USP

Campus de São Carlos

DIAGNÓSTICO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CENTER-LESS ATRAVÉS DE EMISSÃO ACÚSTICA

JALON DE MORAIS VIEIRA

Orientador: Prof. Dr. João Fernando Gomes de Oliveira

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço 04/01/05

Ass.:

Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de São Carlos

Núcleo de Manufatura Avançada

Diagnóstico do processo de retificação center-less através de emissão acústica

Autor: Jalon de Morais Vieira

Orientador: Prof. Tit. João Fernando Gomes de Oliveira

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de DOUTOR EM ENGENHARIA

ÁREA: ENGENHARIA MECÂNICA

DEDALUS - Acervo - EESC

31100050104

EESC - USP Biblioteca CAMPUS DE S. CARLOS

São Carlos

2002

Class. TESE EESC
Cutt. 6241
Tombo T005/05
Sysno 1422563

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

V658d

Vieira, Jalon de Morais
Diagnóstico do processo de retificação center-less através de emissão acústica / Jalon de Morais Vieira. -- São Carlos, 2002.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2002.
Área: Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Tit. João Fernando Gomes de Oliveira.

1. Retificação center-less. 2. Emissão acústica. 3. Monitoramento. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **JALON DE MORAIS VIEIRA**

Tese defendida e julgada em 19-12-2002 perante a Comissão Julgadora:

APROVADO

Prof. Tit. **JOÃO FERNANDO GOMES DE OLIVEIRA (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Assoc. **REGINALDO TEIXEIRA COELHO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **ALEXANDRE MENDES ABRÃO**
(Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG)

APROVADO

Prof. Dr. **ALISSON ROCHA MACHADO**
(Universidade Federal de Uberlândia/UFU)

Aprovado

Prof. Dr. **JUAREZ FELIPE JÚNIOR**
(Universidade Paulista/UNIP)

Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica

Profa. Assoc. **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Ao meu Pai, Vieira

À minha Mãe, Geni

À minha Irmã, Gisele

Aos meus Avós.

À minha Esposa, Jaqueline

À minha Filha, Jade

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me dado a força necessária para concluir este trabalho.

Ao Professor João Fernando Gomes de Oliveira, pelo estímulo, incentivo, oportunidade e pelo seu profissionalismo para condução e orientação desta tese.

Ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão da bolsa de doutorado.

À minha esposa Jaqueline, pela compreensão, companheirismo, amor e força dedicados nestes anos de trabalho.

À minha filha Jade, que com seu sorriso modificou minha vida.

À minha sogra, Terezinha Pacheco pelo auxílio nos momentos de aperto com a Jade.

Aos grandes companheiros, Alexandre, Aldo, Carlão, Giuliano, Gustavo, André, Douglas, Daniel, Leonardo, Fábio, Ronaldo, Dinho, Tadeu, Roger, João Jorge, Paulinho, José Vicente, Nelson, Heraldo, Marcelo, Vinícius, Batata e Marconi pelos bons momentos.

À Magnífica Reitora da Universidade Federal de Juiz de Fora, Professora Maria Margarida Martins Salomão pelo incentivo.

Ao Diretor do CTU/UFJF Professor Luciano de Carvalho pelas recomendações, oportunidade e liberação para realização deste trabalho.

Aos professores do CTU/UFJF, Etienne, Clarete, Paulo Rogério, Chico Raposo, Gerson, Márcio, Cuco, Eduardo, Wilson, Derli, Élson, Élisson, Romário, Edgar e Dário pelo estímulo e companheirismo durante a realização deste doutorado.

Aos alunos bolsistas do curso de mecânica Aluísio e Josy pela grande colaboração para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos de casa Auri, Ed e Pernambuco pelo prazeroso convívio, que tornaram os dias de São Carlos ainda mais agradáveis.

Aos companheiros da pós-graduação, Neilor, Whisner, Virgílio, Júlio, Luciana, Andréia, Zé Antônio, Zé Luiz, Cláudio, Vânia e Alex, pelos tempos da salinha, conversas e voleibol.

Às eficientes secretárias Dona Irene, Ana Paula e Beth.

Aos técnicos do LAMAFE, pelo auxílio constante durante a realização dos experimentos.

Aos demais professores do curso de pós-graduação pelos conhecimentos transmitidos, especialmente aos Professores Reginaldo Teixeira Coelho e Rosalvo Tiago Ruffino.

Aos professores Haroldo Béria Campos, Álisson Rocha Machado, José Roberto Tavares Branco e Alexandre Mendes Abrão, pelo auxílio nestes últimos anos.

À todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS ..... **II**
LISTA DE FIGURAS ..... **VII**
LISTA DE TABELAS ..... **XIV**
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS ..... **XV**
LISTA DE SÍMBOLOS ..... **XVI**
RESUMO ..... **XVII**
ABSTRACT ..... **XVIII**
1 INTRODUÇÃO **1**
1.1 Objetivos 3
2 PRINCÍPIOS SOBRE RETIFICAÇÃO CENTER-LESS **5**
2.1 Elementos básicos 5
2.1.1 Características do processo 5
2.1.2 Nomenclatura de elementos de retificadoras center-less 8
2.2 Principais métodos center-less 9
2.2.1 Retificação center-less com sapatas 9
2.2.2 Retificação center-less de passagem 12
2.2.3 Retificação center-less de mergulho 14
2.2.4 Outros tipos de retificação center-less 15
2.3 Considerações sobre a geração de circularidade 20
2.4 Principais problemas do processo center-less 25
2.5 Fatores que influenciam o processo center-less 30
2.5.1 Régua de retificação 30
2.5.2 Dressagem do rebolo de arraste 40
2.5.3 Dressagem do rebolo de corte 42
3 MONITORAMENTO DOS PROCESSOS DE RETIFICAÇÃO **46**
3.1 Principais problemas de retificação 46
3.2 Grandezas para monitoramento de eventos 50
3.2.1 Potência 51
3.2.2 Vibrações de baixa frequência 55
3.2.3 Forças de corte 56

3.2.4 Emissão acústica 58
3.3 Monitoramento por emissão acústica 61
3.3.1Geração da EA 61
3.3.2 Sensores de EA 62
3.3.3 Resposta em frequência 62
3.3.4 Monitoramento do ciclo de trabalho 64
3.3.5 Monitoramento da dressagem 71
3.3.6 Emissão acústica versus força de corte 78
3.3.7 Emissão acústica e sistemas multisensores 80
3.3.8 Emissão acústica versus vibrações 82
3.3.9 Crítica aos sistemas atuais de monitoramento 86
4 DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA DIAGNÓSTICO DE ANOMALIAS NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CENTER-LESS DE MERGULHO 88
4.1 Justificativa para desenvolvimento do sistema 88
4.2 Necessidade de diagnóstico 88
4.3 Sistema proposto 89
4.4 Concepção básica. 90
4.5 Programa do sistema de mapeamento 93
5 APLICAÇÃO DO SISTEMA DE MAPEAMENTO PARA DIAGNÓSTICO DE ANOMALIAS NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CENTER-LESS DE MERGULHO 97
5.1 Experimentos iniciais 97
5.2 Experimentos para desenvolvimento de uma metodologia para avaliação de problemas de set-up 99
5.3 Procedimento experimental 105
5.3.1 Dressagem eficiente 106
5.3.2 Peça boa 107
5.3.3 Rebolo de corte desbalanceado 108
5.3.4 Altura inadequada entre o centro da peça e o centro dos rebolos ..... **Erro! Indicador não definido.**8
5.3.5 Vibrações no processo center-less 110

5.3.6 Retificação com rotação excessiva do rebolo de arraste 112
5.3.7 Retificação com pouca quantidade e ausência de fluido de corte 112
5.4 Resultados e análise 113
5.4.1 Velocidades diferentes de dressagem 113
5.4.2 Correção de falhas na superfície do rebolo 116
5.4.3 Rebolo de arraste excêntrico 118
5.4.4 Retificação adequada de haste de válvula. 123
5.4.5 Retificação com rebolo de corte desbalanceado 124
5.4.6 Retificação com altura inadequada da régua de apoio. 125
5.4.7 Vibrações durante retificação. 128
5.4.8 Rotação elevada do rebolo de arraste 131
5.4.9 Retificação com pouca quantidade e ausência de fluido de corte 133
5.5 Análise conclusiva 135
6 CONCLUSÕES 137
Sugestões para trabalhos futuros 138
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 139

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Figura esquemática do processo de retificação center-less (HASHIMOTO, 1999). 5
FIGURA 2.2 - Representação esquemática da retificadora center-less microma E1 8
FIGURA 2.3 - Representação do processo de retificação center-less com sapatas (WEBSTER, 1999). 9
FIGURA 2.4 - Figura esquemática de diversos projetos de sapatas utilizados (WEBSTER, 1999). 12
FIGURA 2.5 - Representação do processo de retificação center-less de passagem (MARINELLI FILHO, 1995). 13
FIGURA 2.6 - Representação esquemática do processo de retificação center-less de merguho (MARINELLI FILHO, 1995). 14
FIGURA 2.7 - Representação do processo de retificação center-less endfeed (MARINELLI FILHO 1995). 15
FIGURA 2.8 - Representação do processo de retificação center-less de passagem de barras (MARINELLI FILHO, 1995). 16
FIGURA 2.9 - Representação do processo de retificação center-less de peças com diâmetros escalonados (MARINELLI FILHO, 1995). 17
FIGURA 2.10 - Figura esquemática do processo de retificação center-less de peças que apresentam seções cruzadas (MARINELLI FILHO, 1995). 18
FIGURA 2.11 - Desenho esquemático do processo de retificação center-less de múltiplas peças (MARINELLI FILHO, 1995). 19
FIGURA 2.12 - Desenho esquemático do processo de retificação center-less de rolos cilíndricos convexos (MARINELLI FILHO, 1995). 19
FIGURA 2.13 - Geometria do processo de retificação center-less (KING & HAHN, 1986). 20
FIGURA 2.14 - Configuração formada pela peça e rebolos, estabelecendo um polígono externo e um polígono interno em retificação center-less (KING & HAHN, 1986). 21

FIGURA 2.15 - Representação esquemática do contato entre polígonos (KING & HAHN, 1986). 21
FIGURA 2.16 - Desenho esquemático de um policentróide, representando um diâmetro constante ao redor da circunferência (KING & HAHN, 1986). 22
FIGURA 2.17 - Deslocamento do centro da peça em relação aos centros dos rebolos de corte e de arraste (KING & HAHN,1986).....23
FIGURA 2.18 - Uso de ângulo γ positivo e ângulo de régua positivo em retificação center-less (KING & HAHN, 1986). 24
FIGURA 2.19 - Figura esquemática das razões β simples e composta (KING & HAHN, 1986). 29
FIGURA 2.20 - Régua de apoio da peça usada durante processo center-less.....30
FIGURA 2.21 - Resultados de circularidade obtidos por DALL (1946)...31
FIGURA 2.22 - Distribuição de forças durante retificação acima e abaixo dos centros dos rebolos (OLIVEIRA, 1994). 32
FIGURA 2.23 - Metodologia gráfica desenvolvida por REEKA (1967) para obtenção de condições ótimas de trabalho.....34
FIGURA 2.24 - Efeito dos parâmetros do processo no perfil de circularidade da peça (REEKA, 1967).....35
FIGURA 2.25 - Desenho esquemático evidenciando os ângulos γs e γr (KONIG, 1980). 35
FIGURA 2.26 - Gráfico de estabilidade geométrica (KONIG, 1980).....36
FIGURA 2.27 - Número de ondas para o gráfico de estabilidade geométrica (KONIG, 1980).....36
FIGURA 2.28 - Relações geométricas do processo center-less.....38
FIGURA 2.29 - Relação entre a inclinação do rebolo de arraste e inclinação do dressador do rebolo de arraste. 41
FIGURA 2.30 - Deslocamento do carro do dressador do rebolo de arraste em relação ao centro de rotação do mesmo.....41
FIGURA 2.31 - Fenômenos de reendurecimento e tempêra para aço.....44

FIGURA 3.1 - Relação dos principais problemas enfrentados na retificação (OLIVEIRA, 1995).....46
FIGURA 3.2 - Dispersão dimensional das peças, resultante de dois ciclos de retificação (GOMES, 1997).....47
FIGURA 3.3 - Diagrama esquemático de um ciclo de retificação com detecção de contato rebolo/peça, FELIPE JÚNIOR (1996).....48
FIGURA 3.4 - Situação da automação da retificação (OLIVEIRA & DORNFELD, 2001).....51
FIGURA 3.5 - Modelo de retificação center-less, de um cilindro de parede fina (ALLANSON et al.1989).....52
FIGURA 3.6 - Potência de retificação durante sparkout (ALLANSON et al 1989).....53
FIGURA 3.7 - Mudança na curva de potência de retificação (WAKUDA & INASAKI, 1991).....54
FIGURA 3.8 - Mudança na curva de potência quando ocorre uma queima (INASAKI, 1991).....54
FIGURA 3.9 - Gráfico de deflexão do eixo árvore (VISHNUPAD, SHIH & SHIN, 1995).....57
FIGURA 3.10 - (a) Padrão de retificação ideal da peça e (b) Retificação apresentando anomalia no sparkout, (KIM et al, 2001).....59
FIGURA 3.11 - (a) Condição ideal de retificação da peça e (b) Representação de setup inadequado de trabalho (KIM et al, 2001).....59
FIGURA 3.12 - Aplicação do processo de filtragem RMS sobre o sinal bruto de EA.....60
FIGURA 3.13. Principais fontes de emissão acústica na retificação de metais.....61
FIGURA 3.14 - Resposta em frequência de sensores de EA (DONG & WEBSTER, 1996).....63
FIGURA 3.15 - Sinais brutos de EA gerados pelas duas máquinas.....63
FIGURA 3.16 - Limites estáticos para monitoramento (KLUFT, 1984)...64
FIGURA 3.17 - Aplicação de monitoramento para otimizar o ciclo de retificação.....65

FIGURA 3.18 - Princípio de detecção de corte em vazio (KLUFT, 1984). 66
FIGURA 3.20 - RMS da EA versus número de passes (DORNFELD & CAI, 1984). 67
FIGURA 3.21 - Variação da emissão acústica com a distância Hr (DORNFELD & CAI, 1984). 68
FIGURA 3.22 - Sinal de EA na retificação (KONIG & MEYEN, 1990).. 69
FIGURA 3.23 - Histograma de amplitudes (KONIG & MEYEN, 1990).. 70
FIGURA 3.24 - Rugosidade superficial medida (a), estimada (b) (GRABEC & KULJANIC, 1994). 71
FIGURA 3.25 - Otimização de operação de dressagem (KLUFT, 1984).. 72
FIGURA 3.26 - Detecção de defeitos durante a dressagem (KLUFT, 1984). 72
FIGURA 3.27 - Sistema de monitoramento utilizando EA (WESTKAMPER, 1993). 73
FIGURA 3.28 - Sinais de dressagem para os rebolos reto e perfilado, (KONIG & KLUMPEN, 1993a). 74
FIGURA 3.29 - Dressagem de rebolo que apresenta perfil irregular e respectivos sinais de EA. 75
FIGURA 3.30 - Dressagem do rebolo perfilado, (KONIG & MEYEN, 1990). 76
FIGURA 3.31 - EA no avivamento de CBN (KONIG & KLUMPEN, 1993b). 77
FIGURA 3.32 - Dressagem versus EA versus rugosidade, (INASAKI, 1985). 78
FIGURA 3.33 - Comparação entre forças de corte e sinal de EA, (WESTKAMPER, 1993). 79
FIGURA 3.34 - EA $(RMS)^2$ versus F_H (DORNFELD & CAI, 1984)..... 79
FIGURA 3.35 - Sensores disponíveis para usinagem, (BYRNE et al. 1995). 81
FIGURA 3.36 - Limites estáticos e dinâmicos, (BYRNE et al. 1995)..... 82

FIGURA 3.37 - Valores de EA ao longo do processo, (BYRNE et al. 1995). 83
FIGURA 3.38 - Detecção de vibração auto excitada, (BYRNE et al. 1995). 84
FIGURA 3.39 - Comparação da rugosidade medida e prevista, (BYRNE et al. 1995)..... 84
FIGURA 3.40 - Espectro de frequência de EA, (BYRNE et al. 1995). 85
FIGURA 3.41 - Detecção de ranhuras na peça..... 85
FIGURA 4.1 - Esquema da concepção básica do sistema de mapeamento. 90
FIGURA 4.2 - Procedimento de construção do mapa do rebolo, no processo de retificação center-less. 92
FIGURA 4.3 - Procedimento de construção do mapa do rebolo, no processo de dressagem..... 92
FIGURA 4.4 - Mapa da superfície ativa do rebolo, obtida a partir do sinal de EA, detectado durante uma dressagem com profundidade de 1μm..... 93
FIGURA 4.5 - Painel do programa utilizado neste trabalho. 94
FIGURA 4.6 - Diagrama do programa usado neste trabalho..... 95
FIGURA 5.1 –Corpo de prova usado durante experimentos 100
FIGURA 5.2 - Retificadora center-less Microma modelo E1. 101
FIGURA 5.3 – Sistema de monitoramento Sensis BM-12. 101
FIGURA 5.4 – Sistema de monitoramento Sensis DM-42. 101
FIGURA 5.5 - Sensor de emissão acústica fixado no suporte da régua de trabalho..... 103
FIGURA 5.6 - Sensor de emissão fixado junto ao carro do dressador do rebolo de corte. 103
FIGURA 5.7 – Medidor de circularidade Talyrond 250. 104
FIGURA 5.8 - Rugosímetro portátil usado durante experimentos..... 105
FIGURA 5.9 – Figura ilustrando a fixação de um contrapeso na flange do rebolo de corte 109

FIGURA 5.10 – Ilustração presentando a introdução de calço metálico sob a régua de apoio, ocasionando condição inadequada de trabalho 109
FIGURA 5.11 – Alteração do posicionamento dos vetores força em função da modificação da altura entre centros (a)condição adequada de trabalho e (b) condição inadequada de trabalho ..... **Erro! Indicador não definido.**
FIGURA 5.12 – Anéis de borracha introduzidos no suporte da régua de apoio. 110
FIGURA 5.13 – Representação esquemática da região onde a régua de apoio foi fresada. 111
FIGURA 5.14 - Desenho esquemático mostrando movimento de dressagem nos sentidos de ida (vai) e volta (vem). 114
FIGURA 5.15 - Mapas representando variações no avanço e na profundidade de dressagem. 115
FIGURA 5.16 - 1^0 passe de dressagem, realizado para a correção da superfície do rebolo. 116
FIGURA 5.17 - 2^0 passe de dressagem, realizado para correção da superfície do rebolo. 117
FIGURA 5.18 - Último passe dressagem, realizado para correção da superfície do rebolo. 117
FIGURA 5.19 - Rebolo de arraste excêntrico (20rpm). 120
FIGURA 5.20 - Rebolo de arraste excêntrico (11rpm). 121
FIGURA 5.21 - Rebolo de arraste excêntrico (28 rpm). 121
FIGURA 5.22 - Rebolo de arraste excêntrico (35rpm). 122
FIGURA 5.23 - Regulagem ruim do rebolo de arraste (42rpm). 122
FIGURA 5.24 - Retificação padrão de válvula com boa circularidade... 124
FIGURA 5.25 - Mapa obtido durante retificação com o uso de calço de 3mm sob a régua de apoio.....1265
FIGURA 5.26 - Mapa obtido durante retificação com o uso de calço de 5mm sob a régua de apoio.....126
FIGURA 5.27 - Mapa obtido durante retificação com o uso de calço de 8mm sob a régua de apoio.....127

FIGURA 5.28 - Perda de contato da peça com a régua de apoio acarretando em ausência de sinal durante processo 127
FIGURA 5.29 – Representação do contato forçado entre régua de apoio e peça 128
FIGURA 5.30 - Vibração durante sparkout. 130
FIGURA 5.31 - Simulação de vibração com shaker. 130
FIGURA 5.32 – Mapa obtido durante retificação utilizando rotação elevada do rebolo de arraste. 132
FIGURA 5.33 – Ampliação do mapa da Figura 5.33 132
FIGURA 5.34 – Mapa representando retificação com pouca quantidade de refrigeração. 134
FIGURA 5.35 – Mapa representando retificação com ausência de fluido de corte. 135

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Principais fatores que influenciam o processo center-less. .26
TABELA 2 - Razão β. 29
TABELA 3 - Parâmetros utilizados em testes preliminares. 97
TABELA 4 - Resultado dos testes realizados. 98
TABELA 5 - Condições experimentais levantadas durante este trabalho. 106
TABELA 6 - Condições experimentais levantadas durante este trabalho. 106
TABELA 7 - Principais anomalias do processo center-less. 136

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EA - emissão acústica

RMS - raiz quadrática média

CNC - comando numérico computadorizado

Ra - rugosidade aritmética

VI - instrumento virtual, aplicativo em Labview

CAD - projeto auxiliado por computador

CAM - manufatura auxiliada por computador

CLP - controlador lógico programável

CIM - manufatura integrada por computador

LISTA DE SÍMBOLOS

β - razão β

γ - ângulo que determina a distância do centro da peça em relação aos centros dos rebolos de corte e arraste (graus)

$\gamma r = \gamma a$ - ângulo de contato da peça com o rebolo de arraste (graus)

$\gamma s = \gamma c$ - ângulo de contato da peça com o rebolo de corte (graus)

ϕ - ângulo de desvio do carro dressador (graus)

ϕa - diâmetro do rebolo de arraste (mm)

ϕc - diâmetro do rebolo de corte (mm)

ϕp - diâmetro da peça (mm)

nc - rotação do rebolo de corte (rpm)

Dp - diâmetro da peça (mm)

da - diâmetro do rebolo de arraste (mm)

na - rotação do rebolo de arraste (rpm)

n - número de lóbulos da peça

H = h - distância entre o centro da peça e o centro dos rebolos (mm)

Ud - grau de recobrimento de dressagem

Hr - distância entre a superfície do rebolo e a superfície da peça (mm)

Us - limite para janela de monitoramento

T - tempo de dressagem (segundos)

Np - rotações da peça por minuto (rpm)

Nra - rotações do rebolo de arraste por minuto (rpm)

Dra - diâmetro do rebolo de arraste (mm)

Nrc - rotações do rebolo de corte por minuto (rpm)

Ra - Rugosidade aritmética (μm)

Sd – Passo de dressagem (mm)

ad – Profundidade de dressagem (mm)

RESUMO

VIEIRA, J. M. (2002) Diagnóstico do processo de retificação center-less através de emissão acústica. São Carlos, 2002. 145p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Uma das dificuldades do processo de retificação center-less é o estabelecimento de padrões confiáveis que determine com pequena margem de erro problemas no processo. Este trabalho visa desenvolver um sistema de monitoramento capaz de identificar falhas ocorridas durante a dressagem e o processo de retificação center-less acima dos centros de hastes de válvulas. Para tanto, inicialmente, foi feito um estudo teórico e prático acerca do processo de retificação center-less com o objetivo de conhecer seus elementos básicos, características, principais problemas e fatores que influenciam o processo. Em função da grande aplicação da emissão acústica em operações de retificação, foi desenvolvida um nova metodologia, onde foi possível criar um mapa digital, baseado em informações acústicas detalhadas do processo, usando para isto uma constante de tempo muito pequena. Os resultados mostraram a potencialidade do sistema de mapeamento em detectar e diagnosticar problemas ocorridos durante processos de retificação e dressagem. Assim, pode-se atuar sobre o processo de tal forma a corrigir estas anomalias.

Palavras-chave: retificação center-less; emissão acústica; monitoramento

ABSTRACT

VIEIRA, J. M. (2002) Diagnosis of the center-less grinding process through acoustic emission. São Carlos, 2002. 145p. Thesis (Doctorate) - São Carlos School of Engineering, University of SãoPaulo.

One of the difficulties of the center-less grinding process is to establish reliable patterns to determine, with a small error, problems in the process. This work aims to develop an monitoring system able to identify flaws happening during the dressing and the center-less grinding process above the center of valves stems. Initially a theoretical and practical study was conduct on the center-less grinding process with the objective of discussing its basic elements, characteristics, main problems and factors that influence the process. Due to the great application of acoustic emission in grinding operations a new methodology was developed, where it was possible to create a digital map, based on detailed acoustic information on the process using for this a very short time constant. The results showed the potentiality of this mapping system to detect and to diagnose problems during grinding and dressing. Therefore, it is possible to correct anomalies when plunge center-less grinding process.

Keywords: center-less grinding; acoustic emission; monitoring

1 INTRODUÇÃO

A aceleração do desenvolvimento tecnológico dos modernos processos de produção industrial é um fenômeno que vêm se difundindo mundialmente, por meio dos processos de internacionalização e globalização da economia. Reflexos desse processo mundial já são observados de forma intensa no Brasil, obrigando as indústrias nacionais a adaptarem-se às novas exigências do mercado mundial.

O desenvolvimento tecnológico aliado à alta competitividade do mercado impulsiona o setor industrial na utilização intensiva de tecnologias ligadas à eletrônica e à informática.

Observa-se uma intensa e crescente utilização do computador, nas diversas fases de fabricação de produtos, desde o projeto (Projeto Assistido por Computador - CAD), até a manufatura (Manufatura Assistida por Computador - CAM). Igualmente, este é largamente aplicado, no controle de processos e na automação industrial (com utilização de sensores, atuadores e os processadores lógico programáveis - CLP), na utilização de máquinas automatizadas (Comando Numérico Computadorizado - CNC), nos braços mecânicos programáveis (robôs) e na integração do sistema de manufatura (Manufatura Integrada por Computador - CIM). Dessa forma, a automação industrial é um processo irreversível e caracterizador da modernidade da sociedade mundial, tornando-se ferramenta imprescindível na busca da qualidade, produtividade e competitividade.

Assim, estas grandes conquistas tem resultado em potentes soluções para controle do processo em tempo real e monitoramento de máquinas para sistemas de fabricação. Através da atual tendência de crescimento das indústrias de comunicação, tem se obtido soluções de alto desempenho a relativo baixo custo em quase tudo que se faz.

Em função da especificidade deste trabalho, verificam-se também grandes avanços alcançados nos processos abrasivos de fabricação, no que diz respeito à

melhoria de máquinas ferramentas, melhores produtos abrasivos e a disponibilidade de mais conhecimentos sobre o processo de retificação. Mas apesar dos avanços tecnológicos desta era, o processo de retificação ainda apresenta-se como um desafio na maioria das linhas de produção.

Um dos grandes problemas do processo de retificação center-less, é que as correções no processo (setup), na peça (erros dimensionais e inspeção visual) ou no rebolo (dressagem, dentre outros), dependem muito da habilidade e do desempenho individual de cada operador, por isso há dificuldade em se estabelecer um padrão de qualidade uniforme. A operação de regulagem de máquina, além de influenciar na qualidade da peça, implica no aumento dos custos direcionados ao consumo do rebolo, perda de tempo no processo de retificação e, consequentemente, diminuição da produção.

As variações na qualidade das peças produzidas entre duas operações de dressagem (vida do rebolo) e na produção, entre outros fatores, fez com que fossem desenvolvidos estudos para solucionar problemas relacionados com as operações de retificação center-less e dressagem. Mas a implantação de novas tecnologias encontram, freqüentemente, dificuldades relacionadas às interferências com outros sistemas de controle ou dispositivos presentes na retificadora; porém, se realizada, pode trazer benefícios interessantes ao processo.

Os sistemas de monitoramento podem auxiliar na obtenção de resultados mais próximos de um padrão uniforme de qualidade. Inicialmente os sistemas de monitoramento foram utilizados em operações com o uso de ferramentas de geometria definida mostrando-se úteis e práticos. Sua utilização no processo de retificação foi substancialmente dificultada devido à geometria aleatória das arestas cortantes dos grãos abrasivos.

Segundo OLIVEIRA (1995), o processo de retificação utiliza apenas 3% dos sistemas de monitoramento instalados no mundo, enquanto que nos processos que utilizam ferramentas com geometria definida, esta porcentagem é elevada para 45% no caso do processo de furação, 38% no processo de torneamento, 8% no processo de fresamento e 6% para outros processos. A baixa utilização do monitoramento na retificação é atribuída a fatores relacionados com o funcionamento destes sistemas durante o processo. De todos os sistemas de monitoramento instalados, 46%

funcionam integralmente, 25% foram eliminados por razões técnicas, 16% funcionam parcialmente e 13% foram substituídos por outros sistemas.

No processo de retificação center-less, por exemplo, pode-se verificar a necessidade de intervenção, para ajuste do mesmo, onde há regiões com falhas (desgaste acentuado) na superfície de corte do rebolo. Isto pode ser detectado quando o rebolo é dressado, pela intensidade do sinal de E.A. que é registrado em tempo real. A variação da intensidade deste sinal pode indicar as regiões que apresentam falhas durante a operação de dressagem. Desta forma, o operador poderá realizar dressagens sucessivas até o momento em que o sinal de E.A. seja uniforme.

Fator de grande importância para que tenhamos uma continuidade na utilização de modernas tecnologias em ambientes industriais produtivos diz respeito à disseminação de conhecimentos e experiências adquiridas ao longo de tantas pesquisas realizadas nos mais diferentes pontos deste país.

É certo que as atividades de pesquisa contribuem significativamente para alavancar o desenvolvimento tecnológico do país. Mais que isto, é preciso salientar a importância deste estudo no que diz respeito a possibilidade de multiplicar o conhecimento e despertar a curiosidade científica entre estudantes dos mais diferentes níveis de instrução, pois muitos de nós alunos de pós-graduação com certeza, um dia, teremos a possibilidade de ensinar.

1.1 Objetivos

Este trabalho visa criar um sistema de monitoramento que seja eficaz na identificação de anomalias ocorridas durante retificação center-less. Objetivando-se fornecer informações em tempo real, a partir de sinais advindos de sensores de emissão acústica acoplados à régua suporte da máquina e ao carro dressador, foram criadas diversas situações, onde através dos resultados obtidos e análise dos sinais dos sensores foi possível identificar irregularidades do processo.

Este método desenvolvido é de extrema importância, pois a retificação center-less torna-se mais previsível quanto à questão da qualidade final do produto, o que está intimamente ligada aos custos do processo.

Para atingir o objetivo, este trabalho foi estruturado da seguinte forma:

No capítulo 2 são apresentados os princípios básicos do processo de retificação center-less, compreendendo as características do processo, nomenclatura dos elementos da retificadora utilizada, principais métodos de retificação center-less, considerações sobre a geração de circularidade e principais problemas do processo. Neste capítulo também são abordados os fatores que influenciam o processo tais como a régua de retificação, dressagem dos rebolos de arraste e de corte.

No capítulo 3 são apresentados diversos estudos a respeito do monitoramento dos processos de retificação. Uma ênfase é dada à grandeza emissão acústica levando-se em consideração a geração de EA, sensores de EA, monitoramento do ciclo de trabalho, monitoramento da dressagem e é feita uma crítica aos sistemas atuais de monitoramento.

No capítulo 4 é descrita a proposta de desenvolvimento de um sistema de diagnóstico de anomalias no processo de retificação center-less. É apresentada uma justificativa para a criação do sistema e é feito também um comentário a respeito das dificuldades de diagnóstico do processo, da concepção básica do sistema, do programa computacional e da metodologia utilizada para análise das imagens geradas pelo sistema.

No capítulo 5 são apresentados os equipamentos utilizados, os experimentos iniciais e finais, bem como uma síntese, associando o comportamento das características das imagens do mapa acústico e os problemas do processo.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 PRINCÍPIOS SOBRE RETIFICAÇÃO CENTER-LESS

2.1 Elementos básicos

2.1.1 Características do processo

Os elementos primários de uma retificadora center-less são o rebolo de corte, o rebolo de arraste e a régua de apoio. Diferentemente do processo de retificação cilíndrica entre pontas, onde a peça é suportada por um sistema com centro definido, e é rotacionada a uma determinada velocidade enquanto é usinada pelo rebolo, no processo center-less, a peça não é mantida entre pontas e sim apoiada entre o rebolo de arraste e a régua de apoio, enquanto é retificada pelo rebolo de corte, conforme mostrado na Figura 2.1.

