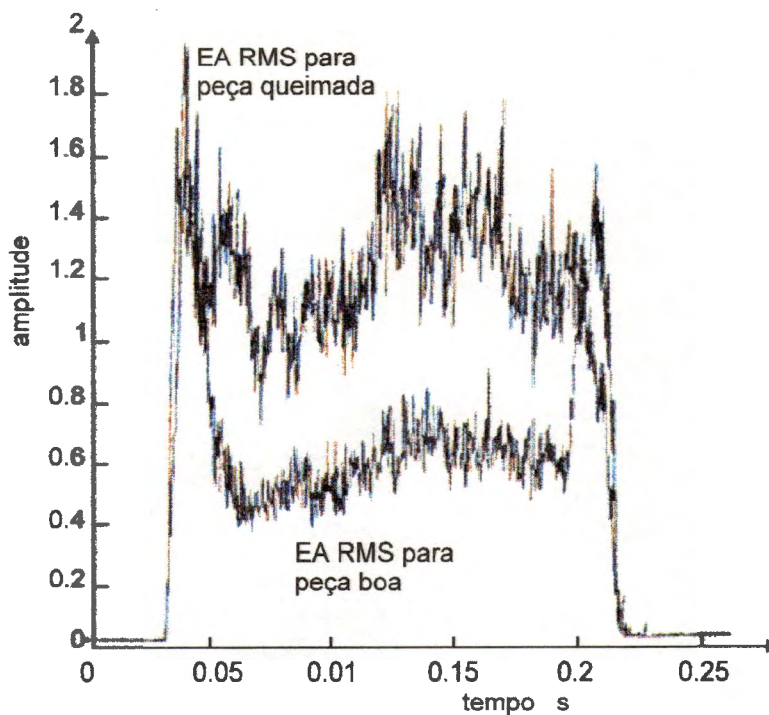


Figura 3.11 - Sinal de E.A. medido durante a retificação de uma peça que apresenta sinais de queima e de uma peça sem defeitos de integridade superficial (Webster et al, 1994).

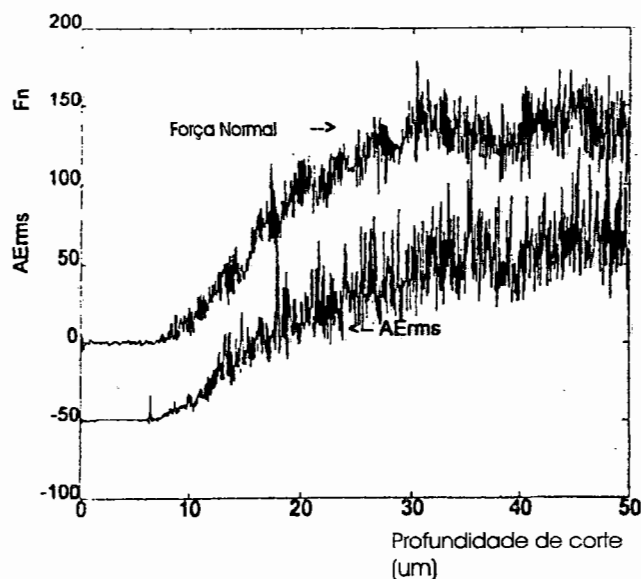


Figura 3.12 - Comportamento de força normal de retificação e de E.A. em função da profundidade de corte (Webster et al, 1994).

3.3.3. - E.A. no monitoramento da vida de rebolos

Um estudo sobre o problema de fim de vida do reboło, anterior ao descrito acima, foi feito por Dornfeld e Cai, 1984, onde o objetivo era identificar o momento em que ocorre o empastamento do reboło (“wheel loading”) através da E.A.. O estudo concluiu que a E.A. cresce conforme aumenta a adesão de partículas metálicas na superfície e porosidades do reboło, mostrando-se um indicador confiável e de boa repetibilidade para o monitoramento da vida do reboło em função do empastamento da superfície de corte. No entanto, o estudo afirma que o uso isolado da E.A. monitorando a retificação, apesar de indicar o momento em que o reboło perde a sua capacidade de corte (fim de vida), não permite identificar se a causa do fim de vida é o empastamento ou o desgaste dos grãos abrasivos.

O comportamento geral do sinal de E.A. na detecção do desgaste do rebolo durante o processo de retificação também foi estudado por Hundt et al, 1994. Inicialmente, o desgaste foi considerado como um fenômeno que pode ocorrer em três situações de corte distintas: em operações com baixa taxa de remoção de material, quando o desgaste do rebolo é provocado, principalmente, pelo desgaste do grão abrasivo; operações com média taxa de remoção de material, onde o desgaste é devido, principalmente, à fratura dos grãos; e operações com alta taxa de remoção de material, nas quais o desgaste é creditado em sua maior parte à fratura da liga e ao arrancamento dos grãos abrasivos. Como em qualquer taxa de remoção de material essas três situações estão acontecendo concomitantemente, o problema maior é diferenciar o comportamento do sinal de E.A. durante a ocorrência de desgaste por fratura de grãos e por fratura de ligante, e durante a ocorrência do desgaste por perda da afiação do grão abrasivo. Este último tipo de desgaste faz com que o raio de ponta do grão abrasivo aumente e provoque a elevação da força de retificação e da temperatura no contato entre rebolo e peça, uma vez que passa-se a dissipar mais energia em atrito em relação à dissipação com remoção, conforme foi discutido por Vieira, 1992. Nos primeiros tipos de desgaste citados acima, apesar de incorrer na perda de perfil do rebolo, a capacidade de corte tende a permanecer ativa por mais tempo, uma vez que ocorre a chamada “auto-afiação” do rebolo.

O sinal de E.A. nas situações onde ocorrem os desgastes por fratura do grão abrasivo e do ligante acompanha o comportamento dos sinais obtidos em fratura de materiais frágeis, segundo Hundt et al, 1992. Devido a essa característica a velocidade de propagação do sinal de E.A. e a sua amplitude em diferentes frequências podem ser monitoradas e a sua causa pode ser identificada com maior facilidade, evitando a

ocorrência do desgaste do grão abrasivo e as conseqüências que esse tipo de desgaste provoca.

3.3.4. - E.A. no monitoramento da retificação cilíndrica

Nas operações cilíndricas de retificação, o monitoramento sempre foi tido como algo difícil de ser feito devido à geometria de contato entre rebolo e peça e também devido ao fato de que tanto a peça como a ferramenta estão constantemente em movimento. Isso impedia o uso de sensores que, geralmente, apresentavam-se intrusivos ao processo. Por esses motivos, entre outros, é que a E.A. prevaleceu como a técnica mais indicada para o monitoramento das operações cilíndricas externas. Por tratar-se do monitoramento de um sinal que se transmite através da agitação interna do material, a colocação de sensores de E.A. pode ser feita em qualquer parte da máquina onde haja contato físico com a peça ou com o rebolo.

Tendo em vista essa vantagem que a E.A. proporciona ao monitoramento das operações cilíndricas, Chang et al, 1992, propuseram que a aquisição do sinal de E.A. fosse feita através de um sensor localizado no bico de saída do fluido lubri-refrigerante da máquina. Como o fluido lubri-refrigerante está diretamente em contato tanto com a peça como com o rebolo durante o corte do material, a dúvida residia na capacidade de propagação do sinal através do fluido. Uma vez verificada essa capacidade, o estudo permitiu analisar as relações existentes entre E.A. e outros parâmetros da retificação cilíndrica, como o avanço longitudinal (mm/rotação da peça), a profundidade de corte (ou avanço transversal) e a velocidade da peça (RPM). A pesquisa conduzida por Chang concluiu que todos esses parâmetros inerentes à retificação cilíndrica externa podem ser

diretamente relacionados com o sinal de E.A. monitorado durante o processo. Além disso, identificou que o sinal poderia ser seguramente sensoreado através do fluido lubri-refrigerante, desde que seja feita uma filtragem no sinal que elimine os ruídos causados pela turbulência do fluido no sensor. A figura 3.13 mostra a montagem utilizada por Chang et al, 1992.

A E.A. também foi utilizada na retificação cilíndrica externa para identificar a ocorrência de vibrações e o surgimento de marcas que o reboło deixa na peça, chamadas de “marcas de retífica” (Chang e Dornfeld, 1993). Para a aquisição do sinal foi colocado um sensor junto ao bico de saída de fluido lubri-refrigerante, conforme descrito acima. A instabilidade da vazão do fluido, uma das fontes de ruído no sinal, foi eliminada com o uso de um reservatório colocado entre a bomba e a saída do fluido. A ação do reservatório regula as irregularidades que a vazão pode apresentar em função do funcionamento da bomba, além de eliminar as influências que a formação de bolhas de ar no fluido pode causar. Nesse trabalho foi verificado que a frequência de vibração do conjunto reboło-peça, medida através do número de marcas de vibração encontradas na peça e da frequência de rotação da peça, aproxima-se da frequência da E.A. detectada. Para a identificação das “marcas de retífica”, foi monitorado o comportamento do sinal durante a retificação de peças que já continham marcas feitas artificialmente (fora da retificação) na peça. Sempre que o reboło entrava em contato com a faixa onde se encontravam essas marcas, a E.A. apresentava um pico localizado.

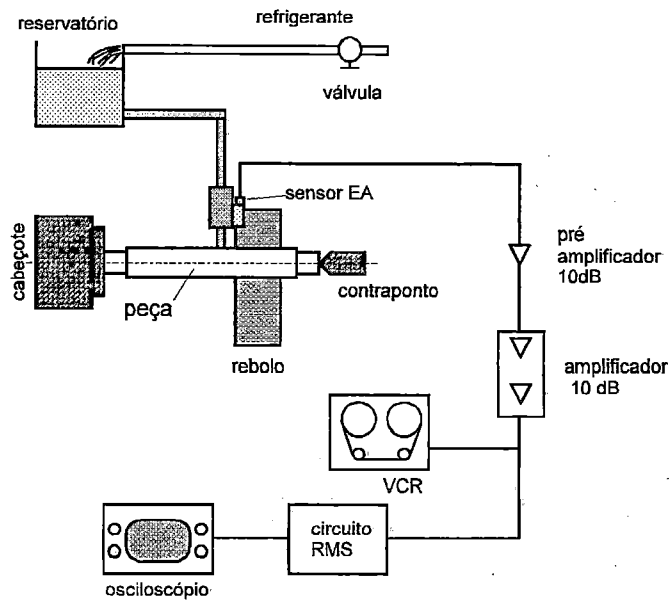


Figura 3.13 - Esquema da montagem utilizada para a aquisição do sinal de E.A. através do fluido de corte (Chang et al, 1992).

3.3.5. - E.A. no monitoramento do contato entre rebolo e peça

Com o crescimento do uso de máquinas numericamente comandadas, o ciclo de retificação passou a ser mais estudado de modo a buscar a sua otimização. Oliveira, 1989, promove uma discussão sobre as diferenças existentes entre o ciclo teórico e o ciclo real. Essas diferenças se devem, principalmente, à deformação do sistema máquina-rebolo-peça. No entanto, independente da ocorrência de deformações existe a aproximação do rebolo em relação à peça, e esta fase do ciclo é, geralmente, responsável por grande parte do tempo improdutivo da operação. Como as tolerâncias das peças nos processos anteriores ao de retificação são muito abertas (Kluft, 1994; Oliveira et al, 1995), a posição de contato entre rebolo e peça pode apresentar grandes variações

dentro de um mesmo lote. A figura 3.14 mostra como essa variação de material influencia na aproximação do rebolo durante o ciclo de retificação.

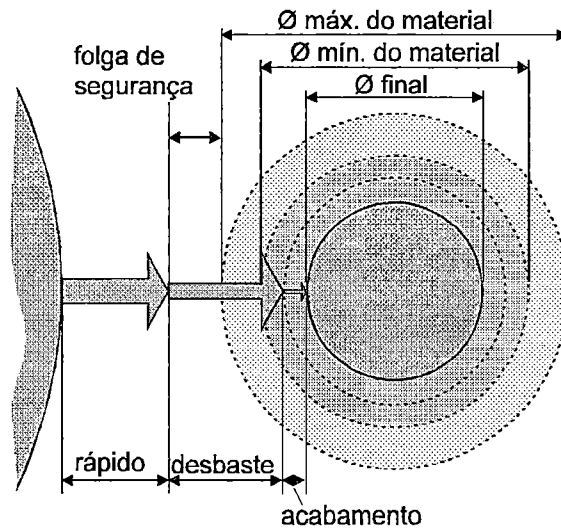


Figura 3.14 - Variação de diâmetro apresentada pelas peças a serem retificadas (Kluft, 1994).

Antes de se iniciar o corte do material, o rebolo é levado até uma posição próxima à da periferia da peça em avanço rápido e a partir dessa posição começa a ser movimentado em avanço de trabalho até que toque a peça e inicie o corte efetivamente. Esse período de movimentação sem remoção de material é conhecido como “ciclo de corte no ar” e chega a representar até 20% do tempo de retificação de uma peça (Oliveira, 1989). Dornfeld, 1990, afirma que a redução do tempo gasto com a aproximação do rebolo resulta no aumento de eficiência do processo. A figura 3.15 mostra um ciclo de retificação convencional e um ciclo com “gap-less” destacando o ganho de tempo com a detecção do contato.

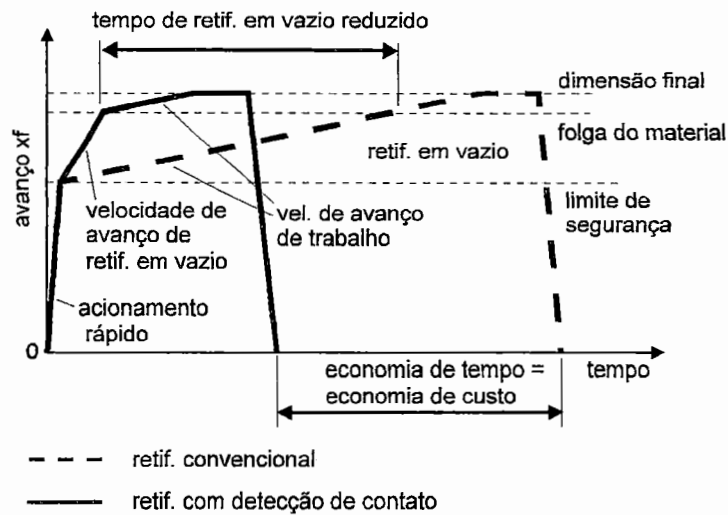


Figura 3.15 - Ciclos de retificação sem detecção de contato (“gap-less”) e com detecção de contato (Kluft, 1994).

Foi dentro desse raciocínio que sistemas para a eliminação do ciclo de corte no ar foram desenvolvidos. Alguns utilizam informações vindas da corrente de alimentação do motor principal da retificadora para detectar o contato entre rebolo e peça (sensor de efeito Hall). Outros chegaram a sugerir o uso de sensores de vibração (acelerômetros). No entanto, o uso da E.A. para a detecção desse contato tem se mostrado mais eficiente e segura. Kakino (apud Dornfeld, 1990), comprovou que a resposta que um sensor de E.A. pode dar com relação ao contato entre rebolo e peça é pelo menos 17,5 ms mais rápida que a resposta dada por um acelerômetro. Com relação à corrente, a resposta chega a ser antecipada em 1 s. pelo sensor de E.A. em relação ao sensor de efeito Hall (Dornfeld 1990), o que resulta em reduzir o tempo de corte no ar em 15 a 20%, em média, quando se faz a comparação entre o monitoramento da E.A. e o monitoramento da corrente do motor principal da máquina.

3.3.6. - E.A. no controle do “Spark-out”

As deformações que ocorrem no sistema máquina-rebolo-peça durante as operações de retificação provocam uma diferença dimensional instantânea na peça em relação ao valor comandado na máquina. Ao final do ciclo, essas deformações devem ser compensadas através do “spark-out”, ou seja, através de um período onde ocorre contato entre rebolo e peça sem que haja avanço do rebolo contra a peça, também chamado de faiscamento ou centelhamento. Conforme o sistema vai sofrendo a relaxação das partes deformadas, a manutenção do contato entre rebolo e peça faz com que ainda ocorra a remoção de material.

Considerando que o “spark-out”, assim como o corte no ar, acrescenta tempo ao ciclo, seria interessante que esse tempo fosse reduzido ao mínimo possível. Foi assim que a E.A. passou a ser associada ao ciclo de “spark-out”. Dornfeld, 1990, afirma que, monitorando-se o sinal de E.A. durante o “spark-out”, uma queda na intensidade do sinal representa uma redução na taxa de remoção de material. Por consequência, tem-se a possibilidade de se verificar se o tempo necessário para compensar a relaxação das partes deformadas já transcorreu. Esse mesmo tipo de comportamento do sinal pode ser obtido tanto com o rebolo recém-dressado, como com o rebolo já em fim de vida, onde o tempo necessário para o “spark-out” é diferente, sendo, portanto, possível tomar a decisão de afastar o rebolo a partir do nível de E.A. monitorado.

3.3.7. - E.A. na detecção de colisões

Quando se utilizam máquinas retificadoras CNC, grande parte da movimentação realizada sem que ocorra contato entre rebolo e peça é feita em velocidade de avanço rápido (G00). Durante essa movimentação a ocorrência de uma falha na programação ou no comando da máquina pode resultar em uma colisão entre o rebolo e a peça ou algum dos componentes da retificadora. Normalmente as máquinas CNC são dotadas de sensores de colisão baseados no sinal de corrente do motor principal, que interrompem a execução do programa (ou linha de comando), fazem o cabeçote porta-rebolo movimentar-se para trás, em direção à posição de “set-point” (referência) no eixo X (eixo transversal), e desliga o motor do rebolo. No entanto, como já foi discutido anteriormente, a resposta apresentada pelo sensor do sinal de corrente, por ser de certo modo lenta, pode permitir que as colisões danifiquem a peça ou a máquina, ainda que apenas superficialmente. Em um caso de colisão o sinal de E.A. propaga-se pela estrutura da máquina rapidamente, a utilização desse tipo de sinal para detectar colisões do rebolo com qualquer parte da máquina possibilitaria menor ocorrência de danos provocados pelos choques (Oliveira et al, 1995).

3.3.8. - E.A. no monitoramento de parâmetros de corte

Conforme já foi visto anteriormente, ao tratar do uso da E.A. em processos como o torneamento e o fresamento, o sinal de E.A. tende a crescer com o aumento da velocidade de corte. No processo de retificação isso também ocorre, conforme

verificaram Kishi et al (apud Mendizabal, 1991) e Dornfeld, 1990, em ensaios cujos resultados são apresentados na figura 3.16.

O crescimento da E.A. conforme a velocidade de corte é aumentada tem nesse caso explicação semelhante à do caso dos processo discutidos anteriormente, ou seja, a energia consumida durante o corte sofre um acréscimo e o crescimento do sinal de E.A. é decorrente da liberação de energia provocada por deformações do material durante o processo de corte do material. A equação 3.1 (Dornfeld, 1990) mostra como a energia específica de retificação está relacionada com a velocidade de corte, entre outros parâmetros.

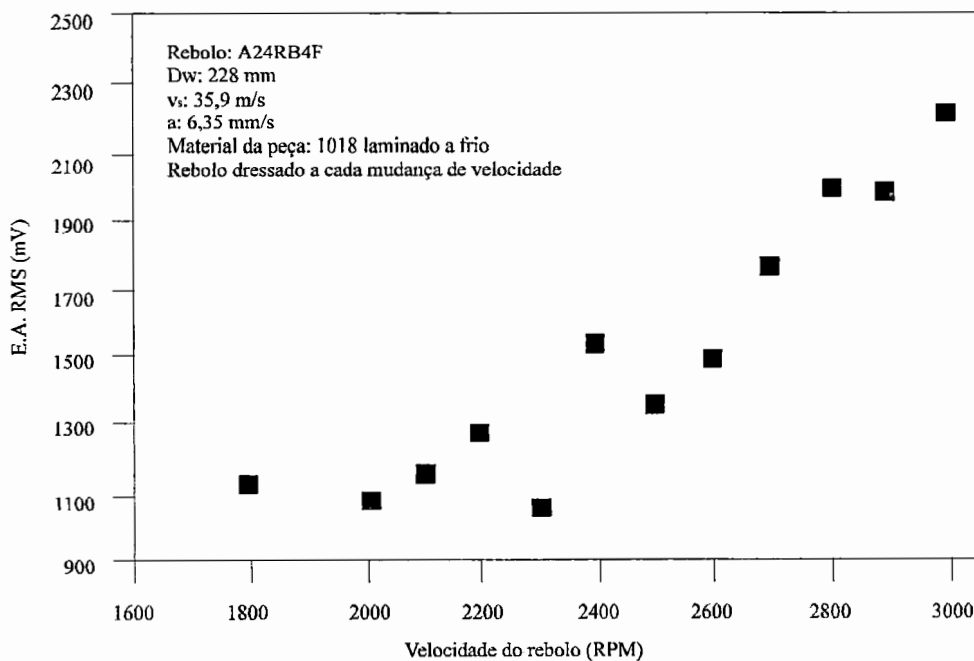


Figura 3.16 - Comportamento do sinal de E.A. em relação à velocidade de corte (periférica) do rebolo (Dornfeld, 1990).

$$u = \frac{F_h \cdot v_s}{b \cdot a \cdot v_w} \dots\dots\dots 3.1$$

Onde: u - energia específica de retificação;

F_h - componente horizontal da força de retificação;

v_s - Velocidade de corte do rebolo;

v_w - Velocidade da peça;

b - largura de atuação do rebolo;

a - profundidade interação entre rebolo e peça (avanço).

De acordo com a equação 3.1, aumentando-se a velocidade de corte a energia específica de retificação também cresce. Havendo maior nível de energia envolvido no sistema, a geração de E.A. também tende a crescer.

Com relação ao avanço (a), a análise simples da equação 3.1 poderia induzir à conclusão de que este é um parâmetro que reduziria a energia específica de retificação. No entanto, diversos autores já verificaram que o avanço tem relação direta com o aumento das forças de retificação (Oliveira, 1988; Bianchi, 1990). Assim, como resultado tem-se que um acréscimo nesse parâmetro de corte faz com que a energia específica de retificação também aumente. Conseqüentemente, o sinal de E.A. gerado pelo sistema deve apresentar, da mesma forma, um incremento de intensidade. Dornfeld, 1990, mostra na figura 3.17 a tendência de crescimento da E.A. com relação ao aumento do avanço.

Em resumo, o sinal de E.A. no processo de retificação é utilizado para o monitoramento da dressagem, da aproximação e contato entre rebolo e peça (“gap-less”), determinação da duração do ciclo de “spark-out” e determinação da condição de agressividade da superfície de corte do rebolo em relação ao acúmulo de material na sua estrutura (“wheel loading”).

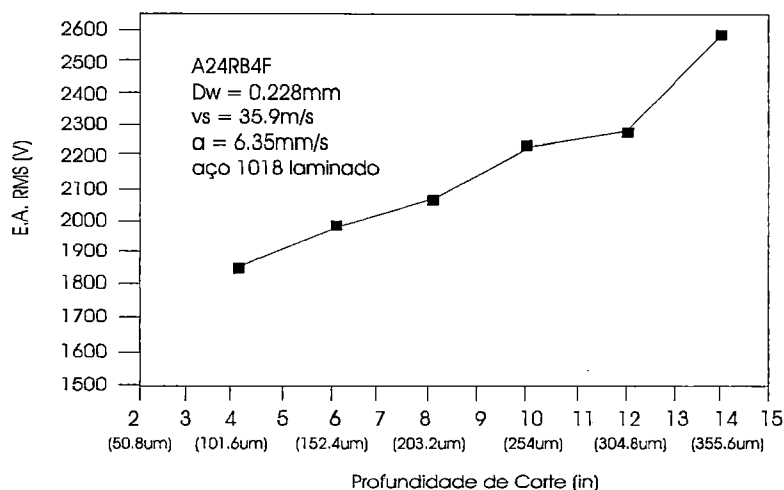


Figura 3.17 - Comportamento do sinal de E.A. em função do avanço (Dornfeld, 1990).

Seria interessante a aplicação do monitoramento do sinal de E.A. para a avaliação da dureza do rebolo em condições de trabalho. A medição do comportamento de dureza do rebolo na máquina, dentro das suas condições de trabalho, pode permitir que as condições de retificação sejam corrigidas. Essas correções visam compensar as variações decorrentes tanto das diferenças entre os métodos de medição utilizados pelos fabricantes (caso rebolos com a mesma marcação de dureza apresentem comportamentos distintos), como as variações localizadas que surgem durante o processo de retificação (conseqüência do processo de fabricação do rebolo).

O presente trabalho traz a proposta de utilização das técnicas de E.A. para o monitoramento da dureza de rebolos durante o processo de retificação. Essa proposta será explicada a seguir.

4. Proposta de Metodologia Para Avaliação de Dureza Por E.A. (Aspectos Gerais)

Baseando-se na revisão sobre os métodos de controle e avaliação do grau de dureza de rebolos exposta no capítulo 2, percebe-se que os métodos existentes não apresentam os graus de confiabilidade e repetibilidade necessários para que o comportamento do rebolo seja previsível e repetitivo, uma vez que não consideram variações específicas que podem ocorrer no momento da retificação. Mais importante ainda é o fato de que as indicações de dureza derivadas desses métodos não são compatíveis entre si, gerando mais inconsistências ao processo. Além disso, existe ainda o fato de que praticamente todos os métodos que são comercialmente utilizados para o controle e avaliação do grau de dureza de rebolos após a fabricação o fazem com o rebolo fora das condições de utilização, ou seja, estaticamente e na sua superfície lateral.

Outro fato que contribui para as incertezas quanto aos métodos de controle e avaliação de dureza atualmente utilizados é não considerar que durante a utilização podem ocorrer variações localizadas da dureza do rebolo, que no presente trabalho são chamadas de “dureza local de trabalho”, e o efeito exercido pelo comportamento em processo do rebolo, também conhecido por “dureza dinâmica”.

Inasaki, 1985, afirmou que a E.A. pode trazer informações sobre o comportamento de dureza do rebolo durante o processo de retificação. O grão abrasivo fica sustentado por pontes de liga que, à medida em que a dureza do rebolo é aumentada, se tornam mais reforçadas e resistentes, proporcionando a maior retenção do grão. O rompimento das pontes mais resistentes demanda maior quantidade de energia do que no caso das pontes menos resistentes. Portanto, o pulso de E.A. emitido no momento em

que ocorre a fratura do ligante tende a ter maior intensidade quando a dureza do rebolo tem maior grau.

Esse comportamento pode ser analisado mais especificamente na operação de dressagem, onde promove-se tanto a fratura do grão abrasivo, como a sua remoção (fratura da liga). Nessa operação, a variação na intensidade do sinal de E.A. pode, então, ser ocasionada não apenas pelas condições de dressagem, mas também por uma alteração localizada na dureza do rebolo ou ainda na sua estrutura. Assim, tais tipos de não uniformidades podem ser controladas com o uso da E.A. durante a dressagem do rebolo. Disso depreende-se que esta pode ser uma importante ferramenta para a avaliação da dureza de rebolos.

Propõe-se, então, neste trabalho a elaboração e aplicação de uma metodologia que possibilite relacionar o grau de dureza local do rebolo com o sinal de E.A. captado durante a dressagem, e que essa relação possa ser utilizada como forma de controle e avaliação da dureza do rebolo e do seu comportamento em processo, uma vez que Inasaki, 1985, já chamava a atenção para o fato de que o comportamento de desgaste do rebolo em função da sua dureza poderia ser avaliado através do uso das técnicas de E.A. durante a operação de dressagem.

Para que essa metodologia seja confiável e assegure a repetibilidade dos resultados é preciso que utilize de métodos de avaliação confiáveis da dureza. Assim, uma vez que os rebolos tenham sido medidos com o mesmo método convencional utilizado pelos fabricantes, por exemplo o método Oghoshi ou o método Zeiss-Mackensen, a dureza desses rebolos durante a retificação de uma peça padronizada pode ser avaliada com o uso da **relação G de retificação**. Por relacionar os volumes de material removido e de rebolo gasto durante o processo, a relação G de retificação representa o comportamento do rebolo, em termos de dureza, durante a sua utilização no

processo de maneira clara e fácil de analisar e reproduzir, e com um caráter prático incomparável.

Para que a metodologia de avaliação possa ser aplicada é necessário o desenvolvimento de um banco de ensaios que permita a captação do sinal de E.A. durante a dressagem e a avaliação da relação G de retificação, além de possibilitar a realização da dressagem em diversas condições, mas com o valor de U_d sendo mantido. Além disso, é necessário que um método que possibilite a medição do desgaste do rebolo seja conhecido e dominado. A metodologia proposta aqui consiste, portanto, em buscar a correlação entre níveis de E.A. durante a dressagem com o comportamento do rebolo, no que se refere ao seu desgaste volumétrico. O capítulo 5 traz mais detalhes a respeito do banco de ensaios utilizado para o levantamento de dados no sentido de se avaliar a proposta do presente trabalho. Os resultados os resultados obtidos são apresentados e discutidos no capítulo 6.

5. Experimentação

O presente capítulo descreve a parte experimental desenvolvida no trabalho. A realização dos experimentos tem como objetivos primários: verificar a existência de relação entre a força de dressagem, emissão acústica e velocidade de corte; e objetivos de segunda ordem, como a determinação do comportamento da emissão acústica em função da velocidade do rebolo em rebolos com diferentes graus de dureza e em condições de dressagem também diferenciadas.

A seguir é exposto como o projeto da experimentação é efetuado, incluindo o desenvolvimento do banco de ensaios e a determinação dos ensaios preliminares. Em seguida, serão descritos a seqüência definitiva de ensaios e alguns resultados típicos das relações estudadas.

5.1. - Projeto da Experimentação

O desenvolvimento da experimentação começou visando alcançar o objetivo inicial de identificar a influência da velocidade de corte sobre o comportamento da “dureza dinâmica” do rebolo. Para isso foi idealizado um dispositivo cujo princípio de funcionamento deveria ser semelhante ao da balança de Nakayama, 1985, e que seria preso entre pontos em uma retificadora cilíndrica externa. A figura 5.1 mostra como foi idealizado esse dispositivo.

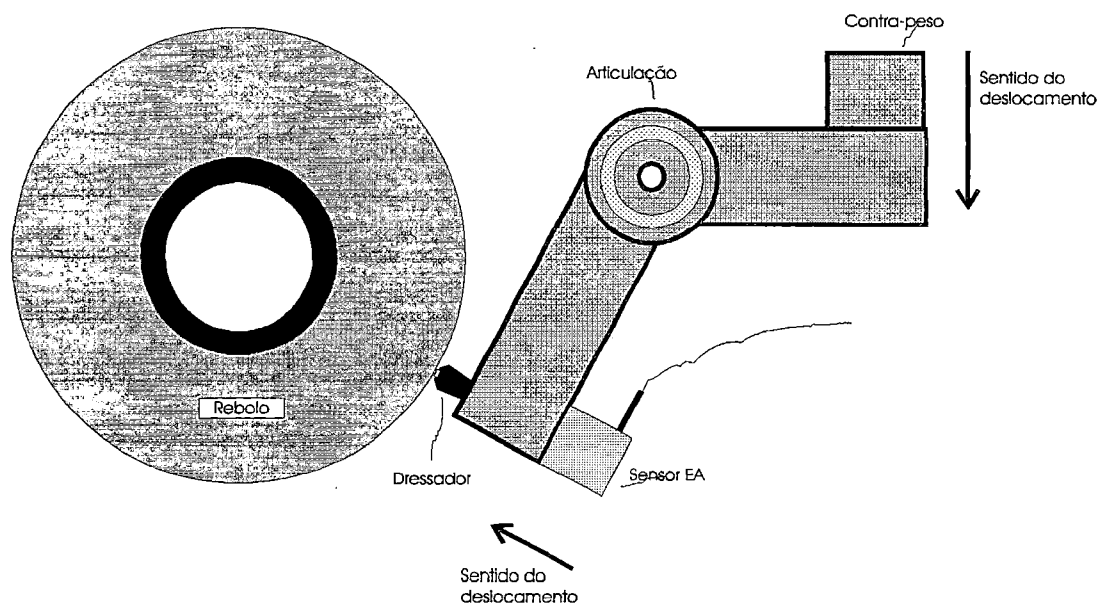


Figura 5.1 - Dispositivo idealizado inicialmente para a medição de “dureza dinâmica”.

O funcionamento esperado do dispositivo é o seguinte: um dressador com perfil conhecido e controlado colocado em um das extremidades do dispositivo é pressionado contra o rebolo com força constante conhecida e controlada através de contrapesos colocados na outra extremidade do dispositivo. Um apalpador mede o deslocamento que o braço horizontal da balança tem conforme o dressador vai penetrando no rebolo e um sensor de E.A. mede a intensidade do sinal durante o contato entre dressador e rebolo. Isso é feito em diversas velocidades do rebolo e em rebolos com graus de dureza diferenciados.

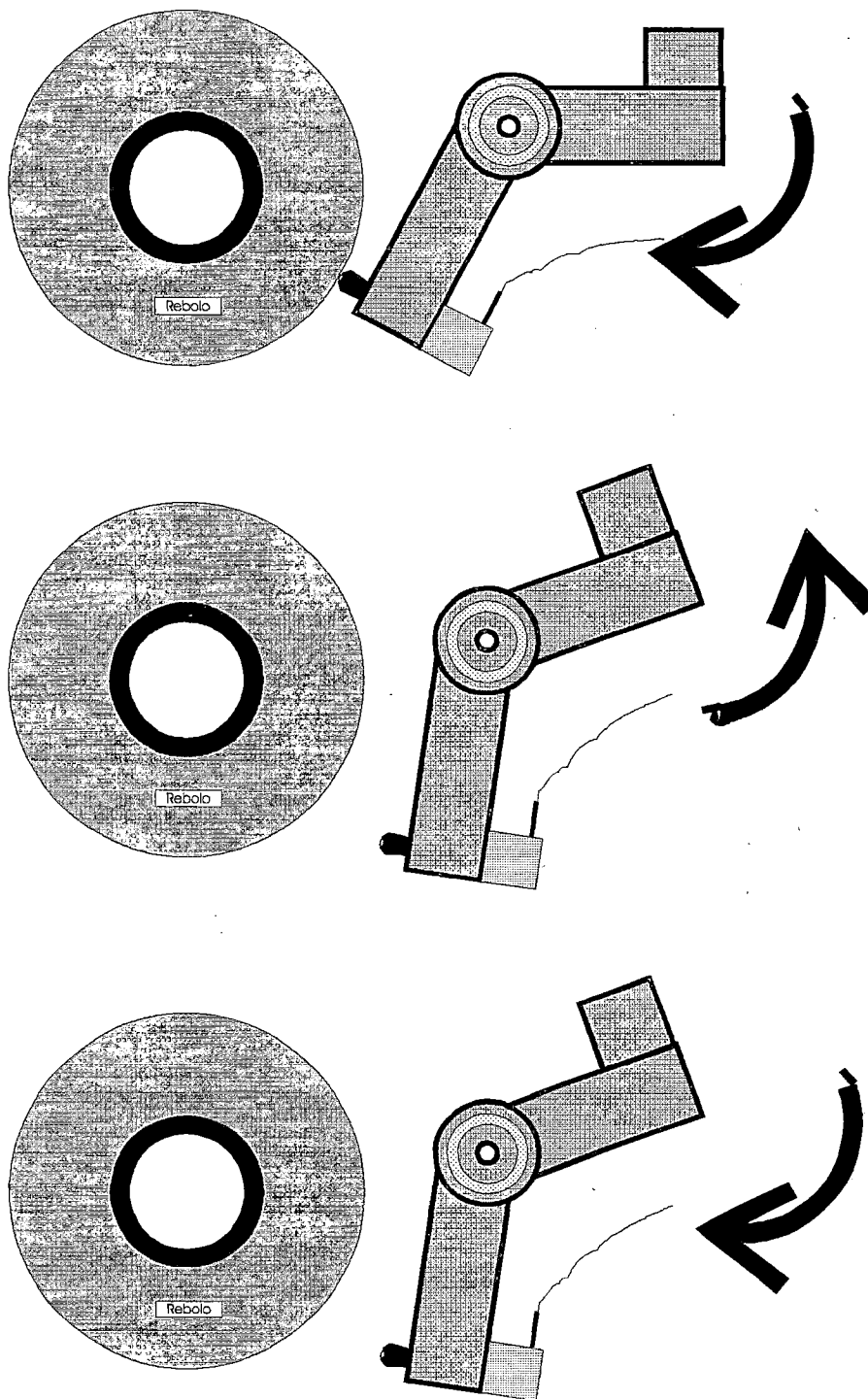


Figura 5.2 - Representação do funcionamento do dispositivo idealizado inicialmente.

O funcionamento do dispositivo, no entanto, não ocorre como esperado. Conforme o dressador é colocado em contato com a superfície do rebolo, uma oscilação do dispositivo, segundo uma tendência de giro, começa a ocorrer. A amplitude dessa

oscilação aumenta diretamente com o tempo de contato. Essa oscilação acontece devido aos choques que ocorrem entre a ponta do dressador e os grãos abrasivos com maior destaque na periferia do rebolo, e que provoca no sistema uma força em sentido contrário ao de penetração do dressador. Com isso, o dressador é “empurrado” para trás e, em seguida, volta a tocar a periferia do rebolo, dessa vez com maior quantidade de movimento, e imediatamente o fenômeno volta a ocorrer (figura 5.2); esse comportamento provoca a abertura de buracos com maior profundidade no rebolo e de forma irregular, uma vez que isso acontece apenas no ponto onde o dressador toca o rebolo. Além disso, a medição do deslocamento do sistema em relação à periferia do rebolo (penetração do dressador) fica comprometida pela oscilação do sistema.

Um segundo banco de ensaios foi idealizado com o objetivo de verificar o comportamento da força e da E.A. na dressagem em diversas condições de velocidade e de grau de recobrimento. O equipamento para a aquisição dos dados desejados consiste em um dinamômetro piezelétrico preso junto ao barramento da retificadora cilíndrica externa, um dressador tipo placa (“fliese”) preso na parte superior do dinamômetro de modo a captar os esforços de dressagem tanto no sentido normal como no sentido tangencial, e um sensor de E.A. colocado também na parte superior do dinamômetro. A figura 5.3 mostra como foi feita essa montagem.

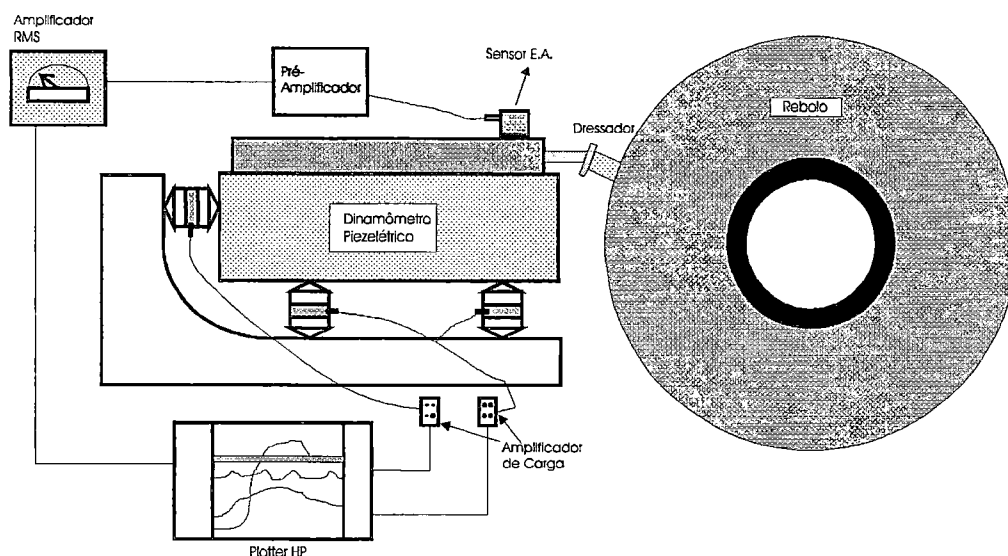


Figura 5.3 - Esquema da montagem experimental para a aquisição de forças e E.A. na dressagem.

Os sinais de força normal e tangencial captados pelas células de carga do dinamômetro são amplificados e registrados através de um “plotter”. O sinal de E.A. também passa por uma amplificação e depois é registrado igualmente no “plotter”. Para auxiliar no armazenamento dos dados, também é utilizado um computador, sendo que o “plotter” funciona como interface A/D. Com essa montagem é possível adquirir e relacionar sinais de força e de E.A. na dressagem. A figura 5.4 mostra um exemplo de resultado possível de se obter com o banco descrito.

Essa montagem não apresentou problemas com relação à utilização e aquisição dos sinais. No entanto, apresenta o problema de intrusividade, uma vez que o dinamômetro fica preso no barramento e impede a utilização do sistema para adquirir dados durante a retificação de uma peça.

Forças e E.A. x Vs p/ ad = 0,02mm e
f20.000

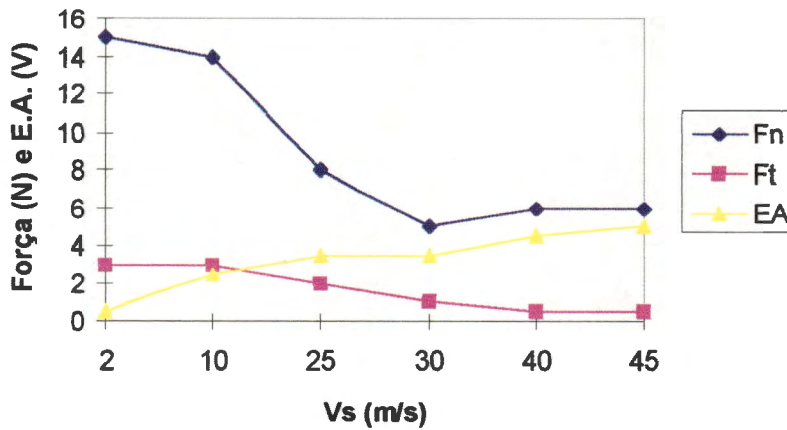


Figura 5.4 - Forças e E.A. na dressagem (exemplo de resultado).

Como a experimentação descrita acima possibilita relacionar o comportamento das forças na dressagem com o comportamento da E.A. na dressagem, foi pensado, então, um terceiro tipo de montagem experimental que possibilitasse a aquisição do sinal de E.A., descartando a aquisição de forças (uma vez que essas estão sendo estudadas pelo sistema da figura 5.4), e que também permitisse a avaliação do desgaste do rebolo após a retificação de uma peça padronizada para os ensaios, levando ao cálculo da relação G de retificação. Ou seja, nessa nova montagem pode ser avaliada a relação entre o desgaste do rebolo (relacionado à dureza efetiva de trabalho) e o nível de E.A. na dressagem.

Nesse tipo de experimento é medido o sinal de E.A. na dressagem do rebolo em diversas profundidades (a_d), e em diversas velocidades de passagem (S_d), de modo a manter constante o valor do grau de recobrimento de dressagem (U_d). Após isso, uma peça é retificada (com sobremetal pré-determinado) e o desgaste do rebolo medido. Para medir o sinal de E.A. durante a dressagem, é colocado um sensor junto ao contra-ponto

da retificadora cilíndrica externa e utiliza-se o próprio dressador da máquina, apenas tendo o cuidado de controlar a variação de perfil que este pode ter (para manter o grau de recobrimento sob controle). O sinal de E.A. é transferido diretamente para um microcomputador com o auxílio de um programa de aquisição que será descrito mais adiante. A medição do desgaste do rebolo é feita também com o uso do dressador da máquina, realizando sucessivos toques do rebolo no dressador com o auxílio de um sistema de monitoramento e uma rotina de calibração do rebolo conforme desenvolvido por Felipe, 1996. É importante ressaltar que esse método de medição do desgaste do rebolo pode apresentar desvios que variam de 2 μm a 5,5 μm em função da velocidade de aproximação do rebolo (Felipe, 1996). A figura 5.5 mostra o comportamento desse desvio, e a figura 5.6 mostra a montagem experimental utilizada. A partir da figura 5.5 escolhe-se o valor de f (velocidade de avanço em mergulho) para realizar o mergulho de medição do rebolo.

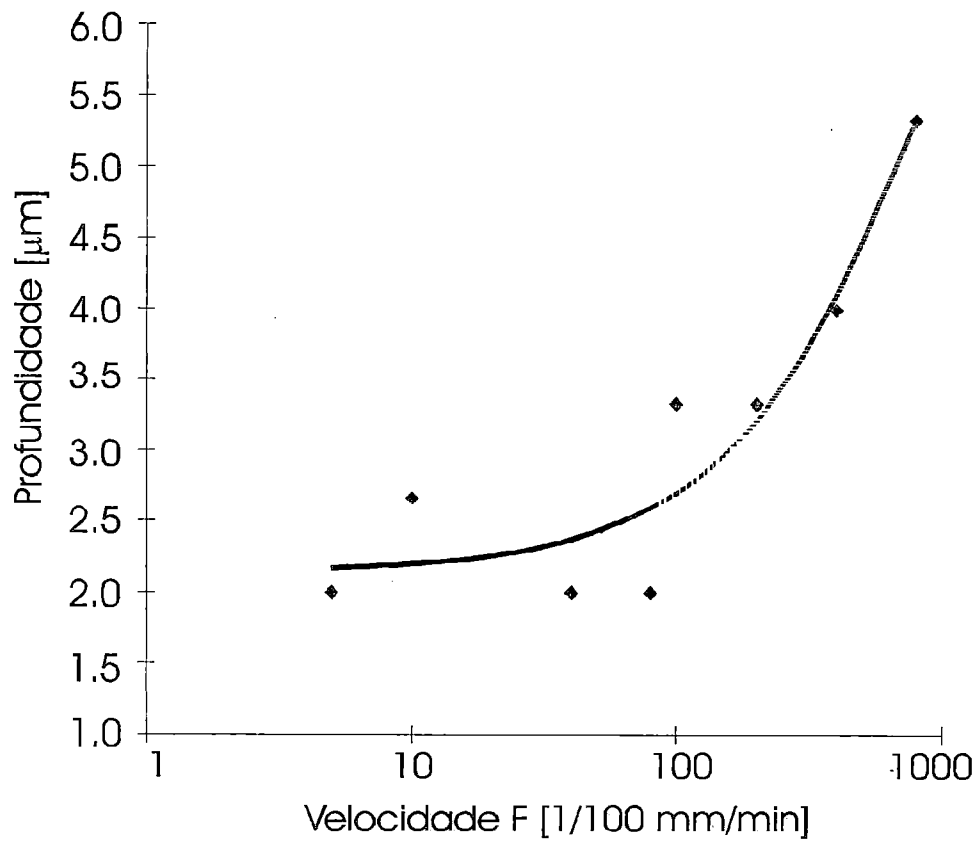


Figura 5.5 - Comportamento do desvio do valor medido de posição do rebolo em função da velocidade de aproximação do rebolo (Felipe, 1996).