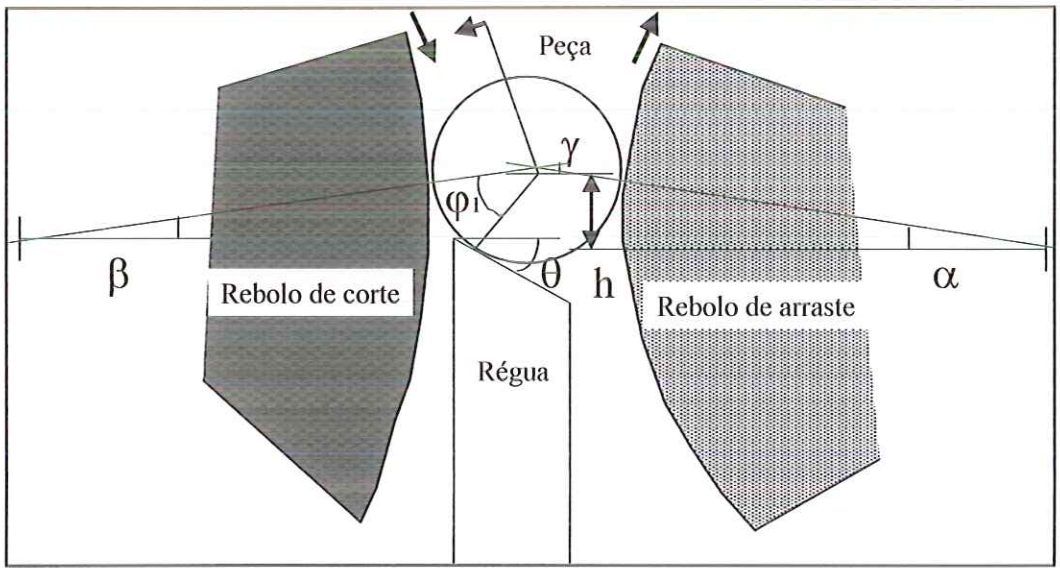


FIGURA 2.1 - Figura esquemática do processo de retificação center-less (HASHIMOTO, 1999).

No processo center-less, o centro da peça pode estar abaixo da linha de centro dos rebolos de corte e arraste, na mesma altura ou acima desta linha. Para um mero observador, não existe aparentemente uma maneira de controlar a circularidade da peça. As pressões de corte são desenvolvidas pela ação das forças de corte contra a régua suporte e também contra o rebolo de arraste. O rebolo de arraste, usualmente fabricado de uma liga de borracha abrasiva, é utilizado como elemento de atrito e frenagem da peça, que gira a uma velocidade superficial uniforme e constante.

Todas as retificadoras center-less empregam a chamada velocidade negativa de trabalho. Em outras palavras, a rotação da peça e a rotação do rebolo de corte ocorrem em sentidos contrários. O diâmetro retificado da peça é determinado pela distância entre as duas superfícies ativas dos rebolos de corte e rebolo de arraste, mas um diâmetro constante da peça não significa um cilindro perfeito.

O processo de retificação center-less de mergulho tem sido vastamente utilizado pelas indústrias do setor metal-mecânico. Devido a sua produtividade e possibilidade de obtenção de componentes com alta acuracidade, tem sempre mantido uma posição de destaque na manufatura. Alguns pontos relevantes do processo center-less podem ser considerados de acordo com dados de KING & HAHN (1986):

- Produtividade: indústrias requerem não somente que as peças sejam retificadas dentro de tolerâncias pré-estabelecidas, mas também que elas sejam retificadas em tais tolerâncias no menor tempo possível. O tempo necessário para fabricação de uma peça durante o processo center-less de retificação pode ser dividido entre, o tempo de carregamento da peça, o tempo de pré-posicionamento da máquina e o tempo necessário para remover o material da peça, apresentando o produto final, qualidades dimensionais e superficiais adequadas.

- Tempo de carregamento das peças: a retificadora center-less apresenta dificuldade no que diz respeito ao carregamento de peças para trabalho e a obtenção de um set-up adequado de trabalho. Antes do contato com o rebolo de corte, a peça repousa livremente sobre uma régua de apoio. Esta peça pode ser injetada ou ejetada

axialmente e pode ser carregada do topo da máquina ou através de outras formas possíveis.

- Tempo de pré-posicionamento: em função do carregamento das peças durante o processo center-less, torna-se possível uma mínima abertura entre rebolos e peça. Assim, o tempo de pré-posicionamento da máquina pode ser mantido em um mínimo.

- Tempo necessário para remoção de material: está relacionado à quantidade de material a ser removida e a taxa na qual a vida do rebolo e a qualidade da peça irão permitir. A quantidade de material a ser removida é uma função da profundidade das imperfeições na superfície da peça, na condição anterior a retificação. Estas imperfeições podem ser mecânicas, dimensionais ou químicas, ou uma combinação destas três.

- Imperfeições mecânicas: uma imperfeição mecânica pode ser uma marca causada pela ferramenta ou uma trinca nucleada por fatores diversos, que de alguma forma pode comprometer a resistência mecânica da peça, se esta não for completamente retificada.

- Imperfeições dimensionais: imperfeições dimensionais podem ser consideradas como sendo as imperfeições mais comumente encontradas. Elas são o resultado de limitações de operações anteriores, na obtenção de tolerâncias que são necessárias a peça. Elas são as ondulações encontradas em todo o comprimento, as ovalizações encontradas em diversos componentes, as excentricidades que podem existir entre quaisquer dois diâmetros em uma peça, e existem certamente muitas outras mais.

- Imperfeições químicas: uma das imperfeições químicas mais comuns é conhecida como camada descarbonizada, que existe em praticamente todas as peças que foram expostas a uma alta temperatura, em uma atmosfera rica em oxigênio, antes da retificação, como por exemplo em tratamentos térmicos, processo de laminação a quente, entre outros.

2.1.2 Nomenclatura de elementos de retificadoras center-less

A Figura 2.2 apresenta os principais elementos constituintes de uma retificadora center-less, com a configuração a ser utilizada no decorrer deste trabalho.

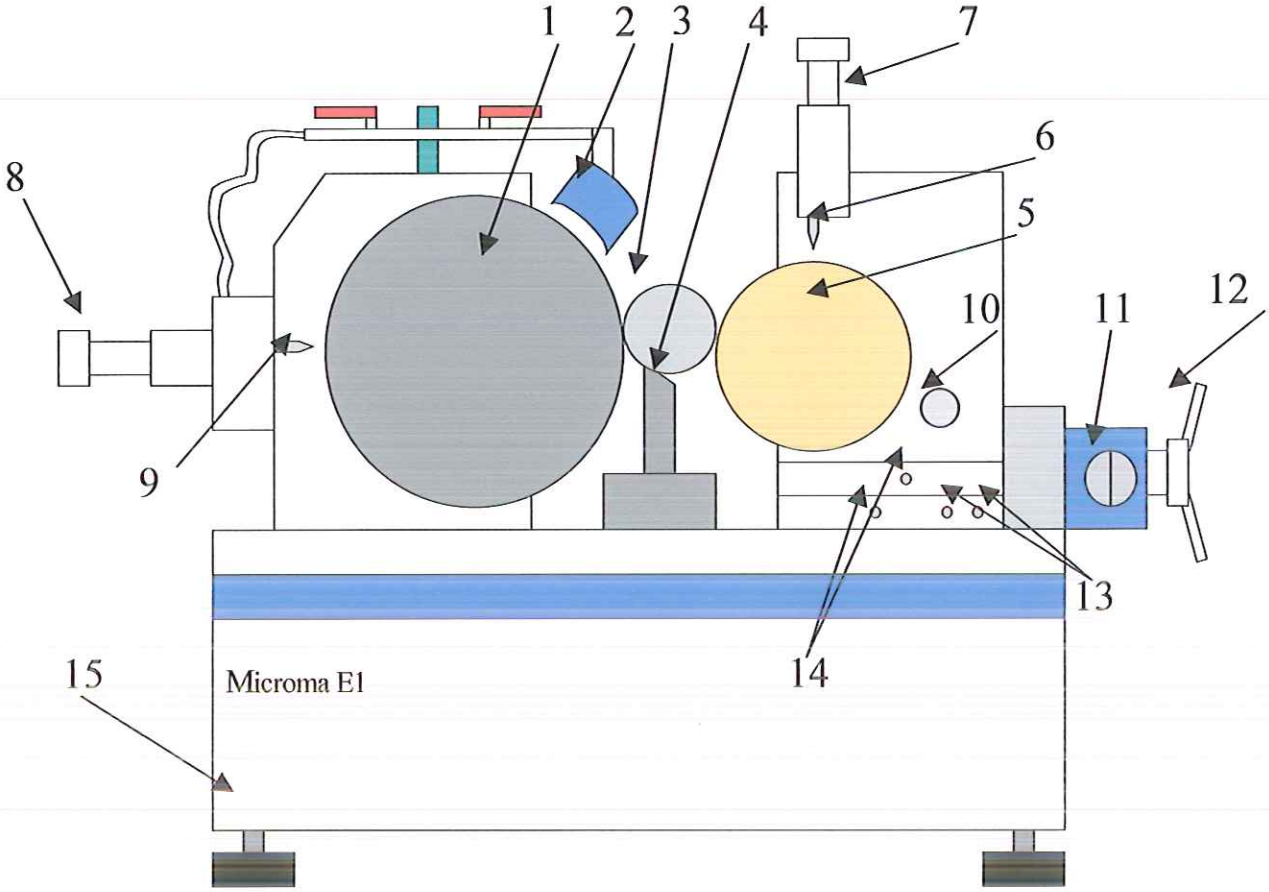


FIGURA 2.2 - Representação esquemática da retificadora center-less da marca Microma modelo E1.

Na Figura 2.2 os seguintes itens são apresentados:

1 – Rebolo de corte.

2 – Calha de refrigeração.

3 – Peça.

4 – Régua suporte.

5 – Rebolo de arraste.

6 – Dressador do rebolo de arraste.

7 – Avanço manual do dressador do rebolo de arraste.

8 – Avanço manual do dressador do rebolo de corte.

9 – Dressador do rebolo de corte.

10 – Avanço de corte manual para o ciclo de corte.

11 – Parafuso regulador da velocidade de avanço para o ciclo de trabalho.

12 – Volante posicionador do rebolo de arraste.

13 – Parafusos reguladores da conicidade da peça.

14 – Parafusos ajustadores de set-up.

15 – Parafusos de nivelamento da máquina.

2.2 Principais métodos center-less

2.2.1 Retificação center-less com sapatas

De acordo com WEBSTER (1999), a retificação center-less com sapatas é um processo que permite a usinagem de precisão de superfícies axissimétricas, particularmente onde a relação diâmetro/comprimento da peça é considerável. Existem diversos materiais retificados por este método. Dentre estes, os mais comuns são os metais e as cerâmicas.

A filosofia básica da retificação center-less com sapatas é relativamente simples. Cabeçotes contendo guias suportam a face da peça por várias maneiras e, desta forma fornecem um meio para rotação da peça. A Figura 2.3 apresenta este tipo de retificação.

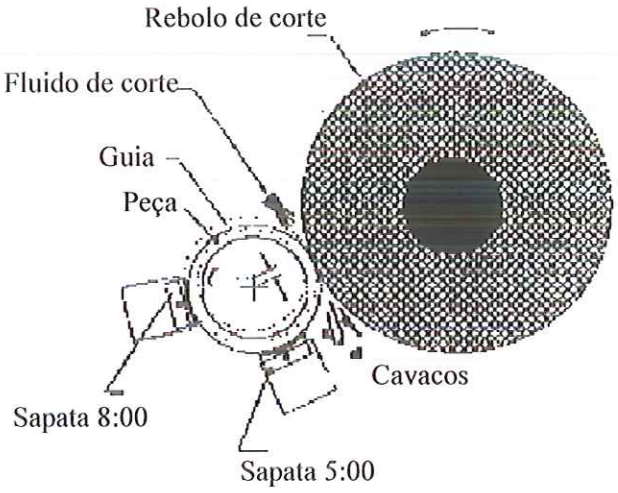


FIGURA 2.3 - Representação do processo de retificação center-less com sapatas (WEBSTER, 1999).

Neste processo, o movimento radial da peça é restringido por uma sapata ou, mais comumente, por um par de sapatas que estão fixadas na base da máquina de variadas maneiras. O centro de rotação da peça é propositadamente balanceado a fim de fornecer uma força resultante que irá assegurar a estabilidade física do sistema dinâmico antes, durante e depois da remoção de material.

WEBSTER (1999) evidenciou vários benefícios que garantem o uso da retificação center-less com sapatas, incluindo alta qualidade do produto, consistência, velocidade e flexibilidade do processo. Na indústria de precisão de eixos e rolamentos, por exemplo, a retificação de superfícies de peças funcionais como pistas, no qual os elementos rolantes se deslocam, necessitam frequentemente de elevados níveis de acuracidade e, através deste método consegue-se valores satisfatórios. Estes altos níveis de qualidade são resultados de vários atributos mecânicos e de processo, bem como o mecanismo único de obtenção de circularidade, da filosofia center-less com sapatas.

Para altos volumes de produção, a retificação center-less pode oferecer maiores taxas de fabricação que outros processos. A maioria das retificadoras center-less são fundamentalmente capazes de usinar uma grande variedade de formas e tipos e têm sido projetadas para remoções internas e externas. Ferramental e sistema de carga/descarga simplificados permitem, a este processo, ocupar um posto privilegiado na produção em massa de componentes de alta precisão.

Avarias térmicas foram consideradas por MALKIN (1989) como sendo as principais causas de danos na retificação. Substancial energia é gerada durante processo de retificação e grande parte dela é produzida na formação do cavaco, deformação, cisalhamento e deslizamento. Outras significantes fontes de energia são resultantes de fratura de grãos abrasivos, quebra de rebolos e atrito peça/sapata.

Para prevenir avarias que podem ser causadas por geração considerável de energia, o calor deve ser removido estrategicamente. Para que isto aconteça, cavacos aquecidos são removidos da peça, enquanto o fluido de corte fornece adicional transferência de calor por convecção. O restante da energia vai para a sapata e para peça. As temperaturas resultantes podem alcançar níveis que causam erros dimensionais ou danos irreversíveis ao material, na forma de queima da peça, ou das

sapatas. De acordo com GUPTA (1993), ao menos três modos de falhas distintas são encontrados quando da queima de peças.

- Queima de têmpera, que usualmente leva ao amolecimento e deterioração das propriedades de resistência ao desgaste.

- Queima de re-endurecimento, quando o refrigerante atinge a superfície aquecida produzindo martensita não revenida.

- Trincamento, devido ao alto gradiente térmico e mudanças de fases.

Estudos realizados por WEBSTER (1999), evidenciaram uma grande quantidade de parâmetros que frequentemente geram um impacto na qualidade final da peça. Seleção do rebolo, velocidade do rebolo, avanço, velocidade rotacional da peça, material, rigidez da máquina e aplicação de fluido de corte, são alguns fatores que necessitam consideração cuidadosa para se obter um produto de qualidade. Talvez a mais óbvia consideração, mas não menos crítica, seja o projeto e a localização angular da sapata.

A sapata apresenta três funções básicas:

- É uma referência para a peça;

- Deve resistir a deflexão contra as forças de retificação;

- Deve atuar como filtro de lóbulos na superfície da peça.

Materiais para sapatas variam de plásticos como o Delrin™, materiais endurecidos como carbetos, a materiais, tais como cerâmicas especiais e diamante policristalino (PCD). A seleção de materiais para sapatas deve considerar sua lubricidade, resistência ao desgaste, condutividade térmica, rigidez, vida efetiva e custo. Trabalhos utilizando sapatas com filme fluido também estão sendo testados, na qual a peça gira sobre uma camada hidrostática ou hidrodinâmica de filme.

Existem múltiplas possibilidades para a escolha da geometria da sapata, de acordo com WEBSTER (1999) e conforme pode-se verificar na Figura 2.4. Dentre as mais usadas temos as sapatas planas, sapatas em V e sapatas invólucro. A mais básica é a sapata plana que pode ter uma seção retangular ou circular.

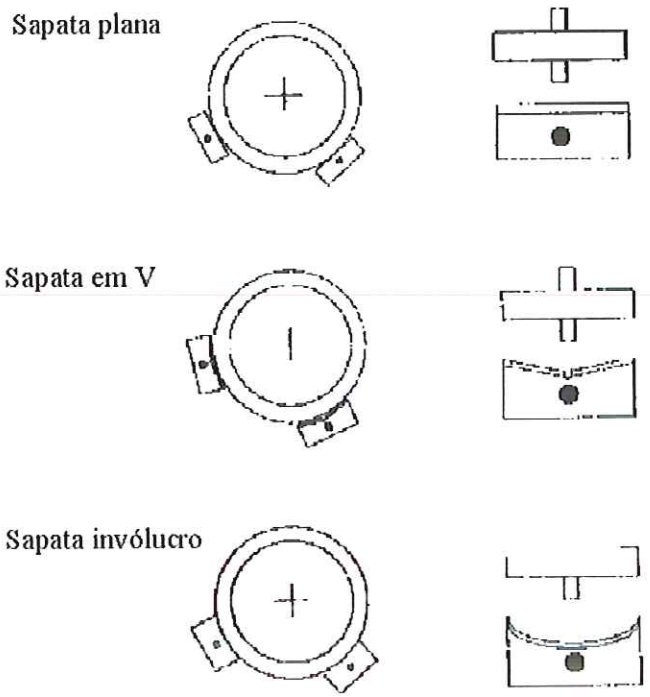


FIGURA 2.4 - Figura esquemática de diversos projetos de sapatas utilizados (WEBSTER, 1999).

As vantagens deste tipo plano incluem simplicidade e fácil fabricação, embora elas não tenham uma boa conformidade peça/sapata, tendo uma simples linha de contato e, desta forma, um desgaste acentuado. A forma em V permite dois pontos de contato com a peça, sendo hábil para trabalhos em vários diâmetros de peças. O tipo sapata invólucro é cuidadosamente fabricado para que se tenha um ajuste apertado de contato com o diâmetro da peça.

2.2.2 Retificação center-less de passagem

A retificação center-less de passagem, vista na Figura 2.5, apresenta grande vantagem, por ser contínua, uma característica pouco encontrada em métodos de usinagem dos metais. Este tipo de retificação também dá à peça, sem o auxílio de nenhum mecanismo externo, o seu movimento de rotação bem como uma velocidade de passagem que pode ser pré-definida, e que se mantém, durante o processo, sem flutuações significativas (KING & HAHN, 1986).

Outra vantagem é a utilização uniforme de toda a periferia do rebolo, o que é benéfico para a otimização da vida do mesmo, controle dimensional e eficiência de retificação. Isto também reduz as quantidades de dressagens do rebolo. A maior limitação da retificação center-less de passagem é que esta, em princípio, se adapta somente a peças cilíndricas, sem variações do diâmetro ao longo de seu eixo. As aplicações, para este tipo de retificação, são peças de superfície externa cilíndrica, tolerando algumas reduções de área, mas sem ressaltos externos. O comprimento destas peças pode exceder o dos rebolos, como no caso de barras; já peças de pequeno comprimento podem ser retificadas continuamente, resultando em grandes taxas de produtividade.

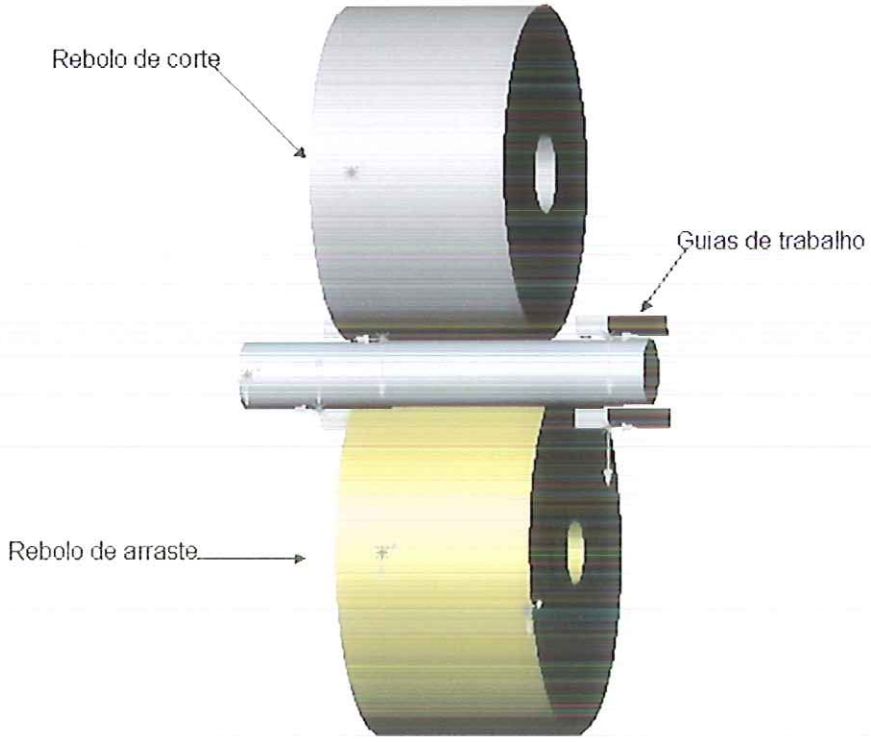


FIGURA 2.5 - Representação do processo de retificação center-less de passagem (MARINELLI FILHO, 1995).

2.2.3 Retificação center-less de mergulho

Este é um método de retificação center-less muito utilizado e será explorado com detalhes durante a realização do presente trabalho. Mas não é um método contínuo como no caso anterior e conforme mostra a Figura 2.6, a menos da utilização de mecanismos especiais de alimentação automáticos, deve ser alimentado manualmente. Mas por outro lado, este tipo de retificação oferece uma grande flexibilidade para a retificação de diversos tipos de perfis.

Esta possibilidade se dá devido ao fato de se poder gerar os mais diferentes tipos de formas no rebolo de corte, através de ferramentas e técnicas de dressagem adequadas, possibilitando a geração de peças com variações de diâmetros e perfis de revolução mais complexos.

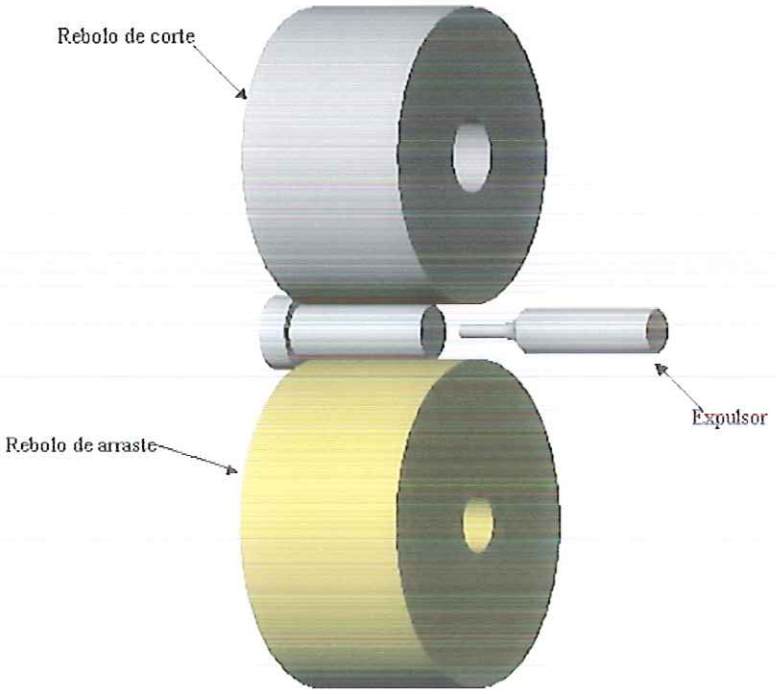


FIGURA 2.6 - Representação esquemática do processo de retificação center-less de merguho (MARINELLI FILHO, 1995).

2.2.4 Outros tipos de retificação center-less

a) Retificação center-less "endfeed"

O rebolo de corte e/ou rebolo de arraste são inclinados, sendo ambos perfilados ou não, de tal forma a produzir uma configuração cônica na qual a peça será introduzida axialmente entre os rebolos. Durante o contato de retificação, a peça é avançada em movimento de passagem até alcançar o expulsor. Desta forma, o continuo avanço da peça resulta em uma gradual remoção de material (MARINELLI FILHO, 1995).

O processo de retificação center-less "endfeed" é usado principalmente em peças com formato cônico, e pode ser visto no esquema da Figura 2.7. Operações em retíficas que apresentam base robusta e proteções adequadas para trabalho, oferecem grande rigidez e uso de ferramental simplificado.

O avanço da peça, após contato com os rebolos, pode ser assegurado pela ação de passagem garantida pelo rebolo de arraste inclinado; a força de tração fornecida pelo rebolo de arraste é suficiente para realização do trabalho, sem a necessidade de um dispositivo especial para empurrar a peça.

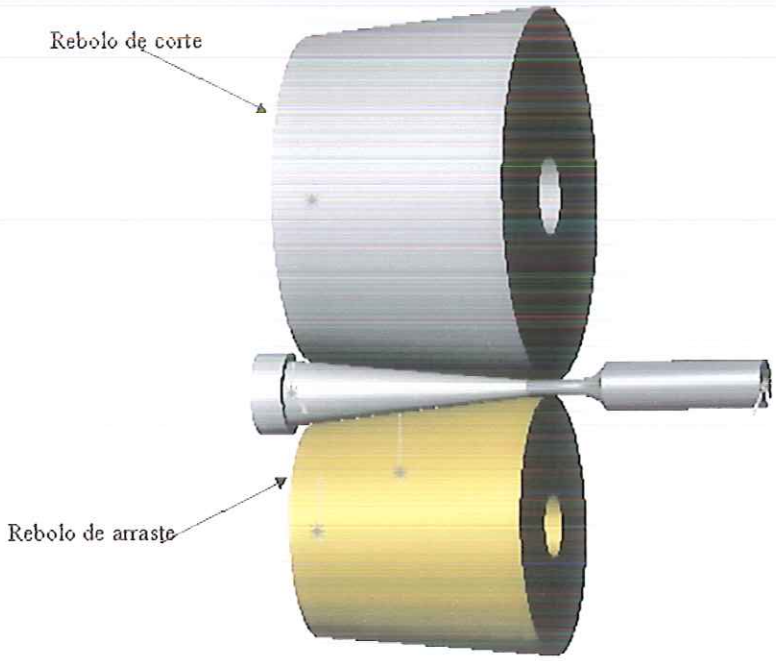


FIGURA 2.7 - Representação do processo de retificação center-less "endfeed" (MARINELLI FILHO 1995).

b) Retificação center-less de passagem de barras

A peça é suportada pela régua de apoio e confinada pelas guias de trabalho, enquanto vai sendo introduzida axialmente entre os rebolos conforme visto na Figura 2.8. O rebolo de arraste inclinado controla a rotação e o movimento de passagem da peça.

O processo de retificação center-less de passagem é o melhor método para a retificação de barras longas e tubos em processo contínuo. Quando a quantidade de remoção de material excede ao permissível, utilizam-se duas ou mais retificadoras center-less arranjadas em linha, nas quais a peça passa por estas sucessivas unidades até a obtenção da dimensão final.

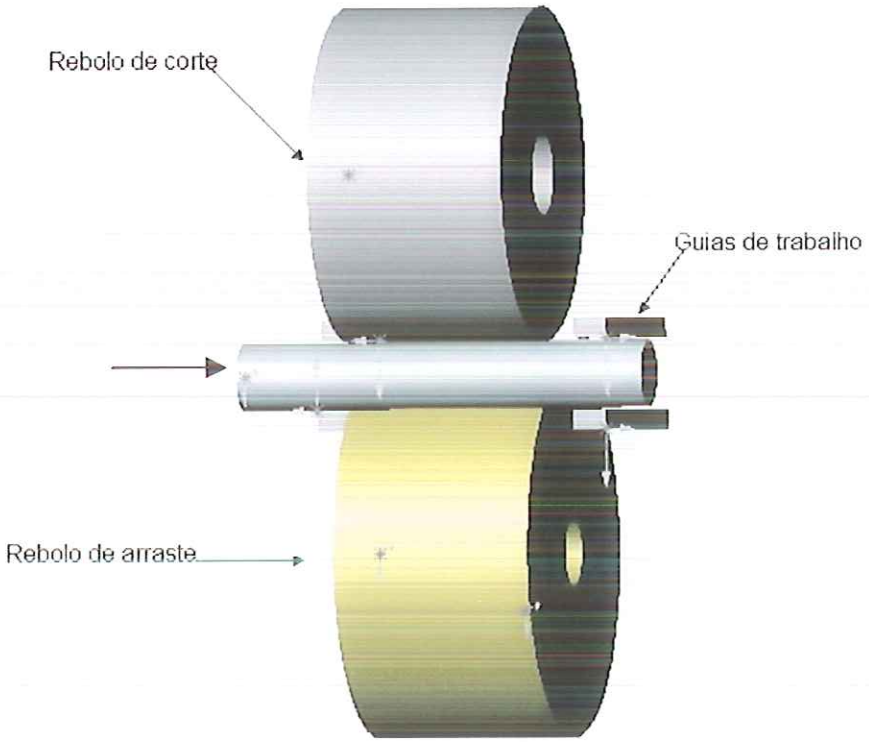


FIGURA 2.8 - Representação do processo de retificação center-less de passagem de barras (MARINELLI FILHO, 1995).

c) Retificação center-less de mergulho de várias seções cilíndricas com diferentes diâmetros

Como visto na Figura 2.9, a retificação dos componentes realiza-se, utilizando um único rebolo de corte de largura apropriada ou vários rebolos montados em um mesmo eixo. Este último método é preferido quando substanciais diferenças no diâmetro da peça necessitam ser retificados (MARINELLI FILHO, 1995).

Economia de tempo na produção e, ao mesmo tempo, alta acuracidade, no que diz respeito a concentricidade e aspectos geométricos das superfícies retificadas, podem ser obtidas através deste método, que é adaptado para peças com comprimento considerável, que sejam compatíveis com a largura do rebolo de corte e que apresentem um canal, entre as transições de seções dos diferentes diâmetros, a fim de permitir a dressagem.

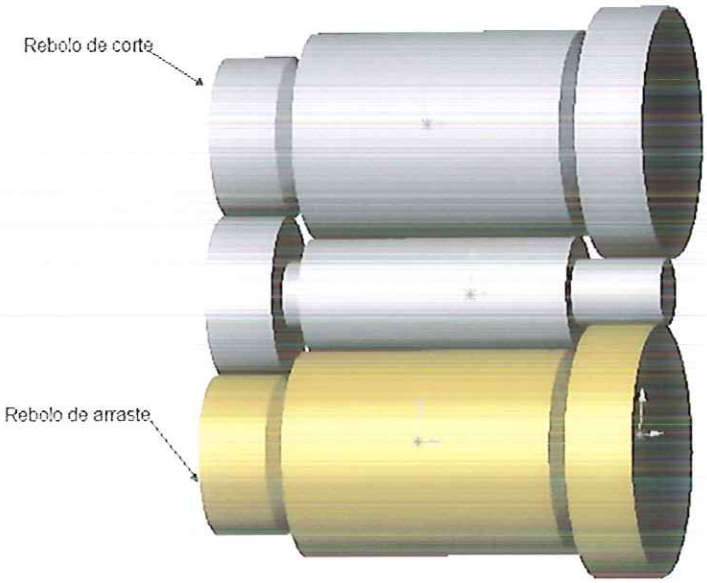


FIGURA 2.9 - Representação do processo de retificação center-less de peças com diâmetros escalonados (MARINELLI FILHO, 1995).

d) Retificação center-less de mergulho de seções cruzadas

Dois pares de rebolos de corte e de arraste são usados neste caso, montados com um determinado espaçamento a fim de permitir uma rotação sem obstruções

para a peça, como mostrado na Figura 2.10. Para este processo, uma régua especial se faz necessária para evitar qualquer tipo de interferência na rotação da mesma.

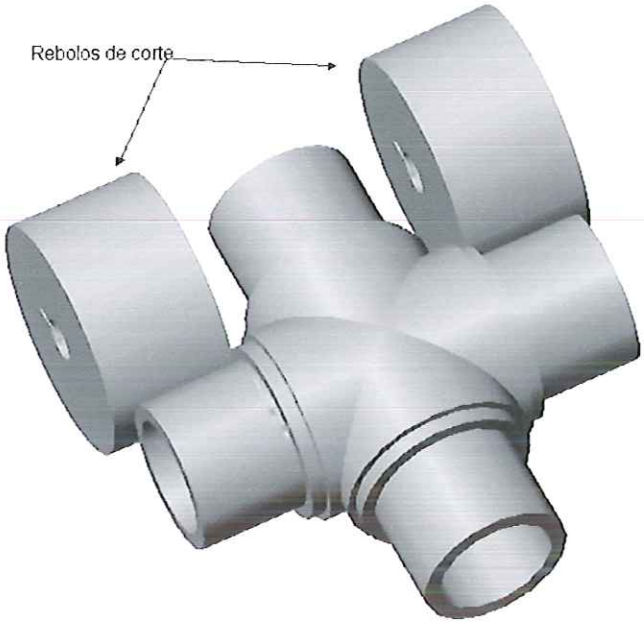


FIGURA 2.10 - Figura esquemática do processo de retificação center-less de peças que apresentam seções cruzadas (MARINELLI FILHO, 1995).

e) Retificação center-less de passagem de múltiplas peças

Um único rebolo, ou vários rebolos montados lado a lado, utilizando, em alguns casos, espaçadores, em um mesmo eixo, são alimentados automaticamente de duas ou mais peças relativamente pequenas, alinhadas na zona de retificação ao longo do eixo comum de rotação. O sistema pode ser caracterizado como uma multi-estação de retificação center-less de passagem, como pode ser visto na Figura 2.11.

Este sistema de retificação é adaptável a dois diferentes tipos de processos:

(i) As peças são carregadas em lotes e tem a mesma operação realizada simultaneamente;

(ii) Um desenvolvimento passo a passo de perfis de peças é realizado em posições consecutivas usando um "balancim" que é um tipo de dispositivo de trabalho manual.

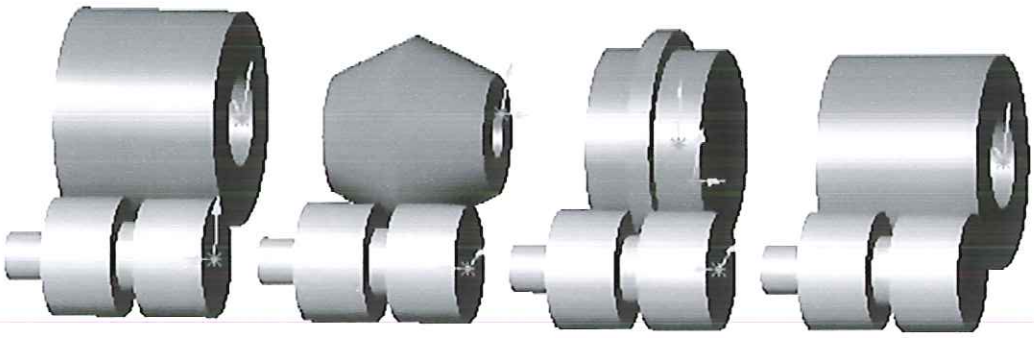


FIGURA 2.11 - Desenho esquemático do processo de retificação center-less de múltiplas peças (MARINELLI FILHO, 1995).

f) Retificação center-less de passagem de rolos cilíndricos convexos

Sabe-se que todas as seções de um arco circular tem curvaturas idênticas. Conseqüentemente, uma peça que passa em um plano axial, ao longo da face do rebolo de corte que apresenta perfilamento semelhante a um contorno circular, irá ser retificada com um perfil correspondente, semelhante a FIGURA 2.12.

Um arco côncavo, na face do rebolo, irá resultar em um perfil convexo na peça. Peças com baixa convexidade (grande raio), conhecidas como perfis convexos, são necessárias em algumas aplicações mecânicas, por exemplo, com o objetivo de controlar a distribuição de tensões em peças sobrecarregadas.

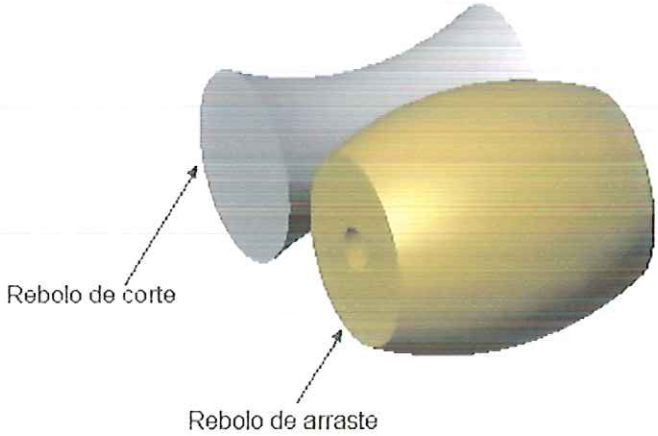


FIGURA 2.12 - Desenho esquemático do processo de retificação center-less de rolos cilíndricos convexos (MARINELLI FILHO, 1995).

2.3 Considerações sobre a geração de circularidade

De acordo com KING & HAHN (1986), a razão fundamental que direciona a tendência da retificação center-less em gerar um diâmetro lobulado na peça repousa na geometria do processo, que é composta pelos contatos entre a peça, a régua, o rebolo de arraste e o rebolo de corte, conforme Figura 2.13.

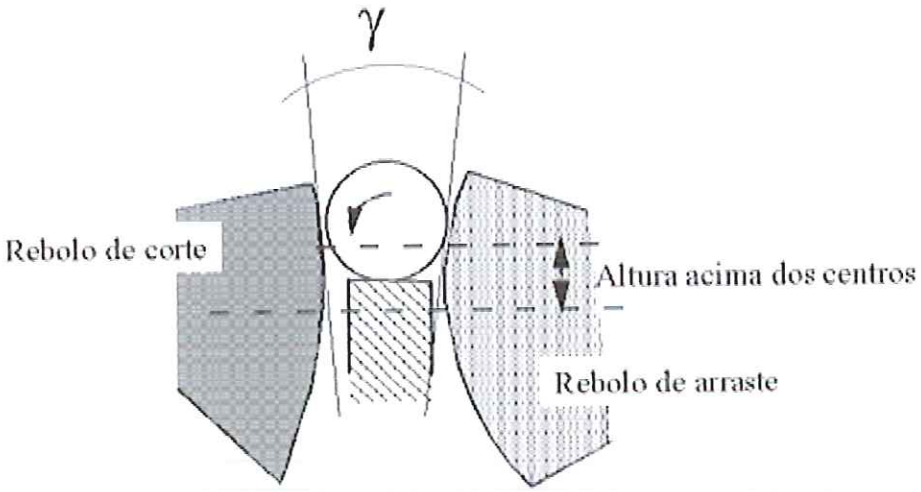


FIGURA 2.13 - Geometria do processo de retificação center-less (KING & HAHN, 1986).

A configuração formada pela peça, rebolos e régua pertence a uma família de figuras geométricas envolvendo dois polígonos, um dos quais, o polígono interno, pode girar dentro do espaço restrito, formado pelo polígono externo e manter contato, todas as vezes, com os lados deste polígono externo, conforme pode ser visto na Figura 2.14.

Embora a superfície dos rebolos que tocam os dois lados do polígono interno sejam arcos, seus raios de curvatura são consideravelmente maiores, quando comparados aos relativamente pequenos erros geométricos da peça, de tal forma que as superfícies dos rebolos podem ser consideradas como linhas retas.

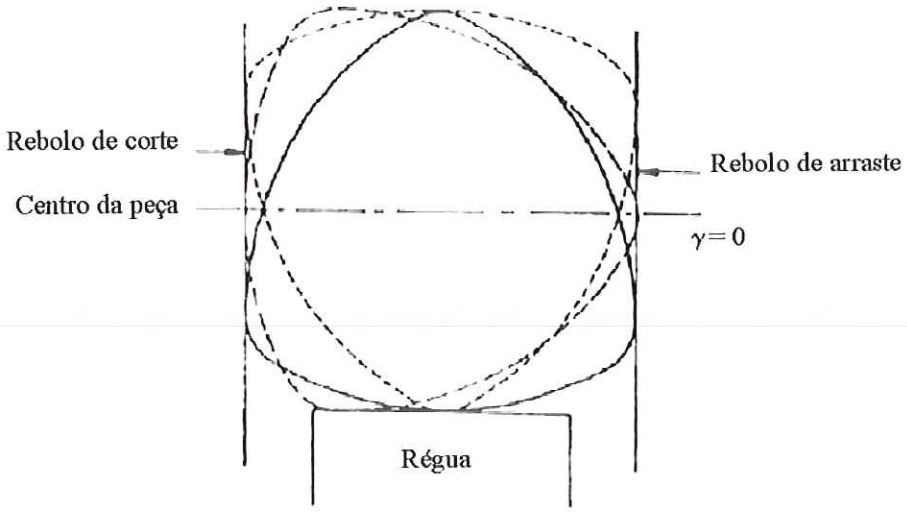


FIGURA 2.14 - Configuração formada pela peça e rebolos, estabelecendo um polígono externo e um polígono interno em retificação center-less (KING & HAHN, 1986).

Assim, segundo KING & HAHN (1986) a geometria center-less de um setup de máquina, com a linha de centro da peça coincidente com a linha de centro dos rebolos, forma um quadrado com dois lados representando os rebolos, onde qualquer polígono interno, tendo um número ímpar de lados, poderá girar sem a perda de contato com qualquer um dos lados do polígono externo, como mostrado na Figura 2.15.

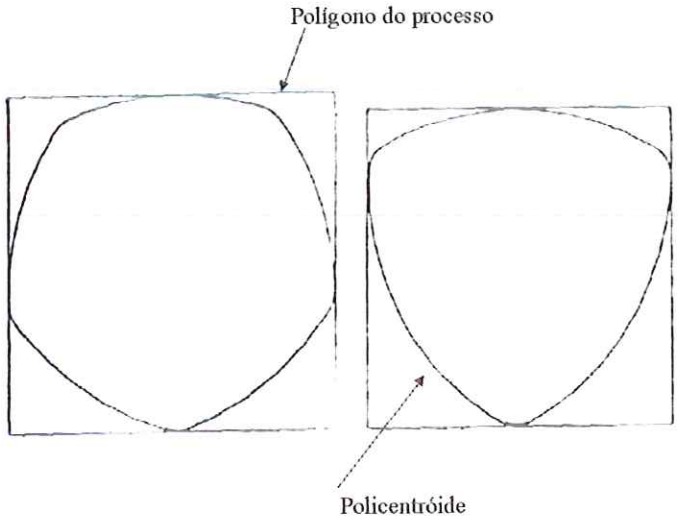
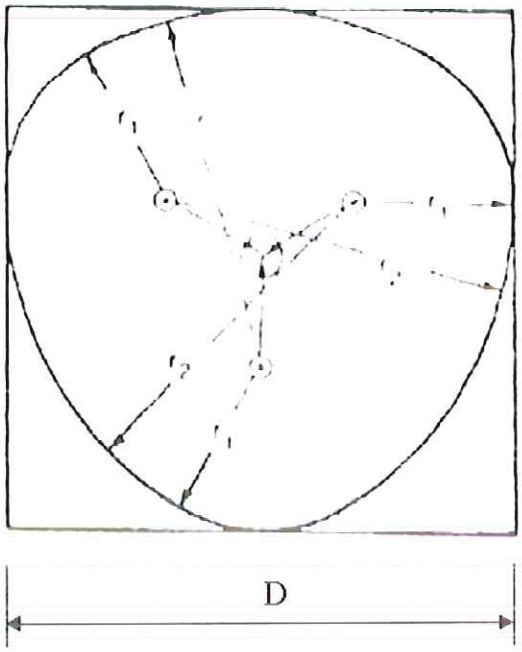


FIGURA 2.15 - Representação esquemática do contato entre polígonos (KING & HAHN, 1986).

Os polígonos internos tem uma forma claramente definida chamada de policentróide, apresentando pares de raios ao redor de um número de centros igual ao número de lóbulos do polígono. Como mostra a Figura 2.16, o diâmetro do policentróide é constante ao redor da circunferência, sendo o mesmo, a soma de diferentes raios.



$$r1 + r2 = D$$

FIGURA 2.16 - Desenho esquemático de um policentróide, representando um diâmetro constante ao redor da circunferência (KING & HAHN, 1986).

Para destruir esta relação, deve-se modificar o paralelelismo dos lados do polígono externo através da elevação do centro da peça acima da linha de centro dos rebolos. Desta forma introduz-se o ângulo gama (γ).

Se a peça girar, representada pelo policentróide, durante a retificação, representada pelo polígono externo que já não é mais paralelo, observar-se-á que uma interferência é criada entre o pequeno raio do policentróide e o rebolo de corte. Conseqüentemente, em cada revolução da peça, o centro comum dos pares de raios irá aproximar-se do eixo da peça, e o desvio de um círculo verdadeiro irá ser diminuído, como pode ser visto na Figura 2.17.

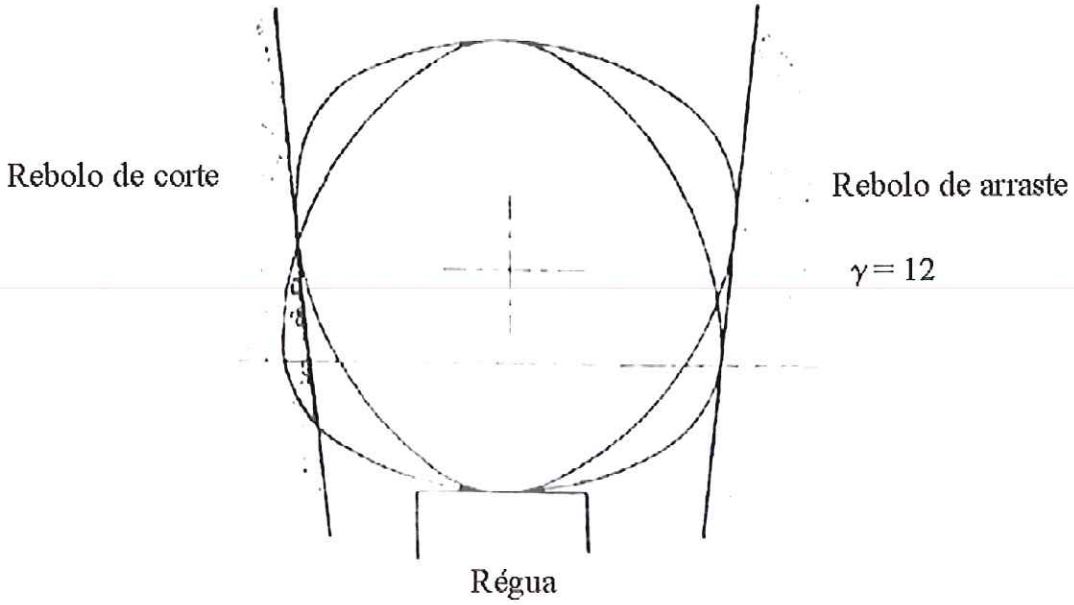


FIGURA 2.17 - Deslocamento do centro da peça em relação aos centros dos rebolos de corte e de arraste (KING & HAHN,1986).

Uma simplificada explicação dos fatos fornecida por KING & HAHN (1986) mostra que, como o ponto de contato do policentróide girante desliza ao longo do lado de referência (lado do rebolo de arraste), um ponto diametralmente oposto irá sempre mover-se paralelo ao lado de referência e verticalmente ao longo da face de contato do rebolo de corte. Mas, desde que o rebolo não está paralelo ao lado de referência nesta nova configuração, tem-se uma maior interação entre o menor raio do policentróide e o rebolo de corte. Conseqüentemente mais material é removido do menor raio que do maior raio, que está em contato com o rebolo de corte somente em um ponto elevado acima dos centros.

Considerações devem também ser feitas, quando trabalha-se com o centro da peça, abaixo da linha de centro que une os centros dos rebolos de corte e arraste, ou seja, quando utiliza-se um ângulo gama negativo.

Diferenças são observadas, pois um ângulo gama positivo, na maioria das vezes, produz uma melhor circularidade na peça comparado ao uso de um ângulo gama negativo. Outra diferença entre as duas condições é a direção da componente vertical da força de corte que, quando retificando acima dos centros, reduz a pressão sobre a régua e quando retificando abaixo dos centros aumenta a pressão sobre a

régua. Embora estas mudanças apresentem um leve efeito nas condições de operação da máquina, estas são primariamente significantes na relação do atrito entre peça e régua e na sua influência na estabilidade mecânica no suporte da peça.

Um simples esquema gráfico da interação rebolo/peça, durante rotação da peça, em um "setup" composto de um ângulo gama positivo e um ângulo de régua positivo, pode ser visto na Figura 2.18.

Este efeito benéfico à circularidade da peça, resulta diretamente no aumento do movimento da componente vertical do eixo da peça, permitindo assim, uma diferença na interação entre o rebolo de corte e o maior raio da peça e entre o rebolo de corte e o menor raio da peça.

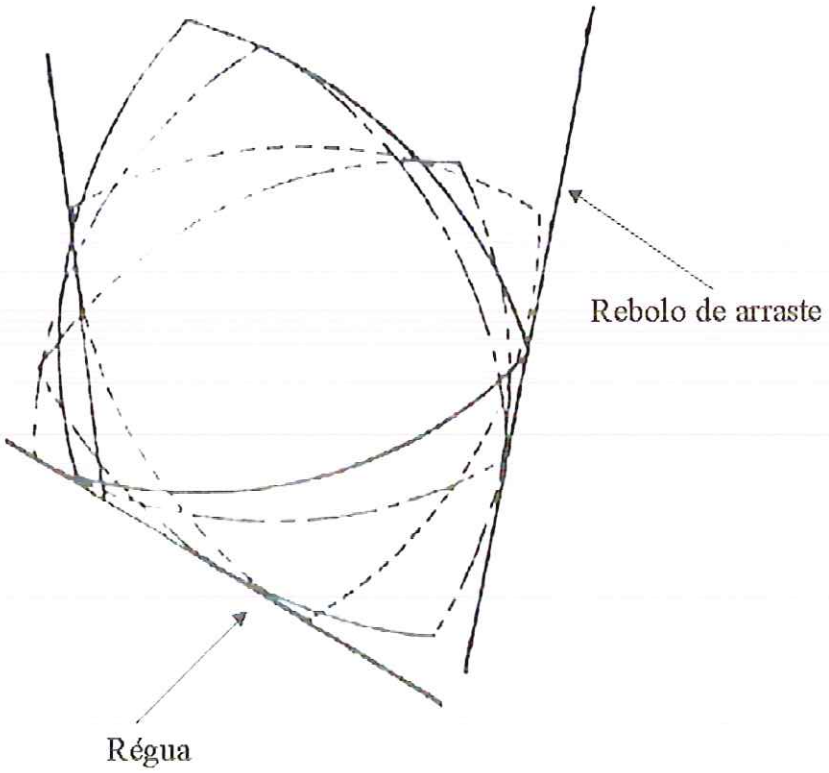


FIGURA 2.18 - Uso de ângulo γ positivo e ângulo de régua positivo em retificação center-less (KING & HAHN, 1986).

Assim, o ângulo gama, seja este positivo ou negativo, influencia grandemente todo o processo de retificação center-less, com relação à qualidade final da peça e atualmente merece grande atenção, muito maior que no passado. Desde que um aumento no ângulo gama representa uma melhoria nas condições de circularidade da peça, deve-se ter em mente a possibilidade de introduzir na máquina vibrações auto-excitadas. Assim, deve sempre existir um compromisso entre "setup" e condições ótimas do produto final. Desta forma, teremos um valor de gama que irá produzir condições otimizadas de trabalho.

2.4 Principais problemas do processo center-less

Investigações têm sido realizadas a fim de estudar a influência de vários parâmetros do processo na qualidade das peças retificadas e para identificar condições ótimas de "set-up" (DALL (1946); UDUPA (1987); OLIVEIRA (1994); ZHOU et al. (1996) e GUO et al. (1997)). O efeito destes parâmetros de "setup" sobre o desempenho do processo, pode ser caracterizado por três parâmetros de estabilidade (ZHOU et al., 1996):

1. Estabilidade do processo
2. Estabilidade da vibração
3. Estabilidade na formação de lóbulos

Pode ser uma tarefa desafiadora a regulagem de uma operação de retificação center-less com um balanço dos três parâmetros de estabilidade, circularidade e produtividade simultaneamente. Conforme ZHOU et al. (1997), dois tipos de instabilidade da peça podem ocorrer durante retificação center-less:

1. "Speed-up" (Alta rotação da peça)
2. "Jumping" (Peça salta da região de trabalho)

O "speed-up" relaciona-se ao mecanismo de controle do atrito, e pode ser minimizado pela seleção adequada do ângulo da régua, altura acima dos centros e coeficiente de atrito do rebolo de arraste. Processos center-less com grandes ângulos acima dos centros podem ocasionar a perda de contato da peça com a régua de apoio ocasionando o "jumping" e o exame desta estabilidade pode ser identificado pela análise de forças e momentos que agem sobre a peça.

A formação de lóbulos é referenciada como o único mecanismo em retificação center-less que causa significante erro de circularidade da peça na ausência de vibração da máquina. A formação de lóbulos é afetada pela configuração geométrica do "setup" da peça e este é um dos principais limitantes para obtenção de boa circularidade.

Tentativas para seleção de ângulos de "setup" apropriados, buscando-se evitar instabilidade a qual gera a formação de lóbulos tem sido realizadas. Enquanto estes estudos tem apresentado significante contribuição para um melhor entendimento do mecanismo de geração de lóbulos, sabe-se que ainda é prática comum para suprimir a formação de lóbulos o procedimento de tentativa e erro.

OLIVEIRA (1994), baseado em investigações teóricas e práticas, elaborou uma tabela contendo os principais fatores que influenciam as características da peça em retificação center-less. Na tabela 1, podemos observar os principais fenômenos geradores de erros e suas características gerais.

TABELA 1 - Principais fatores que influenciam o processo center-less.

Fenômenos Geradores	Classificação Geral	Características Gerais da Superfície da Peça
1) Estabilidade geométrica γ	Estabilidade	Lóbulos ímpares
2) Polígono β simples 3) Polígono β composto	Erro β	Lóbulos pares ou ímpares
4) Vibrações auto-excitadas 5) Vibrações forçadas	Vibrações	Irregular ou lobulada

A maioria dos estudos realizados para verificar a influência dos parâmetros do processo têm identificado regiões de instabilidade onde a peça tende a vibrar, pular e sair da zona de retificação estável. ZHOU et al. (1996), estudaram o mecanismo de formação lobular e seu efeito no erro de circularidade e forneceram recomendações gerais para seleção apropriada dos parâmetros de set-up, através de um diagrama.

NAKKEERAN & RADHAKRISHNAN (1988), verificaram que durante processo de retificação existe uma variação de posicionamento de componentes longitudinal e transversal do eixo da peça e que isto ocorre devido a um contato irregular da peça com a régua de trabalho e com o rebolo de arraste. Este movimento seria um dos responsáveis pelo erro de circularidade da peça retificada. ROWE & BARASH (1964), desenvolveram um modelo bidimensional para o processo de retificação center-less de passagem, desprezando variações de posicionamento do eixo da peça. SUBRAMANYA et al. (1987), também verificaram que a ação de corte e o mecanismo de formação de circularidade são altamente complexos e que o eixo da peça não somente move-se lateralmente como também movimenta-se perpendicularmente e oscila em relação a seu eixo. Estes pesquisadores, então, desenvolveram um modelo de simulação que incorpora o balanço da peça e resultados satisfatórios foram alcançados.

Estudos visando a otimização do processo utilizando altas taxas de remoção de material foram realizados por ROWE et al. (1987). Uma investigação durante retificação de aços e ferro fundido foi realizada permitindo a identificação de características limites. Estas características limites revelam, através de um diagrama, as condições limites da operação onde as variáveis do processo são a taxa de passagem, a rotação da peça e a rotação do rebolo de arraste. Os limitantes do processo foram a queima da peça, a vibração e a potência disponível. O diagrama gerado apresenta um ponto ótimo de operação dentro de uma região circundada pelos limites.

Fator de grande influência sobre as condições de circularidade da peça é conhecido como razão β (KING & HAHN, 1986). Esta é considerada a relação existente entre a rotação do rebolo de corte e a rotação da peça. A equação utilizada para o cálculo de β é:

$$\beta = \frac{n_c \times \phi_p}{\phi_a \times n_a} \qquad (1)$$

Onde:

β = Razão β

n_c = Rotação do rebolo de corte (rpm);

ϕ_p = Diâmetro da peça (mm);

ϕ_a = Diâmetro do rebolo de arraste (mm);

n_a = Rotação do rebolo de arraste (rpm)

Pode ser considerado como um dos problemas de circularidade da peça, o fato de que os eixos porta rebolos encontram-se levemente excêntricos. Se o eixo do rebolo de corte gira sincronizado com a rotação da peça em uma dada razão onde tem-se um número inteiro, o mesmo ponto do rebolo de corte irá entrar em contato com a peça em uma mesma posição circunferencial e assim teremos uma perda de circularidade (KING & HAHN, 1986).

Se houver um integrador numérico para a razão β, a perda de circularidade será igual a excentricidade do eixo e assim ter-se-á uma dada perda de circularidade. Entretanto, sendo a razão β um integrador numérico ímpar, o erro é adicionado à peça a cada rotação da mesma e este acúmulo de erros pode facilmente exceder as tolerâncias ordinárias da peça.

Quando a razão β é um número inteiro ímpar, a perda de circularidade gerada na peça irá ter uma frequência de lóbulos que é igual a razão β. Esta é chamada de razão β simples. Entretanto, KING & HAHN (1986) consideram a existência de uma família inteira de frações que irão formar polígonos β. Uma fração β é obtida quando o integrador numérico ímpar é dividido por qualquer número inteiro menor que o integrador. O polígono β irá ter um número de lóbulos igual ao numerador. Estes são chamados de razão β composto. A Tabela 2 mostra esta relação.

TABELA 2 - Razão β.

Razão β					
Número de Lóbulos (n)					
n = 3		n = 5		n = 7	
Fração (f)	β	Fração (f)	β	Fração (f)	β
3/2 3/1	1,5 3	5/4 5/3 5/2 5/1	1,25 1,67 2,5 5	7/6 7/5 7/4 7/3 7/2 7/1	1,17 1,4 1,75 2,33 3,5 7

A razão β simples é obtida quando uma parte do rebolo toca a peça em um lado do polígono entre cada dois lóbulos. A razão β composta é obtida quando uma parte do rebolo toca toda a peça em um espaçamento ao redor da circunferência igual ao número de lóbulos que está no numerador da fração, como pode ser visto na Figura 2.19.

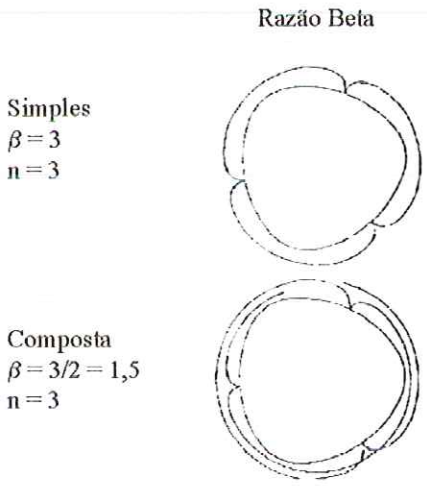


FIGURA 2.19 - Figura esquemática das razões β simples e composta (KING & HAHN, 1986).

2.5 Fatores que influenciam o processo center-less

2.5.1 Régua de retificação

Quando se fala a respeito da régua de retificação, mostrada na Figura 2.20, o primeiro e mais importante fator a ser discutido deve ser o ajuste da altura h, que é a distância entre o centro da peça e a linha que passa pelo centro dos dois rebolos.

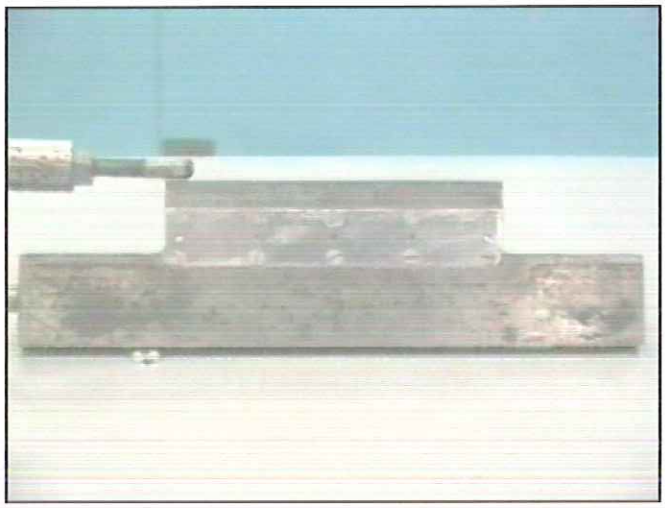


FIGURA 2.20 - Régua de apoio da peça usada durante processo center-less.

Utiliza-se preferencialmente a altura h de modo que o centro da peça fique acima dos centros dos rebolos, pois com este recurso pode-se obter peças com ótimos níveis de circularidade, além de se utilizarem maiores velocidades de trabalho, maximizando-se a produção. Quando se trabalha com a altura h muito alta é comum o aparecimento de marcas de vibração nas peças, o que pode ser tomado como um fator de avaliação.

Já o trabalho com a peça abaixo da linha de centro dos rebolos traz um aumento razoável das forças resultantes na régua de apoio, o que pode comprometer a circularidade da peça. Este tipo de recurso é recomendado para peças longas, como barras, ou quando se quer fazer a retificação de peças empenadas com o objetivo de se corrigir a sua forma. Isto é válido, pois estando a peça com seu centro de rotação abaixo da linha de centro dos rebolos não haverá condição desta escapar.

DALL (1946), foi um dos primeiros a investigar as relações geométricas existentes entre a régua, rebolo de arraste e rebolo de corte e constatou uma profunda relação destes parâmetros com a circularidade da peça. A Figura 2.21 apresenta dois dos resultados obtidos, quando do uso de valores diferenciados de altura do centro da peça em relação a linha de centro dos rebolos e ângulo de inclinação da régua suporte. Foi verificado que a circularidade da peça apresenta significante melhoria quando se utilizam valores de ângulos acima dos centros de 5^0 e ângulo da régua igual a 30^0. Este pesquisador desenvolveu, também, um modelo matemático que visa quantificar erros desenvolvidos durante o processo, em função de irregularidades iniciais da peça.