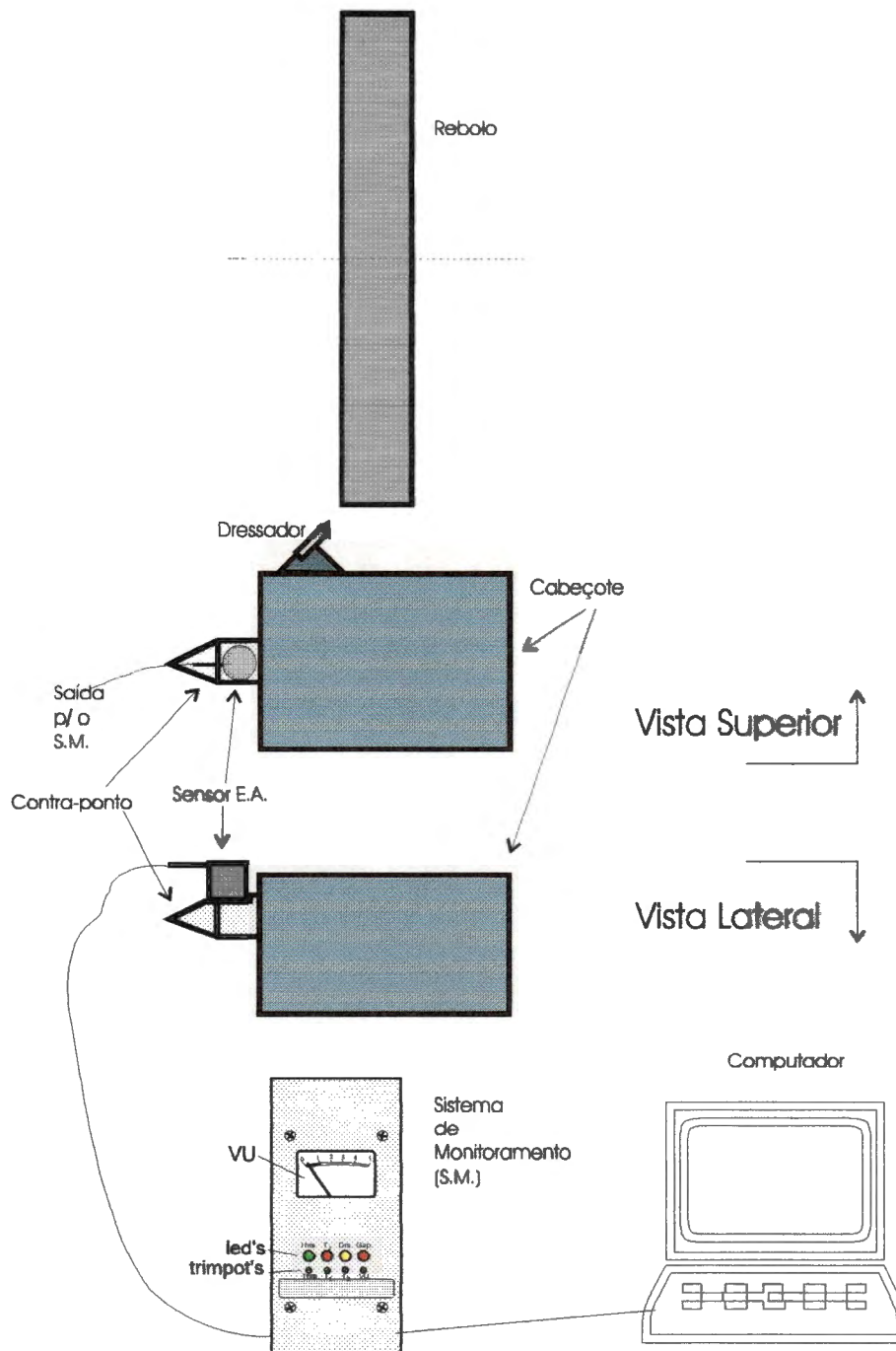


Figura 5.6 - Banco de ensaios para a aquisição de E.A. na dressagem e para a medição do desgaste do rebolo após a retificação de uma peça-padrão.

5.2. - Descrição dos Testes

5.2.1. - Máquina utilizada

A máquina utilizada para as experimentações é uma retificadora cilíndrica externa ZEMA G800, com CNC, com velocidade do rebolo variável e adaptada para trabalhar com o sinal de E.A. captado através de um sensor colocado no contra-ponto e tratado em um sistema de monitoramento (SM) descrito em Felipe, 1996. O sinal de E.A. é utilizado nessa máquina para identificar contato entre rebolo e peça ("gap-less") e entre rebolo e dressador ("calibração"), para identificar colisões e para identificar falhas na dressagem.

5.2.2. - "Hardware" e "Software" para a aquisição de dados de E.A.

Para a aquisição do sinal de E.A. captado durante as dressagens do rebolo é utilizado um microcomputador ligado a uma saída do sistema de monitoramento.

O sinal é armazenado com o auxílio de um "software" chamado "Labview" (da "National Instruments" - "N.I."), que permite a simulação de instrumentos para aquisição de dados através da montagem de circuitos chamados instrumentos virtuais ("virtual instrument" - VI). De acordo com o catálogo de apresentação da "N.I.", as VI's permitem que sejam montados instrumentos conforme a necessidade do usuário, onde o elemento chave é o "software" e não o equipamento. A figura 5.7 mostra a tela de apresentação da VI utilizada para a aquisição dos dados dos ensaios. A programação completa para a VI está contida no anexo II do presente trabalho.

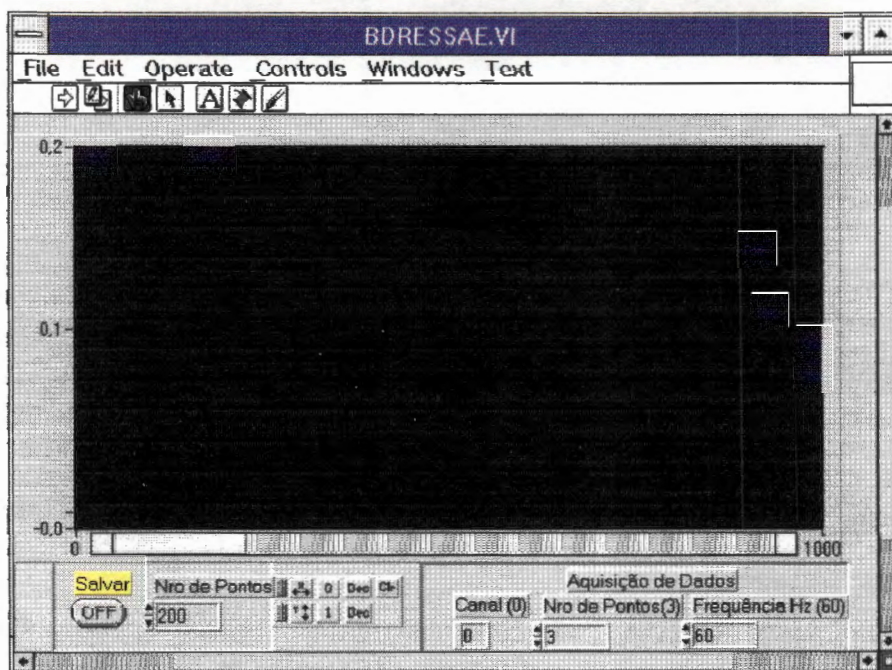


Figura 5.7 - Tela de apresentação do instrumento virtual utilizado para a aquisição dos dados de E.A. nos ensaios realizados.

5.2.3. - Programação CN

Para a realização dos ensaios são desenvolvidos programas CN que realizam a retificação da peça, a medição do desgaste do rebolo, a dressagem para correção do desgaste do rebolo, a dressagem para medição da E.A. nas diferentes condições de trabalho estipuladas.

O programa utilizado para a medição da E.A. é desenvolvido com a seguinte estrutura: um programa principal, onde os parâmetros de cada dressagem é definido, e um sub-programa que define um ciclo fixo de dressagem. Cada ciclo é realizado com a combinação de parâmetros especificada na linha de chamada do sub-programa contida no programa principal. O programa principal e o sub-programa de dressagem são

mostrados e explicados no apêndice III do presente trabalho. A figura 5.8 mostra um esquema de funcionamento do programa.

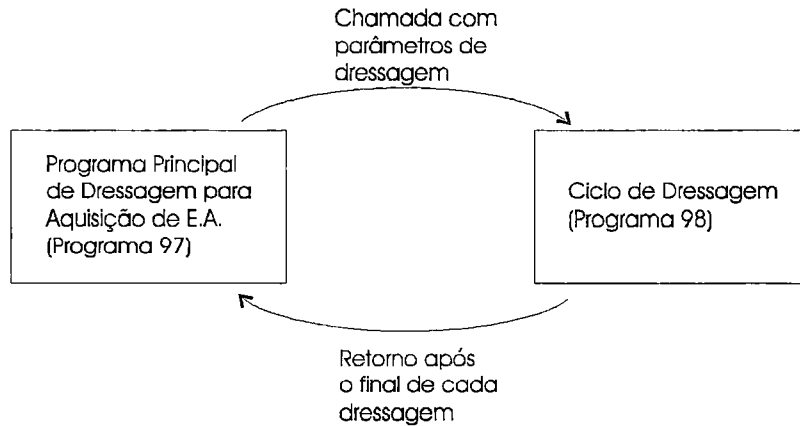


Figura 5.8 - Esquema de funcionamento do programa CN para aquisição da E.A. na dressagem do rebolo.

Outro programa utilizado é o de retificação da peça, que contém chamadas para os sub-programas de medição do desgaste do rebolo e de dressagem para correção do desgaste do rebolo. O programa consiste em retificar uma peça com profundidade e avanços pré-determinados, chamar um sub-programa para a medição do desgaste do rebolo, que realizava o toque do rebolo no dressador (com o uso da rotina de calibração por E.A.) em 25 posições diferentes do rebolo, e finalmente chamar um último sub-programa que realiza a dressagem do rebolo até que as irregularidades devido ao desgaste sejam devidamente eliminadas. Esse último ciclo de dressagem era realizado com o auxílio do recurso de “dressagem inteligente” adaptado na máquina e descrito por Felipe, 1996. A figura 5.9 mostra um esquema de funcionamento desse programa e dos sub-programas. Os programas são mostrados e explicados no apêndice III do presente trabalho.

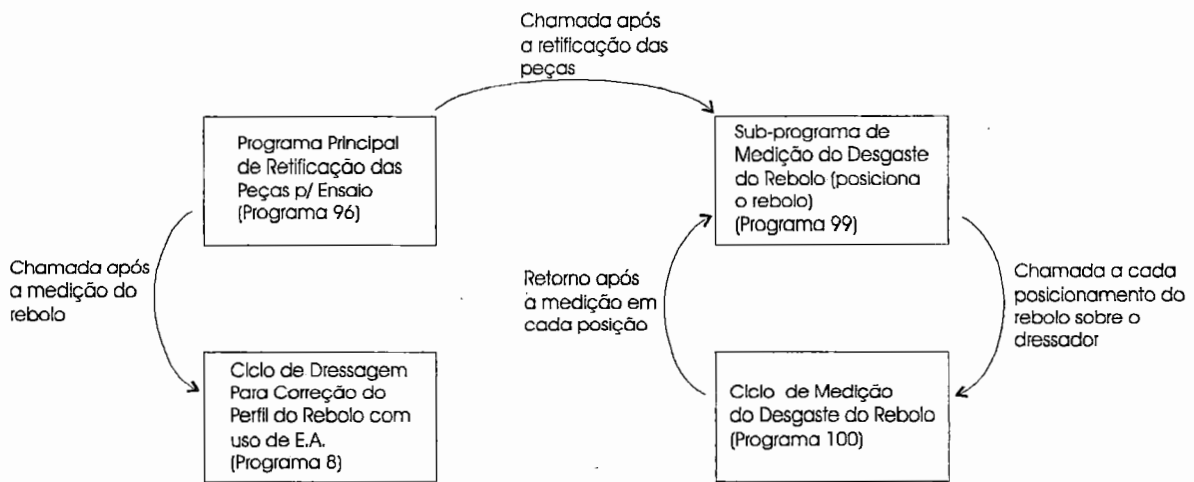


Figura 5.9 - Esquema de funcionamento do programa de retificação e dos sub-programas de medição do desgaste do rebolo e “dressagem inteligente”.

5.2.4. - Ensaios para relacionar força e E.A. na dressagem

Para conhecer melhor o comportamento das forças normal e tangencial e do sinal de E.A. durante a dressagem dos rebolos em diferentes condições, são realizados ensaios utilizando-se a montagem experimental da figura 5.3.

O objetivo desses ensaios é verificar a existência de relação nos comportamentos das forças de dressagem e da E.A., e como esses comportamentos são influenciados pela velocidade do rebolo e pelas condições de dressagem.

5.2.5. - Experimentação para relacionar dureza do rebolo em trabalho ("dureza dinâmica") e E.A. na dressagem

Tendo feito o estudo da relação entre força na dressagem e E.A., passa-se ao procedimento experimental para buscar a relação entre dureza de trabalho do rebolo e

E.A. na dressagem. A montagem utilizada é a da figura 5.6, onde um sensor de E.A. é acoplado ao contra-ponto da retificadora cilíndrica externa Zema G800 e o sinal captado pelo sensor é lido em um microcomputador através de um programa em "Lab-View".

A preparação dos ensaios deve obedecer certos requisitos: a dressagem que possibilitará a captação da E.A. deve ser realizada imediatamente antes da retificação da peça, de modo a permitir que a camada do rebolo que está sendo utilizada para retificar a peça, e que será avaliada através da relação G , também possa ser avaliada em termos de emissão acústica. Para que essa medição da E.A. seja feita é preciso que a superfície do rebolo esteja regular e livre de falhas. A medição do desgaste do rebolo deve ser realizada imediatamente após a retificação. A variação de diâmetro das peças retificadas também deve ser medida para evitar que o desgaste do rebolo ou a resposta irregular da máquina retificadora possam interferir na avaliação do volume de material removido.

Desse modo, os ensaios são realizados na seguinte seqüência de procedimentos para cada velocidade de corte (velocidade do rebolo): primeiramente o rebolo é dressado com cinco profundidades de dressagem diferentes (0,02 a 0,06 mm) e com velocidades de passagem que o grau de recobrimento de dressagem, uma vez que o perfil do dressador varia com a profundidade de dressagem a_d e com a velocidade do rebolo. Duas condições de grau de recobrimento (2,0 e 5,0) são testadas. Durante essas dressagens, dez no total, o sinal de E.A. é medido e armazenado no microcomputador através do "software" "Lab-View".

Em seguida, retifica-se em mergulho uma peça com três colos (figura 5.10), com o diâmetro inicial de cada colo previamente medido com um micrômetro digital, com uma remoção programada de 0,5 mm em velocidade de avanço em mergulho constante (f100 e f150 representam avanço diametral de 1mm/min e 1,5 mm/min, respectivamente). A peça é acionada com velocidade constante (0,5 m/s). O diâmetro dos três colos é

medido novamente ao final da retificação para a aferição da quantidade de material efetivamente removida. A peça é endurecida por têmpera em 45 HRc.

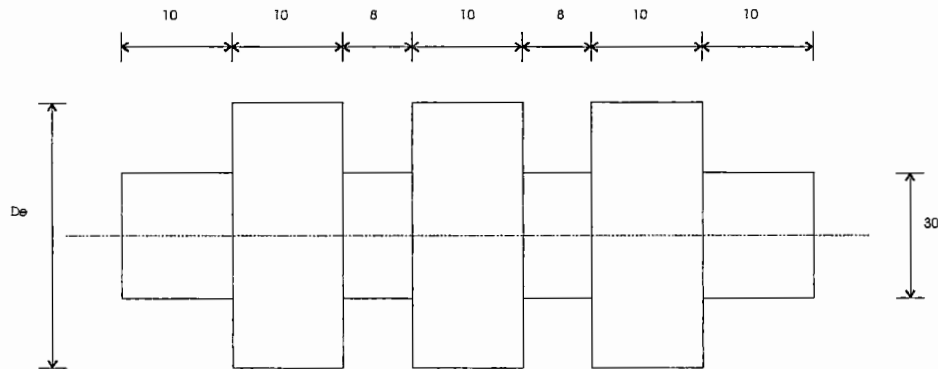


Figura 5.10 - Peça projetada para os ensaios de avaliação do relacionamento da dureza de trabalho do rebolo com E.A. na dressagem.

Após a retificação da peça é feita a medição do desgaste que o rebolo apresenta, de acordo com o procedimento de calibração. Essa medição é feita com o rebolo tocando o dressador em 25 (vinte e cinco) posições diferentes, de modo a permitir que o perfil do rebolo possa ser reproduzido através dos pontos coletados.

Finalmente, após a medição do desgaste do rebolo, é feita uma “dressagem inteligente” de modo a corrigir o perfil do rebolo e deixá-lo preparado para a realização de um novo ensaio.

As tabelas 5.1 e 5.2 mostram as seqüências nas quais os ensaios foram realizados.

Rebolo	Avanço de mergulho $f(x0,01 \text{ mm/min})$	Velocidade periférica $v_s \text{ (m/s)}$
G	150	45; 36; 28; 20
G	100	20; 36; 45; 28
K	100	45; 28; 36; 20
K	150	20; 45; 28; 36
R	150	45; 20; 36; 28
R	100	20; 36; 28; 45

Tabela 5-1 Seqüência geral de realização de ensaios.

	rebolo G	rebolo K	rebolo R
ordem	$a_d \times U_d$	$a_d \times U_d$	$a_d \times U_d$
a	0,06 x 5	0,02 x 2	0,06 x 5
b	0,06 x 2	0,02 x 5	0,05 x 2
c	0,05 x 5	0,03 x 2	0,04 x 5
d	0,05 x 2	0,03 x 5	0,03 x 2
e	0,04 x 5	0,04 x 2	0,02 x 5
f	0,04 x 2	0,04 x 5	0,06 x 2
g	0,03 x 5	0,05 x 2	0,05 x 5
h	0,03 x 2	0,05 x 5	0,04 x 2
i	0,02 x 5	0,06 x 5	0,03 x 5
j	0,02 x 2	0,06 x 2	0,02 x 2

Tabela 5-2- Seqüência de realização de ensaios por rebolo na dressagem.

Os resultados obtidos dos ensaios serão apresentados e analisados dentro do capítulo seguinte.

6. Resultados e Discussão

Nos ensaios realizados foram obtidos diversos tipos de resultados, todos possibilitando avaliar o comportamento do rebolo durante o processo de retificação e dressagem. São resultados: o nível de E.A. e força medidos durante a dressagem do rebolo, o desgaste do rebolo após a retificação da peça designada para os ensaios, as relações existentes entre relação G e velocidade de corte, E.A. e velocidade de corte, E.A. e condições de dressagem e E.A. e relação G sob as diversas condições de operação e dressagem testadas. Esses resultados são apresentados e discutidos a seguir. Os demais resultados obtidos dos ensaios podem ser analisados no anexo III.

6.1. - Força x E.A. na dressagem

Para verificar como se dá o comportamento da força de dressagem e da E.A. na dressagem é feito um ensaio sob diversas condições de velocidade periférica do rebolo, com profundidade de dressagem 0,04 mm (diâmetro) e velocidade de passagem do rebolo pelo dressador f 20000 (equivalente a 200 mm/min). Nesse ensaio, cuja montagem para aquisição dos sinais de força e E.A. está apresentada na figura 5.3, e cujos resultados são mostrados na figura 6.1, percebe-se que o comportamento da força de dressagem é decrescente com o aumento da velocidade do rebolo. Isso explica-se pelo fato de que em altas velocidades o esforço necessário para promover a ruptura do grão abrasivo e do ligante recebe a contribuição da energia cinética envolvida no processo. O grão abrasivo possui uma inércia maior e isso faz com que o choque com a ponta do dressador tenha características mais frágeis. Já em baixas velocidades a energia

cinética envolvida é menor, a inércia do grão também é menor e, por consequência, contribuem menos para atenuar o esforço necessário para arrancar e fraturar o grão abrasivo.

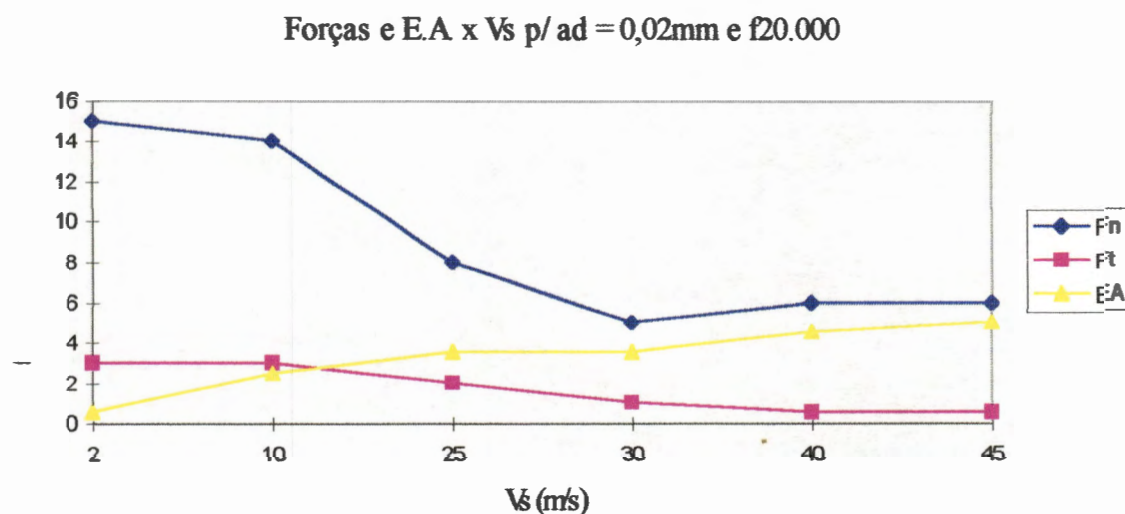


Figura 6.1 - Comportamento da força e da E.A. na dressagem em várias velocidades periféricas do rebolo.

6.2. - E.A. na dressagem

Para cada ensaio realizado é feita a dressagem do rebolo sob diversas condições de profundidade de dressagem (a_d) e passo de dressagem (S_d), de modo a assegurar que o grau de recobrimento de dressagem (U_d) seja mantido em todos os ensaios com valores iguais a 2,0 e 5,0.

Além disso, como a retificação deve ser feita com duas velocidades de avanço em mergulho (f), a aquisição da E.A. na dressagem é sempre repetida, apenas diferenciando-se o diâmetro do rebolo em que isso acontece. Isso possibilita tanto a verificação da

repetibilidade da E.A. em função das condições de dressagem para o mesmo rebolo, como a ocorrência de influências derivadas do processo de fabricação do rebolo. Essas influências serão mais bem discutidas ao final deste capítulo. Para efeito de nomenclatura, os ensaios de dressagem realizados antes da retificação das peças com velocidade de avanço em mergulho f100 receberam o índice **a**, e os que foram realizados antes da retificação das peças com velocidade de avanço em mergulho f150 receberam índice **b**. Também para efeito de nomenclatura, sempre que houver referência à E.A., esta indica o nível médio quadrático da E.A., ou seja, o nível RMS.

A figura 6.2 mostra o comportamento da E.A. durante a dressagem do rebolo com dureza G com velocidade de corte de 45 m/s. Cada elevação do nível de E.A. corresponde a uma dressagem, conforme mostra a seqüência de ensaios descrita na tabela V.I. É possível observar que o comportamento da E.A. apresenta variação muito pequena quando o ensaio é repetido, uma vez que as condições de dressagem foram mantidas rigorosamente iguais. O que varia é apenas a velocidade de avanço em mergulho do rebolo no momento da retificação da peça, sendo a dressagem, portanto, independente desse parâmetro.

As variações mais significativas que ocorrem dentro de uma mesma condição de dressagem quando o ensaio é repetido, caso do 3º e do 8º conjunto de pontos, podem ser creditados à influência de fatores inerentes à fabricação do rebolo, tais como a distribuição irregular da massa de grãos e de ligante na periferia do rebolo, a diferença de pressão no sentido axial que ocorre durante a prensagem do rebolo, etc. Esses fatores são mais bem discutidos ao final deste capítulo. Nas figuras 6.3 e 6.4 a - c são mostrados resultados que apresentam variações no nível de E.A.. Isso ocorreu em cerca de 20% dos ensaios. Tais variações podem ser também creditadas aos fatores da fabricação do rebolo.

E.A. na Dressagem de Rebolo com Dureza G, velocidade de corte 45 m/s

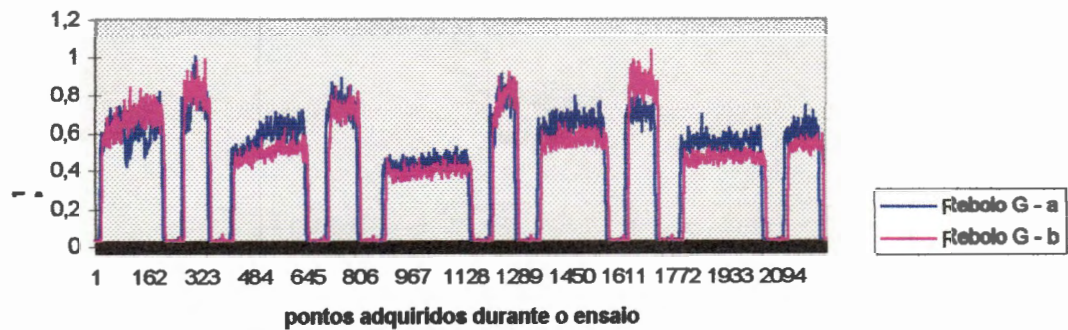


Figura 6.2 - Comportamento do nível de E.A. na dressagem do rebolo dureza G com velocidade de corte 45 m/s.

Na figura 6.3 observa-se que a E.A. repete mais o comportamento e o nível nas 4 últimas dressagens realizadas, o que descarta a hipótese de que o método não tem repetibilidade. Observa-se também que na dressagem 6 da figura 6.3, o comportamento é repetido, apresentando variação apenas no nível da E.A., levando a crer que existe uma variação uniforme em toda a largura do rebolo.