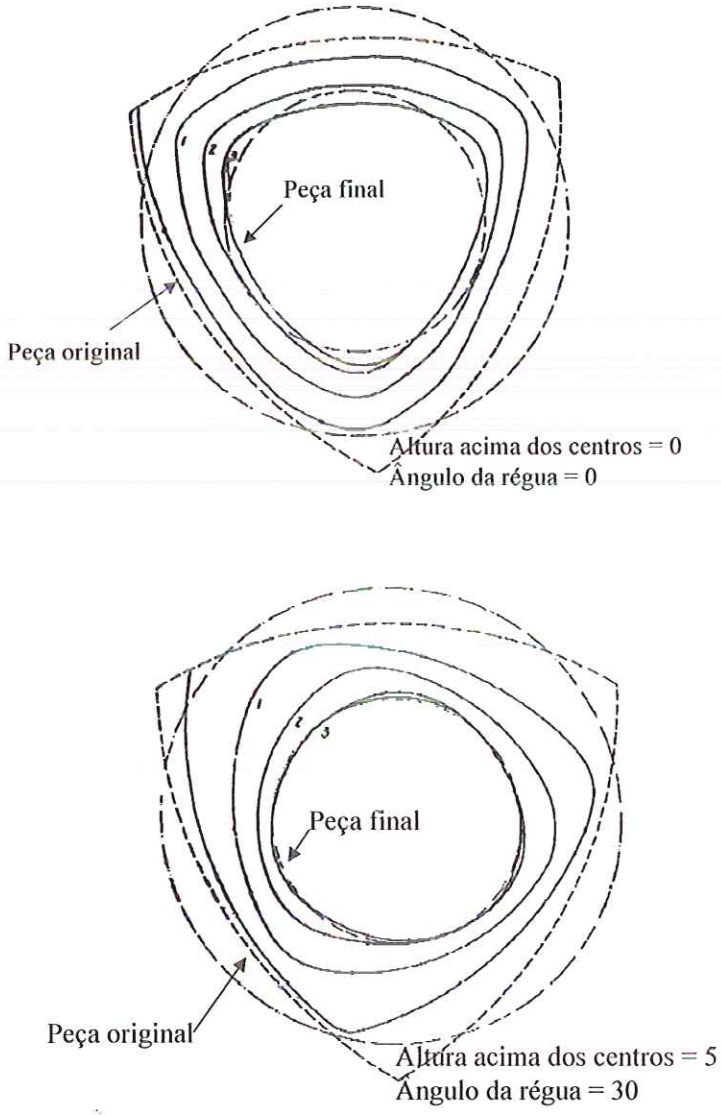
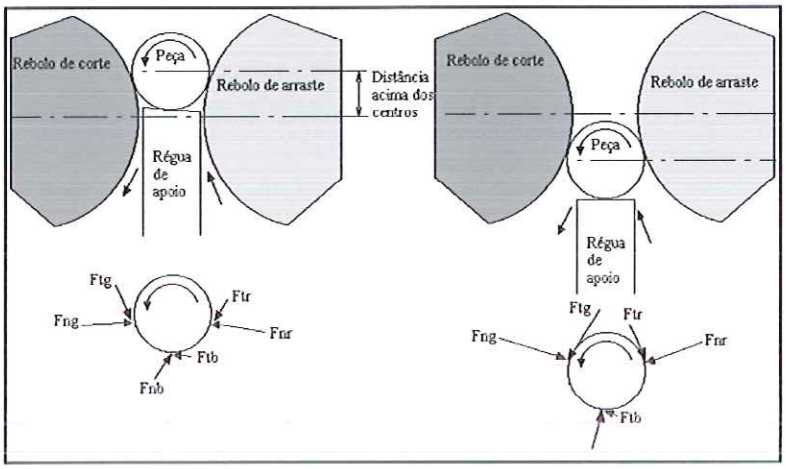


FIGURA 2.21 - Resultados de circularidade obtidos por DALL (1946).

No entanto, OLIVEIRA (1994) afirmou que quando do uso do método center-less abaixo dos centros, pode-se também alcançar boa circularidade e estabilidade geométrica da peça compatíveis com os obtidos com a retificação center-less acima dos centros.

A idéia básica do método center-less abaixo dos centros é ter um maior equilíbrio dos vetores força agindo na peça, tornando-se possível assim, o uso de maiores valores de força sem a perda da circularidade da peça. A Figura 2.22, ilustra estas forças para ambos os métodos.



Onde: F = Força n = Normal g = Rebolo de corte

t = Tangencial b = Régua de apoio

r = Rebolo de arraste

FIGURA 2.22 - Distribuição de forças durante retificação acima e abaixo dos centros dos rebolos (OLIVEIRA, 1994).

Sabe-se que a força de retificação normal é cerca de 60% maior que a força de retificação tangencial. Quando a peça está sendo retificada acima da linha dos centros dos rebolos, o somatório vetorial das forças tangenciais pressionam a peça contra a régua de apoio. Devido a todas as forças serem aplicadas abaixo do centro da peça, o componente da força de compressão na régua é relativamente pequeno. Nesta situação, a dinâmica da força de retificação faz com que F_{nb} torne-se negativa por um certo período de tempo (talvez milisegundos), fazendo a peça vibrar sobre a régua de trabalho e saltar para fora da região de corte (OLIVEIRA, 1994).

Uma outra limitação neste caso é a velocidade máxima da peça. Para pequenos ciclos de retificação, é desejável uma maior rotação para a peça, pois isto leva a uma

maior distribuição de calor e menor temperatura de retificação. Mas, quando da retificação acima dos centros utilizando altas velocidades, o fluido de corte tende a infiltrar-se entre a régua de trabalho e a peça, reduzindo o componente de atrito entre estes dois elementos. Nestes casos, a peça pode girar com a mesma velocidade periférica do rebolo de corte e em alguns casos pular para fora da máquina.

A grande vantagem da retificação abaixo dos centros é a possibilidade de se utilizarem altas velocidades de avanço em mergulho. Neste caso, menores ciclos de retificação e maior velocidade da peça podem ser usados sem os problemas descritos para retificação acima dos centros.

Um dos problemas no uso da retificação abaixo dos centros é o maior nível de desgaste na régua de trabalho. Com o uso de réguas diamantadas este problema pode ser solucionado.

Simulação e testes experimentais abaixo e acima dos centros, de pequenas amostras de zircônia foram desenvolvidos por GUO et al. (1997). Neste trabalho, em função das condições iniciais de circularidade da peça e de "set-up", a simulação poderia predizer, para condições acima dos centros dos rebolos, o risco de aumento da velocidade da peça e possibilidade da mesma saltar para fora da região de corte e, também, a perda de circularidade da peça para a condição abaixo dos centros. Neste mesmo sentido, estudando a retificação de peças pequenas e leves, TAKASU & MASUDA (1992) mostraram, através de análise dinâmica e geométrica, ser pior a retificabilidade de peças que apresentavam furo concêntrico quando comparada a peças sólidas.

UDUPA et al. (1987), analisaram os processos center-less abaixo e acima dos centros, durante retificação de amostras que apresentavam geometria específica. Os resultados mostraram que o erro de circularidade aumenta somente poucos mícrons quando a peça é retificada abaixo dos centros e a diferença de acabamento superficial é insignificante, quando comparado ao método acima dos centros.

A última maneira de se trabalhar com a altura h é colocando-se os eixos de rotação de todos os elementos, rebolos e peça, sobre a mesma linha. Isto terá um efeito muito perigoso para o trabalho em grandes produções, pois este posicionamento irá gerar um perfil triangular ou com número ímpar de lóbulos sobre a peça com diâmetro constante, ou seja, para medidas com um micrômetro o

diâmetro constante irá dar a falsa idéia de boa circularidade. Portanto, deve-se tomar muito cuidado com a medida de circularidade em retificação center-less, para isso recomenda-se a utilização de um dispositivo para medidas radiais, composto de um relógio comparador em um prisma de metal duro em V.

A Figura 2.23 apresenta metodologia gráfica desenvolvida por REEKA (1967), para cálculo da altura da régua ideal para diferenciados ângulos de contato rebolo-peça. Uma abordagem simplificada é utilizada para se alcançar valores ótimos da altura de régua. Neste caso, basta que seja sabido os valores dos diâmetros dos rebolos de arraste (ϕA) e corte (ϕC) e diâmetro da peça (ϕP). A partir destes dados, a altura h pode ser encontrada para um valor de $\gamma = 8^0$, onde podemos obter valores adequados de circularidade.

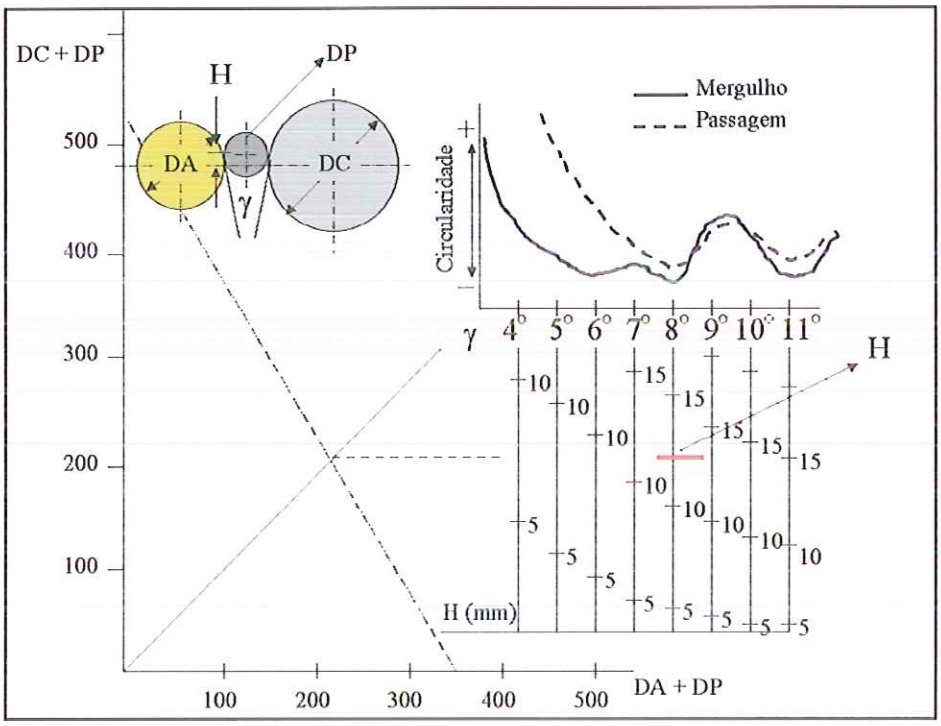


FIGURA 2.23 - Metodologia gráfica desenvolvida por REEKA (1967) para obtenção de condições ótimas de trabalho.

Este pesquisador encontrou perfis diferentes de circularidade, como os mostrados na Figura 2.24, à medida que eram variados os valores de h.

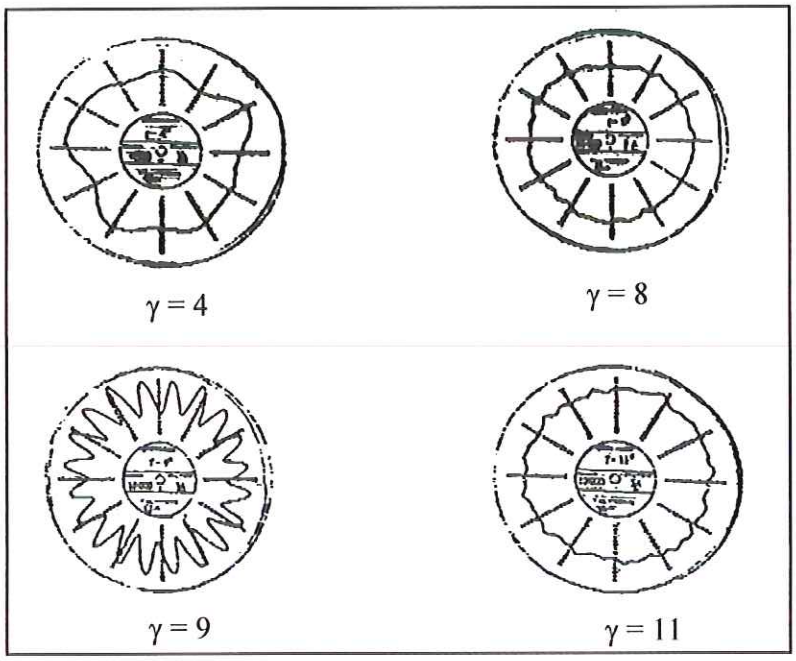


FIGURA 2.24 - Efeito dos parâmetros do processo no perfil de circularidade da peça (REEKA, 1967).

KONIG (1980), elaborou um diagrama capaz de fornecer informações detalhadas a respeito de regiões de estabilidade, em função dos ângulos de contato da peça com o rebolo de corte (γs) e da peça com rebolo de arraste (γr), mostrados na Figura 2.25, no qual obtém-se peças com ótimas condições de circularidade. Este diagrama pode ser visto na Figura 2.26.

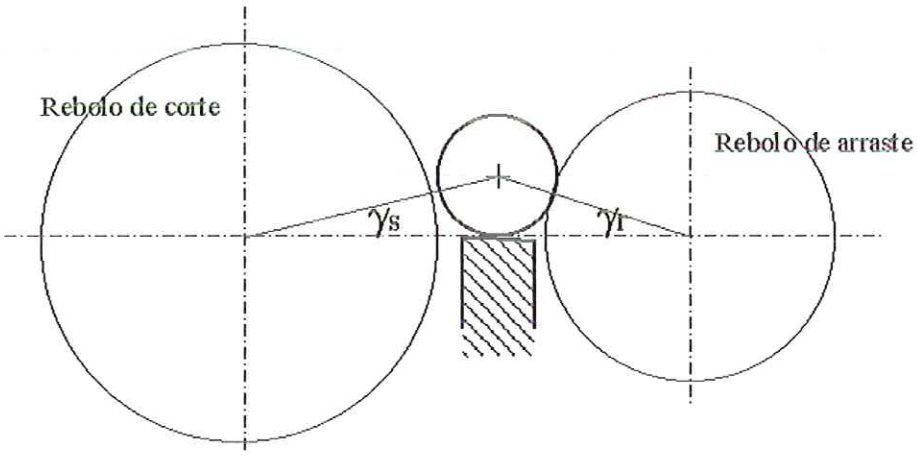


FIGURA 2.25 - Desenho esquemático evidenciando os ângulos γs e γr (KONIG, 1980).

A Figura 2.27 relaciona os parâmetros de estabilidade geométrica ao número de lóbulos formados na peça durante processo. Quanto maior o número de lóbulos, maior será a possibilidade de obtenção de produtos com boa circularidade, mesmo que em alguns casos tenha-se que trabalhar em condições de instabilidade geométrica.

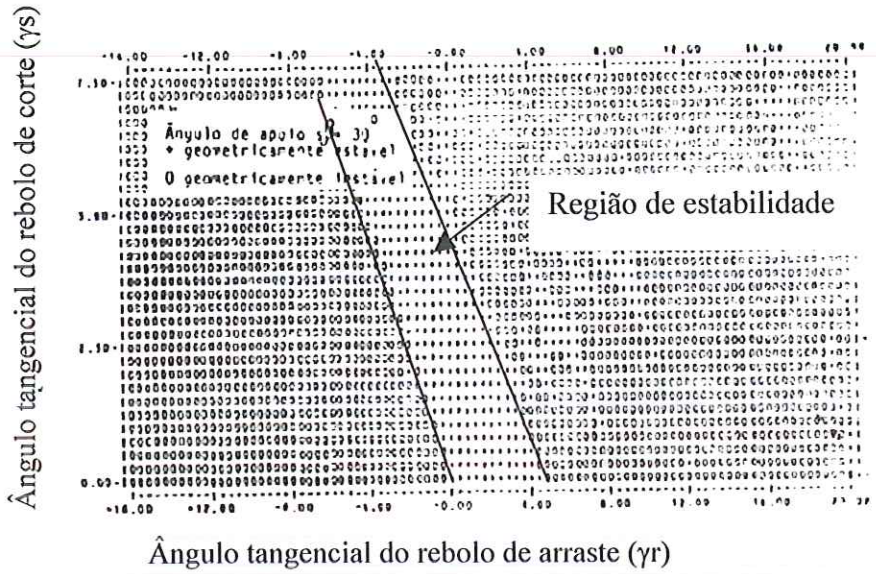


FIGURA 2.26 - Gráfico de estabilidade geométrica (KONIG, 1980).

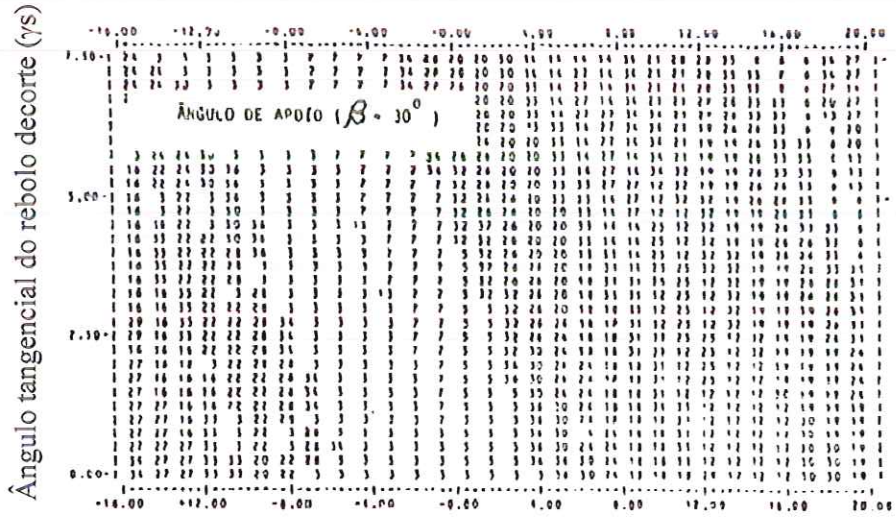


FIGURA 2.27 - Número de ondas para o gráfico de estabilidade geométrica (KONIG, 1980).

Outros pesquisadores também têm se dedicado a estudar a influência de vários outros parâmetros do processo relacionados com a qualidade de peças retificadas e identificar condições ótimas de set-up (ROWE (1979); MIASHITA (1982); FURUKAWA (1971); GURNEY (1964)).

Há duas formas de se calcular a altura h:

1) Utilizando-se a experiência de anos de trabalho de alguns indivíduos da indústria metal-mecânica. Quase todos os manuais e catálogos recomendam que se trabalhe com uma altura h, acima da linha de centro dos rebolos, equivalente à metade do diâmetro da peça a ser usinada, sendo que este valor de h só é recomendado para peças de até 1" (25.4mm) de diâmetro. Para peças com maior diâmetro, h deve variar somente até ¾"(19.0mm) ou 7/8"(22.0mm). Este procedimento, no entanto, é grosseiro e não produz resultados satisfatórios

2) Usar ângulo de contato γ de 8^0 entre rebolo de corte e arraste, baseado em trabalho desenvolvido por REEKA (1967).

O cálculo da altura h é feito da seguinte maneira:

$$h = 0.07 \times [(\varnothing c + \varnothing p) \times (\varnothing a + \varnothing p)] / (\varnothing c + \varnothing a + 2\varnothing p) \qquad (2)$$

Onde:

$\varnothing c$ = Diâmetro do rebolo de corte

$\varnothing a$ = Diâmetro do rebolo de arraste

$\varnothing p$ = Diâmetro da peça

Para chegar a Eq.2 REEKA (1967) desenvolveu uma hipótese, baseando-se no desenho esquemático da Figura 2.28.

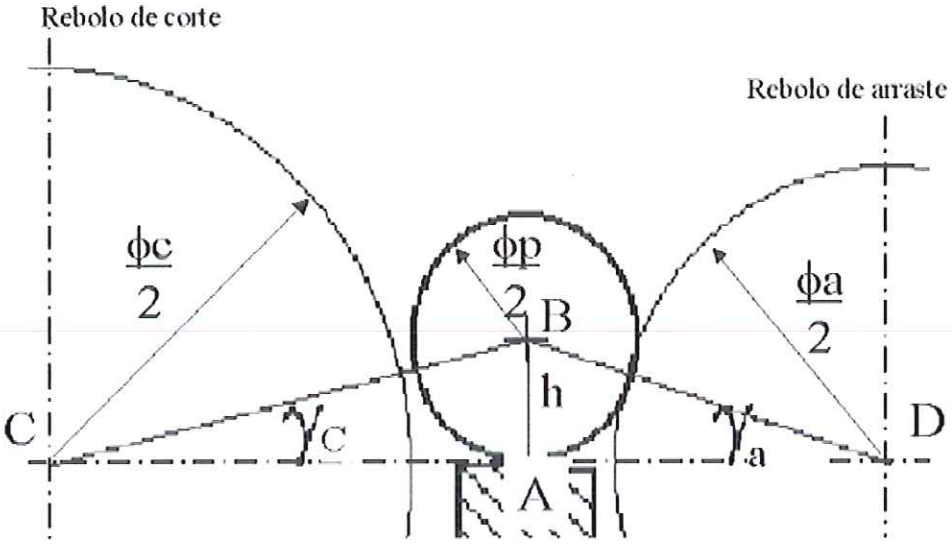
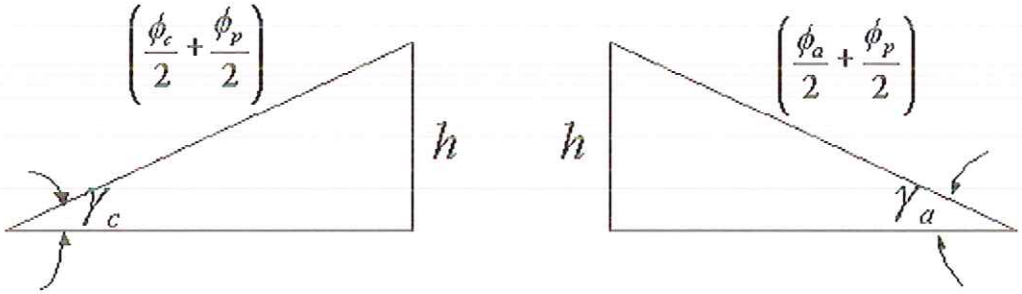


FIGURA 2.28 - Relações geométricas do processo center-less.

Isolando os triângulos BÂC e BÂD, tem-se:



Determinando senγ_c e senγ_a, tem-se:

$$\operatorname{sen}\gamma_a = \frac{h}{\left(\frac{\phi_a}{2}+\frac{\phi_p}{2}\right)} \tag{3}$$

e

$$\operatorname{sen}\gamma_c = \frac{h}{\left(\frac{\phi_c}{2}+\frac{\phi_p}{2}\right)} \tag{4}$$

Somando as equações membro a membro, obtem-se:

$$\operatorname{sen}\gamma_c + \operatorname{sen}\gamma_a = \frac{h}{\left(\frac{\phi_c}{2} + \frac{\phi_c}{2}\right)} + \frac{h}{\left(\frac{\phi_a}{2} + \frac{\phi_p}{2}\right)} \tag{5}$$

Fazendo $\operatorname{sen}\alpha = \alpha$ e adotando $\alpha = \gamma_a + \gamma_c = 8^o$, tem-se:

$$\gamma_a + \gamma_c = \frac{2h}{(\phi_p + \phi_c)} + \frac{2h}{(\phi_p + \phi_a)} \tag{6}$$

$$8^o = 2h\left[\frac{1}{(\phi_p + \phi_c)} + \frac{1}{(\phi_p + \phi_a)}\right] \tag{7}$$

Transformando 8° em radianos, tem-se:

$$0{,}0698 = h\left[\frac{(\phi_p + \phi_a) + (\phi_p + \phi_c)}{(\phi_p + \phi_c) \times (\phi_p + \phi_a)}\right] \tag{8}$$

Isolando h, encontra-se:

$$h = 0{,}07 \times \frac{\left[(\phi_p + \phi_c) \times (\phi_a + \phi_p)\right]}{(2\phi_p + \phi_a + \phi_c)} \tag{9}$$

Uma maneira bastante comum, para se referenciar a altura h, é se utilizar a distância entre a mesa inferior da máquina e o centro da peça. Este procedimento é simples pois, sempre será conhecido o diâmetro da peça a ser retificada e, com isso, apenas regula-se a distância do seu ponto de apoio sobre a régua de retificação e a mesa inferior da máquina.

Outro fator importante para o bom trabalho na retificação center-less é a geometria da régua de retificação. Os principais elementos que devem ser levados em consideração para confecção da régua são:

a) Largura da régua de retificação: deve variar de acordo com o diâmetro da peça a ser retificada. As mais comuns apresentam de ½"(12.5mm) até ¾" (19.0mm),

sendo que diâmetros maiores de peças devem utilizar réguas mais grossas. Se esta largura for muito pequena poderá ocorrer marcas de vibração na peça, para evitar isto deve-se corrigir esta largura dentro de um limite aceitável para cada peça de modo que se possa retificar, sem que o rebolo de corte atinja primeiro a régua.

b) Comprimento da régua de retificação: este comprimento deve ser suficiente para que a peça passe por toda a extensão dos rebolos, sem nunca perder o contato com o mesmo.

c) Ângulo da régua de retificação: este ângulo deve variar não muito rigidamente entre 25^0 e 30^0, sendo que, quanto maior for o diâmetro da peça, menor deverá ser o ângulo da régua. Em alguns casos, ângulos de régua muito agudos poderão gerar marcas de vibração nas peças retificadas.

d) Material da régua de retificação: Geralmente se utiliza metal duro para confecção destas réguas, mas quando se quer evitar riscos causados pela passagem da peça sobre a régua, pode-se utilizar materiais mais moles, como aço temperado ou bronze endurecido.

2.5.2 Dressagem do rebolo de arraste

Três são as funções do rebolo de arraste em retificação center-less:

a) Ajudar no controle dimensional da peça que esta sendo retificada,

b) Controlar a rotação da peça,

c) Controlar a velocidade de passagem da peça entre os dois rebolos.

É devido ao controle da velocidade de passagem da peça que o rebolo de arraste deve trabalhar inclinado em relação ao rebolo de corte nas operações de retificação center-less de passagem. Um outro fator também de extrema importância para o desempenho do rebolo de arraste durante o trabalho é o ponto de contato da peça com o rebolo de arraste, que deve ser o mesmo ponto em que o dressador percorreu o rebolo durante a dressagem. Isto é, toda peça deve caminhar sobre a mesma linha que o dressador percorreu durante a dressagem. Para isto duas ações devem ser realizadas:

a) O carro do dressador deve ter o mesmo ângulo (ϕ) de desvio na horizontal em relação ao eixo de rotação do rebolo de arraste, tal qual mostrado na Figura 2.29.

b) Outro fator que é muito importante é a correção da posição do dressador, o qual deve estar deslocado, em relação ao eixo de rotação do rebolo da mesma distância em que está o ponto de contato da peça com o rebolo de arraste até a linha de centro dos dois rebolos. A Figura 2.30 ilustra esta afirmação.

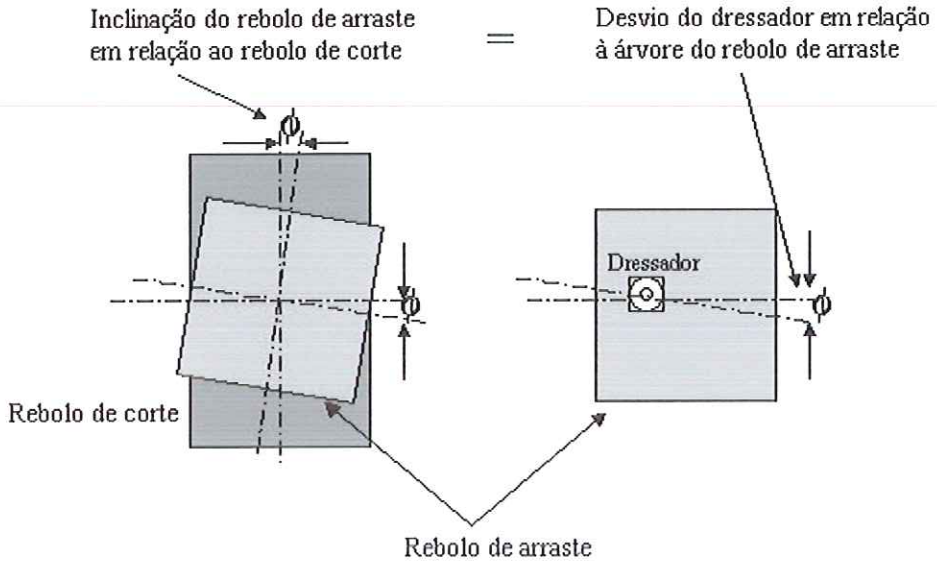
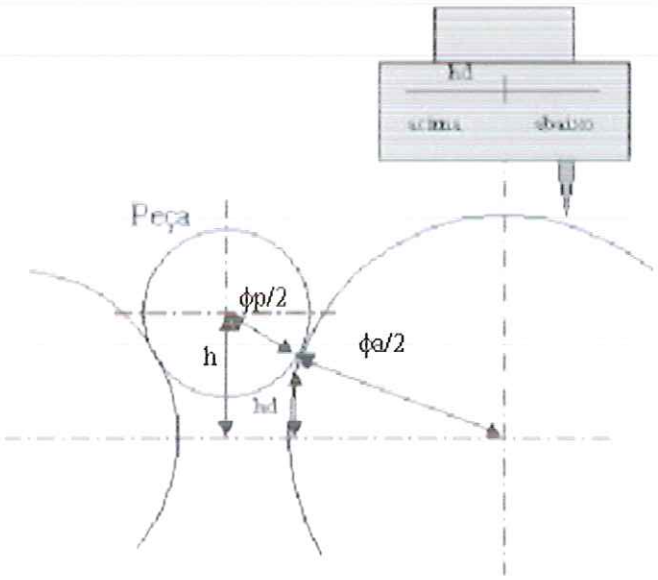


FIGURA 2.29 - Relação entre a inclinação do rebolo de arraste e inclinação do dressador do rebolo de arraste.



$$hd = (h.\phi a)/(\phi p.\phi a)$$

FIGURA 2.30 - Deslocamento do carro do dressador do rebolo de arraste em relação ao centro de rotação do mesmo.

Outro fator que pode influenciar no desempenho do rebolo de arraste é a sua dressagem, pois este não deve apresentar-se completamente liso, o que poderia ocasionar sérios acidentes, pois desta forma, a peça pode ser acelerada em demasia pelo rebolo de corte, já que o rebolo de arraste não mais consegue atritar a peça. Para se evitar este tipo de problema, deve ser utilizado durante processo graus de recobrimento de dressagem relativamente altos, algo em torno de Ud = 3.0 ou 4.0, com dressadores de diamante de ponta única, não necessitando de diamantes de qualidade superior para este tipo de serviço.

HASHIMOTO (1999), durante a realização de experimentos derivou a equação de movimento rotacional da peça durante o processo center-less, para analisar a estabilidade de rotação da peça. Este pesquisador descreveu a análise teórica sobre a existência de forças críticas de retificação em função de várias condições de "setup" e a influência do coeficiente de atrito do rebolo de arraste na zona de segurança das operações de retificação center-less. Neste estudo, uma máquina de testes de atrito rolamento/escorregamento foi desenvolvida. Esta permite medir o atrito e o desgaste dos rebolos sobre as mesmas condições. Os coeficientes de atrito e as taxas de desgaste de vários rebolos de arraste são apresentados. Foi apresentado também, neste trabalho, o coeficiente de atrito entre peça e diversos rebolos de arraste. Estes resultados foram discutidos sob o ponto de vista da segurança das operações, para se evitar o lançamento da peça para fora da região de corte, bem como o controle da produção em massa.

2.5.3 Dressagem do rebolo de corte

A dressagem do rebolo de corte deve ser feita com um grau de recobrimento que atenda as especificações de acabamento requeridas por cada peça e, preferencialmente, de maneira a minimizar o consumo de rebolo e diamante para cada operação. O processo de dressagem influencia na topografia superficial do rebolo e no grau de agressividade do mesmo. A integridade superficial da peça está intimamente relacionada com as condições de dressagem do rebolo. Um dos

problemas encontrados, que é função das condições de dressagem do rebolo, é a queima da peça, sendo este um dos tipos mais comuns de danos térmicos.

A queima visível em aços é caracterizada por têmperas de colorações azuladas sobre a superfície da peça. Estas colorações são geralmente removidas pelo "spark-out" no fim do ciclo de retificação, mas este efeito é cosmético e a ausência de colorações na superfície usinada não significa necessariamente que a queima da peça não ocorreu (MALKIN, 1989).

No início da queima, existe uma tendência de adesão de partículas de metais nos grãos abrasivos do rebolo, causando o aumento da força de corte, a deterioração da superfície da peça e o aumento da taxa de desgaste do rebolo.

De acordo com OLIVEIRA (1988), a definição de queima na retificação inclui tanto a retêmpera como o reendurecimento da superfície da peça. A retêmpera ocorre quando o calor gerado durante a usinagem aumenta a temperatura da superfície para um ponto abaixo da temperatura de transformação austenita-ferrita. Isto pode produzir localmente áreas mais moles, as quais tem o efeito de reduzir a resistência ao desgaste do material. O reendurecimento ocorre quando a temperatura de transformação austenita-ferrita é excedida durante a usinagem. O fluido de corte pode esfriar a superfície localmente e formar áreas de martensita branca, as quais são mais duras que as áreas vizinhas, levando a tensões residuais mais altas e causando uma grande susceptibilidade de ocorrência de trincas.

A Figura 2.31, mostra os fenômenos de reendurecimento e têmpera do aço, para as condições de queima e não queima. Pode ser observado que para aços endurecidos usinados sem qualquer queima, existe geralmente algum amolecimento devido a têmpera próximo da superfície. Na mesma figura, observa-se que a queima da peça não é, necessariamente, acompanhada do reendurecimento da superfície da peça (MALKIN, 1989).

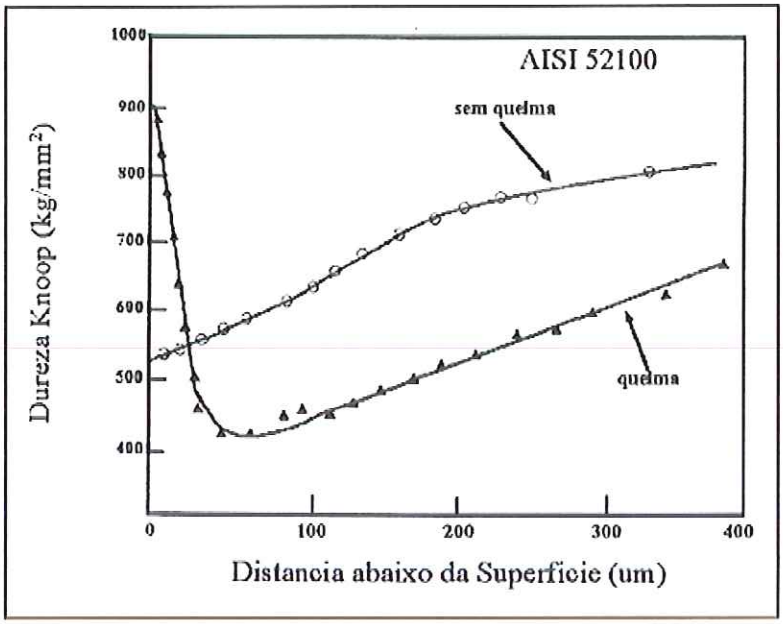


FIGURA 2.31 - Fenômenos de reendurecimento e tempêra para aço.

A ocorrência da queima ocorre quando a temperatura crítica na zona de usinagem é excedida e, portanto, a energia específica crítica no limiar da queima é um indicativo de tal fenômeno. Tal energia é usualmente baseada na medição da força, sendo também possível tal medição através da medida da potência da máquina, utilizando-se transdutores de potência de estado sólido (MALKIN, 1989).

Outra observação a ser feita é que deve se dar preferência à utilização de dressadores conglomerados, que além de muito mais baratos do que os de ponta única são também mais robustos e resistentes ao calor. Estas características ajudam este tipo de dressador a ter um desempenho, em termos de vida, muito maior do que os de ponta única. Para ambientes de trabalho mais específicos recomenda-se a utilização de dressadores do tipo placa que possuem uma relação custo/benefício muito boa em relação aos outros dois tipos citados.

Problemas comuns encontrados em retificadoras center-less dizem respeito a erros no perfil axial da peça causados pela dressagem do rebolo de corte. Durante a operação de dressagem do rebolo de corte, o carro suporte do dressador desliza sobre um came seguidor.

Desta forma, muitas vezes a acuracidade de fabricação deste came é pouco apreciada, o que pode acarretar em erros no perfil axial da peça. Uma regra a ser seguida é que a tolerância produzida no came seja 1/10 da tolerância de trabalho da

peça. As razões para esta tolerância apertada é que o erro do came é reproduzido no raio da peça, porém a tolerância da peça é medida em seu diâmetro. Isto significa que qualquer erro no came será duplicado na peça.

3 MONITORAMENTO DOS PROCESSOS DE RETIFICAÇÃO

3.1 Principais problemas de retificação.

Os problemas de retificação podem ser divididos em três grupos principais, relacionados a:

- Operação de retificação.
- Operação de dressagem.
- Condicionamento do rebolo.

A Figura 3.1. mostra os principais problemas de retificação, no que diz respeito a sua automação, inclusive center-less, enfrentados pelas empresas usuárias do processo. Esta lista foi obtida em visitas a empresas, entrevistas aos usuários e também levantamento apresentado por OLIVEIRA (1995).

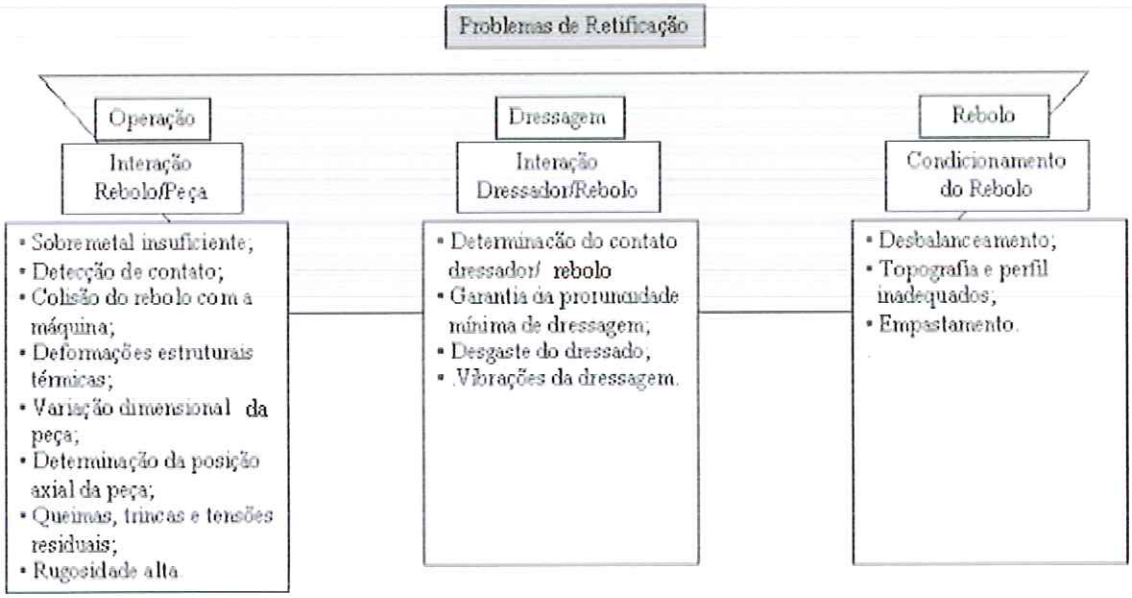


FIGURA 3.1 - Relação dos principais problemas enfrentados na retificação (OLIVEIRA, 1995).

Estudos realizados por membros do Laboratório de Otimização de Processos de Fabricação do Núcleo de Manufatura Avançada tem prestado valiosas contribuições ao desenvolvimento de técnicas para resolução destes problemas. Algumas destas técnicas são:

a) Sistema de calibração automática do rebolo

Um dos sistemas já experimentado e posteriormente adotado pela indústria de máquinas ferramentas é o sistema de calibração, que utiliza a energia acústica para detectar o contato entre o rebolo e o diamante de calibração, a fim de melhorar a precisão dimensional da retificadora, diminuindo o erro sistemático das peças produzidas em lote. Este sistema possibilita diminuir a dispersão das peças retificadas, conforme verifica-se na Figura 3.2. Além disso, o sistema pode facilitar nas operações de "setup" da máquina, tornando-as mais rápidas, e na dressagem dos rebolos, pois evita a dressagem em vazio devido ao desgaste excessivo do rebolo ou à deformação térmica da estrutura da máquina.

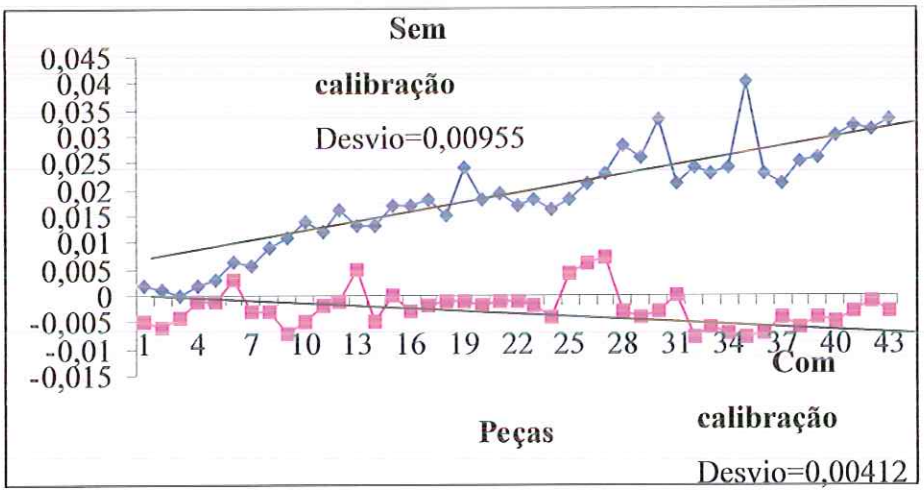


FIGURA 3.2 - Dispersão dimensional das peças, resultante de dois ciclos de retificação (GOMES, 1997).

b) Dressagem inteligente

Quando as peças retificadas começam a apresentar problemas de acabamento, erros de forma ou de tolerância, normalmente realiza-se a dressagem a fim de

corrigir a superfície do rebolo e devolver-lhe as características de afiação e o restabelecimento do perfil original.

Utilizando a informação sobre o posicionamento do rebolo obtida na calibração automática do mesmo, pode-se iniciar a dressagem inteligente, eliminando, por exemplo, a dressagem em vazio. Utiliza-se a emissão acústica para monitorar o processo, que é realizado em duas etapas, uma com alta profundidade de dressagem (aproximadamente 50μm) e velocidade máxima (Ud = 1) e a segunda passada com dressagem de acabamento (FELIPE JÚNIOR, 1996).

A emissão acústica detecta se há falhas durante a operação de dressagem. Caso se detecte alguma falha, a operação é repetida automaticamente, até que não seja detectada falha alguma.

c) "Gap less" rebolo peça

Este sistema diminui o tempo de ciclo da operação de retificação, utilizando-se da detecção de contato entre o rebolo e a peça através da emissão acústica. Desta forma, é feita uma aproximação rápida com o rebolo até uma posição limite (de segurança), conforme verifica-se na Figura 3.3, diminuindo então a velocidade até que haja o contato rebolo/peça. A partir deste ponto, o sistema altera a velocidade de avanço.

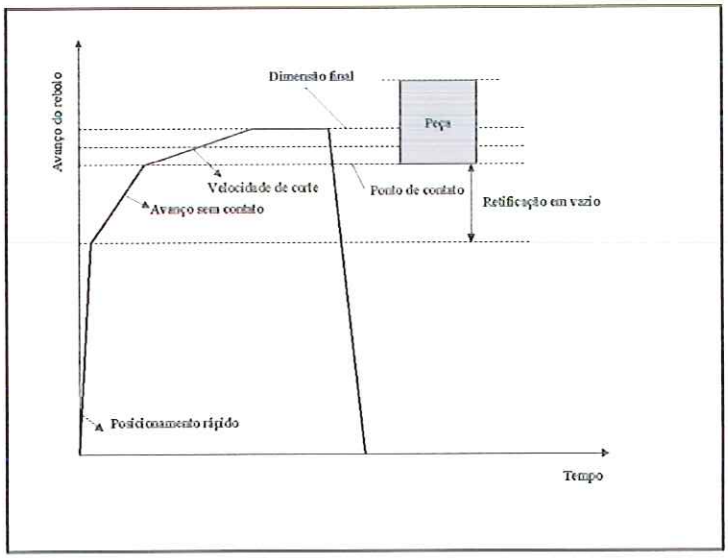


FIGURA 3.3 - Diagrama esquemático de um ciclo de retificação com detecção de contato rebolo/peça, FELIPE JÚNIOR (1996).

O sistema também permite observar se há erros de fixação, presença de picos (por exemplo, uma peça excêntrica ou com sobremetal excessivo) ou ainda se há ausência da peça, podendo, neste caso, ser interpretado também como material com dimensões abaixo das mínimas necessárias para se realizar a retificação.

d) Sistema anti-colisão

Neste sistema é feito um monitoramento durante a movimentação do rebolo para o posicionamento, a fim de se verificar se há a presença de emissão acústica, pois os ruídos provocados na movimentação do rebolo ficam bem abaixo do nível de sinal obtido quando o rebolo toca a peça, o dressador ou o barramento da retificadora.

Desta forma, caso haja a presença de emissão acústica durante a movimentação, o sistema determinará, automaticamente, o desligamento e o afastamento do rebolo, sem maiores consequências para a máquina (FELIPE JÚNIOR, 1996).

e) Detecção de falhas no sobremetal

É feita através de bruscas alterações no comportamento do sinal de emissão acústica em períodos específicos do ciclo, pois o contato rebolo/peça deve ser cada vez mais contínuo após o início da operação de retificação. Portanto, durante o centelhamento (também conhecido como "spark out"), que é a fase onde o rebolo apenas elimina as imperfeições da peça, sem arrancar material, o sinal de emissão acústica deve ser contínuo, ou seja, qualquer variação no sinal de emissão acústica pode significar a presença de falhas na peça, que deve ser eliminada, caso ainda haja sobremetal (FELIPE JÚNIOR, 1996).

f) Sistema de mapeamento acústico do rebolo.

É utilizado para detectar anomalias durante processos de retificação e dressagem. Este sistema foi primeiramente utilizado por TUNDISI (1999) com o objetivo de mapear acusticamente toda a área perimetral da superfície do rebolo durante dressagem. Recentemente, GOMES (2001) utilizou o sistema de mapeamento acústico para relacionar o padrão gráfico do mapa com um determinado tipo de desgaste, dutil ou frágil, que estava ocorrendo durante retificação.

Estas pesquisas desenvolvidas puderam demonstrar a potencialidade deste sistema de mapeamento e muitas outras aplicações tem sido dadas ao uso desta tecnologia. Ao longo deste trabalho, um estudo detalhado será realizado a respeito desta forma de monitoramento.

3.2 Grandezas para monitoramento de eventos

Existem várias grandezas relacionadas ao processo de retificação que podem ser monitoradas em processo para o acompanhamento e controle. A Figura 3.4 mostra alguns problemas de retificação, os tipos de sensores aplicáveis, o status de seu desenvolvimento e de sua implantação industrial. Como se pode verificar nesta figura, ainda há várias características do processo de retificação center-less sem solução industrial para automação tais como: desgaste do rebolo, queima da peça, grau de afiação do rebolo, desgaste do dressador, etc, OLIVEIRA & DORNFELD (2001).

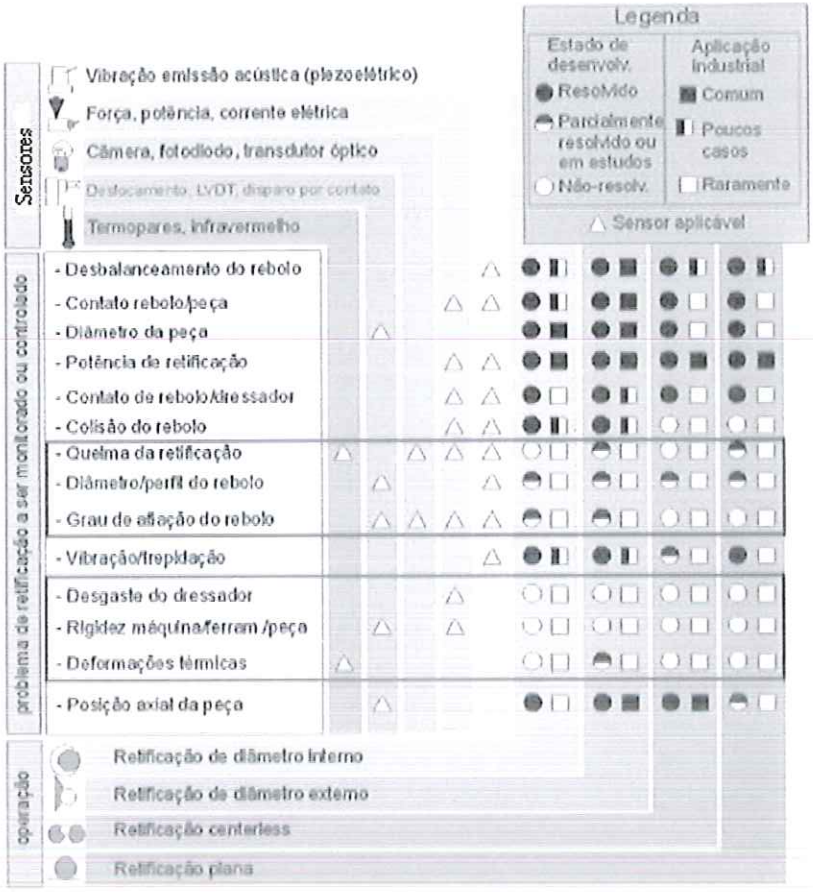


FIGURA 3.4 - Situação da automação da retificação (OLIVEIRA & DORNFELD, 2001).

Nos próximos itens serão apresentados sistemas baseados em grandezas que atendem as necessidades de monitoramento.

3.2.1 Potência

A potência efetiva do eixo árvore tem relação direta com o torque disponível no eixo do motor. Os eventos que ocorrem no eixo árvore refletem na potência requerida pelo motor, KONIG & KUMPLEN (1993).

Apesar da medição da corrente dos motores de avanço ou do eixo árvore representarem a alternativa de monitoramento da força de corte mais simples e a mais fácil de implantar, este procedimento apresenta algumas desvantagens.

Na medição de correntes de "drives", o atrito de deslocamento nas guias altera, significativamente, o sinal obtido e as massas inerciais funcionam como um filtro

passa-baixa, retardando a resposta do sistema às ocorrências repentinas, tais como colisão do rebolo contra o barramento. Além disso, a potência efetiva do eixo árvore é proporcional à força de corte resultante na direção tangencial, um parâmetro com baixa sensibilidade ao desgaste, dificultando o monitoramento desta condição do rebolo.

Apesar dos problemas deste tipo de medição, ela pode ser utilizada para detectar colisão, quebra de ferramenta e desgaste em processos onde as seções transversais de corte utilizadas são grandes o bastante para que as alterações possam ser detectadas, DORNFELD, KONIG & KETTELER (1993).

ALLANSON et al. (1989) pesquisaram os efeitos da deflexão do sistema peça-rebolo-máquina na dimensão final de cilindros de parede fina no processo de retificação center-less. A Figura 3.5 mostra um esquema do modelo da operação.

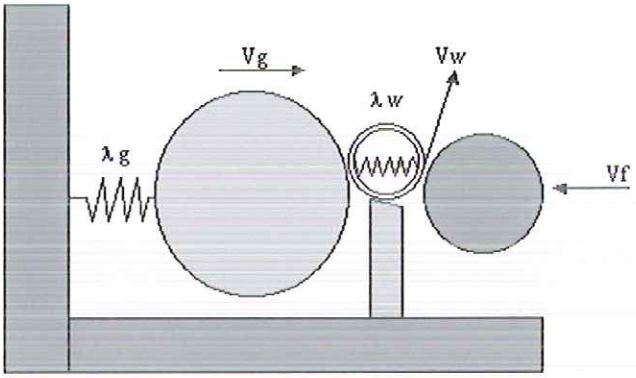


FIGURA 3.5 - Modelo de retificação center-less, de um cilindro de parede fina (ALLANSON et al.1989).

O objetivo é otimizar o tempo de ciclo, definindo uma medida alvo menor que a requerida. Assim, compensa-se o efeito da deflexão do sistema e permite-se que se abrevie o tempo de "sparkout". Para calcular esta sobremedida é necessário que se conheça a constante de tempo do sistema peça-rebolo-máquina.

Esta constante é considerada como o tempo necessário para que ocorra o alívio da deflexão do sistema, ou seja, voltar à posição que se encontrava no início da última operação de retificação. A constante pode ser determinada através do monitoramento da potência consumida pelo motor do eixo árvore, durante "sparkout".

Considerando as seguintes hipóteses: que o coeficiente da força de retificação (força normal/força tangencial) é aproximadamente constante para todas as profundidades de corte, que a velocidade de corte é constante e que a potência elétrica consumida pelo processo é proporcional a mecânica, pode-se assumir, para efeitos de cálculo, que a profundidade de corte é proporcional a potência. A Figura 3.6 mostra o sinal da potência de retificação durante "sparkout".

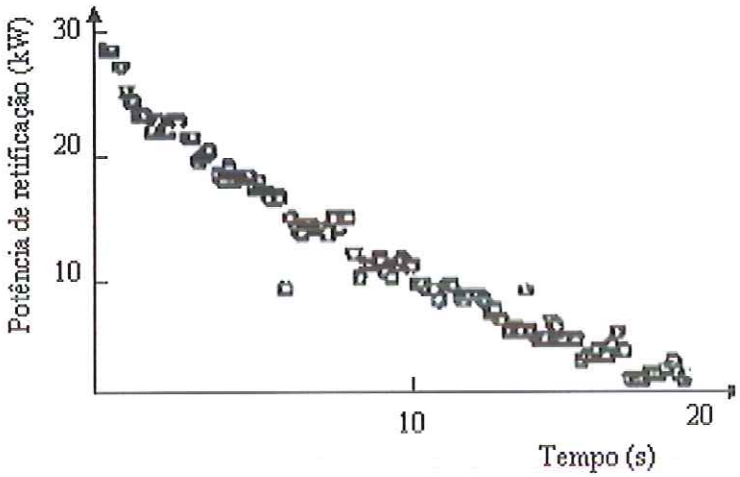


FIGURA 3.6 - Potência de retificação durante sparkout (ALLANSON et al 1989).

INASAKI (1991) realizou experimentos em retificação interna e propôs métodos de monitoramento em processo, utilizando, também, a potência de retificação. O monitoramento da potência do eixo árvore permite calcular a constante de tempo Tm do sistema, que representa a resposta característica do mesmo. A constante Tm é determinada no início do ciclo.

Um valor grande de T indica que o rebolo está ficando cego, que o material da peça é difícil de ser retificado e que a rigidez estática da retificadora não é grande o bastante. Na medida em que diminui a afiação do rebolo, Tm aumenta. Portanto, a constante Tm é um bom índice para determinar a vida do rebolo.

A Figura 3.7 mostra duas curvas do sinal de potência x tempo, sendo que uma refere-se ao início da vida do rebolo e a outra ao rebolo desgastado. Estas curvas foram obtidas em experimentos de retificação interna, similares aos descritos acima,

realizados em outra data. Pode-se observar que há uma mudança de nível e formas das curvas.

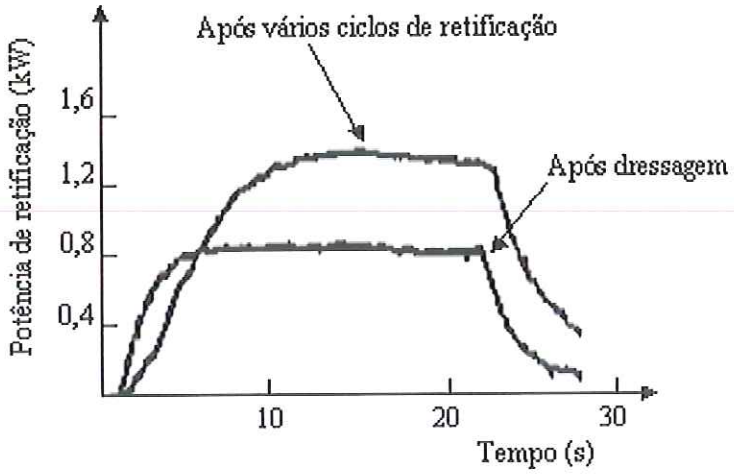


FIGURA 3.7 - Mudança na curva de potência de retificação (WAKUDA & INASAKI, 1991).

Quando ocorre a queima durante o processo, a potência do eixo árvore aumenta repentinamente, como pode ser visto na Figura 3.8.

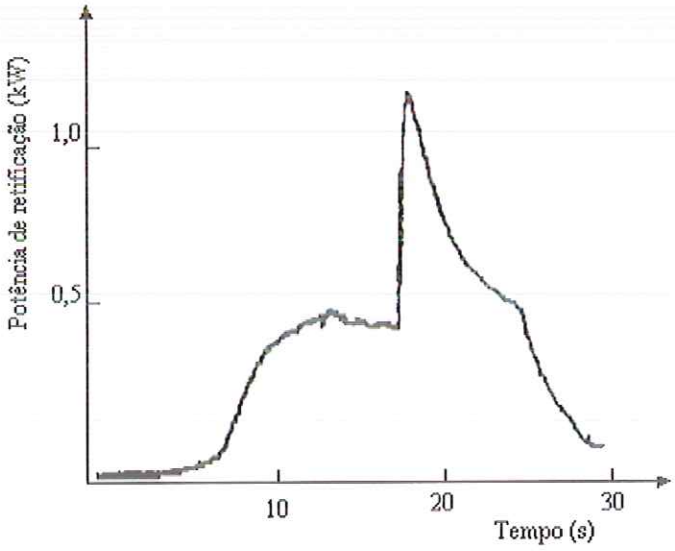


FIGURA 3.8 - Mudança na curva de potência quando ocorre uma queima (INASAKI, 1991).

Logo, o monitoramento da potência consumida também pode detectar a ocorrência de queima.

THOMAS et al. (1995) realizaram experimentos em uma retificadora cilíndrica externa CNC e propuseram um sistema de controle adaptativo em processo, baseado no sinal de potência de retificação. Neste sistema, a constante de tempo é determinada no início do ciclo. Monitorando e processando o sinal de potência em processo, permite-se a otimização do tempo de operação para cada peça usinada. Como por exemplo, no caso de alteração no valor da taxa de avanço, o tempo de sparkout também deve mudar.

A capacidade deste sistema de se adequar à operação de cada peça possibilita também a aplicação da estratégia de sobre-avanço. Nestes experimentos, a variância do sinal de potência é utilizada para detectar o momento de contato rebolo/peça, e este momento é utilizado como referência de início de ciclo. Conclui-se que com este sistema pode-se obter os resultados desejados mesmo com grande variação da deflexão, devido à alterações na afiação do rebolo ou devido a alterações dos parâmetros do processo.

3.2.2 Vibrações de baixa frequência

Os sinais de vibrações podem fornecer informações importantes sobre o estado do processo e sua evolução. As vibrações de baixa frequência refletem as propriedades específicas do sistema porta ferramenta, os estados dos elementos rotativos da máquina, irregularidades da ferramenta e do material da peça, assim como a segmentação básica do cavaco, JUNKAR, FILIPIC & BRATKO (1991).

MORI et al. (1992) apresentaram um sistema de monitoramento em processo e diagnóstico para aplicação em retificação cilíndrica externa. Este sistema utiliza a medição da vibração e sua análise para identificar problemas durante o ciclo de retificação.

Em sistemas de retificação cilíndrica, vibrações importantes ocupam faixas de frequência próximas. Porém, ainda que possuam quase o mesmo nível de sinal, a forma das ondas geralmente diferem, pelo fato de originarem-se de diferentes mecanismos. Quando as vibrações são monitoradas através de um sensor de vibração, o ruído da fonte de tensão deve ser considerado pois se mistura com os sinais de interesse.

Um dos exemplos típicos, das mais significativas vibrações indesejáveis é o de "chatter" regenerativo, que pode ser separado em dois tipos: "chatter" regenerativo da peça e "chatter" regenerativo do rebolo. Embora, usualmente, possuam quase a mesma frequência, as formas de ondas diferem, por que o "chatter" regenerativo da peça é modulado pela rotação da peça e o "chatter" regenerativo do rebolo pela frequência de rotação do mesmo.

A análise da vibração executada por este sistema mostrou que o "chatter" do rebolo/peça e que as vibrações devidas ao desbalanceamento do rebolo exercem efeito significativo na superfície da peça acabada.

Os pesquisadores avaliaram o desempenho deste sistema em experimentos de retificação cilíndrica externa, variando-se as condições de usinagem. Concluíram que o sistema obteve sucesso no diagnóstico das vibrações e nas ações corretivas, podendo ser aplicado com facilidade em outros tipos de processos de fabricação.

ROWE et al. (1987), para investigar os efeitos de alta frequência de ressonância e rigidez, construíram uma retificadora center-less modificada, com alta rigidez estática e frequência de ressonância de 500Hz, para ser comparada a uma máquina convencional. Os resultados obtidos sugerem a construção de futuras retificadoras com alta frequência de ressonância para minimizar as vibrações forçadas. Entretanto, deve-se utilizar um rebolo de arraste de liga de borracha específica para fornecer adequada conformidade estática durante processo. Uma combinação de grau moderado de conformação estática e frequência de ressonância alta foi conseguida, gerando bons resultados. Foi mostrado também, que existe uma faixa ótima de velocidade rotacional da peça para um mínimo erro de circularidade.

3.2.3 Forças de corte

Existem componentes mensuráveis da força de corte dos processos convencionais de usinagem. A força é consequência da deformação plástica nas zonas de cisalhamento, primária e secundária e atrito peça/ferramenta e cavaco/ferramenta no processo abrasivo, DORNFELD, KONIG & KETTELER (1993). No processo center-less ainda deve-se considerar o atrito peça/régua e peça/rebolo de arraste.

O desgaste da ferramenta causa um aumento na força de corte e os componentes da força de corte são parâmetros especialmente bem adequados para o monitoramento do processo, KONIG & KLUMPEN (1993).

TONSHOFF et al. (1998) apresentaram exemplos de monitoramento e controle de vários tipos de processos de usinagem utilizando diferentes sensores, inclusive sensores de força. Um dos exemplos apresentados é sobre o processo de retificação interna, em que o objetivo é a otimização do tempo de processo e da qualidade obtida, utilizando um sistema baseado no controle da força normal de retificação através de atuação no motor de avanço. A força normal de retificação é medida com um dinamômetro piezoelétrico instalado abaixo do eixo árvore. Este sistema permitiu a otimização do tempo de ciclo e a obtenção de furos com boa circularidade. VISHNUPAD, SHIH & SHIN (1995) realizaram um experimento de monitoramento da operação de retificação cilíndrica interna de mergulho, cujo objetivo foi determinar a relação entre as grandezas físicas e as condições do processo, visando a aplicação em monitoramento. A medição de deflexão do eixo árvore foi utilizada para monitorar a força tangencial de retificação.

Como pode ser visto na Figura 3.9, o sinal de um ciclo de retificação, adquirido a partir do sinal do sensor de deflexão, tem pouco ruído, facilitando os cálculos de equações características e valores estatísticos.

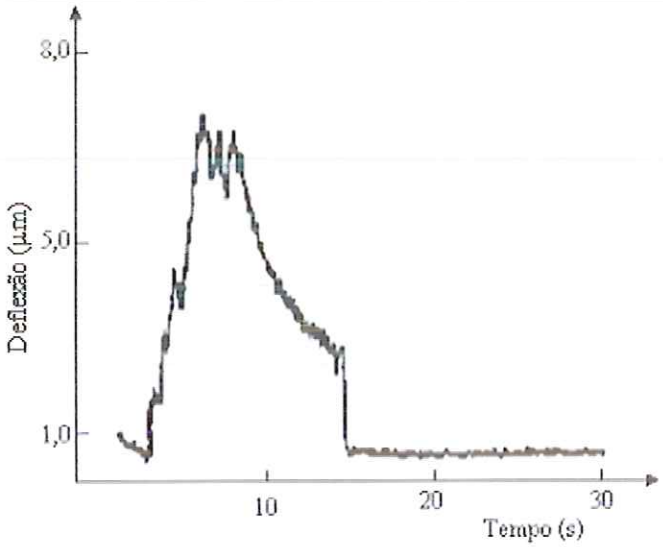


FIGURA 3.9 - Gráfico de deflexão do eixo árvore (VISHNUPAD, SHIH & SHIN, 1995).

Concluiu-se que os valores estatísticos obtidos a partir da medição da deflexão apresentam correlação com a retilineidade, circularidade e batimento da peça resultante.