E.A. na Dressagem de Rebolo com Dureza K, Velocidade de Corte 28 m/s

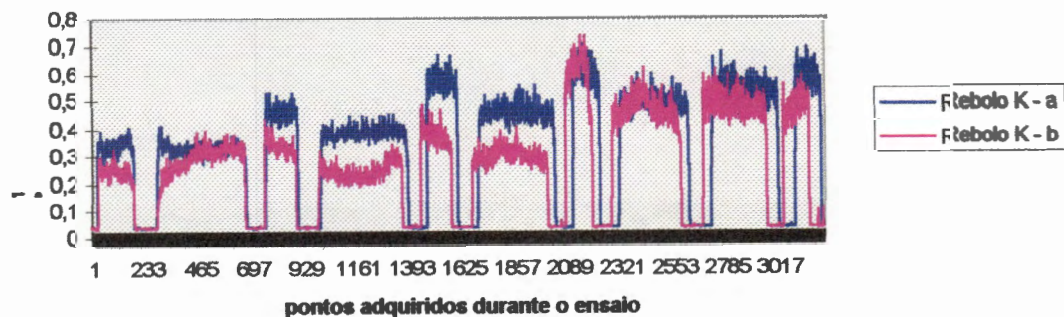


Figura 6.3 - Comportamento da E.A. na dressagem do rebolo dureza K com velocidade de corte 28 m/s.

Ainda na figura 6.3, as variações apresentadas em comportamento e nível de E.A. das 5 primeiras dressagens sugere a existência de variações localizadas na dureza e na composição do rebolo, o que pode ser creditado aos já citados fatores considerados inerentes à fabricação do rebolo. Essas variações localizadas de dureza são tratadas no presente trabalho como “dureza local do rebolo”, de modo a diferenciá-las do grau de dureza do rebolo, que é tratado também como “dureza global do rebolo”. As figuras 6.4 a 6.6 mostram com mais detalhe que a dureza do rebolo ao longo de sua largura sofre alterações significativas, provocando a queda do nível de E.A. conforme vai se dando a passagem do dressador pela superfície do rebolo. Isso destaca a irregularidade que os rebolos, principalmente os de maior largura, podem apresentar devido às diferenças de pressão que ocorrem no sentido axial durante a prensagem da massa durante a sua fabricação.

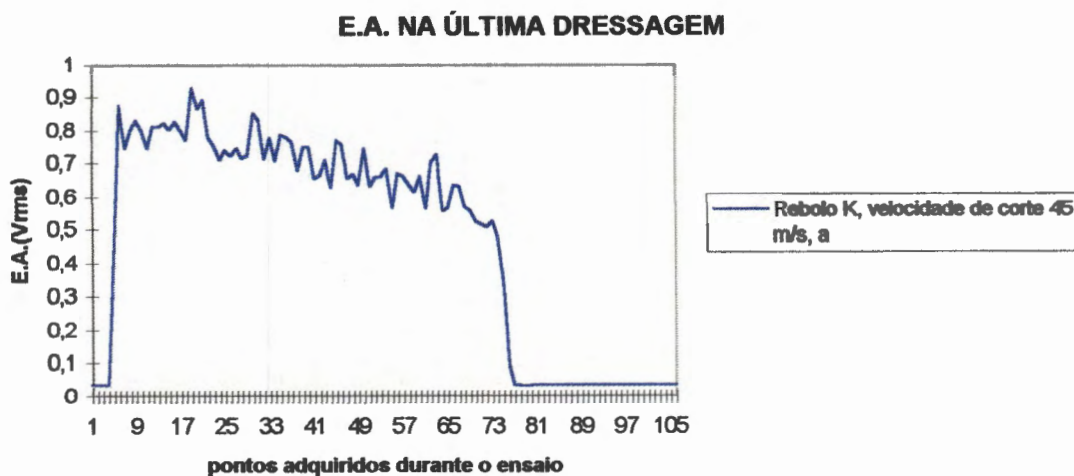


Figura 6.4 - Nível de E.A. na última dressagem do rebolo dureza K em velocidades de corte 45 m/s antes da retificação da peça com velocidade de avanço f100.

E.A. NA ÚLTIMA DRESSAGEM

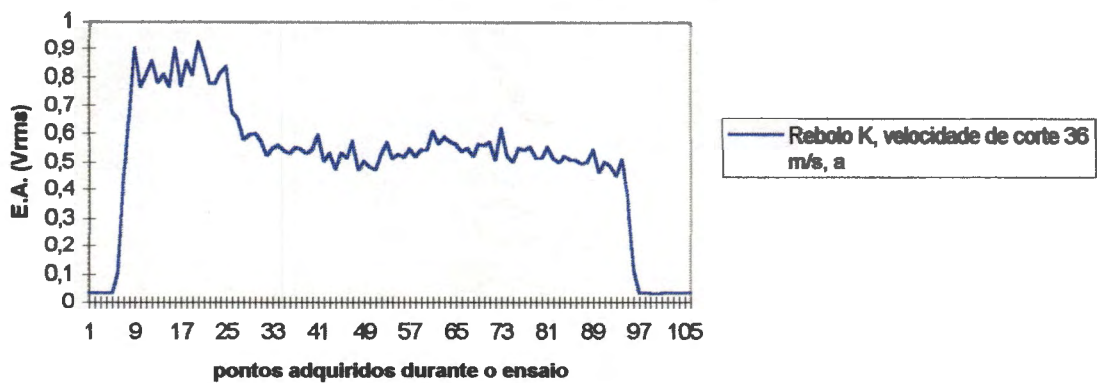


Figura 6.5 - Nível de E.A. na última dressagem do rebolo dureza K em velocidades de corte 36 m/s antes da retificação da peça com velocidade de avanço f100.

E.A. NA ÚLTIMA DRESSAGEM

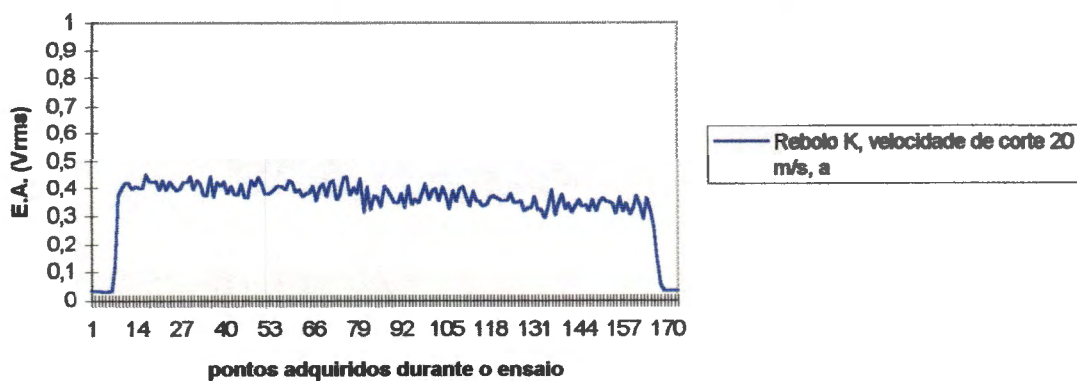


Figura 6.6 - Nível de E.A. na última dressagem do rebolo dureza K em velocidades de corte 20 m/s antes da retificação da peça com velocidade de avanço f100.

6.3. - Desgaste do rebolo na retificação das peças

A medição do desgaste do rebolo é feita visando avaliar a perda volumétrica que pode surgir tanto em função das condições de operação utilizadas, como em função da dureza do rebolo. Vale lembrar que, conforme descrito no capítulo 2 do presente trabalho, rebolos de maior grau de dureza tendem a sofrer menor desgaste volumétrico e maior perda de agressividade dos grãos abrasivos, que se mantêm retidos pelo ligante com maior força, enquanto que rebolos com menor grau de dureza tendem a sofrer maior perda volumétrica, uma vez que a força de retenção que o ligante exerce sobre os grãos é reduzida. Já com relação às condições de operação, é importante ressaltar que, de acordo com o conceito de “dureza dinâmica” difundido no ambiente da retificação e objeto de interesse do presente trabalho, o comportamento esperado é a menor perda volumétrica em velocidades de corte mais elevadas, ocorrendo o inverso em velocidades menores.

É importante também ressaltar que, conforme já foi descrito anteriormente, o método de medição do desgaste do rebolo apresentado no capítulo anterior pode apresentar variações na medição de 0,002 mm a 0,005 mm conforme a velocidade de avanço em mergulho utilizada. Essa variação pode ser creditada à velocidade de resposta da máquina em relação ao sinal de E.A. acusado pelo sistema de monitoramento utilizado.

As figuras 6.7 a 6.10 mostra o comportamento do desgaste apresentado pelos três rebolos testados nas duas condições de avanço utilizadas para retificar as peças em cada velocidade de corte. É interessante destacar que esse comportamento obedeceu à tendência de que os rebolos mais duros apresentariam menor desgaste volumétrico que

os rebolos mais moles. Assim, na maioria dos casos, o rebolo com grau de dureza G apresentou maior perda de perfil que o rebolo de grau de dureza K, e este, por sua vez apresentou menor desgaste que o rebolo de grau de dureza R.

Alguns comportamentos de desgaste merecem ser destacados e discutidos isoladamente dentre os apresentados: o do rebolo de dureza K quando retificando a peça com $v_s = 20$ m/s e f100, e os do rebolo de dureza G na retificação das peças com $v_s = 20$ m/s e f150, e com $v_s = 45$ m/s em ambos valores de f.

No primeiro caso (rebolo K, $v_s = 20$ m/s e f100), o desgaste apresenta-se de forma muito acentuada quando a velocidade de avanço em mergulho utilizada foi f100, principalmente quando comparado ao desgaste medido no caso de f150 na mesma velocidade de corte e aos demais comportamentos de desgaste desse rebolo em todas as situações de v_s e f. Esse comportamento irregular de desgaste pode ser creditado ao surgimento de uma região onde a concentração da mistura grãos - ligante estava menor que o normal no restante do rebolo. Essa queda na concentração da mistura é um problema típico de fabricação do rebolo que é discutido posteriormente sob a denominação de densidade heterogênea.

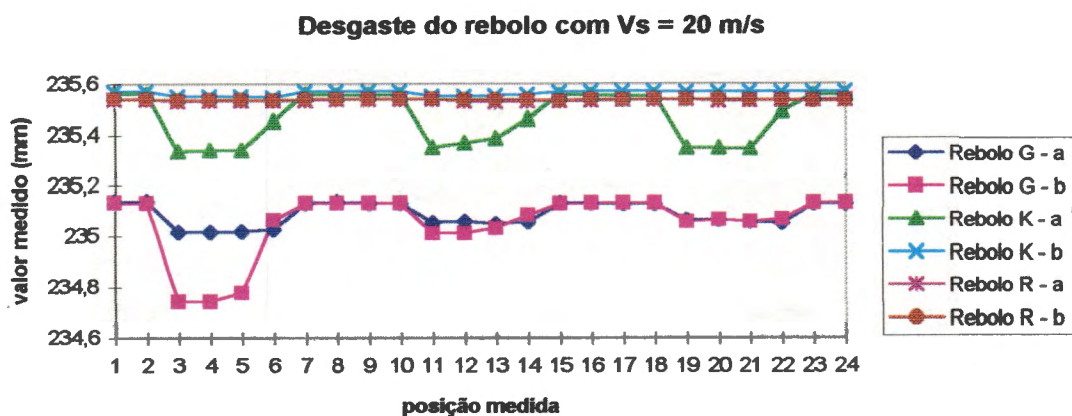


Figura 6.7 - Representação do desgaste apresentado no perfil dos três rebolos testados nas velocidades de corte 20 m/s.

Desgaste do rebolo com $V_s = 28$ m/s

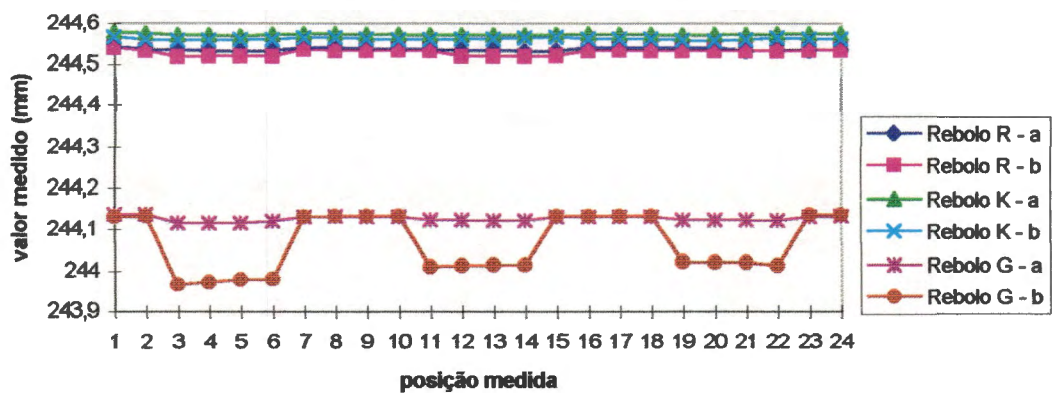


Figura 6.8 - Representação do desgaste apresentado no perfil dos três rebolos testados nas velocidades de corte 28 m/s.

Desgaste do rebolo com $V_s = 36$ m/s

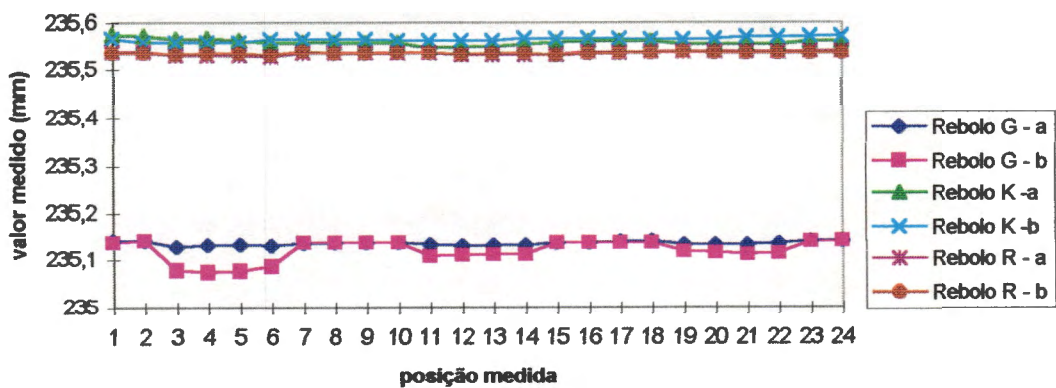


Figura 6.9 - Representação do desgaste apresentado no perfil dos três rebolos testados nas velocidades de corte 36 m/s.

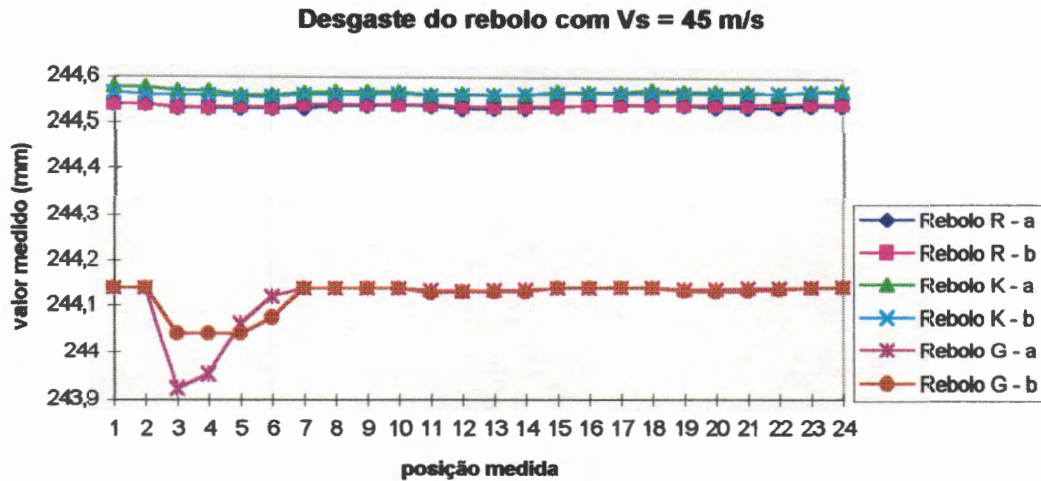


Figura 6.10 - Representação do desgaste apresentado no perfil dos três rebolos testados nas velocidades de corte 45 m/s.

No segundo caso (rebolo G, $v_s = 20$ m/s, f150 e $v_s = 45$ m/s em f100 e f150) o desgaste apresenta-se irregular ao longo da largura do rebolo, sendo mais destacado na posição de retificação de um dos colos e diminuindo na posição de retificação dos outros dois colos. Esse comportamento de desgaste confirma a hipótese apresentada na seção anterior de que a dureza do rebolo pode variar ao longo de sua largura, e que essa variação deve-se ao método empregado para a fabricação do rebolo.

6.4. - Relação G em função da dureza do rebolo

O comportamento esperado da relação G em função do grau de dureza do rebolo é de crescimento. No entanto, os gráficos das figuras 6.11 e 6.12 mostram que esse comportamento não corresponde exatamente às expectativas baseadas na teoria de que

um rebolo mais duro apresenta menor desgaste volumétrico e, conseqüentemente, maior valor de relação G.

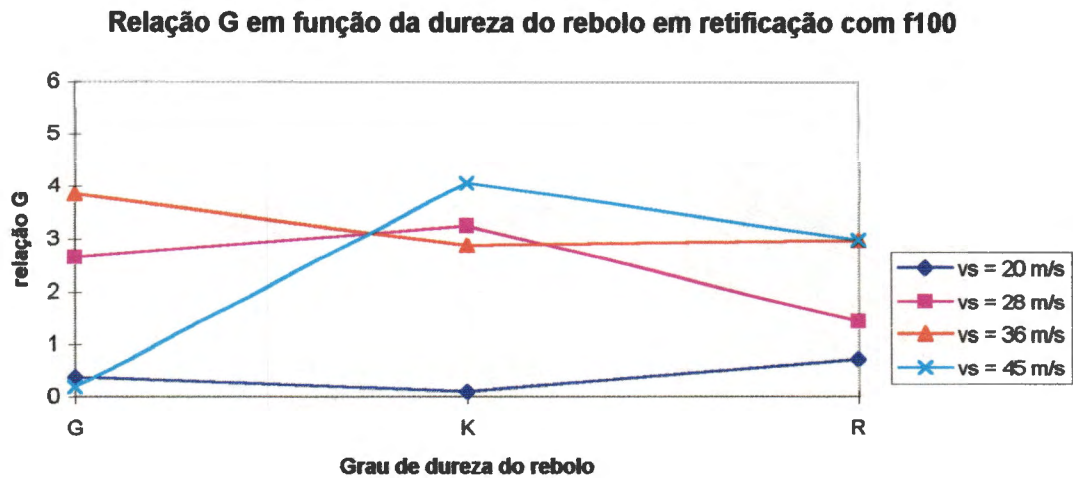


Figura 6.11 - Comportamento da relação G de retificação em função da dureza do rebolo na retificação com: f100.

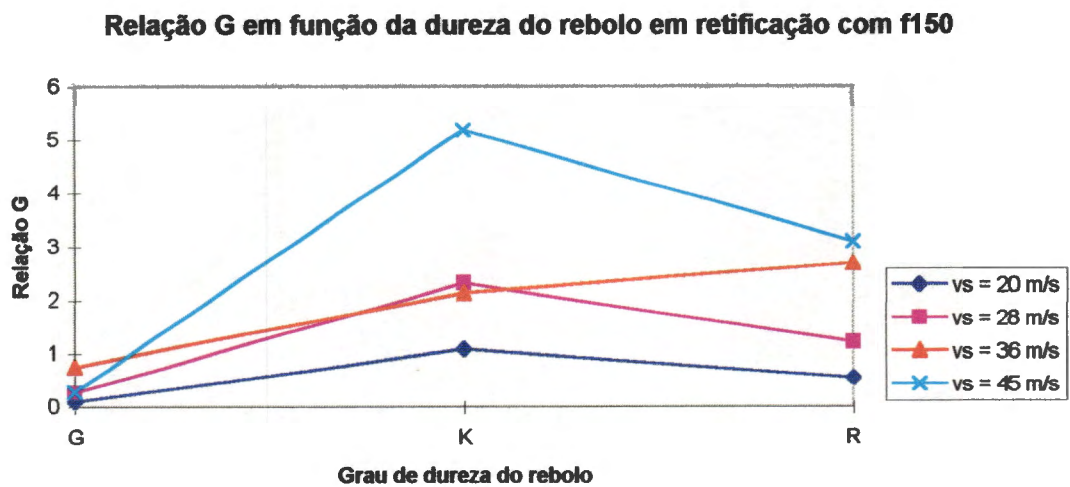


Figura 6.12 - Comportamento da relação G de retificação em função da dureza do rebolo na retificação com: f150.

Os três rebolos testados apresentam a marcação de dureza no rótulo feita pelo setor de controle de qualidade de dois fabricantes diferentes que, provavelmente, utilizaram-se de métodos diferentes para o controle da dureza dos rebolos. Assim, esses rebolos foram novamente verificados em relação à sua dureza, mas com o uso do mesmo método no setor de controle de qualidade de uma única fábrica de rebolos. O método utilizado é o Oghoshi. Os resultados dessa nova verificação estão listados na tabela 6.1.

Rebolo (nominal)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Medida 5 (mm)	Média (mm) (Grau de Dureza Correspondente)
G	0.047	0.054	0.049	0.048	0.054	0,0504 (J)
K	0.037	0.031	0.039	0.033	0.035	0,035 (O)
R	0.026	0.025	0.028	0.024	0.026	0,0258 (Q)

Tabela 6.1 - Resultados obtidos com a medição dos três rebolos testados através do método Oghoshi.

6.5. - Relação G em função da velocidade de corte

Baseando-se no conceito de “dureza dinâmica” de rebolos, onde afirma-se que o aumento da velocidade de corte do rebole faz com que o seu desgaste seja menor, conforme discutido em 6.2, a expectativa sobre os resultados de relação G em função da velocidade de corte seria de aumento de G conforme aumenta-se v_s .

Os gráficos apresentados nas figuras 6.13 a 6.15 levam a crer que essa expectativa é real, ou seja, existe a tendência real de crescimento da relação G de retificação conforme se dá um aumento na velocidade de corte. Esse comportamento foi detectado nos resultados obtidos dos ensaios dos rebolos com durezas R e K, em ambas condições de velocidade de avanço em mergulho.

Relação G x velocidade de corte para rebole dureza G

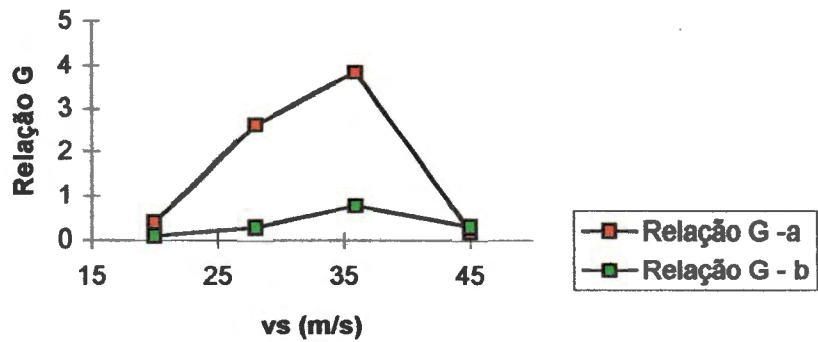


Figura 6.13 - Comportamento da relação G de retificação em função da velocidade de corte em rebole de dureza R.

Relação G x velocidade de corte para rebole dureza K

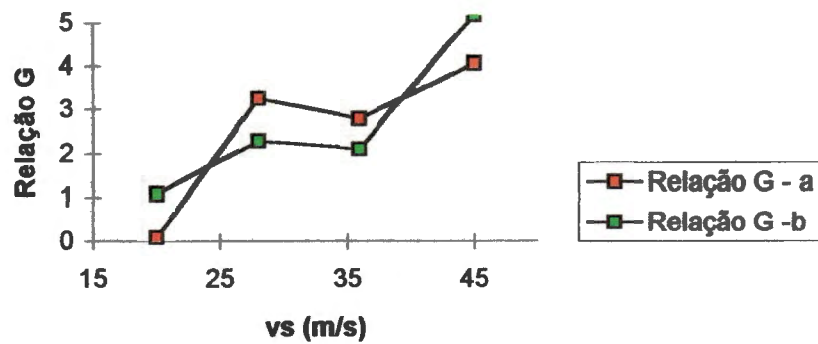


Figura 6.14 - Comportamento da relação G de retificação em função da velocidade de corte em rebole de dureza K.