3.2.4 Emissão acústica

O monitoramento da emissão acústica é um método passivo de teste não destrutivo. Uma vez que a emissão acústica é dependente das características microestruturais do material, já que é gerada pelo movimento de discordâncias, transformações de fase, propagação de trincas e atrito, isto a torna muito útil na indústria metal-mecânica para o monitoramento de processos abrasivos, usinagem, conformação e processos de soldagem. A principal vantagem da utilização da emissão acústica como parâmetro de monitoramento dos processos de fabricação é sua relação direta com a mudança das características microestruturais do material, induzidas pelos parâmetros dos processos ao qual é submetido.

KIM et al. (2001), elaboraram um sistema de monitoramento utilizado para monitorar os estados dos processos de retificação e dressagem, não somente na retificação center-less externa como também na interna.

Estes pesquisadores desenvolveram um sistema de monitoramento usando emissão acústica, chamado monitor de EA, que consiste de três unidades:

1) Unidade de entrada, que recebe os sinais brutos do sensor de EA;

2) Unidade de processamento para obtenção do valor médio quadrático (RMS) do sinal de EA(EArms);

3) Unidade de saída para mostrar os resultados do monitoramento.

Foi verificado que os sinais de emissão acústica caracterizam os estágios de desbaste, acabamento e "sparkout" durante o ciclo de retificação center-less de mergulho de eixos multidiametrais. O gráfico da Figura 3.10(a), apresenta uma condição ideal de retificação, com a amostra apresentando boa circularidade. Já o gráfico da Figura 3.10(b), apresenta uma condição imprópria de retificação, onde observa-se uma etapa de "sparkout" totalmente alterada. Os pesquisadores acreditam que esta mudança seja devido ao fenômeno de "jumping" ocorrido em função de uma altura de régua inadequada.

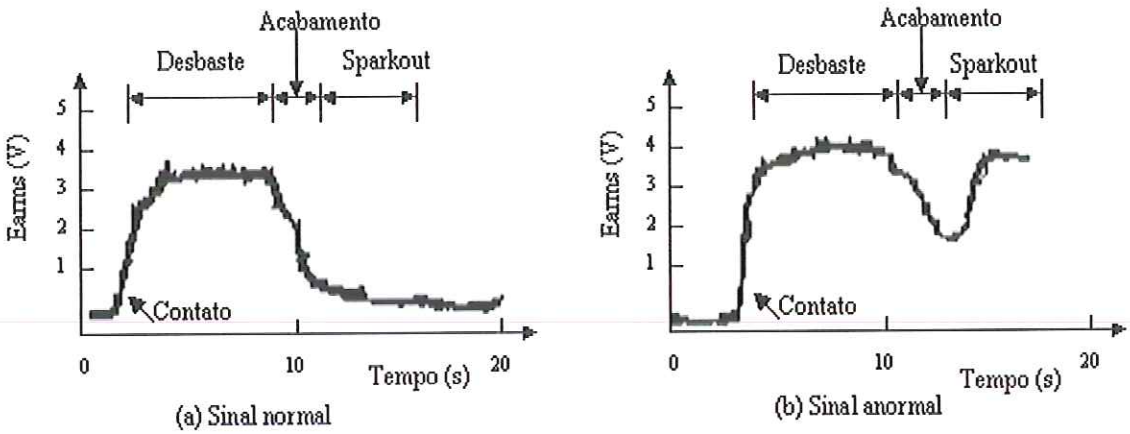


FIGURA 3.10 - (a) Padrão de retificação ideal da peça e (b) Retificação apresentando anomalia no sparkout, (KIM et al, 2001).

Para a condição de retificação center-less interna, variações nos padrões de retificação foram encontradas. A Figura 3.11(a) apresenta condição ideal de trabalho, com os seguintes parâmetros de corte: velocidade de avanço no desbaste: 0,12mm/min e velocidade de avanço no acabamento: 0,06mm/min. A Figura 3.11(b) apresenta "setup" inadequado de trabalho. Neste caso, os parâmetros de corte são os seguintes: velocidade de avanço no desbaste: 0,24mm/min e velocidade de avanço no acabamento: 0,03mm/min.

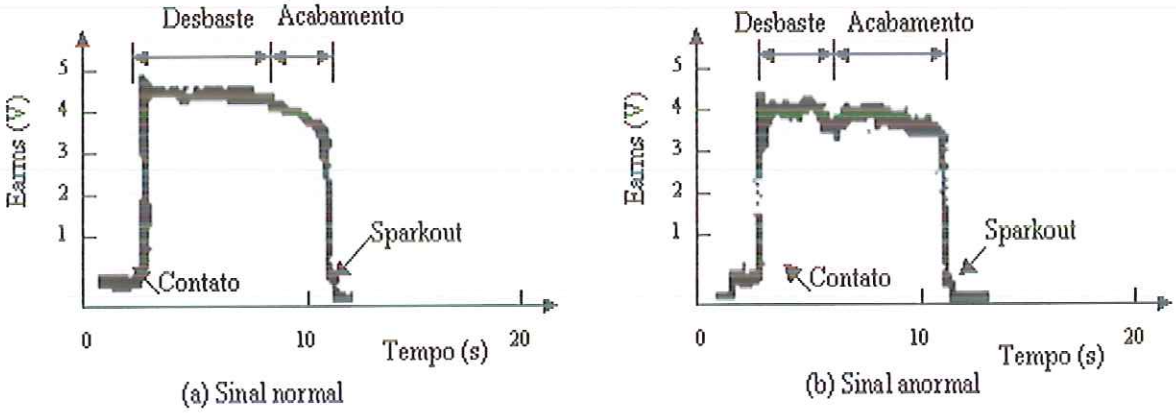


FIGURA 3.11 - (a) Condição ideal de retificação da peça e (b) Representação de setup inadequado de trabalho (KIM et al, 2001).

Uma variação considerável nos sinais de EA devido a alta taxa de avanço foi observada durante desbaste, provavelmente causada por deflexão do eixo do rebolo,

devido a sua baixa rigidez. Para a condição de dressagem dos rebolos, o sistema de monitoramento mostrou-se também eficiente para detecção de anomalias do processo.

Diversos pesquisadores tem utilizado com sucesso a tecnologia de emissão acústica para o monitoramento do desempenho de rebolos e dos diversos processos de fabricação.

Dados detalhados a respeito do uso de EA no processo de retificação serão vistos em itens posteriores. A Figura 3.12 ilustra o processo de filtragem RMS, aplicado ao sinal bruto de emissão acústica.

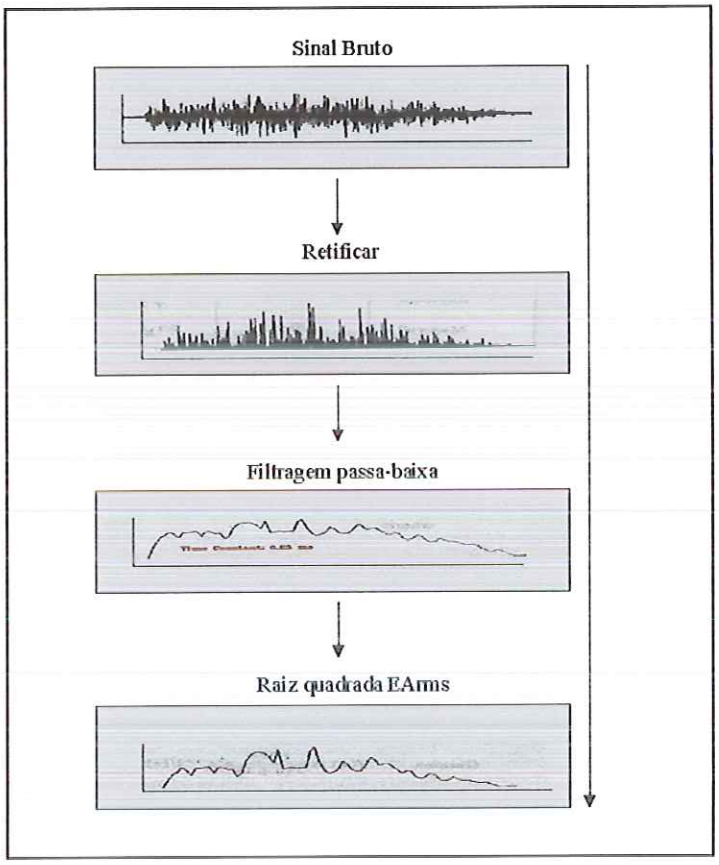


FIGURA 3.12 - Aplicação do processo de filtragem RMS sobre o sinal bruto de EA.

3.3 Monitoramento por emissão acústica

3.3.1Geração da emissão acústica

Segundo KONIG & MEYEN (1990), os fenômenos relacionados com a formação de cavaco na retificação cilíndrica podem ser subdivididos em duas fases.

Inicialmente, ocorre somente o escorregamento do grão abrasivo sobre o material e, esta fase é chamada de elástica. Na segunda fase, começam a ocorrer deformações plásticas e a formação de cavaco. O processo de atrito e deformação plástica que ocorrem na peça durante retificação são acompanhadas por fenômenos relacionados ao rebolo, como desgaste do grão abrasivo e fratura do ligante. Adicionalmente a estes fenômenos, na retificação center-less tem-se ainda que contar com as fontes de atrito provindas do contato peça/régua suporte e peça/rebolo de arraste. A intensidade destes fenômenos é diretamente proporcional ao sinal de EA mensurável. A Figura 3.13, mostra as principais fontes de EA na retificação de metais.

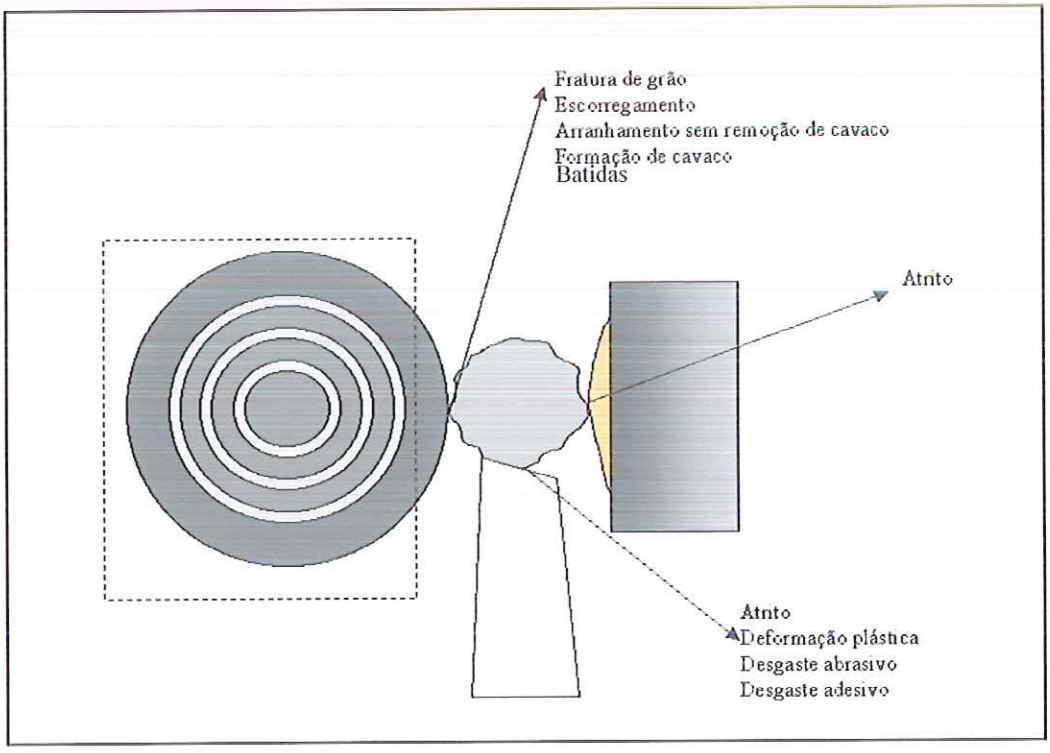


FIGURA 3.13. Principais fontes de emissão acústica na retificação de metais.

3.3.2 Sensores de emissão acústica

Segundo KONIG & MEYEN (1990), as ondas de ultra-som produzidas na usinagem são refletidas, modificadas e amortecidas por várias juntas e interfaces. Finalmente são detectadas pelo sensor como ondas Rayleigh com amplitudes na faixa sub-micrométrica. Onda Rayleigh é um tipo particular de onda mecânica em materiais que apresenta amplitudes mais significativas junto a superfície. Estas ondas tem suas amplitudes atenuadas exponencialmente no sentido de profundidades crescentes dentro do material, BEDFORD & DRUMHELLER (1994).

Dependendo do seu projeto, os sensores convertem ou a velocidade ou a aceleração do sinal em uma diferença de potencial proporcional. A maioria dos sensores utilizados no monitoramento do processo, dentro do espaço de trabalho da máquina, são os que exploram a relação entre a deformação elástica e a tensão elétrica induzida em certos materiais, ou seja, o efeito piezoelétrico.

3.3.3 Resposta em frequência

De acordo com KONIG & KLUMPEN (1993), sensores de ultra–som que detectam o som emitido pelo processo de retificação são sistemas oscilantes cujas frequências de ressonância são determinadas pelo seu projeto. O sensor representa, portanto, o primeiro filtro do sinal detectado na cadeia de medição, com amortecimento ou amplificação dependentes da faixa em que se encontra sua frequência natural.

Assim, o comportamento da frequência do sensor de EA tem um efeito decisivo no espectro de frequência utilizável para diagnóstico. O projetista de sistemas de monitoramento para retificação deve considerar as propriedades específicas do sensor dentro das faixas de frequência selecionadas para análise.

DONG & WEBSTER (1996) realizaram experimentos utilizando duas máquinas: uma retificadora cilíndrica externa, uma retificadora center-less e dois sensores de EA de acoplamento fluídico cujas características de resposta em frequência estão apresentadas na Figura 3.14.

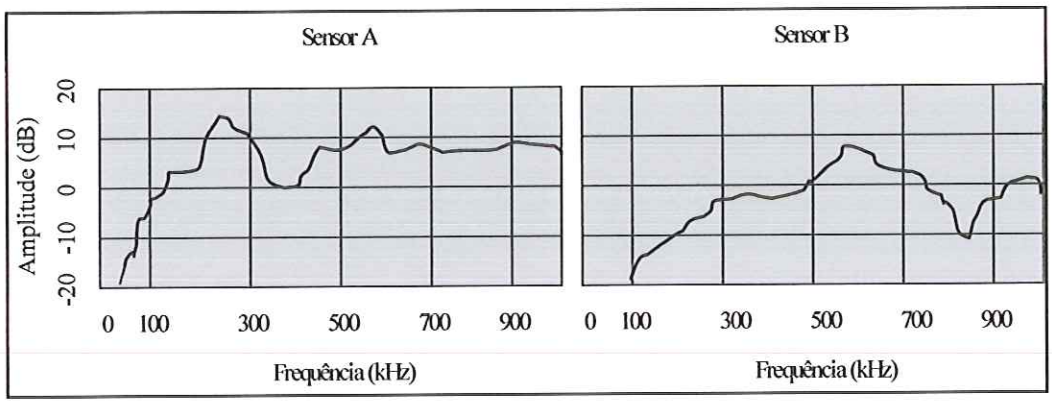


FIGURA 3.14 - Resposta em frequência de sensores de EA (DONG & WEBSTER, 1996).

A frequência natural principal do sensor A é 325kHz e uma das secundárias é 650kHz. A frequência natural principal do sensor B é 515kHz e uma de suas secundárias é 200kHz. A faixa de frequência investigada vai de 100 a 1000kHz e é selecionada através de um filtro passa-banda.

A Figura 3.15 mostra os sinais brutos de EA, adquiridos nos momentos dos contatos rebolo/peça, para as duas máquinas utilizando o sensor A.

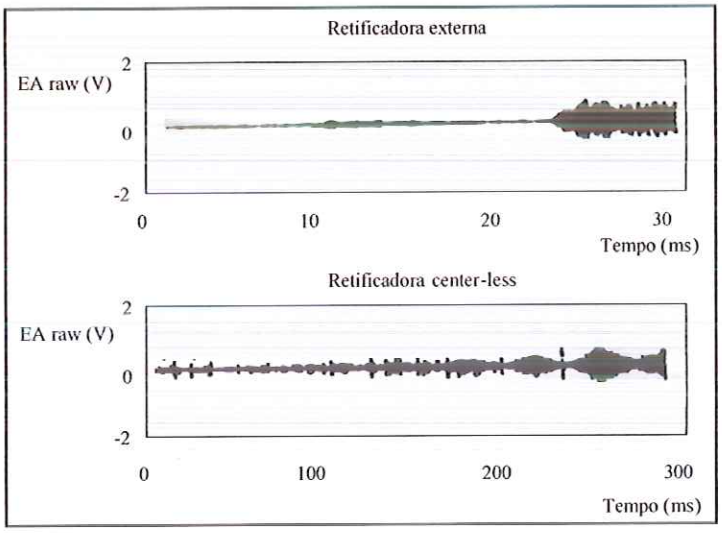


FIGURA 3.15 - Sinais brutos de EA gerados pelas duas máquinas.

Segundo DONG & WEBSTER (1996), o sinal de EA original é uma onda que possui componentes de banda estreita de frequência amplamente distribuídos e que possuem várias intensidades em diferentes bandas. Os fenômenos mostram também,

a grande influência das características de frequência do sensor sobre a frequência de saída, que não é igual à frequência real da EA original.

3.3.4 Monitoramento do ciclo de trabalho

Para DORNFELD (1992), a retificação é um processo no qual a aplicação do monitoramento por EA tem particular sucesso. Outras técnicas tipicamente empregadas, como sensores de força ou torque, são insensíveis a uma grande parte do comportamento do processo devido à baixa taxa de remoção de material. No processo de retificação, as altas velocidades relativas entre rebolo e peça garantem uma fonte significativa de EA.

KAKINO et al. (apud CHANG, DINIZ & DORNFELD, 1992) compararam a sensibilidade de um sensor de EA e observaram que este detectou o contato rebolo/peça 17.5ms antes que o sensor de aceleração, com uma velocidade de aproximação rebolo/peça de 18.5μm/s.

KLUFT et al. (1994) descreveram o uso de EA para detectar contato rebolo/peça usando limites estáticos. Os limites fixos são relacionados a um sinal normal 100% obtido com um rebolo novo ou recém dressado. Um limite inferior ao valor de 100% é utilizado para detecção de contato. Quando o sinal do sensor cruza este limite, um sinal é enviado ao CNC da máquina. A Figura 3.16 mostra os limites utilizados no monitoramento.

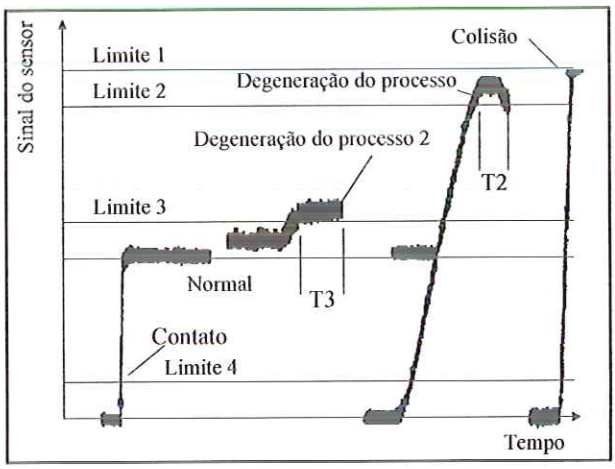


FIGURA 3.16 - Limites estáticos para monitoramento (KLUFT, 1994).

O limite utilizado para a detecção de contato é o limite de número 4, bem próximo do sinal zero, para que a detecção ocorra ao primeiro contato entre rebolo e peça. Com a utilização deste monitoramento, pode-se reduzir o tempo de retificação, conforme mostra a Figura 3.17.

As linhas pontilhadas representam o sistema convencional, sem monitoramento. Este sistema tem 3 fases: o acionamento rápido, o avanço e depois acabamento. No sistema monitorado, a primeira fase é idêntica mas depois é inserida uma nova fase, ou seja, o avanço de retificação em vazio (com velocidade entre acionamento rápido e avanço de trabalho), até a detecção do contato. A fase de avanço de trabalho é então encurtada, proporcionando economia de tempo. As duas últimas fases são também idênticas ao processo normal.

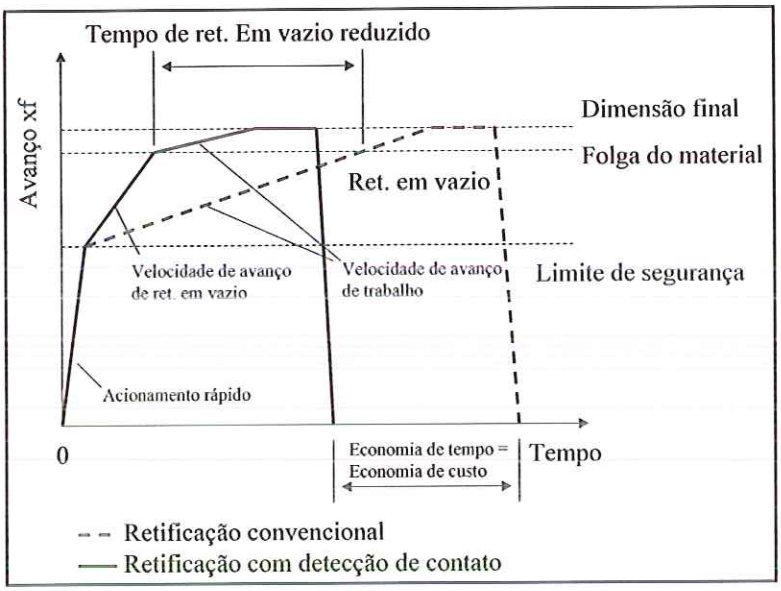


FIGURA 3.17 - Aplicação de monitoramento para otimizar o ciclo de retificação.

KLUFT et al. (1994) também utilizaram o monitoramento de EA para prevenir colisões. Na Figura 3.16, o limite 1, bem acima do sinal de 100%, foi utilizado com este intuito. Assim que este limite é excedido, uma mensagem do sistema de monitoramento interrompe o processo e faz a retração do cabeçote do rebolo para minimizar danos por colisão.

Ainda na Figura 3.16, os limites 2 e 3 foram utilizados para detectar anormalidades no processo, que provocaram elevações do sinal menos bruscas que a

colisão. Estes limites possuem um tempo de tolerância, permitindo que o sinal os ultrapasse instantaneamente, mas o sistema somente reage se o sinal permanece acima do valor por algum tempo. Uma mensagem do limite 3, por exemplo, pode significar que o rebolo está cego, e uma nova dressagem é então ordenada. A ultrapassagem do limite 2 pode ser causada por uma peça mal fixada, uma peça trocada, ou ainda fora de especificação.

Durante a retificação, o valor do sinal de EA pode ser monitorado para detectar o corte em vazio, provocado por falhas na peça, sobremetal insuficiente ou erros de programação. Para isso, uma janela de monitoramento foi estabelecida, conforme mostra a Figura 3.18, sincronizada com o tempo de usinagem da peça. Se durante a extensão da janela, o valor monitorado não atingir o valor limite estabelecido significa que não houve retirada de material da peça.

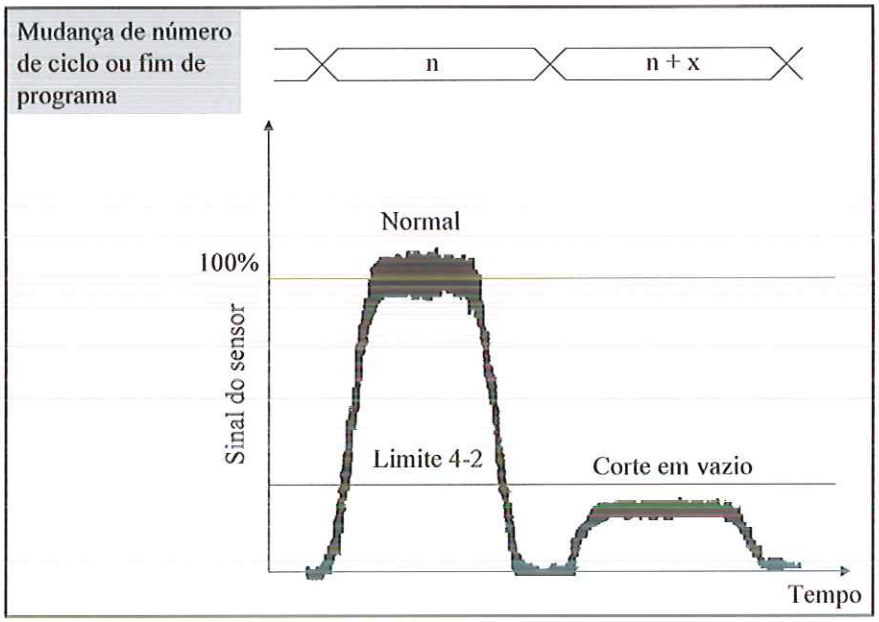


FIGURA 3.18 - Princípio de detecção de corte em vazio (KLUFT, 1994).

O valor do limite 4-2, na Figura 3.18, ficou abaixo da linha de 100%. A peça (n+x) apresentou sinal abaixo deste limite, o que indica que não houve retirada de material suficiente para atender o especificado no projeto da peça.

DORNFELD & CAI (1984) apresentaram um estudo sobre as influências dos parâmetros de retificação na EA. Este é o primeiro trabalho publicado sobre EA em retificação que se tem registro. A Figura 3.19 apresenta o esquema montado para realizar os testes necessários.

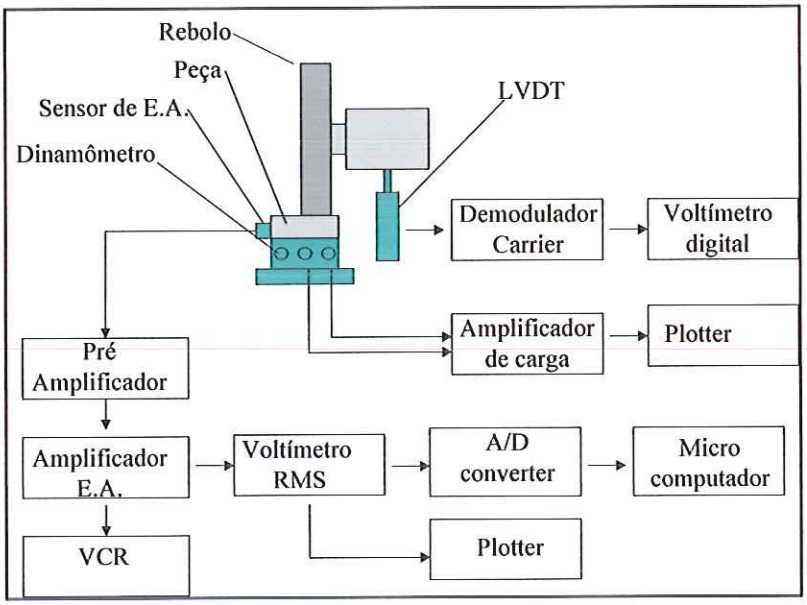


FIGURA 3.19 - Esquema montado para testes (DORNFELD & CAI, 1984).

DORNFELD & CAI (1984) propuseram então o uso do sistema para monitorar o centelhamento e a detecção de contato. Para monitorar o centelhamento, o sinal de EA foi medido em cada passe do rebolo pela peça, depois que o rebolo parou de avançar contra a peça. A medida em que mais passes foram sendo realizados, sem aumentar a profundidade de corte, o sinal foi caindo até que se tornou estável, como mostrado na Figura 3.20.

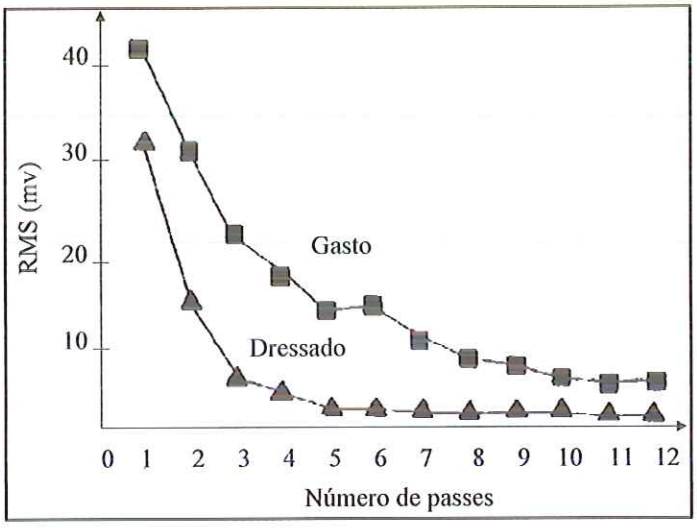


FIGURA 3.20 - RMS da EA versus número de passes (DORNFELD & CAI, 1984).

Na Figura 3.20 pode-se observar que, para o rebolo dressado e, portanto, afiado, o sinal se estabilizou depois de cinco passes, enquanto que para o rebolo desgastado o sinal só se estabilizou depois de dez passes.

Para o monitoramento de contato, os autores fizeram um estudo do sinal gerado para diversos valores de Hr, definido como a distância entre rebolo e peça. Destes estudos, três regiões distintas são determinadas. Na primeira, não há interação significativa, Hr é maior que 22.9μm e o sinal obtido é essencialmente ruído da máquina. Na segunda, há interação entre o fluido e o rebolo e Hr está entre 5.1 e 22.9μm. Na terceira região, acontece a interação entre rebolo e peça, Hr é menor que 5.1μm; há uma interação violenta entre rebolo, fluido e peça e o contato inicial entre rebolo e peça, que não pode ser detectado por medições de força ou centelhamento visível. A Figura 3.21 mostra a variação do sinal de EA com o valor de Hr.

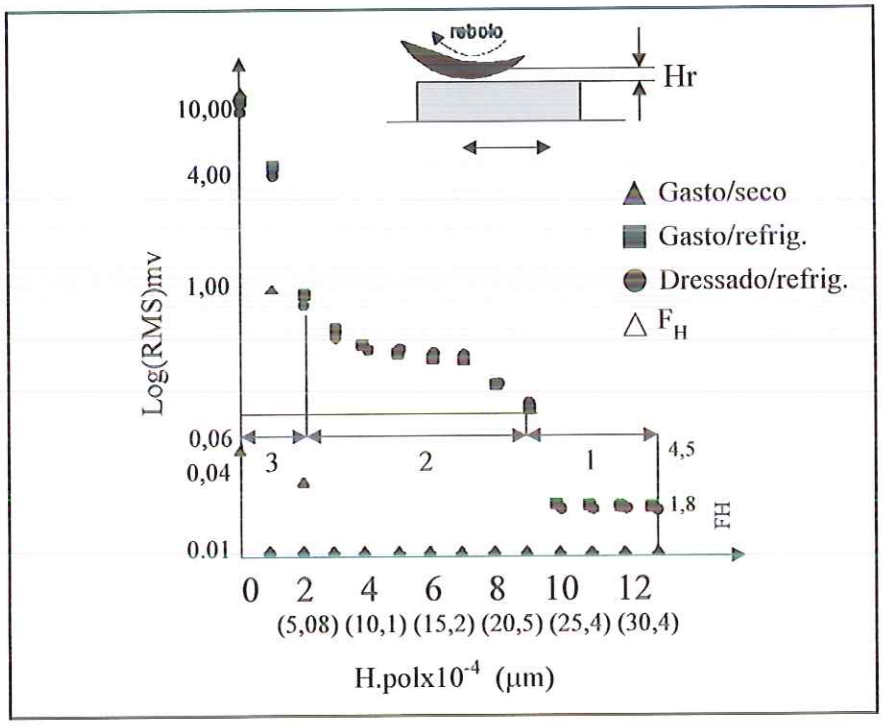


FIGURA 3.21 - Variação da emissão acústica com a distância Hr (DORNFELD & CAI, 1984).

KONIG & MEYEN (1990) utilizaram um sistema de EA em retificação cilíndrica com sensores fixados no ponto e no contraponto, para o monitoramento do processo. O sinal foi utilizado para detectar se todas as fases do processo são realizadas com sucesso, sem falhas. O processo foi dividido em três fases: desbaste,

acabamento e acabamento fino. A distinção das fases é bastante clara, conforme pode ser visto na Figura 3.22, e é atribuída à diferença nas taxas de remoção entre as fases.

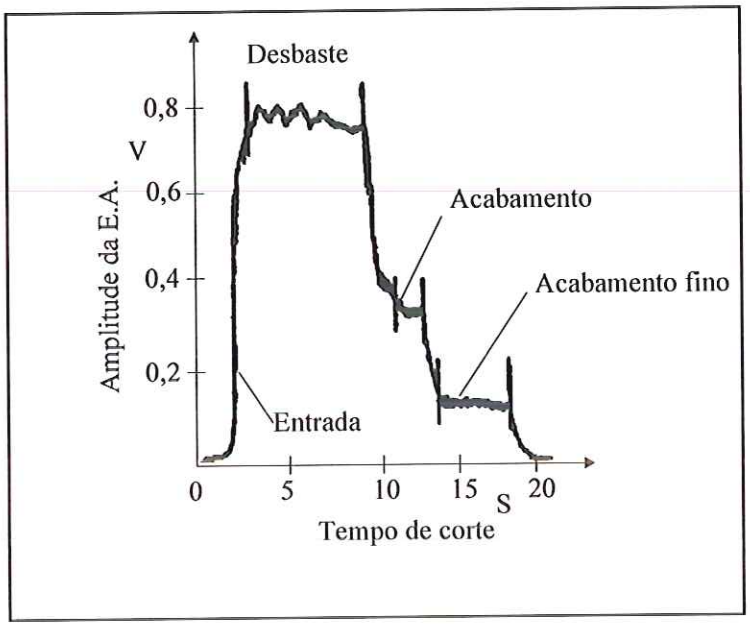


FIGURA 3.22 - Sinal de EA na retificação (KONIG & MEYEN, 1990).

As vantagens apontadas para sensores de EA em aplicações industriais são estabilidade térmica, alta sensibilidade, alta dinâmica e facilidade de instalação. A fim de tornar o monitoramento universal no processo de retificação, os autores sugerem que o sistema seja capaz de identificar automaticamente as fases do processo. Para este fim, é proposto o uso de um histograma de amplitude do sinal RMS, obtido com o uso de um microprocessador, que divide os valores obtidos em um número de classes de frequência apropriado para a faixa de medição a ser feita. O histograma exibe um número de sinais mais pronunciado, correlacionado com as várias fases do processo. Usando um algorítmo recursivo, o microprocessador pode identificar o início e o fim de cada fase do processo. Um exemplo de histograma de amplitude é mostrado na Figura 3.23.

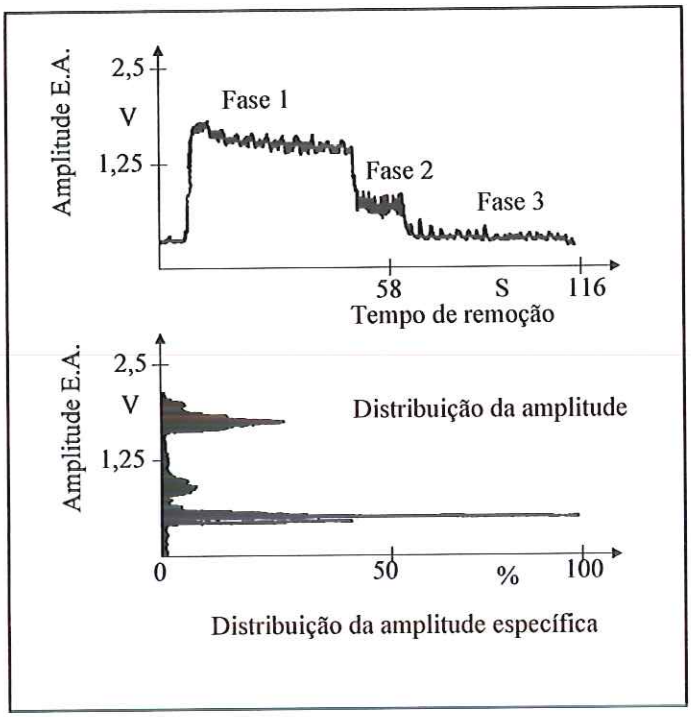


FIGURA 3.23 - Histograma de amplitudes (KONIG & MEYEN, 1990).

No trabalho de KONIG & MEYEN (1990), o sinal de EA foi usado também para detectar vibrações "chatter" e permitir bom acabamento superficial da peça. Para monitorar este problema, usou-se o componente dinâmico da EA.

GRABEC & KULJANIC (1994) utilizaram redes neurais para prever a rugosidade superficial através do nível de EA gerada na retificação. Utilizando um sensor com acoplamento fluídico, diversas leituras de EA foram realizadas, e a densidade de espectro do sinal entre 0 e 500kHz foi utilizada como parte do vetor. A rugosidade também foi medida para cada peça e aplicada como parâmetro do processo. Após o aprendizado, um novo espectro de EA foi usado para alimentar a rede. A Figura 3.24 mostra a rugosidade real medida na peça (a) e a estimada pela rede (b).

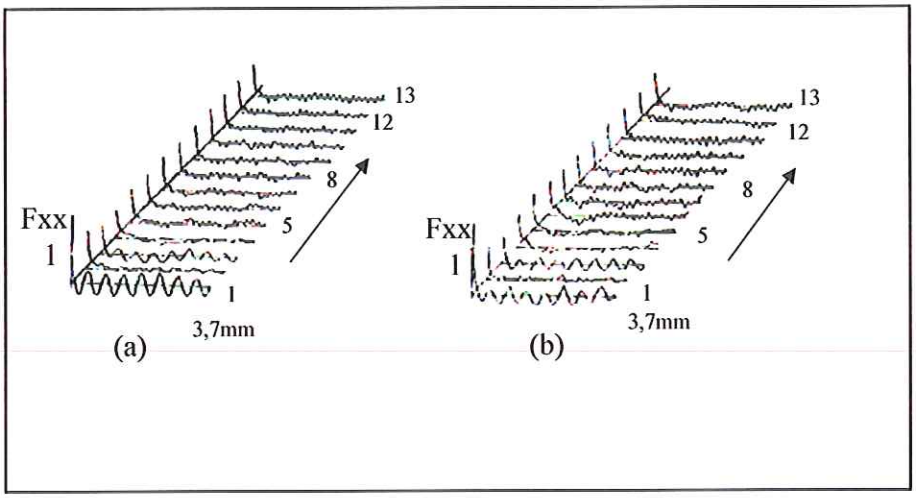


FIGURA 3.24 - Rugosidade superficial medida (a), estimada (b) (GRABEC & KULJANIC, 1994).

BLUM & DORNFELD (1990) utilizaram EA com sensor acoplado à mesa suporte da peça em retificação plana e no contraponto, em retificação cilíndrica, para monitorar detecção de contato e centelhamento. Realizando diversos testes com rebolos afiados e não afiados, os autores mostraram que o sinal de EA apresenta uma queda de nível a cada passe, o que significa que a deformação da máquina está sendo eliminada. Quando o sinal se estabiliza, o centelhamento esta finalizado e não há mais remoção de material, mas apenas atrito dos grãos do rebolo na peça.

3.3.5 Monitoramento da dressagem

A Figura 3.25 mostra como o monitoramento pode ser usado para otimizar a dressagem. O programa CNC é modificado de modo que o dressador não mais execute passes em vazio, mas se aproxime radialmente do ponto do rebolo que, empiricamente se sabe tem o menor desgaste. Quando o contato entre o dressador e rebolo é detectado, o controle numérico pára o movimento de avanço e começa a executar passes de dressagem a partir deste ponto. Os passos de dressagem são continuados apenas até que o rebolo fique com o contorno desejado, isto é, até que o primeiro movimento completo sem defeitos, seja detectado automaticamente. A operação de dressagem é então terminada e a máquina volta ao processo de retificação.

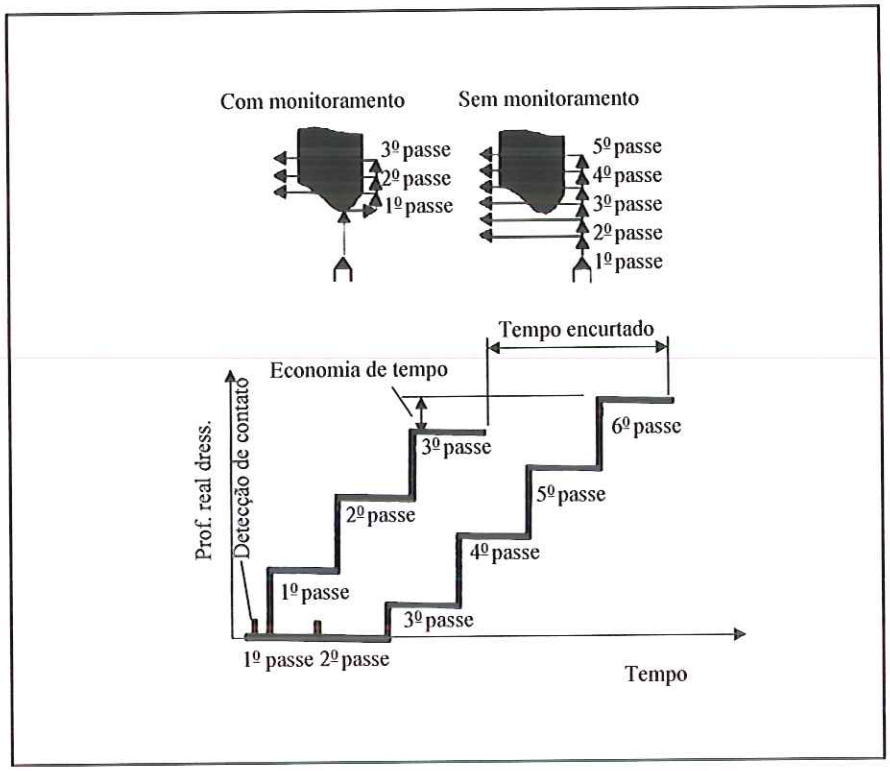


FIGURA 3.25 - Otimização de operação de dressagem (KLUFT, 1994).

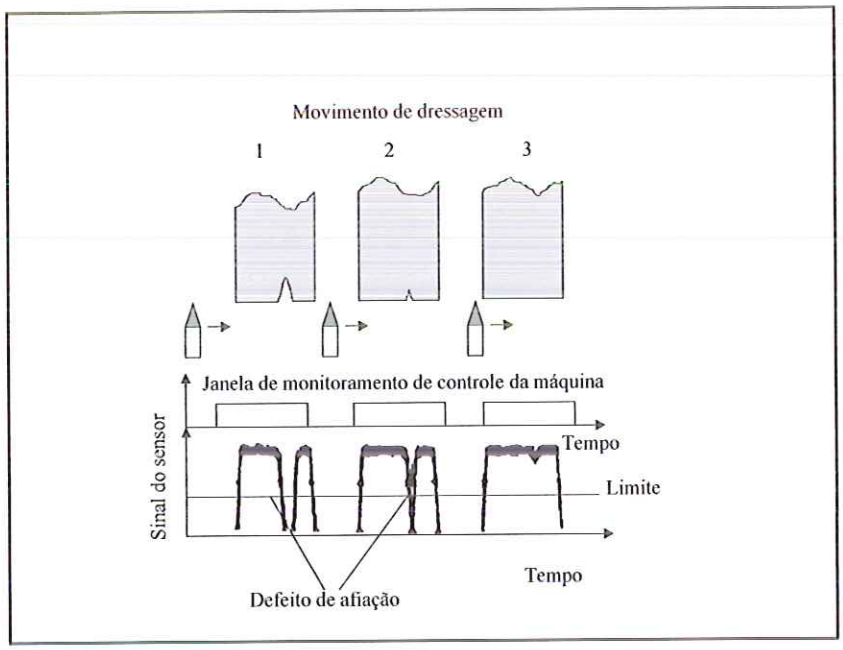


FIGURA 3.26 - Detecção de defeitos durante a dressagem (KLUFT, 1994).

A Figura 3.26 ilustra o comportamento do sinal durante a dressagem de um rebolo com defeito no perfil. A dressagem é repetida até que o sinal se mantenha acima do limite durante todo processo.

WESTKAMPER (1993) descreveu o uso de um sistema de monitoramento por EA, com um sensor colocado no rotor do motor do rebolo para retificação interna, conforme mostrado na Figura 3.27.

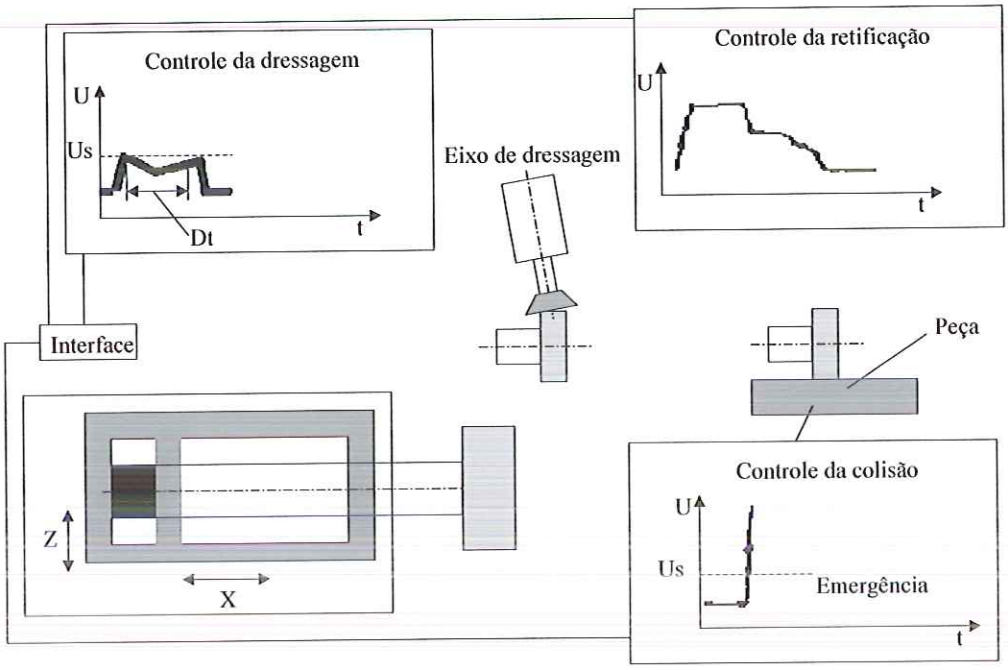


FIGURA 3.27 - Sistema de monitoramento utilizando EA (WESTKAMPER, 1993).

O sistema apresentado pode verificar o controle de colisão, controle do processo de retificação ou ainda controle da dressagem. A Figura 3.27 apresenta três janelas de controle ilustrando as aplicações do sistema. Na janela do controle de colisão, um valor limite Us é estipulado, e o sistema aciona um alarme se este limite é ultrapassado. Na janela de controle de dressagem, um limite Us também é estipulado, e o alarme é acionado se o valor do sinal medido cai abaixo deste limite por um intervalo de tempo Dt. No caso do controle do processo, observa-se o comportamento do sinal ao longo da retificação, monitorando o seu comportamento. Quaisquer falhas no processo são detectadas por variações neste comportamento.

KONIG & KLUMPEN (1993a) propuseram o uso da EA para monitoramento da dressagem. Segundo os autores, as estratégias modernas de monitoramento do processo de dressagem baseiam-se em limites estáticos. Quando o valor RMS da EA cai abaixo do limite durante o processo, um sinal é emitido. Este método, entretanto, depende de um sinal constante de EA durante a dressagem. Quando rebolos perfilados são dressados, o perfil do rebolo deve ser dividido em elementos geométricos, com limites individuais, pois o sinal pode variar de acordo com as condições de movimento do dressador.

A Figura 3.28 mostra a dressagem para um perfil reto e outro com contorno, onde o alarme é acionado devido às variações na geometria da dressagem durante a mudança de trajetória do dressador.

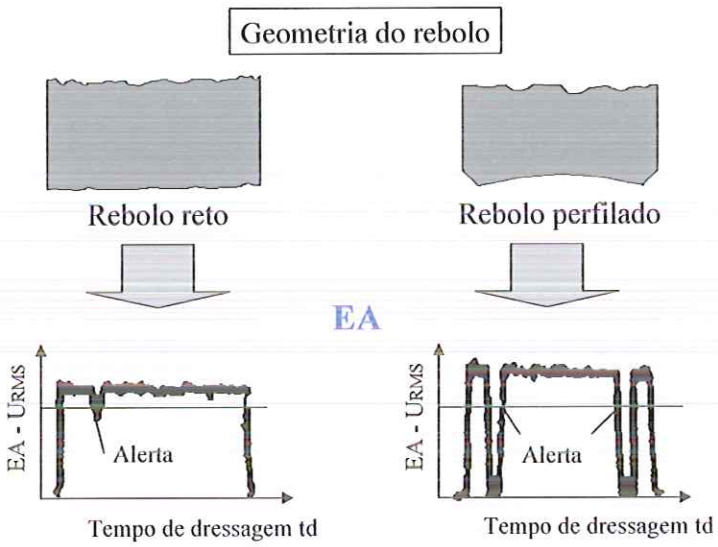


FIGURA 3.28 - Sinais de dressagem para os rebolos reto e perfilado, (KONIG & KLUMPEN, 1993a).

KONIG & MEYEN (1990) utilizaram a EA para monitorar a dressagem e a retificação. No monitoramento da dressagem, o processo é repetido sucessivas vezes, até que o sinal gerado seja constante. A Figura 3.29 ilustra o rebolo utilizado, mostrando seu desgaste irregular. Este desgaste, em forma de cone, foi provocado pelo uso do rebolo em retificação cilíndrica de passagem, que causa maior desgaste nos cantos do rebolo.

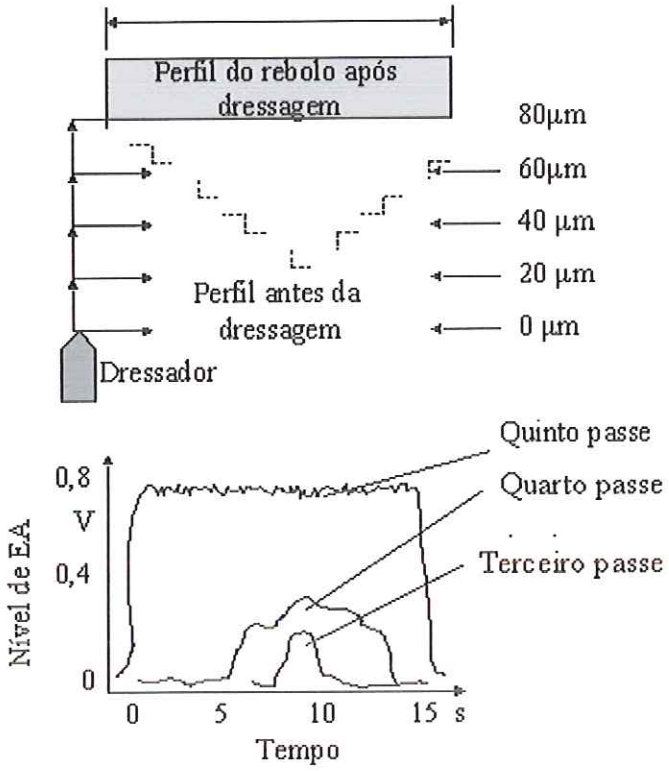


FIGURA 3.29 - Dressagem de rebolo que apresenta perfil irregular e respectivos sinais de EA.

São necessários 5 passes de dressagem para que o sinal se torne constante, o que indica que toda extensão do rebolo foi dressada e nas mesmas condições (mesma profundidade de dressagem).

Em um outro exemplo, é monitorada a dressagem de um rebolo perfilado, feita com um dressador de ponta única de diamante controlado por CNC. O erro máximo admitido no perfil é de 2μm. O perfil do rebolo e o sinal obtido na dressagem são mostrados na Figura 3.30. O dressador percorre as áreas I, II, III e novamente a II. No primeiro passe na área II, não houve remoção suficiente de material, mostrada no sinal de EA.

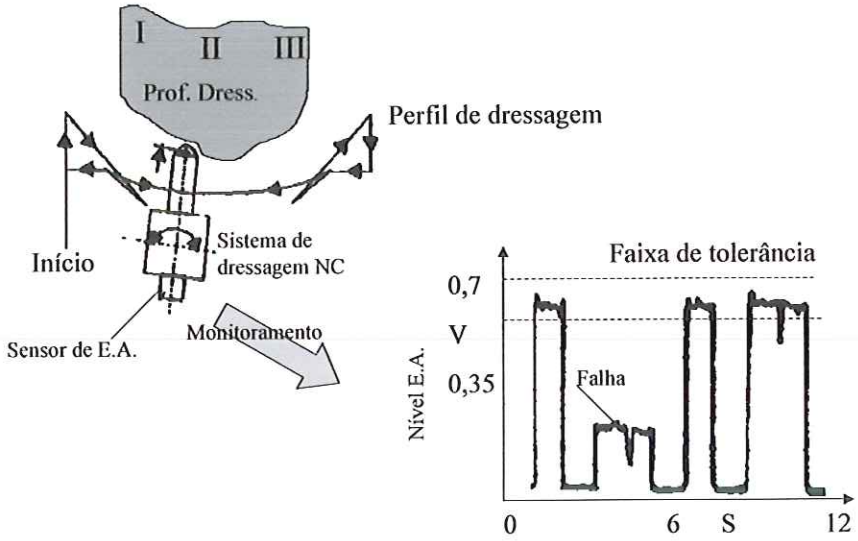


FIGURA 3.30 - Dressagem do rebolo perfilado, (KONIG & MEYEN, 1990).

O sistema também é usado para a detecção de contato dressador/rebolo, para rebolos de CBN. Como estes rebolos são muito caros, é interessante que a posição seja bem conhecida para que a dressagem realizada seja mínima. Segundo os autores, utilizando a fixação correta do sensor e os filtros específicos de frequência, é possível detectar o contato do dressador com o rebolo ao primeiro toque, mesmo para dressadores rotativos.

KONIG & KLUMPEN (1993b) descreveram o uso de EA para o monitoramento da retificação e da dressagem. Na dressagem, são utilizados limites fixos, e o sinal deve permanecer acima destes limites. No caso de rebolos de CBN não eletrodepositados, os rebolos são perfilados e depois devem ser avivados. Este avivamento é feito com um bloco, normalmente feito do mesmo material utilizado em rebolos convencionais (óxido de alumínio). O rebolo de CBN corta este bloco, que deve provocar o desgaste da liga, liberando espaço para cavacos e para o fluido refrigerante escoar. Este avivamento normalmente é feito manualmente, e o resultado é totalmente dependente da habilidade do operador.

Através do monitoramento da EA, gerada no avivamento, é possível obter uma maior repetibilidade no processo. A Figura 3.31 mostra o resultado obtido por KONIG & KLUMPEN (1993b).

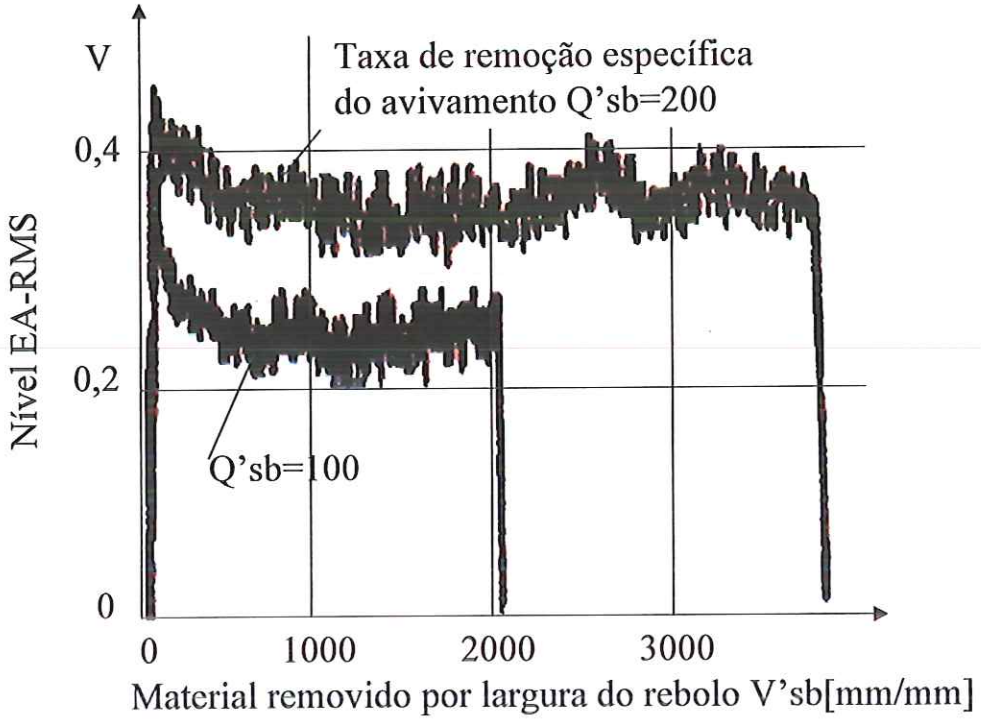


FIGURA 3.31 - EA no avivamento de CBN (KONIG & KLUMPEN, 1993b).

O valor V`sb representa o volume total de material removido do bloco, dividido pela largura do rebolo, e o valor Q`sb representa a taxa de remoção de material durante o avivamento, também dividida pela largura do rebolo. O experimento mostra resultados para dois valores diferentes de Q`sb, 100 e 200. Nos dois casos, o nível de EA sofre um crescimento rápido inicial, seguido por um decréscimo, tendendo a um valor constante, que é determinado pela taxa de remoção. Segundo KONIG & KLUMPEN (1993b), uma vez que este valor seja alcançado, o processo pode ser interrompido pois o avivamento desejado já foi atingido.

INASAKI (1985) utilizou EA para monitorar retificação cilíndrica e dressagem. Dois sensores de EA foram utilizados, um colocado no contraponto da máquina e outro no suporte do dressador. Os dois sensores são ligados juntos no mesmo pré-amplificador.

Na dressagem, a profundidade mínima é garantida através do monitoramento do sinal gerado no processo. Se o sinal permanece constante, indica que o rebolo foi

dressado de maneira uniforme e o possível desgaste irregular foi compensado. Caso contrário, a dressagem deve ser repetida.

Ainda na dressagem, o sinal de EA é usado para prever o comportamento do processo de retificação. Sabe-se que ao aumentar a profundidade de dressagem, obtém-se um aumento na rugosidade da peça e no sinal de EA, até um limite onde maior profundidade não mais significa maior agressividade. Também o avanço de dressagem provoca aumento de agressividade, até o limite onde Ud = 1. Assim, se for estudada a relação de avanço de dressagem (fd) com o nível do sinal gerado de EA e com rugosidade Ra, pode-se obter uma nova associação entre o sinal de EA e a rugosidade. A Figura 3.32 mostra os resultados obtidos neste estudo.

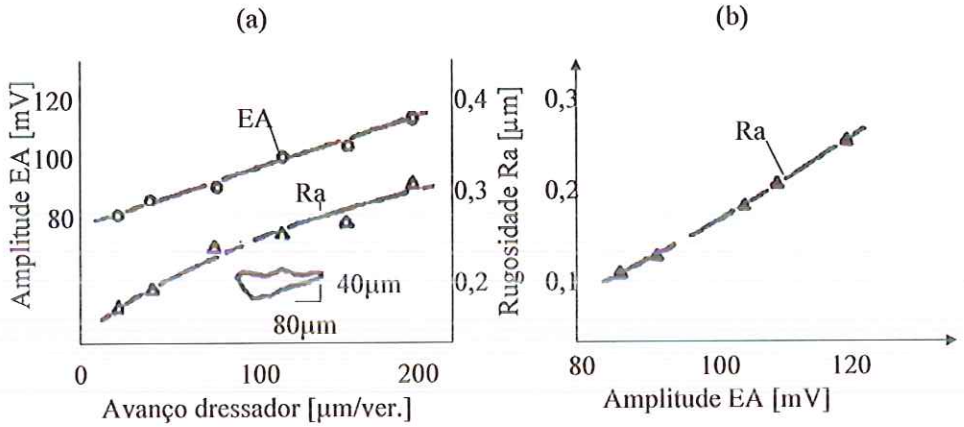


FIGURA 3.32 - Dressagem versus EA versus rugosidade: (a) Influência de fd sobre a EA. (b) Relação entre EA e rugosidade (INASAKI, 1985).

Em 3.32 (a), é estudada a influência de (fd) sobre EA e Ra. Em 3.32 (b), este estudo é usado para relacionar EA com Ra. Assim, monitorando o valor de EA, pode-se ter uma idéia de como será a rugosidade da peça. O mesmo resultado mostrado em 3.32 (a) pode ser obtido variando a profundidade de dressagem ad.

3.3.6 Emissão acústica versus força de corte

WESTKAMPER (1993) realizou uma comparação entre o sinal de EA e as forças de corte, medidas em uma operação de retificação interna, tal qual o sistema mostrado na Figura 3.33. O resultado é mostrado na Figura 3.34.

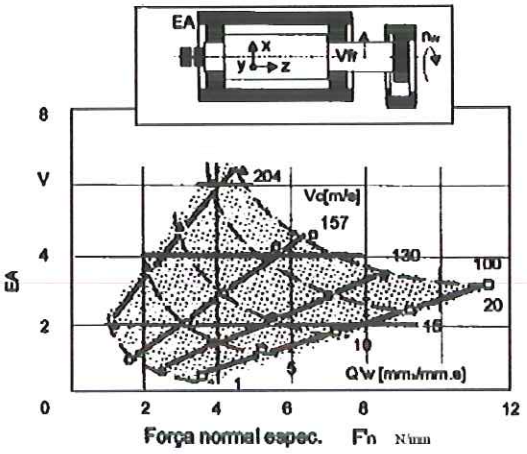


FIGURA 3.33 - Comparação entre forças de corte e sinal de EA, (WESTKAMPER, 1993).

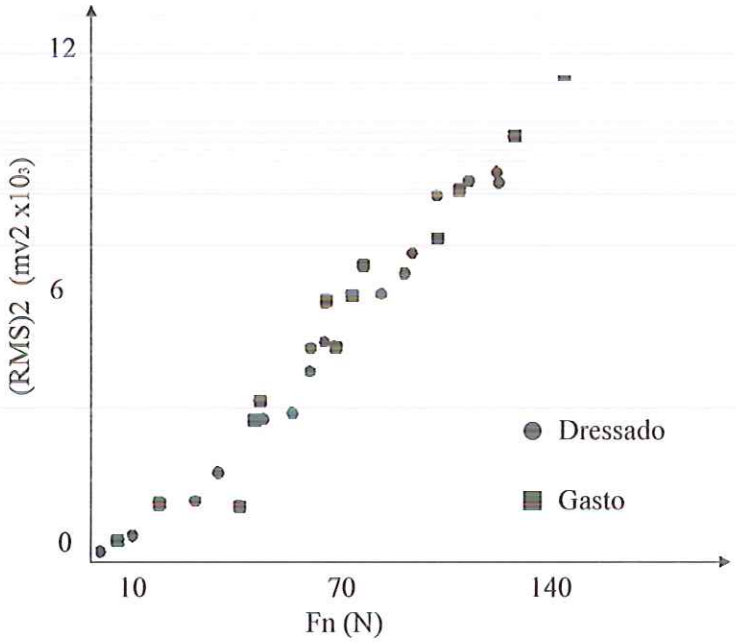


FIGURA 3.34 - EA $(RMS)^2$ versus F_n (DORNFELD & CAI, 1984).

Com uma velocidade de corte constante, foi encontrado um aumento linear do sinal de EA com as forças de corte. Entretanto, um aumento na velocidade de corte leva a um declínio nas forças de corte e um aumento no sinal de EA.

DORNFELD & CAI (1984) apresentaram estudos, relacionando força de corte e EA. Através de medições de EA e das forças de corte, os autores concluíram que a energia de EA, que corresponde ao quadrado do valor RMS do sinal obtido, é proporcional à força de corte Fn.

3.3.7 Emissão acústica e sistemas multisensores

VISHNUPAD & SHIN (1995) descreveram um sistema de monitoramento para retificação interna utilizando diversos tipos de sensores. Entre eles incluem um sensor de EA para coletar sinais do rebolo, um sensor de potência, um sensor capacitivo para medição da deflexão do eixo e um acelerômetro para medir vibração do eixo de retificação.