Relação G x velocidade de corte para rebolo de dureza R

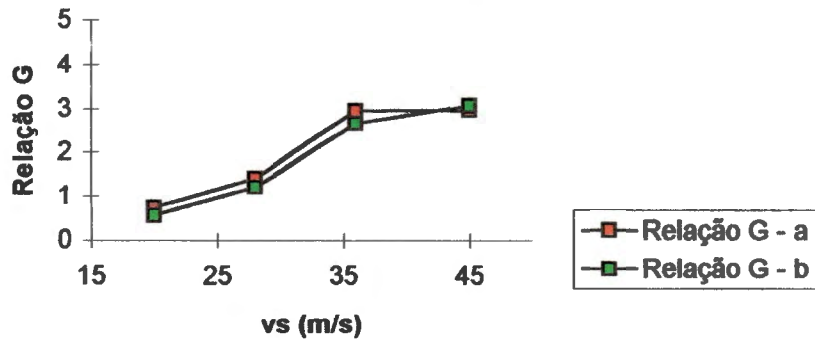


Figura 6.15 - Comportamento da relação G de retificação em função da velocidade de corte em rebolo de dureza G.

Entretanto, houve uma diferença de comportamento detectada no rebolo de dureza G, que pode ser explicada pela influência de diversos fatores. O primeiro é creditar a variação aos já mencionados problemas que a fabricação do rebolo pode apresentar. Assim, é possível que durante a retificação das peças nas condições de f_{100} e $v_s = 28$ m/s e f_{100} e $v_s = 36$ m/s o rebolo possa ter apresentado uma camada superficial endurecida devido a uma maior concentração da mistura grãos - ligante em decorrência de sua densidade heterogênea. Outra contribuição para tal variação pode ser a variação de dureza das peças que foram retificadas, resultando em valores de relação G diferentes daqueles esperados. Além disso, diferenças de dressagem (U_d , a_d ou desgaste do dressador) ou de condições de trabalho (condições de usinagem, resposta da máquina, etc.) também podem ser incluídos como possíveis fatores que contribuem para a dispersão do resultado.

A hipótese que se apresenta no presente trabalho para a identificação da influência da dureza do rebolo na variação do comportamento da relação G é através do

relacionamento da relação G com o comportamento da E.A. durante a dressagem do rebolo. Caso o responsável pela instabilidade de G seja o rebolo, a E.A. deve ter o mesmo comportamento de crescimento ou de decréscimo. Ou seja, a E.A. deve subir nos casos onde a relação G aumenta, e deve decrescer onde a relação G é baixa, desde que fique provado que existe relação entre E.A. e dureza do rebolo.

Portanto, considerando-se esse comportamento da relação G em função de v_s no rebolo de dureza G como atípico, é razoável afirmar que ocorre realmente o crescimento da relação G com o aumento da velocidade de corte.

A seguir são discutidos os resultados relativos à E.A. na dressagem buscando avaliar a sua relação com a dureza do rebolo.

6.6. - Comportamento da E.A. em função da profundidade de dressagem (a_d)

A variação da profundidade de dressagem provocada nos ensaios realizados permitiu a análise do comportamento da E.A. nas diversas situações de dressagem. Os gráficos das figuras 6.16 a 6.18 mostram como se deu esse comportamento em algumas das diversas condições de dressagem e de velocidade de corte utilizadas.

Em primeiro lugar é importante ressaltar que a E.A. tende a crescer conforme aumenta-se a profundidade de dressagem até que se atinja um determinado limite de profundidade. As curvas de E.A. x a_d para $v_s = 45$ m/s e $U_d = 2,0$ mostram a clara existência de uma tendência de crescimento do sinal de E.A. até a profundidade de dressagem de 0,04 mm, após o que o sinal tende a estabilizar-se ou até mesmo a cair. Isso não apenas comprova as observações feitas por Inasaki, 1985, como confirmam que após um determinado limite de profundidade de dressagem a eficiência da operação não sofre alterações significativas. Isso se deve ao fato de que após atingir o valor de a_d lim



definido por Coelho, 1991, o processo de dressagem deixa de ter a fratura dos grãos abrasivos para ter a remoção dos grãos inteiros em sua maior parte. Desse modo, a parcela da E.A. provocada pela fratura dos grãos durante a dressagem passa a contribuir em menor parcela na composição do sinal e o nível final tende a estabilizar-se até o ponto em que essa contribuição deixa de ser significativa, com a E.A. começando então a cair.

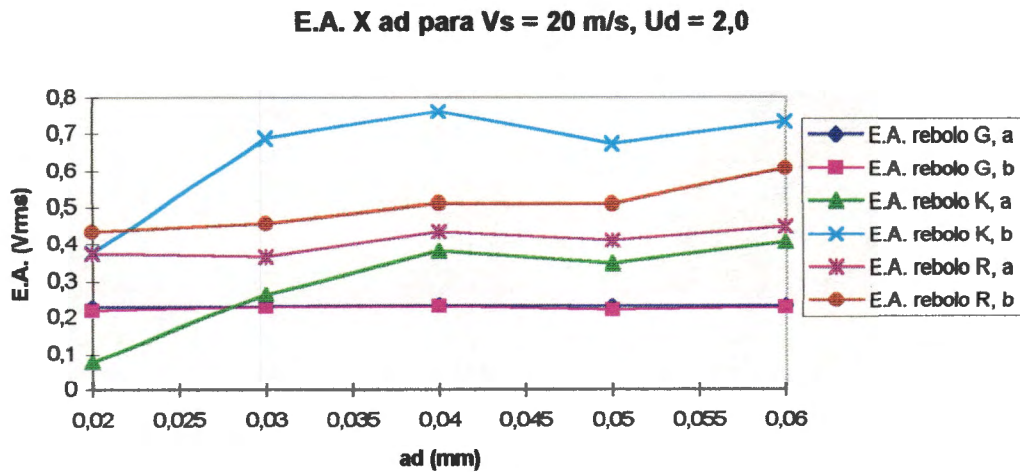


Figura 6.16 - Comportamento da E.A. em função da variação da profundidade de dressagem nos diferentes rebolos testados na velocidade de corte de 20 m/s.

E.A. x ad para $V_s = 28 \text{ m/s}$, $U_d = 2,0$

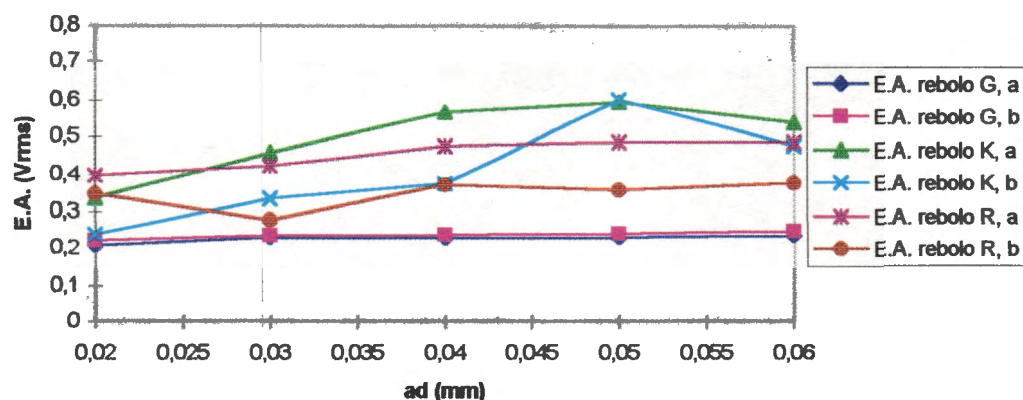


Figura 6.17 - Comportamento da E.A. em função da variação da profundidade de dressagem nos diferentes rebolos testados na velocidade de corte de: 28 m/s.

E.A. x ad para $V_s = 45 \text{ m/s}$, $U_d = 2,0$

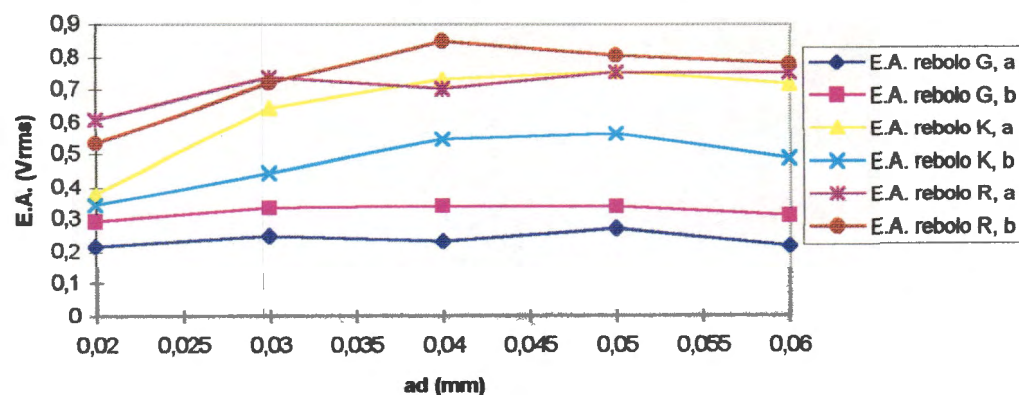


Figura 6.18 - Comportamento da E.A. em função da variação da profundidade de dressagem nos diferentes rebolos testados na velocidade de corte de: 45 m/s.

Outra observação interessante é que o nível do sinal de E.A. também obedece claramente à escala de nível de dureza dos rebolos testados. O rebolo com menor grau

de dureza (G) apresentou níveis de E.A. menores em 89 dos 90 casos testados para todas as profundidades de dressagem ensaiadas. O rebolo com o grau de dureza maior (R) apresentou níveis maiores de E.A. nas diferentes profundidades de dressagem, enquanto que o rebolo com grau de dureza intermediário (K) apresentou níveis de E.A. compatíveis com a expectativa gerada em função do seu grau de dureza na maioria dos casos. Em alguns casos o rebolo de dureza K chegou a apresentar níveis de E.A. maiores ou próximos ao do rebolo com dureza R. Isso pode ser creditado a dois fatores:

a) o rebolo de dureza K é proveniente de fabricante diferente dos outros dois rebolos. Além de utilizar formulações diferentes na fabricação do rebolo (diagrama ternário), os métodos utilizados para a medição e controle da dureza dos rebolos também foram diferentes, trazendo resultados difíceis de serem comparados;

b) a possibilidade de ter ocorrido variação de dureza local do rebolo, conforme citado anteriormente.

6.7. - Comportamento da E.A. em função da velocidade de corte

O comportamento esperado da E.A. em relação ao aumento da velocidade de corte é de crescimento, uma vez que maior taxa de energia cinética está envolvida no processo. Na figura 6.19 observa-se que em alguns casos esse tipo de comportamento não ocorre efetivamente em qualquer velocidade de corte. Existem situações onde o nível de E.A. apresenta decréscimo. No entanto, novamente, existe a hipótese de que a influência dos fatores de fabricação do rebolo tenha provocado uma oscilação localizada na dureza local do rebolo, resultando na alteração de comportamento apresentada.

Na figura 6.8 está mostrado o comportamento da E.A. dos três rebolos. Percebe-se que o aumento da velocidade periférica faz com que a média quadrática de E.A. apresente uma tendência média de crescimento. A dispersão dos valores obtidos aumenta também com a velocidade periférica do reboło. Isso pode ser explicado pelo seguinte: durante a dressagem em baixas velocidades de corte, o arrancamento do grão abrasivo (e a conseqüente fratura do ligante) tem maior freqüência devido ao menor número de

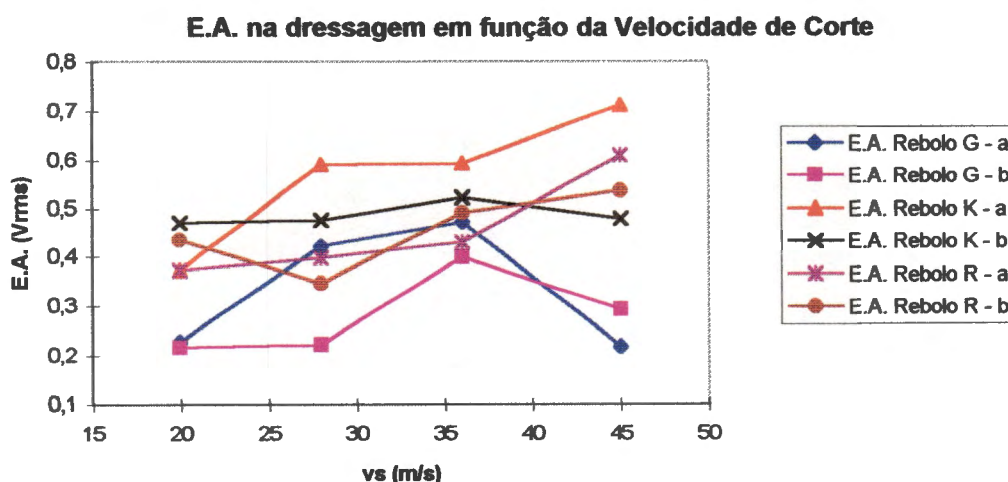


Figura 6.19 - Comportamento da E.A. em função da velocidade de corte para os três rebolos testados.

choques que ocorrem entre o dressador e os grãos abrasivos, demandando menor liberação de energia e, por conseqüência, menor nível de E.A. na operação. Já com o aumento da velocidade de corte, os choques entre a ponta do dressador e os grãos abrasivos têm maior freqüência, fazendo com ocorram mais fraturas dos grãos abrasivos e menos arrancamento dos grãos. Com velocidade mais alta a energia cinética do grão abrasivo é maior, fazendo com que na colisão haja uma tendência maior de fratura do grão abrasivo. A liberação de energia devido ao crescimento do número de choques

entre o dressador e os grãos abrasivos, adicionada ao acréscimo de energia provocado pelo aumento na frequência de ocorrência de fratura dos grãos, é maior nesse caso e, conseqüentemente, a média quadrática do nível de E.A. acompanha esse aumento.

Esse comportamento é similar ao comportamento de desgaste do rebolo durante a retificação, conforme já explicado no capítulo 4.

6.8. - Correlação de comportamentos entre Relação G e E.A.

Para verificar a hipótese proposta, os resultados mostrados nos gráficos das figuras 6.23 e 6.24 são analisados. A figura 6.22 indica que realmente ocorreu o aumento na relação G quando a E.A. também subiu. Esse resultado é coerente com a variação verificada nas curvas das figuras 6.20 e 6.21, onde ao comportamento apresentado pela relação G em função da velocidade de corte existe um comportamento correspondente da E.A. em função da velocidade de corte. Portanto, a origem dessa variação está predominantemente relacionada com o rebolo e não com outros fatores inerentes ao processo de retificação (condições de corte, entre outros) ou mesmo na variação de dureza da peça.

Relação G x velocidade de corte para rebolo dureza G

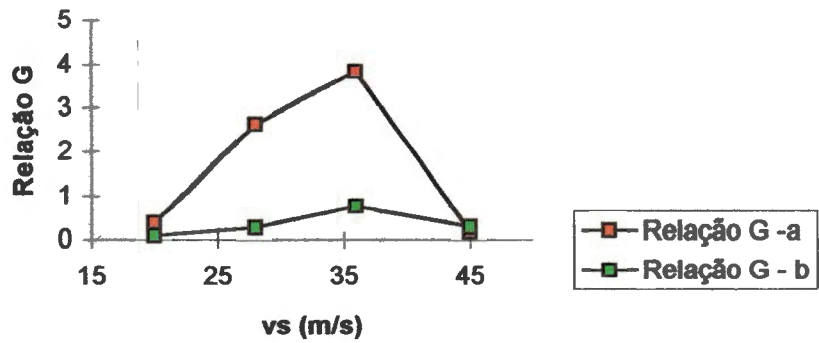


Figura 6.20 - Comportamento da relação G de retificação em função da velocidade de corte.

E.A. na dressagem em função da Velocidade de Corte

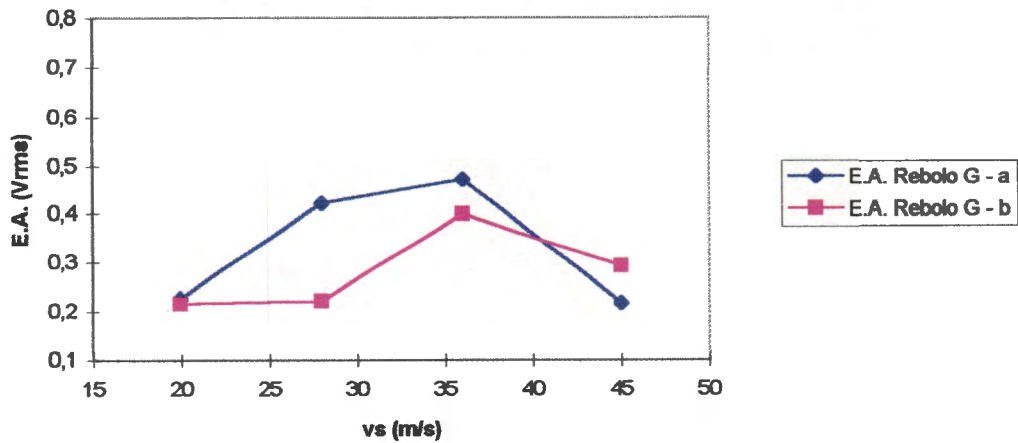


Figura 6.21 -Comportamento da E.A. em função da velocidade de corte.

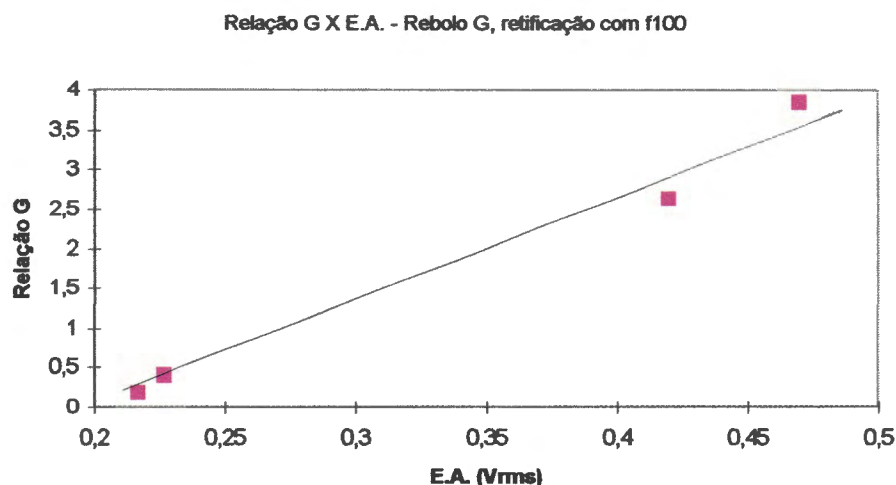


Figura 6.22 -Correlação entre os comportamentos de relação G e E.A. para o caso do rebolo com grau de dureza G na retificação da peça com velocidade de avanço em mergulho f100.

Quando da discussão acerca dos resultados obtidos de **relação G x v_s** , foi proposto que a relação entre o valor de G e E.A. poderia servir um indicativo da dureza local do rebolo. A proposta que aqui efetivamente se coloca é: caso os valores de relação G e de E.A. apresentem o mesmo comportamento, ou seja, crescimento em conjunto ou decréscimo em conjunto, a variação apresentada indica que ocorreu uma alteração localizada na dureza do rebolo (dureza local). Caso essas alterações de comportamento não ocorram em conjunto, a origem da variação deixa de ser o rebolo e passa a estar na peça ou em outra variável do processo que não seja o rebolo (dressagem, condições de corte, resposta da máquina, etc.). As figuras 6.23 e 6.24 mostram como se deu o comportamento da relação G em função da E.A. nos ensaios realizados.

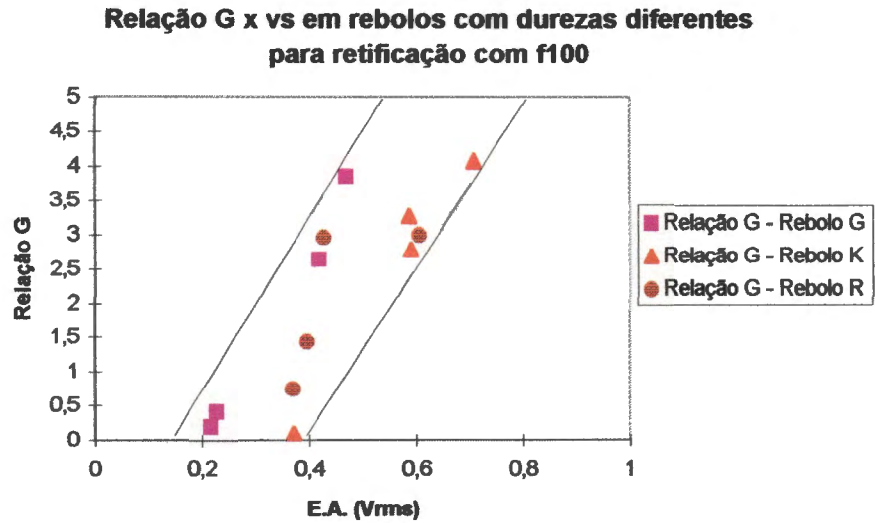


Figura 6.23 - Comportamento da relação G de retificação em função do nível de E.A. na dressagem do rebolo em retificação com velocidade de avanço em mergulho f100.

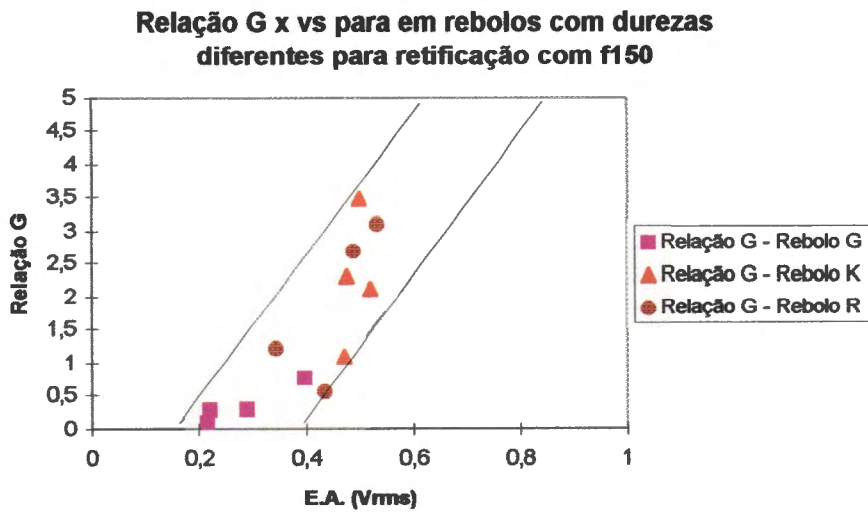


Figura 6.24 - Comportamento da relação G de retificação em função do nível de E.A. na dressagem do rebolo em retificação com velocidade de avanço em mergulho f150.

A tendência de crescimento da relação G de retificação foi acompanhada pelo sinal de E.A. monitorado durante a dressagem dos rebolos. Mais importante é ressaltar que essa tendência apresenta uma compatibilidade com as diferentes durezas dos rebolos testados, ou seja, conforme o grau de dureza do rebolo foi aumentado, a E.A. também subiu e a relação G teve comportamento idêntico. A tendência se torna mais compreensível quando se observa o fato de que em algumas situações o rebolo de dureza K, considerado intermediário, apresenta relação G ou E.A. (ou ambos) em níveis mais elevados que os apresentados pelo rebolo R, considerado o mais duro.

A dispersão existente ainda pode ser atribuída às variações nas condições de dressagem causadas pelo desgaste do dressador ou ainda às variações locais do rebolo, uma vez que foram feitas diversas dressagens para a medição de cada valor da relação G.

6.9. - Fatores da fabricação do rebolo que influenciam a sua dureza localizada (dureza local)

De acordo com o que foi discutido no presente capítulo, existem fatores que estão relacionados com a fabricação do rebolo que têm influência direta sobre o comportamento de dureza que o rebolo apresenta durante o processo de retificação e ao longo de sua utilização.

O primeiro fator a ser analisado é a distribuição da mistura grãos - liga no molde de prensagem do rebolo. A massa de grãos e ligante é despejada no molde em movimento de rotação de modo a fazer com que a distribuição da mistura seja igual por todo o molde. Para assegurar que a distribuição seja realmente equilibrada, ainda é passado uma ferramenta em forma de pente pela massa na tentativa de melhor distribuí-la no molde. Esse pente tem o corpo de madeira e os dentes feitos em material metálico

(aço, por exemplo) com pequena bitola. No entanto, ao procurar a melhor distribuição da massa com o “pente”, ocorre que onde o dente do pente passa acaba ficando uma região de menor concentração da massa e nas regiões imediatamente anterior e posterior a concentração se eleva. Nos pontos onde a concentração ficou reduzida ocorre uma queda localizada da dureza do rebolo, ao passo que onde a concentração ficou maior que no restante a dureza localizada é aumentada. A essa alteração localizada da dureza está sendo dado o nome de densidade heterogênea perimetral (DHP).

Outro fator inerente à fabricação dos rebolos que merece ser discutido é a prensagem da massa. Após a distribuição da massa no molde é feita a prensagem para compactação do rebolo antes da secagem e queima. Essa prensagem é feita com o molde preenchido pela massa e a aplicação da força se dá no sentido axial ao do raio do rebolo. A camada superficial da massa, que fica em contato mais direto com a tampa do molde, recebe a carga por maior tempo e tende a ficar mais compactada que as demais camadas do rebolo. Como a compactação (prensagem) tem influência direta na estrutura do rebolo, e esta na dureza, a prensagem da massa de grãos e ligante que constitui o rebolo durante a fabricação pode afetar diretamente a dureza local do rebolo.

Essas influências explicam as mudanças que os rebolos apresentam em seu comportamento durante a realização das operações de retificação, apresentando-se algumas vezes como mais duro para, em seguida, apresentar comportamento mais compatível com grau de dureza elevado. Em outras palavras, em um determinado momento o rebolo pode ter um desgaste acentuado e perder facilmente o perfil, e num momento seguinte provocar o surgimento de marcas de queima nas peças, sendo que nenhum desses comportamentos é corresponde efetivamente àquele esperado do rebolo. Nesses casos a correção do comportamento do rebolo pode ser feita através da alteração na velocidade de corte.

Outra variação significativa é o rebolo apresentar um lado mais duro ou ainda ser mais duro nas laterais e a porção central apresentar menor dureza. Nesses casos, o desgaste do perfil será irregular e apenas poderá ser corrigido pela dressagem.

Outra prova da existência da DHP é o fato de que diversos operadores de retificadoras em indústrias afirmarem que é comum ocorrer alterações de comportamento do rebolo durante o processo, e que a única forma de se corrigir essas alterações é através de sucessivas dressagens com a remoção de aproximadamente 0,5 mm do diâmetro do rebolo.

Assim, graças a essa análise é possível conhecer a existência do DHP e avaliar a sua influência durante o processo de retificação.

6.10. - Aplicações possíveis dos resultados

A seguir é dado um exemplo de como os resultados obtidos no presente trabalho podem ser aplicados. O exemplo é dado em duas situações muito comuns no meio industrial.

A primeira situação é o caso em que, durante a dressagem do rebolo com o monitoramento da E.A., percebe-se que o nível do sinal está muito alto ou muito baixo em relação a um patamar usual estabelecido previamente. Essa alteração do sinal indica variação na dureza local do rebolo que pode ser corrigida dressando novamente o rebolo até que o sinal de E.A. retorne ao patamar usual.

Uma segunda situação é o caso onde, após verificar-se que o sinal de E.A. na dressagem de um rebolo novo está muito alto ou muito baixo, deve ser feita uma correção na velocidade periférica do rebolo buscando levar o nível de E.A. para o

patamar esperado. Esse caso é típico de rebolos com maior variação dureza local ou ainda de rebolos cujo comportamento não corresponde à dureza especificada no rótulo.

7. Conclusões

Tendo em vista a discussão levantada durante o desenrolar do presente trabalho percebe-se que a retificação, para ser um processo com maior nível de confiabilidade, necessita de sistemas de monitoramento que permitam controlar não apenas as variáveis operacionais do processo, mas também o comportamento do ferramental utilizado na operação.

Assim, com relação ao assunto dureza de rebolos, métodos de medição e controle atualmente empregados e uso da E.A. para a avaliação da dureza de trabalho do rebolo na máquina, é possível tirar uma série de conclusões a respeito.

- A análise comparativa entre os métodos atuais de medição e controle de dureza indica que estes não fornecem resultados que possam ser comparáveis entre si. Isso se deve, principalmente, aos diferentes conceitos, embasamentos e princípios de aplicação de carga que cada método utiliza. Enquanto existem métodos que provocam o arrancamento do grão abrasivo, outros provocam o desgaste abrasivo do ligante, e outros medem apenas o módulo de elasticidade do rebolo, sem que o grão e o ligante sofram solicitações. Além disso, estes medem apenas a dureza estática do rebolo, ou seja, apenas avaliam o rebolo em uma condição completamente diferente daquela que realmente interessa para o processo de retificação, ou seja, em movimento; e as medições realizadas se dão, na maioria dos casos, na superfície lateral do rebolo, tratando-se, portanto, de verificações realizadas por amostragem (localizadas em alguns pontos da face lateral do rebolo), realizadas em uma face que nem sempre corresponde à de trabalho e fora das condições de utilização do rebolo. É preciso considerar também que na superfície de trabalho é possível que ocorram variações localizadas de dureza, cuja avaliação com os métodos atuais é inviável.

- O sinal de E.A. captado durante a operação de dressagem é sensível o bastante para detectar, além da ruptura do ligante, o momento em que ocorre o contato entre o dressador e a superfície de trabalho do rebolo. Apresenta, também, sensibilidade suficiente para identificar alterações nas condições de dressagem, além de ser facilmente tratado para análise.
- A E.A. permite avaliar a influência da profundidade de dressagem sobre a superfície do rebolo, uma vez que o sinal acústico apresenta tendência de crescimento conforme a profundidade de dressagem aumenta. No entanto, o comportamento de crescimento é apresentado apenas até que o valor limite da profundidade de dressagem ($a_{d \text{ lim}}$) seja atingido; após, o sinal apresenta a tendência de estabilização, representando com fidelidade o momento em que a fratura do grão abrasivo passa a ser menos freqüente, enquanto que a ruptura do ligante começa a ter maior intensidade de ocorrência.
- O sinal de E.A. também apresenta a tendência de crescimento conforme a dureza do rebolo é aumentada, e também conforme aumenta-se a velocidade periférica do rebolo (velocidade de corte).
- O comportamento do sinal de E.A. pode apresentar alterações a cada dressagem. Esse tipo de variação pode ser causado por diversos fatores: alteração na área de contato entre dressador e rebolo (em função do desgaste do dressador ou mudança de U_d), alteração nos parâmetros que estabelecem as condições de dressagem ou ainda uma variação localizada da dureza do rebolo.
- É confirmada a hipótese de que ocorrem variações localizadas de dureza no rebolo, e que essas variações exercem grande influência sobre os resultados da retificação, sendo, portanto, importante a sua identificação através do sinal de E.A. na dressagem.
- Finalmente, existe uma correlação entre a relação G de retificação e o sinal de E.A. na dressagem do rebolo. A relação G é normalmente utilizada como parâmetro de

avaliação da eficiência da operação e do comportamento de desgaste do rebolo durante o processo de retificação. Portanto, conclui-se que o sinal de E.A. captado durante a dressagem do rebolo é um indicativo da dureza local de trabalho que o rebolo apresenta durante o processo.

7.1. Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, são apresentadas as seguintes sugestões, no sentido de propiciar continuidade à pesquisa desenvolvida no presente trabalho:

- o desenvolvimento de um sistema de decisão automática para a repetição da dressagem a partir do sinal de E.A. no caso de se identificarem alterações significativas da dureza local de trabalho do rebolo;
- o desenvolvimento de um sistema de decisão automática para a ajustagem da velocidade de corte (v_s) a partir do sinal de E.A., com o objetivo de se manter a dureza de trabalho uniforme, mesmo que haja variação de dureza no rebolo;
- a criação de uma tabela que relacione o nível de E.A. com os graus de dureza estabelecidos para rebolos (escala alfabética), usando como padrão diversos rebolos (mais que três) de diferentes graus de dureza e granulometria;
- o desenvolvimento de um teste de riscamento (“scratch test”) com o uso da E.A. para o controle da dureza estática de rebolos em laboratórios.

Bibliografia citada

1. Anon. *Instrução Para Teste de Dureza em Rebolos.*
2. Bhateja, C.P. *The Importance of Abrasive Grinding Wheel Hardness for the Productivity of Grinding Operations.* Annals of the CIRP, v30, n1, pp 247-249, 1981.
3. Bianchi, E.C. *Ação das Condições de Dressagem na Vida de Rebolos na Retificação de Precisão.* Dissertação de Mestrado, EESC - USP, 1990.
4. Bicudo, L.A.M.C.; Oliveira, J.F.G.; Sokolowski, A.; Dornfeld, D.A. *O uso de Redes Neurais para a Modelagem da Deformação Térmica em Retificadoras.* Revista Máquinas e Metais, pp 112-123, Abril, 1996.
5. Blum, T.; Dornfeld, D.A. *Grinding Process Feedback Using Acoustic Emission.* 4th. International Grinding Conference and Exposition, SME, Dearborn, Michigan, USA, October, 1990.
6. Brinksmeier, E. *Application of AE Sensors for the Monitoring of the Dressing Process.* Annals of the CIRP, 1993.
7. Chang, Y.P.; Diniz, A.E.; Dornfeld, D.A. *Monitoring of the Grinding Process Through Acoustic Emission Using a Squirter.* Proceedings of the Japan - USA

- Symposium on Flexible Automation, ASME, San Francisco, California, USA, pp 335-340, 1992.
8. Chang, Y.P.; Dornfeld, D.A. *Chatter and Surface Pattern Detection for Grinding Processes Using a Fluid Coupled Acoustic Emission Sensor*. Proceedings of the International Conference on Machining of Advanced Materials, NIST, pp 159-167, July, 1993.
 9. Coelho, R.T. *Estudo Experimental da Profundidade de Dressagem de Rebolos na Retificação de Precisão Usando o Método do Disco Retificado*. Dissertação de Mestrado EESC - USP, 1991, 106p.
 10. Colwell, L.V.; Lane, R.O.; Soderlund, K.N. *On Determining the Hardness of Grinding Wheels - I*. Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, pp 113-128, February, 1962.
 11. Diniz, A.E. *Monitoramento e Controle Automático do Processo de Usinagem*. Notas de Aula, UNICAMP, Campinas, 1992.
 12. Dornfeld, D.A. *Intelligent Sensors for Monitoring Machining Processes*. S.D.
 13. Dornfeld, D.A.; Lan, M.S. *Chip Form Detection Using Acoustic Emission*. S.D.

14. Dornfeld, D.A.; Cai, H.G. *An Investigation of Grinding and Wheel Loading Using Acoustic Emission*. Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, v.106, pp 28-33, 1984.
15. Dornfeld, D.A. *Monitoring of the Cutting Process by Means of AE Sensor*. 3rd. International Machine Tool Engineers Conference, Tokyo, Japan, 17p, 1988.
16. Dornfeld, D.A. *Application of Acoustic Emission Techniques in Manufacturing*. NDT & E International, v.25, n.6, pp 259-269, 1992.
17. Felipe Jr., J. *Contribuição Para Implementação de Funções de Retificação Inteligente (R.I.) Utilizando Técnicas de Monitoramento por Emissão Acústica*. Tese de Doutorado EESC - USP, 1996.
18. Hardy Jr., H.R. *Application of Acoustic Emission Techniques to Rock Mechanics Research*. Acoustic Emission, ASTM STP 505, pp. 41-83, 1972.
19. Hartbower, C.E.; Reuter, W.G.; Morais, C.F.; Crimmins, P.P. *Use of Acoustic Emission for the Detection of Weld and Stress Corrosion Cracking*. Acoustic Emission, ASTM STP 505, pp. 187-221, 1972.
20. Hundt, W.; Leuenberger, D.; Rehsteiner, F. *An Approach to Monitoring of the Grinding Process Using Acoustic Emission (AE) Technique*. Annals of the CIRP, v.43/1, pp 295-298, 1994.

- 21.Hutton, P.H. *Acoustic Emission Applied Outside of the Laboratory*. Acoustic Emission, ASTM STP 505, pp. 114-128, 1972.
- 22.Inasaki, I. *Monitoring of Dressing and Grinding Processes With Acoustic Emission Signals*. Annals of the CIRP, v34/1, 1985.
- 23.Inasaki, I. *Monitoring and Optimization of Internal Grinding Process*. Annals of the CIRP, v40/1, 1991.
- 24.King, R.I.; Hahn, R.S. *Handbook of Modern Grinding Technology*. Chapman and Hall LTD., New York, pp 73-87, 1986.
- 25.Kluft, W. *Monitoring the Grinding and Dressing Operations Increases Output and Quality and Reduces Cost and Waste*. 5th. International Grinding, SME, Cincinnati, Ohio, 21p.
- 26.König, W. *Fertigungsverfahren Band 2: Schleifen, Honen, Läppen*. VDI - Verlag, Dusseldorf, pp 56-60, 1980.
- 27.König, W.; Meyen, H.P. *AE in Grinding and Dressing: Accuracy and Process Reliability*. SME Technical Paper, 4th. International Grinding Conference, Dearborn, Michigan, 20p., October, 1990.

- 28.Kumar. K.V.; Cozminca, M.; Tanaka, Y.; Shaw, M.C. *A New Method of Studying the Performance of Grinding Wheels*. Transactions of the ASME, v102, February, 1980.
- 29.Lan, M.S.; Naerheim, Y. *Application of Acoustic Emission Monitoring in Machining*. Proceedings of the 13th. NAMRC, pp 310-313, 1985.
- 30.Liang, S.Y.; Dornfeld, D.A. *Detection of Cutting Tool Wear Using Adaptive Time Series Modeling of Acoustic Emission Signal*. Sensors for Manufacturing, ASME, New York, pp 27-38, 1987.
- 31.Malkin, S. *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining With Abrasives*. Ellis Horwood LTD., West Sussex, 275p., 1989.
- 32.Mendizabal, R.O.A. *Monitoramento do Processo de Retificação Através de Técnicas Acústicas*. Dissertação de Mestrado EESC - USP, 108 p., 1991.
- 33.Nagao, T.; Nakajima, N.; Takanada, N.; Okada, S.; Toyoshima, I.; Kameyama, T. *The Mechanical Properties of Grinding Wheel Materials With Vitrified Bonds (2nd Report) - Stress - Strain Relations*. Bulletin of Japan Society Of Precision Engineering, v19, n2, pp 102-107, June, 1985.
- 34.Nakayama, K. et alli. *Sharpness Evaluation of Grinding Wheel Face by the Grinding of Steel Ball*. Annals of the CIRP, v.29/1, pp 227-231, 1980.

35. Nussbaum, G.C. *Rebolos e Abrasivos: Tecnologia Básica*. Ed. Ícone, São Paulo, 1988.
36. Oda, J.; Okada, S. *Estimation of Grinding Wheel Strength*. Bulletin of Japan Society Of Precision Engineering, v13, n2, pp 69-74, June, 1979.
37. Ogawa, S.; Okamoto, T. *The Effect of Vitrified Bond Composition on Wheel Life*. Bulletin of Japan Society Of Precision Engineering, v20, n4, pp 264-271, December, 1986.
38. Oliveira, J.F.G. *Análise da Ação do Macroefeito de Dressagem de Rebolos no Desempenho do Processo de Retificação*. Tese de Doutorado EESC - USP, 1988, 271p.
39. Oliveira, J.F.G.; Dornfeld, D.A.; Winter, B. *Dimensional Characterization of Grinding Wheel Surface Through Acoustic Emission*. Annals of the CIRP, v.43/1, 1994.
40. Oliveira, J.F.G.; Dornfeld, D.A.; Schneider, C. *A Otimização da Dressagem e a Redução do Custo de Rebolos*. Revista Máquinas e Metais, pp 32-42, Maio, 1994.. .
41. Oliveira, J.F.G.; Eiras, J.A.; Felipe Jr., J.; Bassora, L.A.; Vieira Jr., M.; Marinelli Filho, N. *Desenvolvimento de Capsulas Piezoelétricas de Emissão Acústica para o Controle de Retificação CNC*. Congresso Nacional da Sobracon, 1995.

42. Pande, S.J.; Halder, S.N.; Lal, G.K. *Evaluation of Grinding Wheel Performance*.
Wear, n58, Elsevier Sequoia S.A., Lausanne, pp 237-248, 1980.
43. Peklenik, J.; Lane, R.; Shaw, M.C. *Comparison of Static and Dynamic Hardness Of Grinding Wheels*. Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, pp 294-298, August, 1964.
44. Peters, J.; Snoeys, R.; Decneut, A. *Sonic Testing of Grinding Wheels*. Advances in MTDR, 9th., pp 1114-1131, 1968.
45. Speich, G.R.; Fisher, R.M. *Acoustic Emission During Martensite Formation*. Acoustic Emission, ASTM STP 505, pp. 140-151, 1972.
46. Tetelman, A.S.; Chow, R. *Acoustic Emission and Microcracking Processes*. Acoustic Emission, ASTM STP 505, pp. 30-40, 1972.
47. Tönshoff, H.K.; Wulfsberg, J.P.; Kals, H.J.J.; König, W.; Luttermelt, C.A. *Developments and Trends in Monitoring and Control of Machining Processes*. Annals of the CIRP, v. 37/2, pp 661-621, 1988.
48. Tönshoff, H.K.; Heuer, W. *Methods of Contact Detection of Dressing of Superabrasive Grinding Wheels*. , pp 7-39 - 7-53, s.d.

49. Tönshoff, H.K.; Peters, J.; Inasaki, I.; Paul, T. *Modeling and Simulation of Grinding Process*. Annals of the CIRP, v.41/2, pp 677-688, 1992.
50. Tönshoff, H.K.; Wobker, H.G.; Werner, F. *Analysis of Wheel Waviness and Grain Wear in Grinding*. Transactions of NAMRI / SME, v.XXI, pp 145-149, 1993.
51. Saini, D.P. *Elastic Deflections in Grinding*. Annals of the Cirp, v29/1, 1980.
52. Vieira Jr., M. *Metodologia para a Determinação das Condições de Usinagem e de Operação no Processo de Retificação*. Dissertação de Mestrado, EESC - US, 1992.
53. Vieira Jr., M.; Oliveira, J.F.G.; Coelho, R.T. *Dureza de Rebolos: Conceitos Estáticos e Dinâmicos e Métodos de Medição*. Revista Máquinas e Metais, pp 168-185, Abril, 1996.
54. Webster, J.; Marinescu, I.; Bennett, R. *Acoustic Emission for Process Control and Monitoring of Surface Integrity During Grinding*. Annals of the CIRP, v.43/1, pp 299-304, 1994.
55. Westkamper, E. *Grinding Process Assisted by Sensors and Actors*. Annals of the CIRP, 1993
56. Wilson, J.V. *What You Should Know About Grinding Whells*. Manufacturing Engineering, pp 40-44, June, 1977.

Bibliografia consultada

1. Abrão, A.M. *Sistema para Avaliação de Desempenho Térmico de Pares Rebolo-Peça em Retificação*. Dissertação de Mestrado EESC - USP, 1991.
2. Brinksmeier, E.; Tonshoff, H.K.; Inasaki, I.; Peddinghaus, J. *CIRP Co-operative Working in Grinding*. IFW, UNI - Hannover, 24p., S.D.
3. Brinksmeier, E.; Werner, F. *Monitoring of Grinding Wheel Wear*. *Annals of the CIRP*, v. 41/1, pp 373-376, 1992.
4. Colwell, L.V. *On Determining the Hardness of Grinding Wheels - II*. *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME*, pp 27-32, February, 1963.
5. Eiss Jr., N.S. *Fracture of Abrasive Grain in Grinding*. *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME*, pp 463-470, August, 1967.
6. Eranki, J.; Xiao, G.; Malkin, S. *Evaluating the Performance of "Seeded Gel" Grinding Wheels*. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier Science Publishers, pp 1-17, 1992.
7. Higushi, M.; Yano, A. *Characteristics of Sound Radiation of Grinding Wheel (1st. Report) - Study on the Grinding Sound*. *Bulletin of Japan Society of Precision Engineering*, v.15, n.4, pp 243-249, December, 1981.

8. Michaels, J.E.; Michaels, T.E.; Sachse, W. Applications of Deconvolution to Acoustic Emission Signals Analysis. *Material Evaluation*, v.39, pp 1032-1036, October, 1991.
9. Mori, K.; Kasashima, N.; Yamani, T.; Nakai, T. An Intelligent Vibration Diagnostic System for Cylindrical Grinding. *Proceedings of the Japan - USA Symposium on Flexible Automation*, ASME, v2, pp1097-1100, 1992.
10. Nagao, T.; Nakajima, N.; Takenaka, N.; Hide, M.; Isahaya, S. Static Fracture and Elastic Modulus of Grinding Wheel Materials With Resin Bonds. *Bulletin of Japan Society Of Precision Engineering*, v15, n3, pp 187-188, September, 1981.
11. Nagao, T.; Nakajima, N.; Takanada, N.; Okada, S.; Toyoshima, I.; Kameyama, T. The Mechanical Properties of Grinding Wheel Materials With Vitrified Bonds (3rd. Report) - Strengths and Elastic Moduli of WA and GC Materials. *Bulletin of Japan Society Of Precision Engineering*, v19, n3, pp 187-192, September, 1985.
12. Nakayama, K.; Takagi, J.I. A Method of Sharpness Evaluation of Grinding Wheel Surface. *Bulletin of Japan Society of Precision Engineering*, v.13, pp 105-106, June, 1979.
13. Nakayama, K.; Takagi, J.I. Characterization of Grinding Wheel Surface. S.d.
14. Nakayama, K. et alli. Sharpness Evaluation of Grinding Wheel Face by the Grinding of Steel Ball. *Annals of the CIRP*, v.29/1, pp 227-231, 1980.

15. Oliveira, J.F.G.; Coelho, R.T.; Purquerio, B.M. Análise Experimental da Condição Ideal de Dressagem de Rebolos Usando o Método de Esfera Retificada. VIII COBEM, São José dos Campos, pp 777-780, 1985.
16. Oliveira, J.F.G.; Coelho, R.T.; Purquerio, B.M.; Bianchi, E.C. Grinding Process Dominance by Means of the Dressing Operation. MATADOR / 92, Manchester, England, 1992.
17. Russel, J.K. Deformation During Chip Formation. Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, pp 53-56, February, 1965.
18. Snoeys, R.; Wang, I.C. Analysis of the Static and Dynamic Stiffnesses of the Grinding Wheel Surface. Advances in MTDR, 9th., pp 1133-1148, 1968.
19. Tanaka, T. Simulation Tracking on the Wear Process of Grinding Wheel by the Fuzzy Inference. Proceedings of the Japan - USA Symposium on Flexible Automation, ASME, v.2, pp1023-1028, 1992.
20. Shimamune, T.; Mochida, M.; Ono, K. Grinding at Low Wheel Speed (1st. Report) - Conditions of the Occurrence of Grinding Burn in Creep Feed Grinding. Bulletin of Japan Society Of Precision Engineering, v24, n3, pp 206-213, September, 1990.

21. Shimamune, T.; Mochida, M.; Ono, K. Grinding at Low Wheel Speed (2nd. Report) - Wheel Wear in Creep Feed Grinding. Bulletin of Japan Society Of Precision Engineering, v25, n1, pp 11-17, March, 1991.
22. Usui, E.; Obikawa, T.; Hagiwara, S. Study on Edge Fracture of Abrasive Grain During Grinding With Applying the Theory of Markov Process (1st. Report) - Optical Instrument for Identifying Edge Topography With Aid of Pattern Recognition Technique. Bulletin of Japan Society Of Precision Engineering, v22, n2, pp 95-101, June, 1988.
23. Venk, S.; Smits, C.A.; Govind, R. Sensor-based Information Module to Aid Intelligent Decision Making in Grinding. Journal of Manufacturing Systems, v11, n1, pp13-19, s.d.
24. Wakuda, M.; Inasaki, I. Detection of Malfunctions in Grinding Process. S.d.
25. Wetton, A.G. A Review of Theories of Metal Removal in Grinding. Journal of Mechanical Engineering Science, v11, n4, 1969.
26. Yokogawa, M.; Yokogawa, K. Effects of the Abrasive Retention of CBN Wheels on Grinding Performance. Bulletin of Japan Society Of Precision Engineering, v20, n4, pp 231-238, December, 1986.

27. Yoshikawa, H.; Sata, T. Study on Wear of Grinding Wheels 1 - Bond Fracture in Grinding Wheels. Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, pp 39-43, February, 1963.

28. Zlatkin, A.T.; Lube, E.L. Estimation of Fracture Toughness and Residual Stress in Brittle Crystals from Indentation-induced Acoustic Emission. Journal of Crystal Growth, Elsevier Science Publishers, pp 218-230, 1992.

A n e x o I - Tabelas das normas JIS R6210 e JIS R6212 para a conversão dos valores medidos

no teste pelo método Oghoshi em grau de dureza.

----- tamanho de grão ----->

grau	16	20	24	30	36	46	54	60	70	80	90	100	120	150	180	220
G	—	—	—	1.77	1.55	1.33	1.20	1.11	1.00	0.91	0.83	0.79	0.88	0.75	0.66	0.59
				1.42	1.25	1.07	0.97	0.91	0.81	0.74	0.68	0.64	0.68	0.60	0.54	0.48
H	2.48	2.12	1.83	1.58	1.39	1.19	1.07	1.00	0.90	0.81	0.75	0.72	0.77	0.66	0.59	0.53
	1.88	1.64	1.47	1.27	1.12	0.96	0.86	0.81	0.72	0.66	0.61	0.58	0.60	0.54	0.48	0.43
I	2.20	1.89	1.63	1.41	1.24	1.06	0.96	0.89	0.80	0.73	0.67	0.63	0.67	0.59	0.53	0.47
	1.68	1.46	1.31	1.14	1.00	0.86	0.77	0.72	0.5	0.59	0.55	0.51	0.53	0.48	0.43	0.38
J	1.99	1.69	1.46	1.26	1.11	0.95	0.85	0.80	0.71	0.65	0.60	0.57	0.59	0.53	0.47	0.42
	1.50	1.30	1.17	1.01	0.90	0.77	0.69	0.65	0.58	0.53	0.49	0.46	0.47	0.43	0.38	0.34
K	1.77	1.51	1.30	1.13	0.99	0.85	0.76	0.71	.64	0.58	0.54	0.50	0.52	0.47	0.42	0.37
	1.34	1.17	1.05	0.91	0.80	0.69	0.62	0.58	0.52	0.47	0.44	0.40	0.41	0.38	0.34	0.30
L	1.59	1.35	1.16	1.00	0.89	0.76	0.68	0.64	0.57	0.52	0.48	0.45	0.46	0.42	0.37	0.33
	1.20	1.04	0.94	0.81	0.72	0.62	0.55	0.52	0.46	0.42	0.39	0.36	0.36	0.34	0.30	0.26
M	1.41	1.20	1.04	0.90	0.79	0.68	0.61	0.57	0.51	0.46	0.43	0.39	0.40	0.37	0.33	0.29
	1.08	0.93	0.84	0.73	0.64	0.55	0.49	0.46	0.41	0.37	0.35	0.31	0.32	0.30	0.26	0.23
N	1.27	1.07	0.93	0.80	0.71	0.61	0.54	0.51	0.45	0.41	0.38	0.35	0.35	0.33	0.29	—
	0.96	0.83	0.75	0.65	0.58	0.49	0.44	0.41	0.36	0.33	0.31	0.28	0.28	0.26	0.23	—
O	1.13	0.96	0.83	0.72	0.63	0.54	0.48	0.45	0.40	0.36	0.34	0.32	0.31	0.29	—	—
	0.85	0.74	0.67	0.58	0.51	0.44	0.39	0.36	0.32	0.29	0.28	0.26	0.24	0.23	—	—
P	1.01	0.86	0.74	0.64	0.57	0.48	0.43	0.40	0.35	0.32	0.31	0.29	0.27	—	—	—
	0.77	0.67	0.60	0.52	0.46	0.39	0.35	0.32	0.28	0.26	0.25	0.23	0.21	—	—	—
Q	0.90	0.77	0.66	0.57	0.50	0.43	0.38	0.35	—	—	—	—	—	—	—	—
	0.69	0.60	0.53	0.46	0.40	0.35	0.31	0.28	—	—	—	—	—	—	—	—
R	0.80	0.68	0.59	0.51	0.45	0.38	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	0.61	0.53	0.48	0.41	0.36	0.31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tabela I.1 - Conversão do valor medido no método Oghoshi (em mm) para grau de dureza para rebolos vitrificados.

←----- tamanho de grão ----->

Grau	24	30	36	46	54	60	70	80	90	100
H	1.58 1.17	1.35 1.00	1.17 0.88	1.00 0.74	0.88 0.66	0.78 0.57	0.70 0.53	0.62 0.46	0.57 0.42	0.50 0.38
I	1.38 1.04	1.18 0.88	1.04 0.76	0.88 0.65	0.76 0.58	0.68 0.51	0.62 0.46	0.55 0.41	0.50 0.37	0.43 0.33
J	1.21 0.90	1.04 0.77	0.90 0.66	0.77 0.56	0.66 0.50	0.60 0.45	0.54 0.41	0.48 0.35	0.40 0.32	0.38 0.29
K	1.00 0.78	0.90 0.67	0.78 0.58	0.67 0.50	0.58 0.44	0.52 0.39	0.47 0.35	0.42 0.31	0.38 0.28	0.33 0.25
L	0.91 0.68	0.79 0.58	0.68 0.51	0.58 0.44	0.51 0.38	0.46 0.34	0.41 0.31	0.36 0.27	0.33 0.25	—
M	0.82 0.60	0.69 0.51	0.60 0.45	0.51 0.38	0.45 0.34	0.40 0.30	0.36 0.27	0.32 0.24	—	—
N	0.71 0.52	0.60 0.45	0.52 0.39	0.45 0.34	0.39 0.29	0.35 0.26	0.31 0.23	—	—	—
O	0.62 0.46	0.53 0.40	0.46 0.34	0.40 0.30	0.34 0.26	0.31 0.23	—	—	—	—
P	0.54 0.40	0.46 0.35	0.40 0.30	0.35 0.26	0.30 0.23	—	—	—	—	—
Q	0.48 0.35	0.41 0.31	0.35 0.26	0.31 0.23	—	—	—	—	—	—
R	0.42 0.31	0.36 0.27	0.31 0.23	—	—	—	—	—	—	—

Tabela I.2 - Conversão do valor medido no método Oghoshi (em mm) para grau de dureza para rebolos resinoides.

A n e x o II - Diagrama da VI programada em "Lab-view" para aquisição da E.A. na dressagem

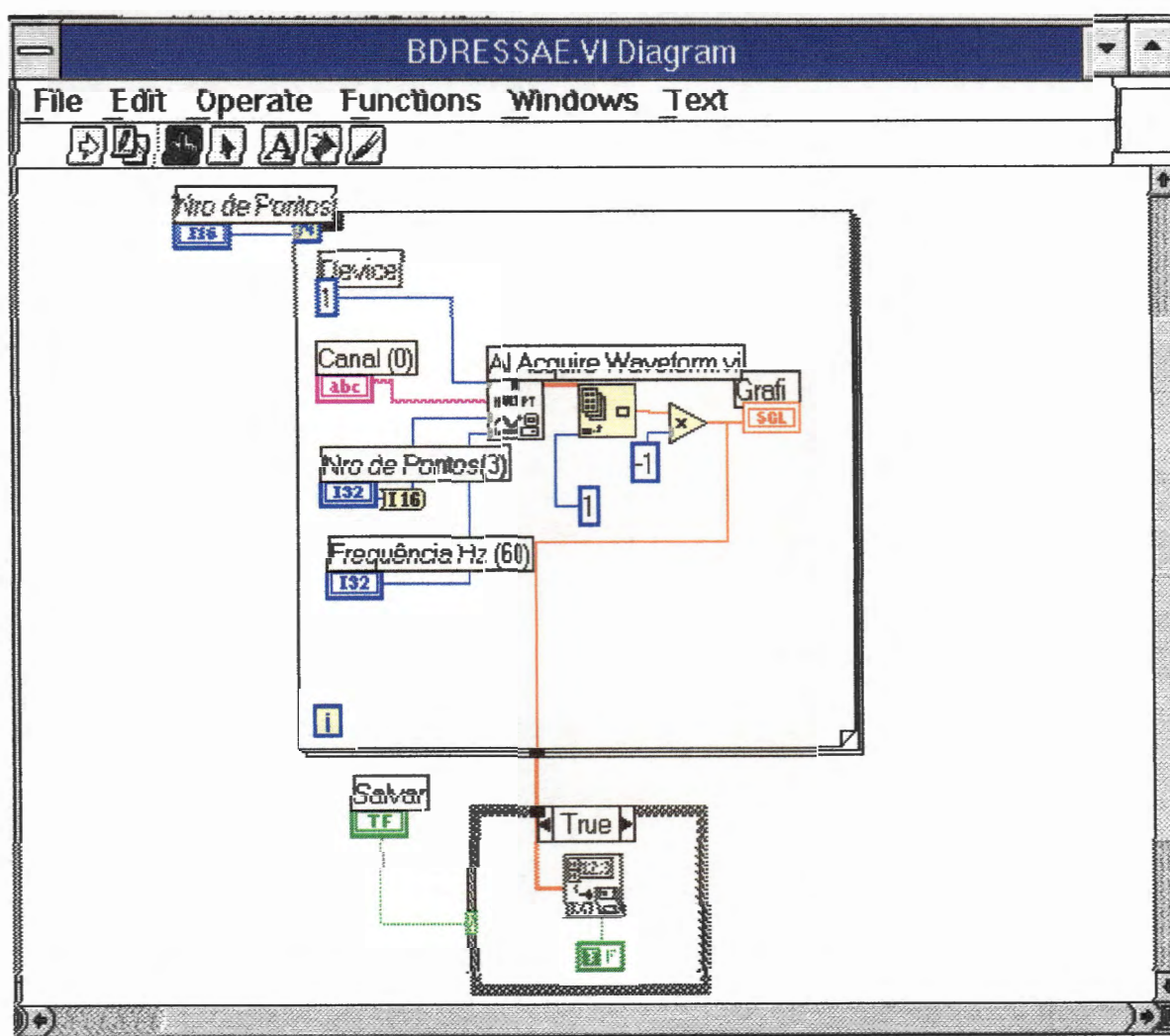


Figura II-1 Diagrama do programa em "Lab-View" para a aquisição da E.A. na dressagem.

A n e x o III - Programas CN utilizados

Programa 96 - Programa principal para a retificação das peças.

N10	M3 S200	liga o porta peça com 200 RPM
N20	G0 ZD12	posiciona o rebolo na posição Z de retificação
N30	XD13 I0.1 M8	aproxima o rebolo até 0.1 mm da peça e liga refrigeração
N40	G23 XD13 F5000	“gap-less” até o rebolo chegar na peça
N50	XD13 I-1. FD7	retifica 1.0 mm em mergulho com velocidade D7
N60	G0 I100. M5	afasta 100.0 mm da peça e desliga o porta-peça
N70	E99	chama o sub-programa para medição do rebolo
N80	E8	chama o ciclo de dressagem para a correção do rebolo
N90	M30	fim de programa

Programa 97 - Programa principal de dressagem para medição da E.A.

N10	M8	liga a refrigeração
N20	M33	aciona relê para a leitura via micro
N30	E98 P1= a_{d1} P2= S_{11}	chama o ciclo de dressagem com a_{d1} e S_{11}
N40	E98 P1= a_{d1} P2= S_{21}	chama o ciclo de dressagem com a_{d1} e S_{12}
N50	E98 P1= a_{d2} P2= S_{11}	chama o ciclo de dressagem com a_{d2} e S_{21}
N60	E98 P1= a_{d2} P2= S_{22}	chama o ciclo de dressagem com a_{d2} e S_{22}
N70	E98 P1= a_{d3} P2= S_{31}	chama o ciclo de dressagem com a_{d3} e S_{31}
N80	E98 P1= a_{d3} P2= S_{32}	chama o ciclo de dressagem com a_{d3} e S_{32}
N90	E98 P1= a_{d4} P2= S_{41}	chama o ciclo de dressagem com a_{d4} e S_{41}
N100	E98 P1= a_{d4} P2= S_{42}	chama o ciclo de dressagem com a_{d4} e S_{42}
N110	E98 P1= a_{d5} P2= S_{51}	chama o ciclo de dressagem com a_{d5} e S_{51}
N120	E98 P1= a_{d5} P2= S_{52}	chama o ciclo de dressagem com a_{d5} e S_{52}
N130	E98 P1= a_{d6} P2= S_{61}	chama o ciclo de dressagem com a_{d6} e S_{61}
N140	E98 P1= a_{d6} P2= S_{62}	chama o ciclo de dressagem com a_{d6} e S_{62}
N150	M34	desliga o relê
N160	M9	desliga refrigeração
N170	M30	fim de programa

Programa 98 - ciclo de dressagem para medição de E.A.

N10	G0 XD44 I50.	afasta o rebolo a 50. mm da posição X de dressagem
N20	ZD45 K5.	posiciona o rebolo a 5. mm da posição Z de dressagem
N30	XD44 I5.	posiciona o rebolo a 5. mm da posição X de dressagem
N40	G37 IP1	compensa o valor de a_d na dressagem do rebolo ($a_d = P1$)
N50	G1 XD44 IP1 F10000	posiciona o rebolo na posição de dressagem
N60	G4 H10	espera de 1s. para estabilizar a posição do rebolo

N70	G10 XD44	referencia a posição de dressagem
N80	G1 K-D49 FP2	dressa o rebolo com a velocidade de passagem P2
N90	G0 I50.	afasta o rebolo a 50.0 mm da posição X de dressagem

Programa 99 - Sub-programa para a medição da dressagem do rebolo

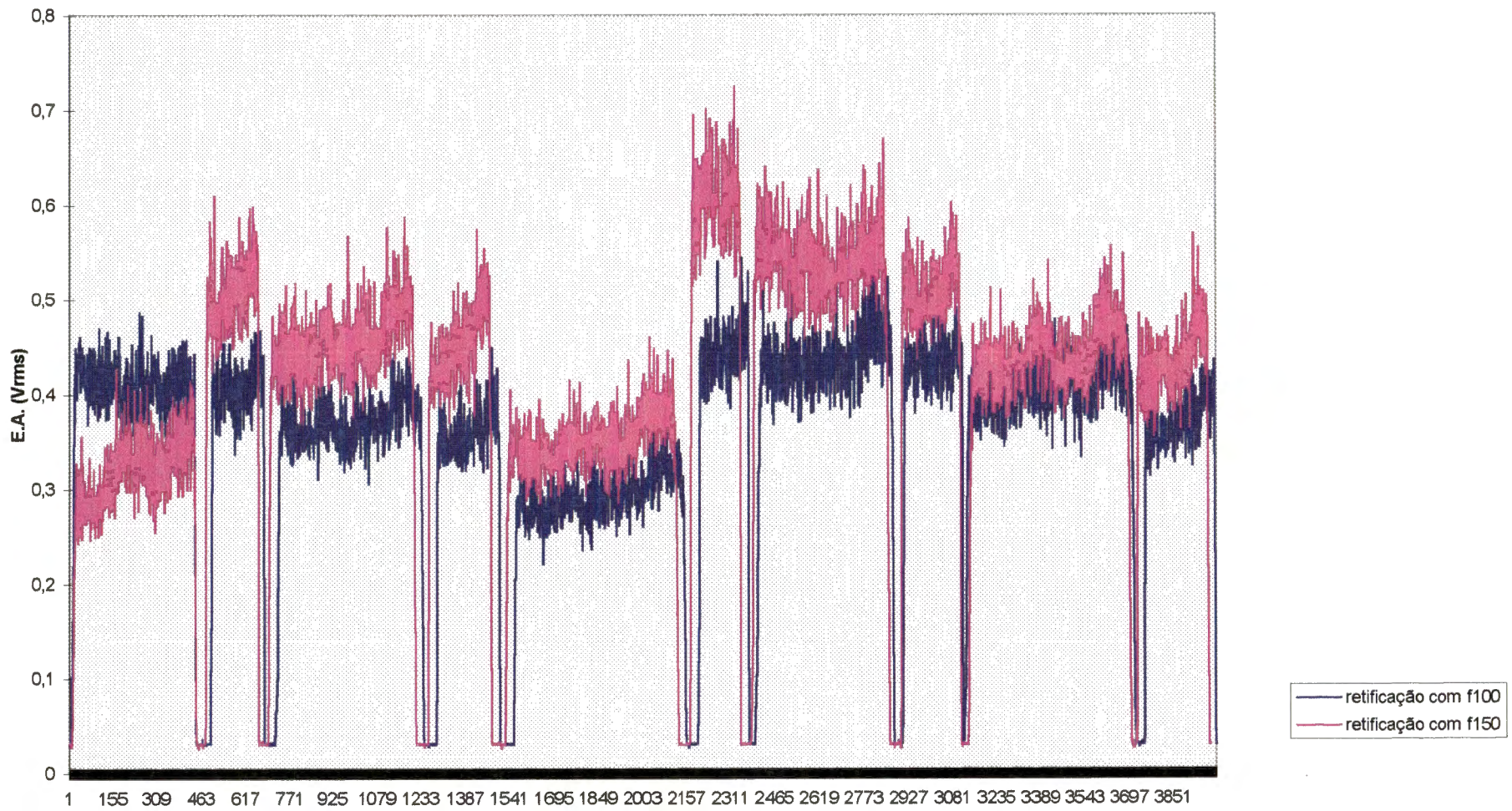
N10	G0 XD44 I50. M9	posiciona o rebolo a 50.0 mm da posição X de dressagem e desliga o refrigerante
N20	ZD45	posiciona o rebolo na posição Z de dressagem
N30	XD44 I0.1	aproxima o rebolo até 0.1 mm da posição X de dressagem
N40	P99=25	aciona o contador para 25 repetições
N50	G0 K-2.	movimenta o rebolo 2.0 mm em Z para a esquerda
N60	E100	chama o ciclo de "gap-less" no dressador
N70	G4 H50	espera 5s. para a leitura da posição X
N80	P99=P99-1 P99#o L50	diminui 1 do contador e retorna ao bloco 50 enquanto for diferente de zero
N90	G0 I10.	afasta o rebolo 10.0 mm em X após 25 medições

Programa 100 - Ciclo de "gap-less" no dressador

N10	G23 XD44 I0.05 F50	"gap-less" no dressador com velocidade de aproximação (0.5 mm/min) até a profundidade máxima de 0.5 mm além da posição X de dressagem
N20	G0 I0.1	afasta o rebolo 0.1 mm da posição em que ocorre o toque no dressador

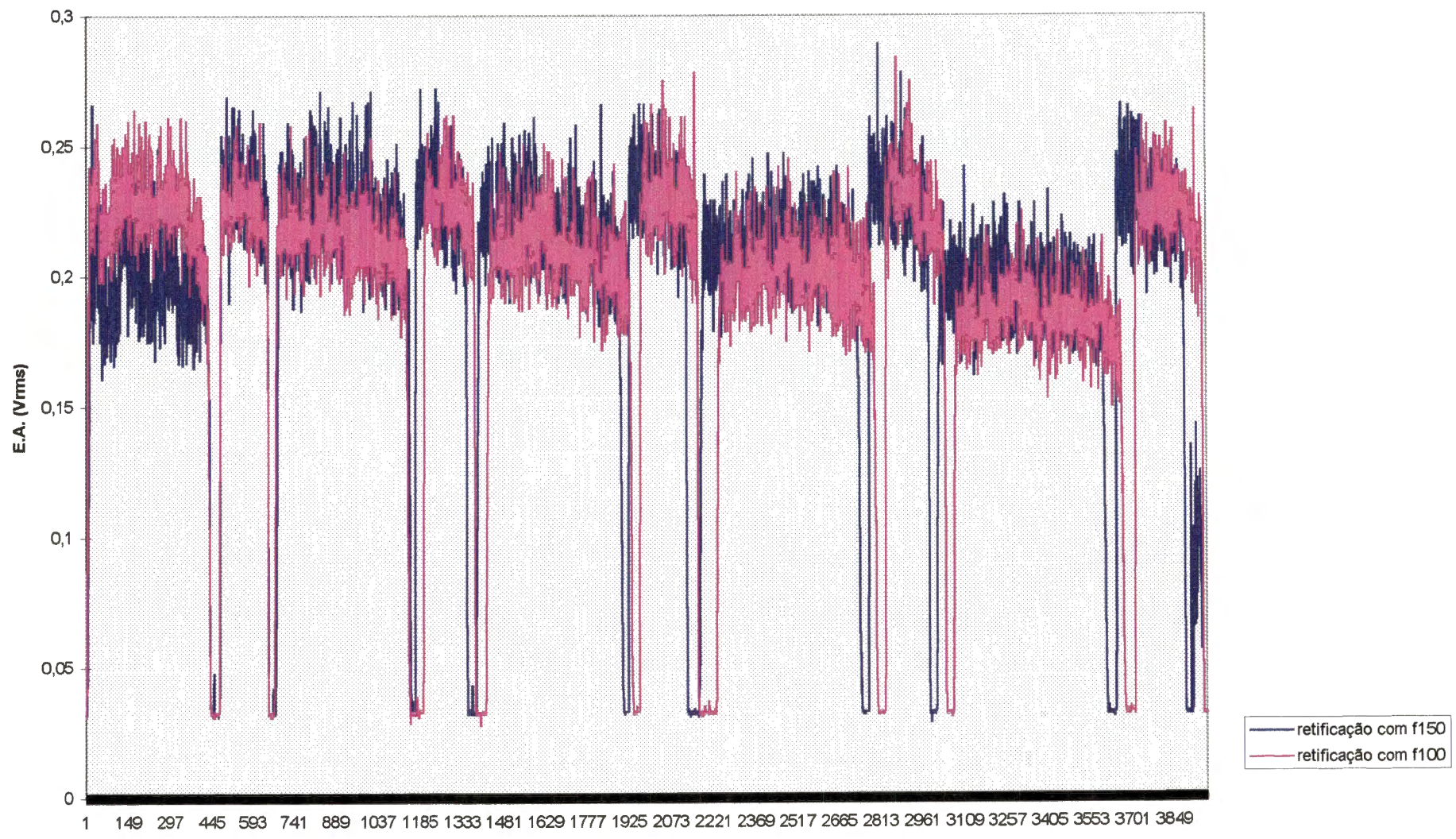
A n e x o I V - R e s u l t a d o s o b t i d o s d o s e n s a i o s e
n ã o e x p o s t o s n o c o r p o d o t r a b a l h o

E.A. na dressagem de rebolo dureza G, com velocidade 20 m/s



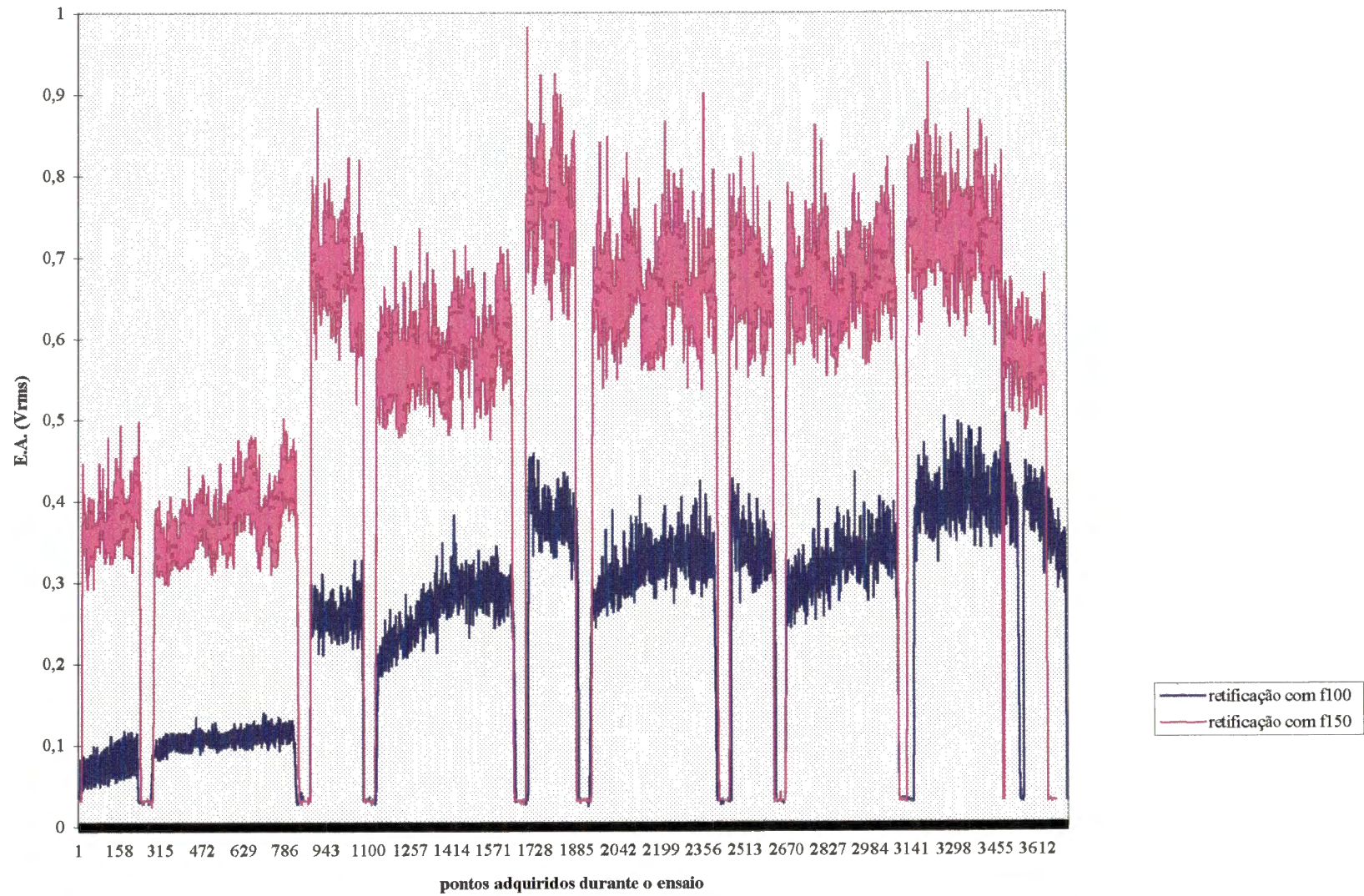
*

E.A. na dressagem de rebolo com dureza R, com $v_s = 20$ m/s

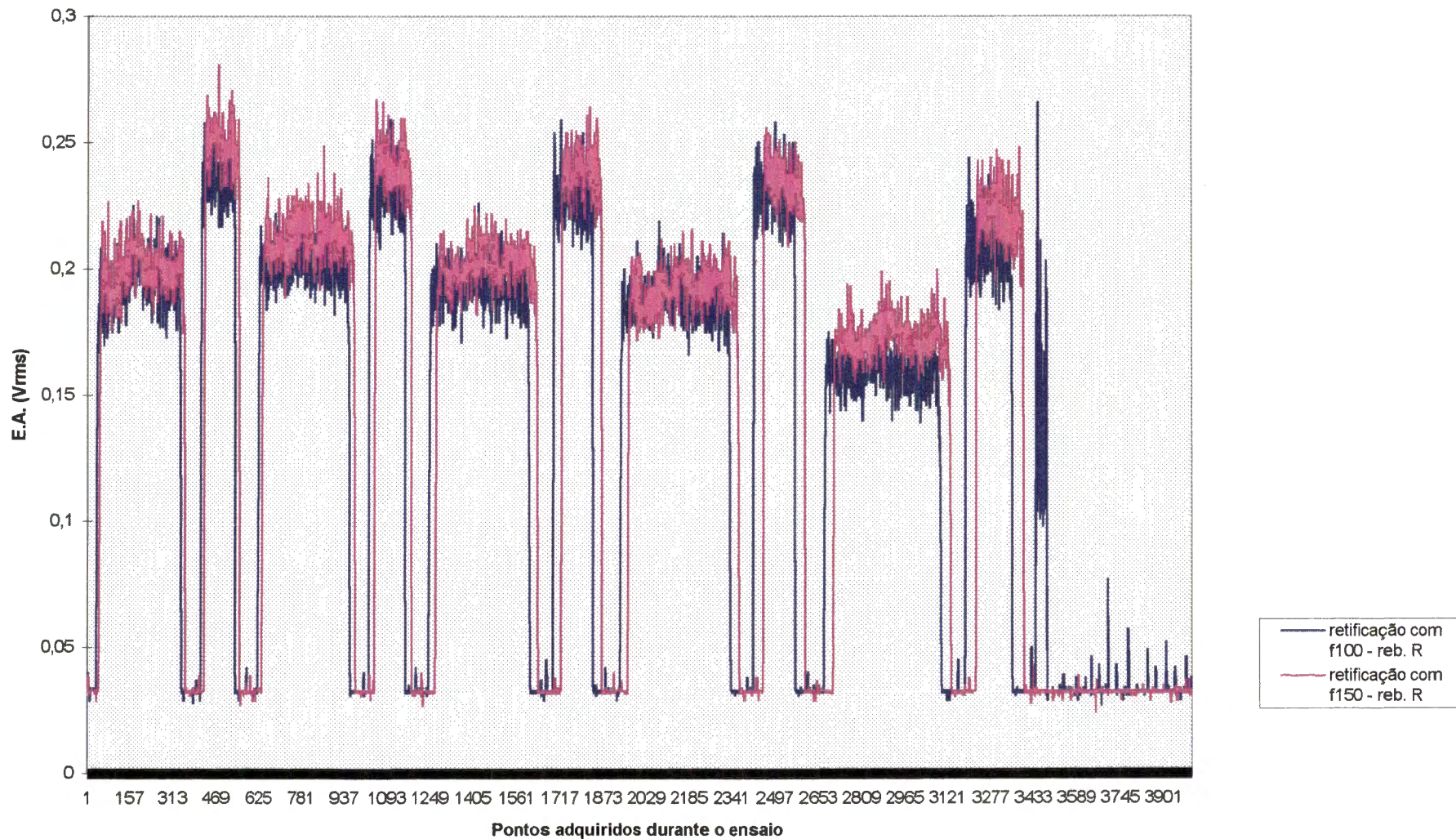


*

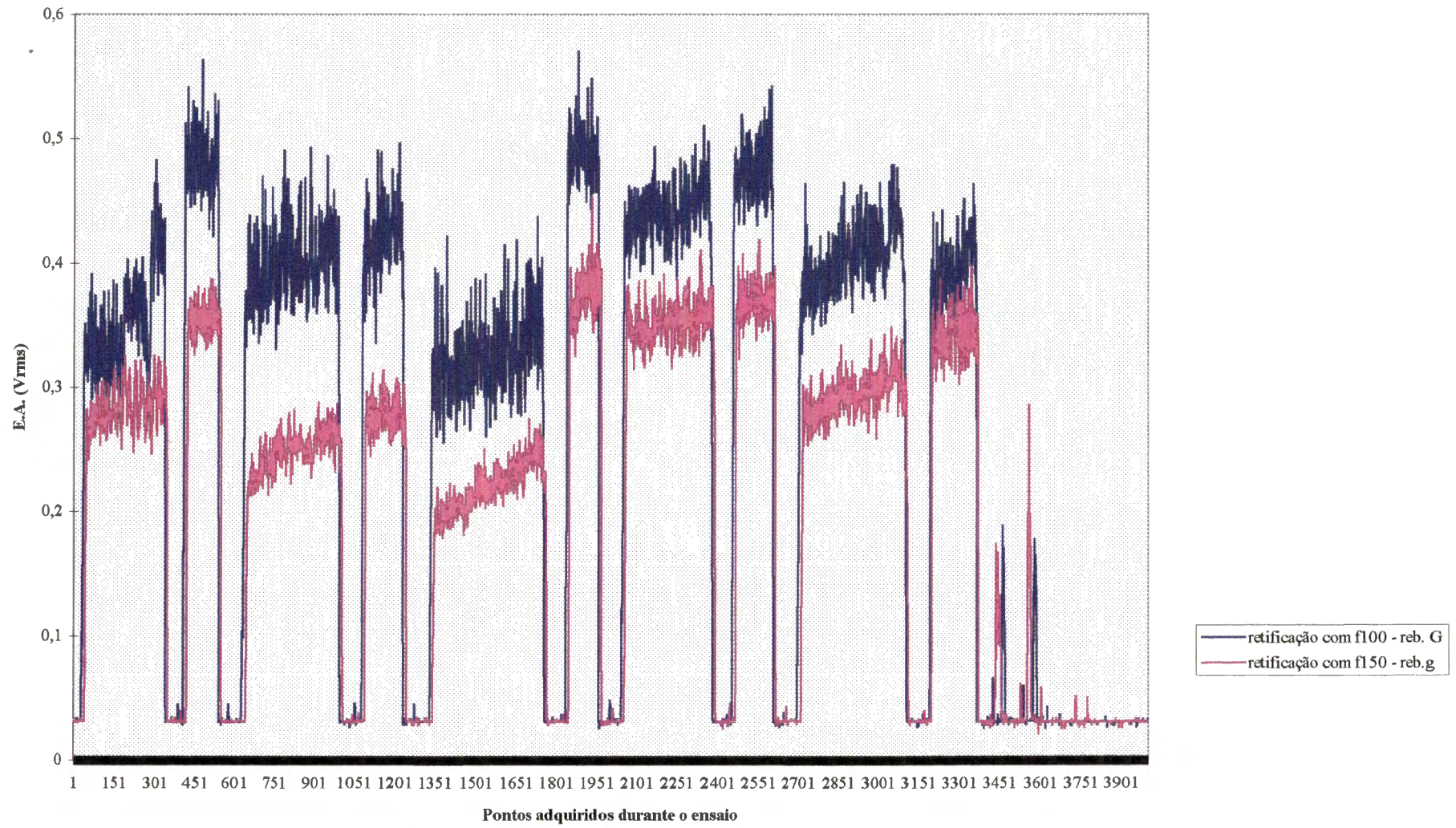
E.A. na dressagem de rebolo dureza K, com velocidade 20 m/s



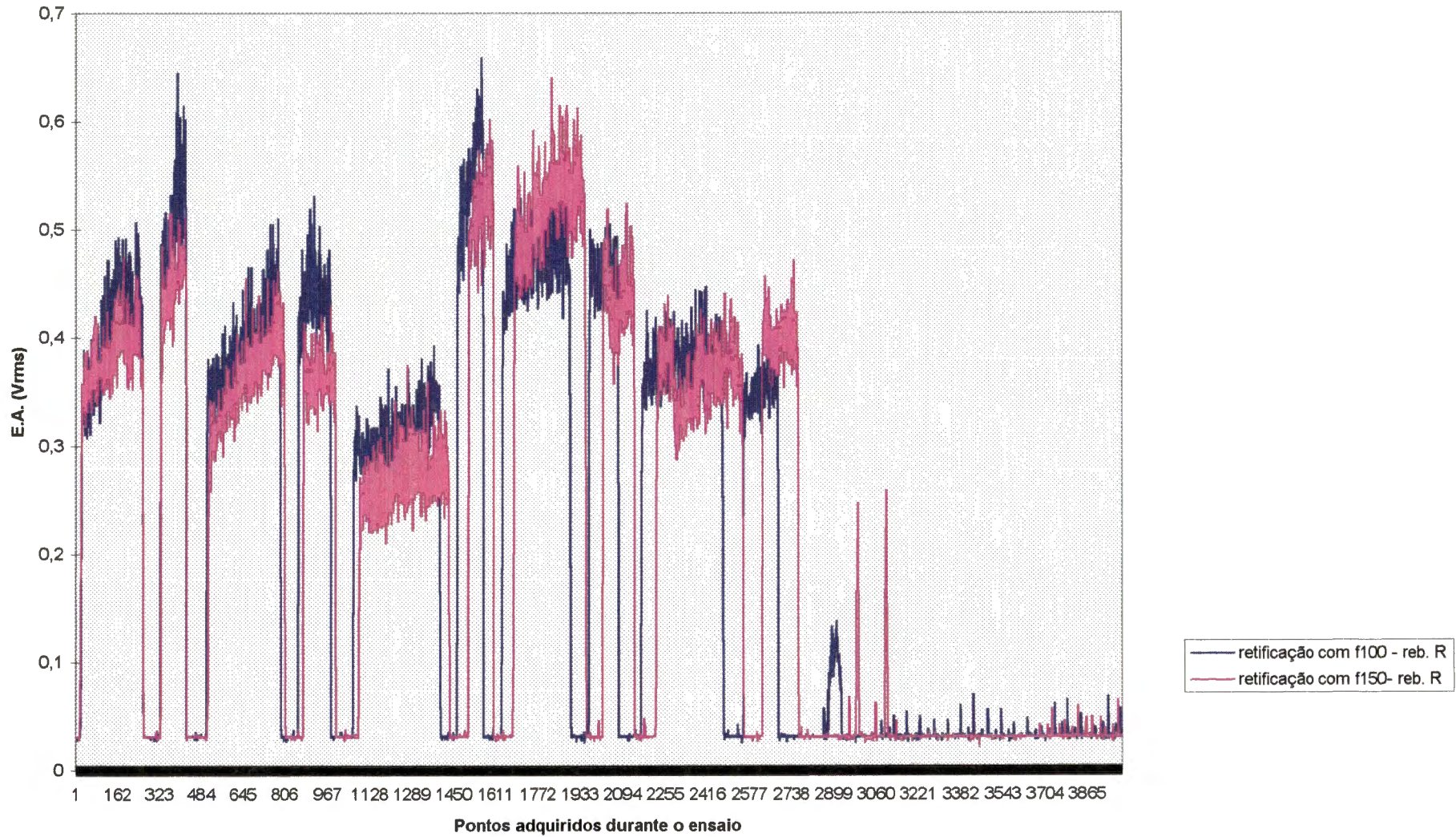
E.A. na dressagem de rebolo dureza R, com velocidade 28 m/s



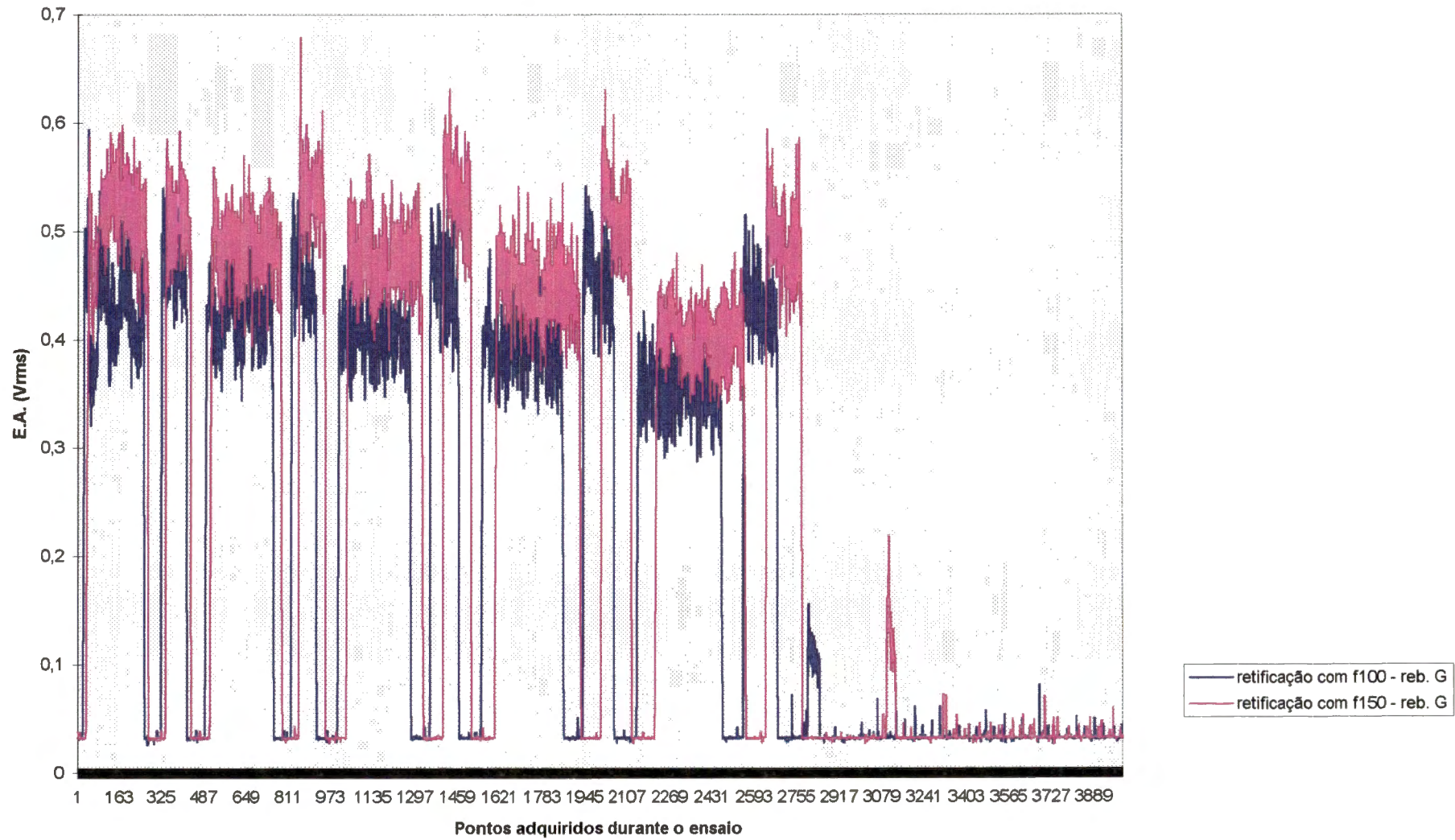
E.A. na dressagem de rebolo dureza G, com velocidade 28 m/s



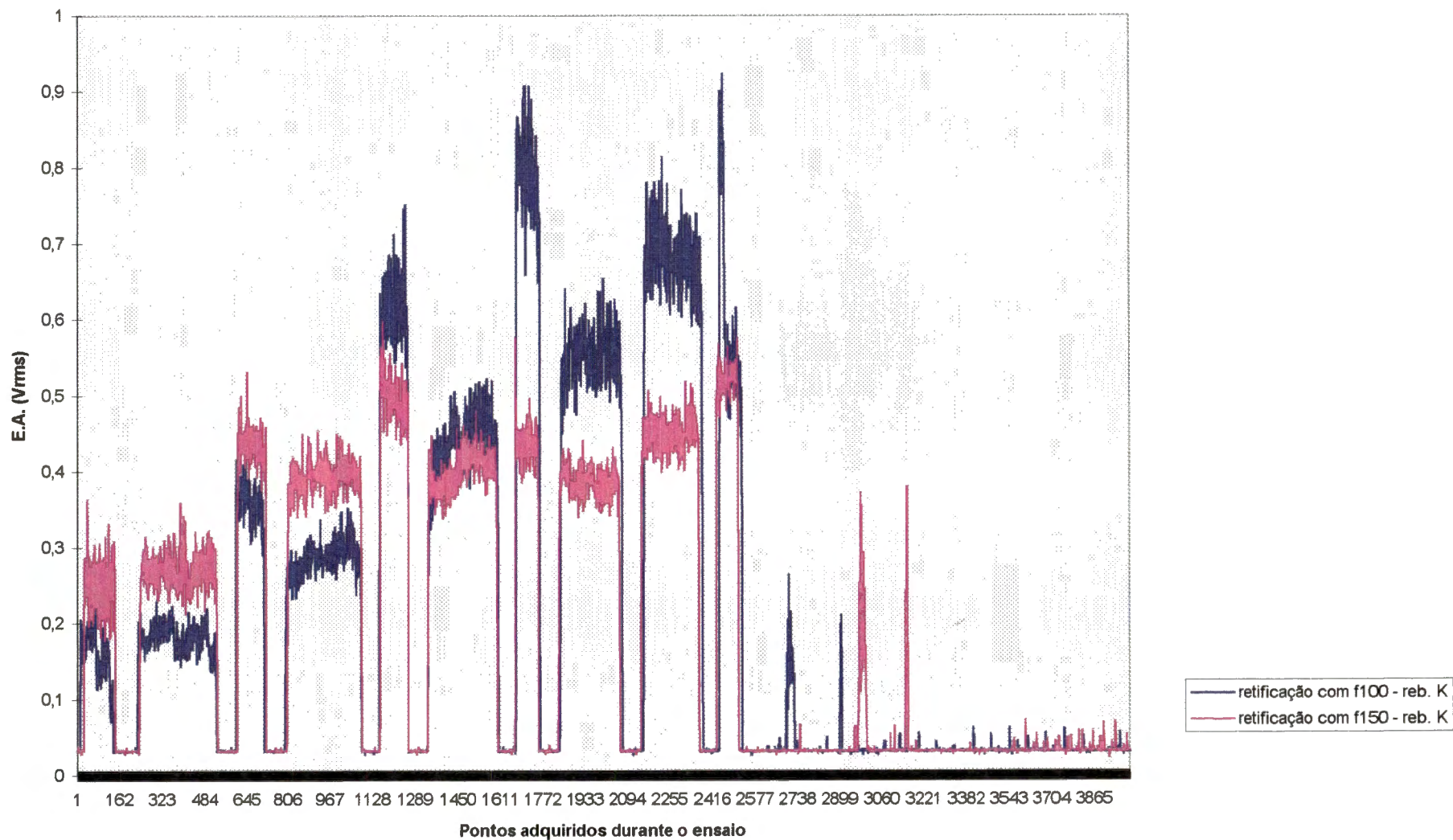
E.A. na dressagem de rebolo dureza R, velocidade 36 m/s



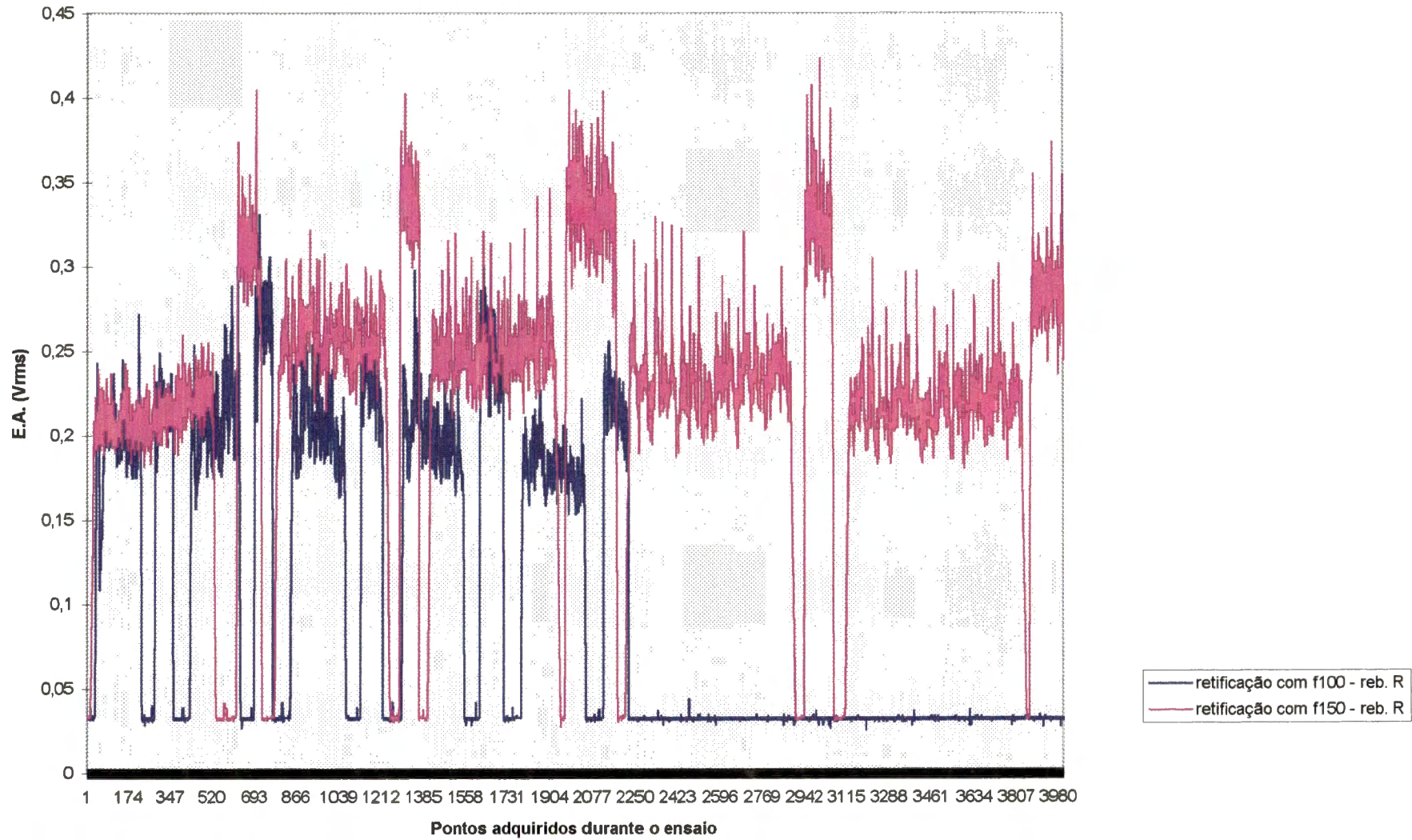
E.A. na dressagem de rebolo dureza G, velocidade 36 m/s



E.A. na dressagem de rebolo dureza K, velocidade 36 m/s



E.A. na dressagem de rebolo dureza R, velocidade 45 m/s



E.A. na dressagem de rebolo dureza K, com velocidade 45 m/s