Com esta montagem, uma série de testes foram realizados. Com o uso de múltiplos sensores, diversas variáveis do processo de retificação foram monitoradas como velocidades, forças e profundidade de corte. Vários testes foram realizados, alterando os valores destas variáveis, para determinar a influência de cada uma nas variáveis de saída do processo, como rugosidade, circularidade e batimento. Desta forma, foi possível associar variáveis de entrada e de saída do processo, e com estas associações treinar uma rede neural para prever o resultado do processo durante a usinagem.

Segundo BYRNE et al. (1995), numerosos sensores diferentes estão disponíveis para monitorar aspectos da usinagem, mas os mais comuns são os sensores de força, potência e de EA. A Figura 3.35 mostra os sensores disponíveis para aplicação em uma máquina ferramenta.

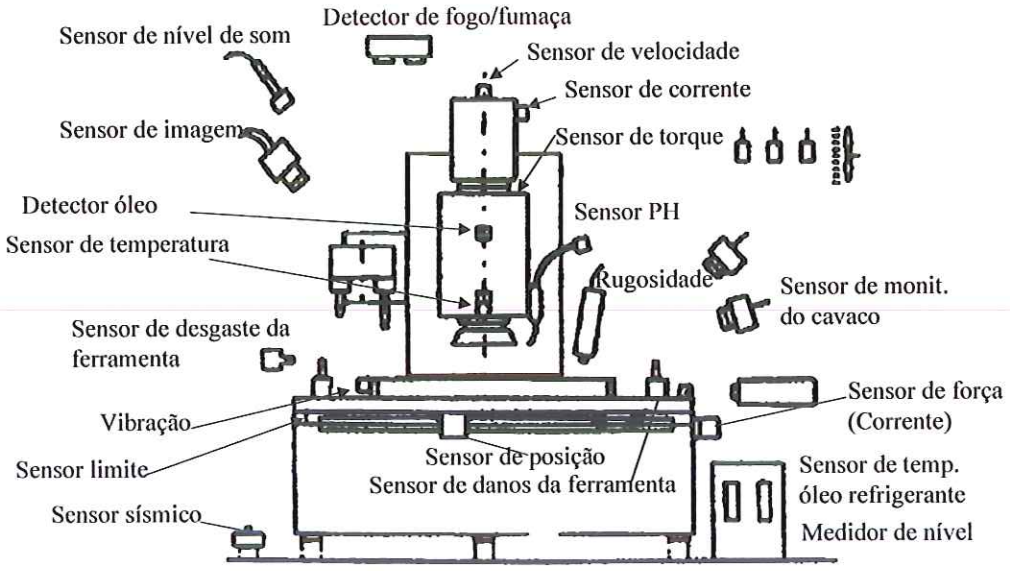


FIGURA 3.35 - Sensores disponíveis para usinagem, (BYRNE et al. 1995).

BYRNE et al. (1995) apresentaram uma pesquisa feita entre 26 fabricantes e 20 usuários de sistemas de monitoramento, num total de 1161 sistemas instalados. Destes sistemas, 27% utilizavam sensores de EA, e apenas 3% (32) eram utilizados na retificação. Isto demonstra a existência de um amplo campo de aplicação prática para EA em retificação.

Para o monitoramento, BYRNE et al. (1995) propuseram o uso de limites estáticos, dinâmicos ou pré-calculados. Os limites estáticos têm valor constante e o sistema indicará quando o sinal ultrapassar este limite. Normalmente são utilizados em retificação para detecção de contato e prevenção de colisões. No entanto, este método de limites fixos só funciona quando todas as restrições permanecem constantes, o que significa que não pode ser aplicado em casos em que o limite não é fixo durante todo o processo. Nestes casos, o uso de limites dinâmicos é mais apropriado. O limite dinâmico é calculado a partir do sinal original, com um atraso de tempo. Assim, variações lentas no sinal podem ser aceitas sem cruzar o limite, mas variações bruscas, como colisões, provocam a ultrapassagem do limite. Outra forma de calcular os limites é armazenar a leitura de um processo realizado em

condições ótimas e, a partir desta leitura, calcular limites inferior e superior, criando uma margem de trabalho para o sinal lido. O limite superior é usado para detectar colisão e o limite inferior pode detectar ausência de peça, sobremetal insuficiente ou má fixação. A Figura 3.36 ilustra todos estes limites.

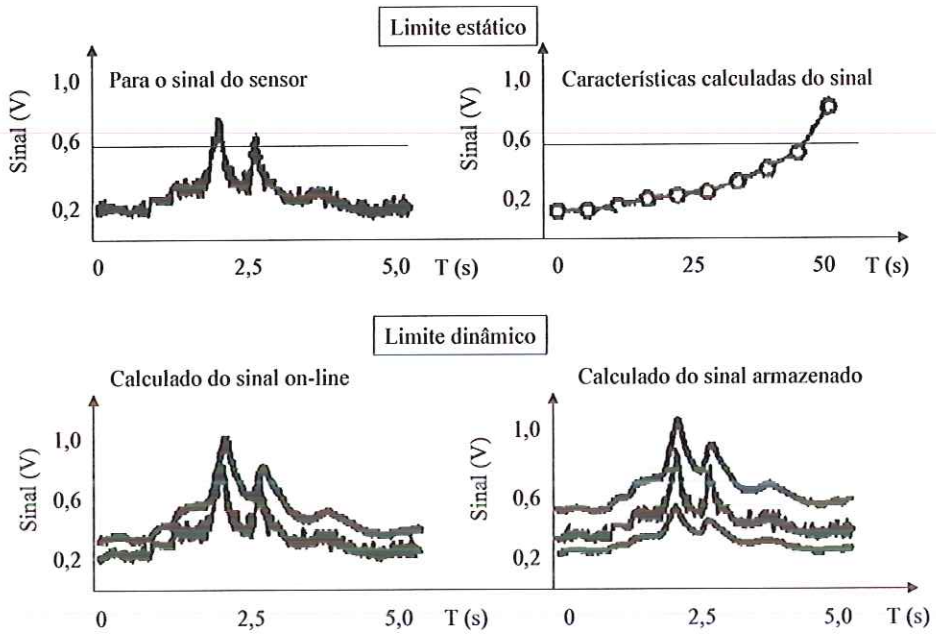


FIGURA 3.36 - Limites estáticos e dinâmicos, (BYRNE et al. 1995).

LEZANSKI & RAFALOWICZ (1993) descreveram um sistema de monitoramento para retificação completo, com sensores de força, vibração, EA e sensores para medição de diâmetro e detecção de falta de circularidade.

O sensor de EA foi fixado no contraponto da máquina, considerado um local bastante apropriado. Na retificação de peças longas, ocorreu uma variação na amplitude do sinal, mas a forma do sinal é idêntica nos dois extremos da peça. O sistema foi usado para detectar contato, desbalanceamento do rebolo e necessidade de dressagem.

3.3.8 Emissão acústica versus vibrações

Segundo BYRNE et al. (1995), problemas típicos de retificação, como vibração, queima e rugosidade alta estão relacionados à topografia e as configurações geométricas do rebolo. Embora o rebolo seja preparado antes de iniciar o processo, ele sofre alterações ao longo deste. Depois de algum tempo de trabalho, a vibração

começa a crescer. Esta vibração pode ser considerada como auto-excitada, associada com ondas, geradas na superfície do rebolo. O sensor de EA, dentre os tantos outros tipos de sensores existentes, parece ser o mais adequado para detectar tais vibrações.

Para eliminar o problema da vibração com a rotação do rebolo, um filtro passa baixa e outro passa alta são utilizados, obtendo o sinal de duas maneiras diferentes, ou seja, um componente estático (DC) e outro dinâmico (AC). O sinal AC é utilizado para monitorar a vibração auto-excitada.

O resultado espectral do componente AC obtido com este sistema é mostrado na Figura 3.37.

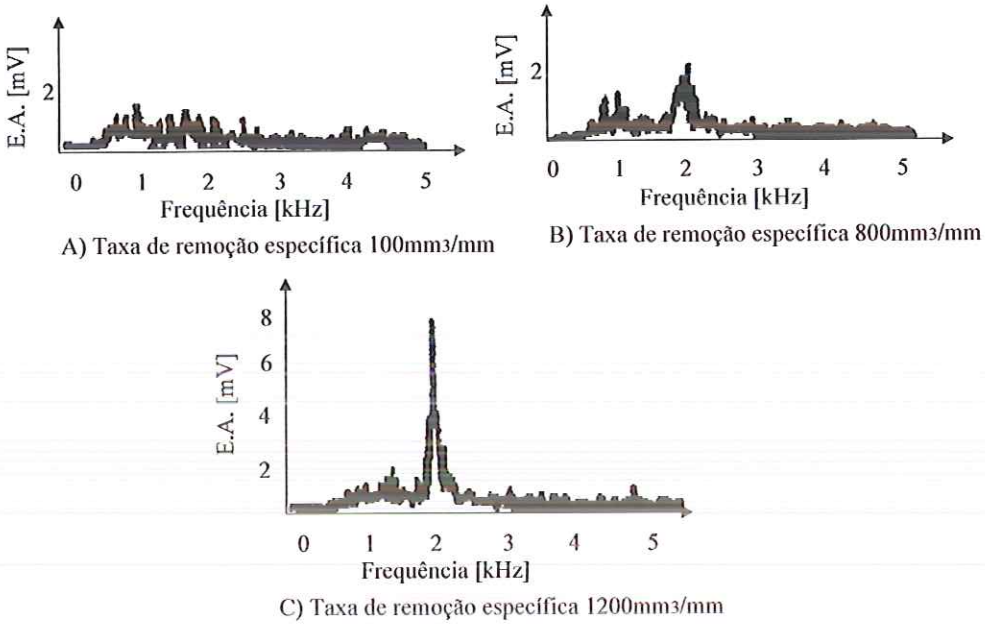


FIGURA 3.37 - Valores de EA ao longo do processo, (BYRNE et al. 1995).

Na Figura 3.37, medições do nível de EA são mostradas em três tempos após a dressagem do rebolo. No primeiro quadro, pouco depois de realizada a dressagem, o sinal parece uniforme mas, após algum tempo de usinagem, uma frequência específica começa a se destacar. Pode-se então utilizar técnicas de redes neurais para a detecção automática de vibração auto-excitada, baseada no espectro de frequências. A Figura 3.38 mostra esta detecção.

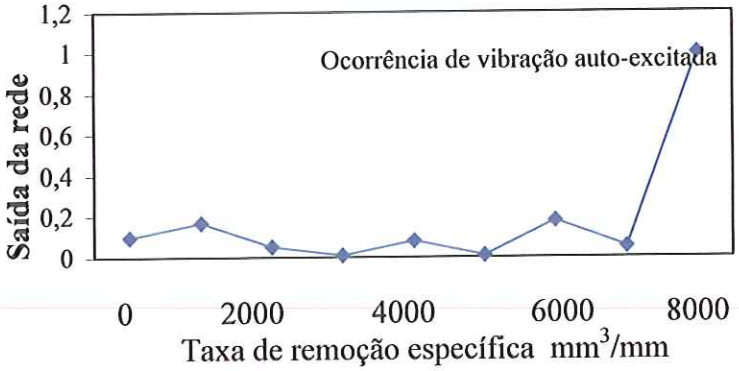


FIGURA 3.38 - Detecção de vibração auto excitada, (BYRNE et al. 1995).

O mesmo método de redes neurais é aplicado para o monitoramento da rugosidade superficial. A Figura 3.39 mostra o resultado do valor de rugosidade real medida e a rugosidade prevista pela rede.

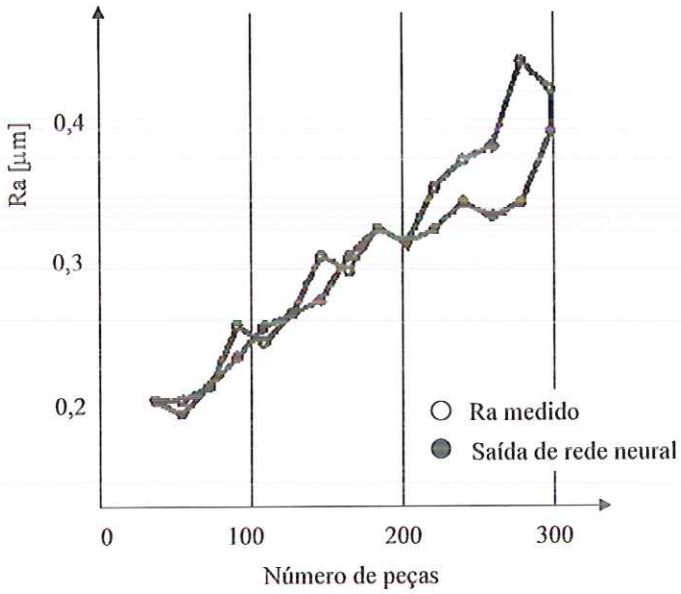


FIGURA 3.39 - Comparação da rugosidade medida e prevista, (BYRNE et al. 1995).

INASAKI (1991), utilizou EA com acoplamento fluídico para monitorar a retificação interna e detectar a vibração auto-excitada. A Figura 3.40 mostra os sinais obtidos em 4 tempos diferentes após o início do mergulho do rebolo.

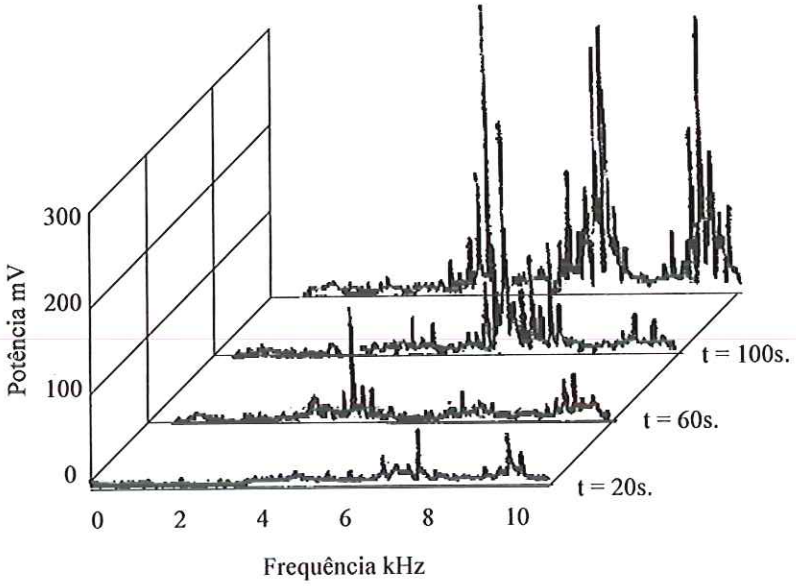


FIGURA 3.40 - Espectro de frequência de EA, (BYRNE et al. 1995).

Este teste demonstra a sensibilidade da EA para a detecção de marcas ou padrões presentes na peça. Em outro teste, três ranhuras foram usinadas em uma peça, com larguras de 0,203, 0,762 e 1,016mm e distanciadas 120^0 entre si. O resultado é mostrado na Figura 3.41.

Este trabalho analisa quantitativamente a capacidade de reconhecer ranhuras do sistema de EA, mostrando diferentes valores de EA para ranhuras de larguras diferentes.

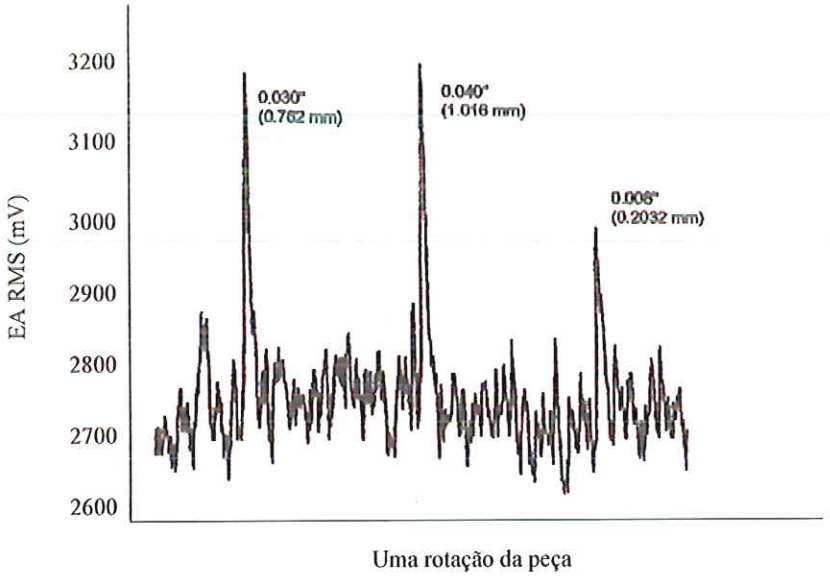


FIGURA 3.41 - Detecção de ranhuras na peça.

3.3.9 Crítica aos sistemas atuais de monitoramento

Conforme apresentado, inúmeros pesquisadores tem lançado mão da emissão acústica para monitoramento das condições de retificação e dressagem. Entretanto, OLIVEIRA (2001) levantou uma importante questão que diz respeito a baixa repetibilidade do nível RMS de emissão acústica e sua fraca correlação com eventos da retificação, o que vem limitando seu uso como técnica de sensoriamento em ambientes industriais.

Diversos fatores, como posicionamento do sensor, fluxo de refrigerante, ruído da máquina, ruído elétrico, topografia do rebolo, número de diamantes em contato com o rebolo, variação da microestrutura e dureza da peça, influenciam o nível RMS de emissão acústica.

Segundo OLIVEIRA (2001), uma das interessantes características da instabilidade da emissão acústica é sua dependência com o tempo. Normalmente, em testes de laboratório, a emissão acústica mostra muito boa correlação com outros parâmetros de retificação em pequenos períodos de tempo. Isto acontece pois o ruído dos mancais ou as deformações da máquina levam um considerável tempo para se modificarem, comparado aos eventos de corte durante a retificação.

Porém, as principais limitações da análise do nível RMS de emissão acústica são as mudanças imprevisíveis na linearidade e amplitude do sinal com o tempo.

A linearidade entre a EA e a dressagem ou parâmetros de retificação podem ser causados pela saturação do sinal no primeiro estágio de pré-amplificação. Na operação de dressagem, quando o sensor é posicionado próximo ao dressador, o sinal de saída do sensor pode alcançar valores maiores que o valor da fonte de tensão. Isto leva a um corte parcial da informação bruta que é difícil de se observar no sinal RMS.

Outra fonte de problemas no monitoramento da EA é a instabilidade do nível RMS. O nível RMS pode flutuar acima de 50% de seu valor após algumas horas.

Experimentos realizados por OLIVEIRA (2001), durante aquecimento da máquina e após 1 hora de trabalho da mesma, mostraram uma maior dispersão e maior sensibilidade dos resultados durante testes realizados no aquecimento da

máquina. Este fato pode ser explicado em função da alta variação na área de contato efetiva na interface, devido a deformação térmica da máquina.

Este pesquisador, sugeriu a utilização de sistemas mais confiáveis e robustos para estudo das condições de retificação. Uma das alternativas para isto é a utilização da análise rápida do sinal RMS de emissão acústica que objetiva, através do uso de uma constante de tempo muito baixa, na faixa de microsegundos, e alta taxa de aquisição de dados, verificar a fenomenologia do processo de retificação e dressagem no pequeno espaçamento existente, praticamente, entre dois grãos abrasivos.

4 DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA DIAGNÓSTICO DE ANOMALIAS NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CENTER-LESS DE MERGULHO

4.1 Justificativa para desenvolvimento do sistema

De acordo com diversos pesquisadores (DALL (1946); REEKA (1967); SUBRAMANYA et al.(1988); ZHOU et al.(1996); ZHOU et al.(1997); NIETO et al.(1998) e HASHIMOTO (1999), o principal problema do processo de retificação center-less está amarrado à obtenção de condições ótimas de circularidade da peça. Como a circularidade está intimamente ligada à geometria do processo e instabilidade dinâmica da peça, as condições de setup de máquina desempenham papel fundamental no que diz respeito a solução deste tipo de problema.

Outros fatores podem contribuir para que sejam obtidos produtos com qualidade superficial e circularidade inferiores. Muitas vezes, estes fatores dependem exclusivamente da experiência do operador de máquina para sua resolução e o uso de monitoramento do processo via emissão acústica se faz necessário, para auxiliar o operador de máquina nas tomadas seguras de decisão para ajuste do processo.

4.2 Necessidade de diagnóstico

Para a elaboração e criação de um sistema de monitoramento, que apresente confiabilidade e seja eficaz no diagnóstico de falhas de "setup", são necessários uma série de estudos detalhados, visando obter informações minuciosas a respeito de parâmetros do processo, difíceis de serem observados e que possam influenciar na circularidade da peça, tais como, qualidade do rebolo de arraste, balanceamento e circularidade do rebolo de corte, dressagem eficiente, dentre outros.

4.3 Sistema proposto

Um sistema de mapeamento do processo de retificação center-less, que utiliza a EA como sinal para produzir um gráfico 3D e que representa a distribuição de energia de retificação na superfície do rebolo foi desenvolvido no âmbito deste trabalho. Este sistema utiliza um sensor de EA como meio de sondagem e um sensor indutivo de proximidade como gatilho para sincronizar o início de aquisição.

O sensor de emissão acústica e o sensor de proximidade são robustos e resistem à ação de detritos sólidos e líquidos, sendo adequados para o uso em ambientes industriais. Além disso, sua instalação é simples e rápida e dependendo do local escolhido para posicionamento, o sensor de EA pode ser fixado com parafuso, necessitando apenas de um furo com rosca ou o mesmo pode apresentar sistema magnético de fixação.

O sensor de proximidade (sensor magnético) deve ser posicionado próximo a flange do rebolo para detectar a passagem de um ressalto e pode ser fixado, por exemplo, em um furo passante, conforme ilustrado na Figura 4.1; este sensor pode ser substituído por um sensor óptico posicionado da mesma forma.

Estas características de instalação tornam a utilização deste sistema bastante flexível, pois a instalação dos sensores é a parte mais trabalhosa, uma vez que, depois de instalados, basta conectá-los ao monitor de EA e à placa de aquisição do computador.

A desvantagem da EA ser um meio indireto de sensoreamento está sendo superada pela utilização de softwares e hardwares atuais, de alto desempenho, juntamente com um equipamento de monitoramento dedicado, desenvolvido e construído pela empresa Sensis. Este sistema permite que se construa o gráfico 3D em tempo real, cuja resolução máxima é considerável em função do perímetro do rebolo utilizado. Isto é possível devido ao recurso de seleção de um valor muito pequeno da constante de tempo para o cálculo do RMS do sinal, disponível no equipamento da Sensis da ordem de microsegundos.

A representação numérica da imagem formada pelo gráfico tridimensional é uma matriz de valores de magnitude RMS do sinal de emissão acústica, adquirido durante retificação. Devido à grande velocidade de aquisição utilizada, esta matriz

possui uma grande quantidade de pontos que representam o comportamento do sinal de EA durante o período de aquisição. Logo, a influência de valores errôneos, gerados devido à instabilidade instantânea do sinal de EA, é atenuada na análise da evolução da imagem como um todo.

4.4 Concepção básica.

A Figura 4.1 mostra um esquema da concepção básica do sistema de mapeamento da distribuição da energia acústica na retificação.

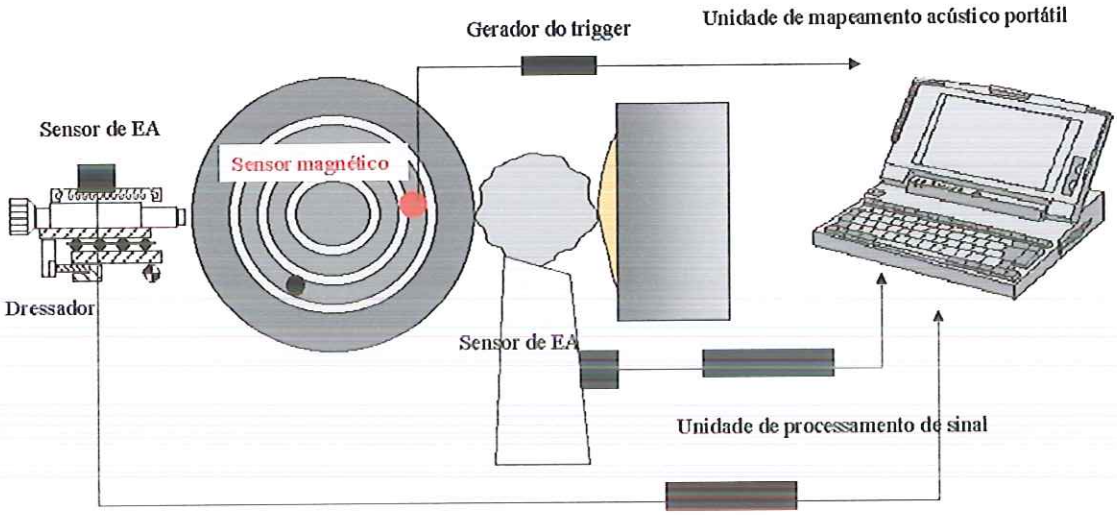


FIGURA 4.1 - Esquema da concepção básica do sistema de mapeamento.

Pode-se observar na Figura 4.1 os elementos que compõem o sistema, descritos a seguir:

- Sensores de EA: captam o sinal bruto de EA, proveniente do contato peça/rebolo ou do contato dressador/rebolo;
- Monitor de EA: amplifica, filtra e calcula o nível RMS do sinal fornecido pelo sensor de EA, sendo que, o cálculo do nível RMS é feito com um tempo de integração (constante de tempo) mínimo para obter uma imagem com grande resolução;

- Sensor de proximidade (indutivo): emite um pulso elétrico a cada rotação completa do rebolo, quando um parafuso de cabeça saliente, instalado na flange, passa por ele. Este pulso é utilizado para sincronizar a aquisição do sinal de EA;
- Microcomputador com placa A/D: é controlado por um programa que adquire o sinal tratado pelo monitor de EA, que contém o nível RMS do sinal filtrado e amplificado e o pulso de sincronização, processa os dados, apresenta na tela e permite armazenamento em disco.

O levantamento de cada linha de imagem do sistema é reiniciado, seqüencialmente a cada rotação do rebolo, quando o microcomputador recebe o pulso de gatilho do sensor de proximidade através da placa A/D. Neste momento, é iniciada a construção de um vetor de n pontos, cujos valores são correspondentes ao nível do sinal processado, fornecido pelo monitor de EA e digitalizado pela placa A/D.

Estes vetores são dispostos um ao lado do outro, seqüencialmente, obedecendo a escala do tempo. O gráfico obtido é representado em 3D, sendo que a abcissa representa a escala de tempo, a ordenada representa o perímetro do rebolo e o tom de cor representa a magnitude do valor de cada ponto.

A resolução do gráfico obtido com este sistema pode ser determinada através da seleção dos seguintes parâmetros: taxa de amostragem, número de amostras por aquisição e constante de tempo para o cálculo do RMS. Idealmente estes parâmetros devem ser selecionados para que se tenha uma amostra a cada choque da peça com uma faixa bastante estreita de grãos abrasivos que estão na mesma posição angular. A Figura 4.2 mostra uma ilustração do procedimento de construção do gráfico 3D, durante o processo de retificação center-less e a Figura 4.3 ilustra o procedimento de construção do gráfico 3D para dressagem.

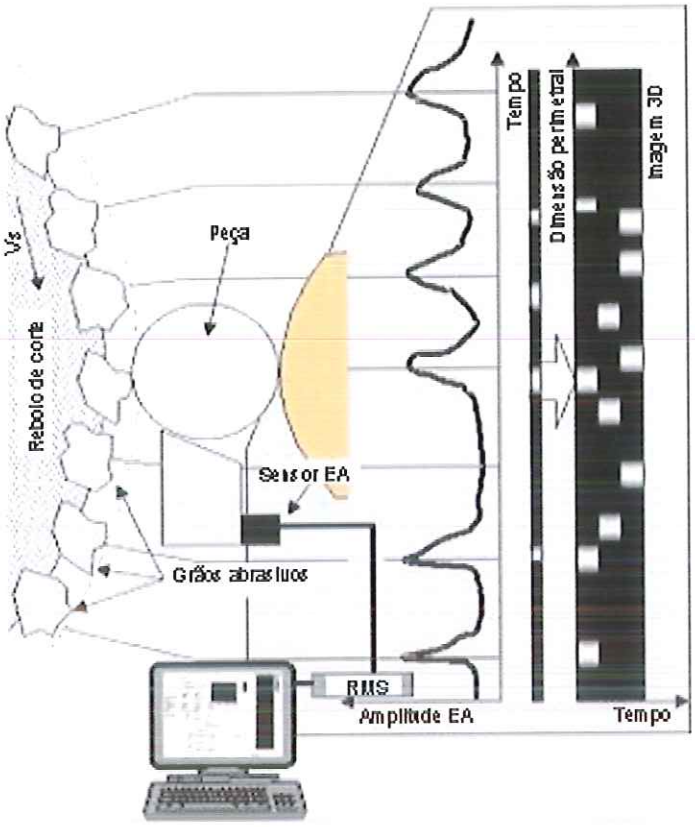


FIGURA 4.2 - Procedimento de construção do mapa do rebolo, no processo de retificação center-less.

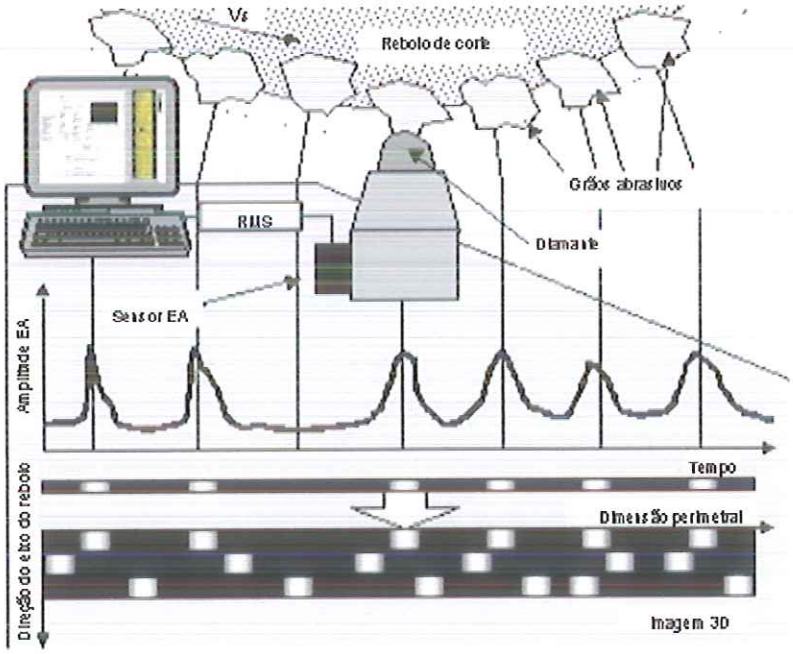


FIGURA 4.3 - Procedimento de construção do mapa do rebolo, no processo de dressagem.

O monitor de EA fornece um sinal processado, cujo nível é correspondente ao nível RMS do sinal bruto adquirido. O nível RMS é calculado, utilizando-se um intervalo móvel, cuja duração é igual a constante de tempo mínima. No sistema Sensis BM 12 a constante de tempo mínima é de 5μs.

4.5 Programa do sistema de mapeamento

O programa desenvolvido pode ser utilizado para realizar três procedimentos de retificação:

- Avaliação da dressagem: a uniformidade de cores da imagem produzida é proporcional a uniformidade da superfície do rebolo. Assim, falhas aparecem como regiões negras devido à falta de contato entre os grãos e o dressador;
- Mapeamento topográfico: realizando a dressagem com uma profundidade mínima, da ordem de 1μm, não há desgaste dos grãos, pois nesta região, ocorre o contato elástico entre dressador/rebolo. A imagem produzida desta forma apresenta a superfície ativa do rebolo. A Figura 4.4 mostra um gráfico obtido com este procedimento.

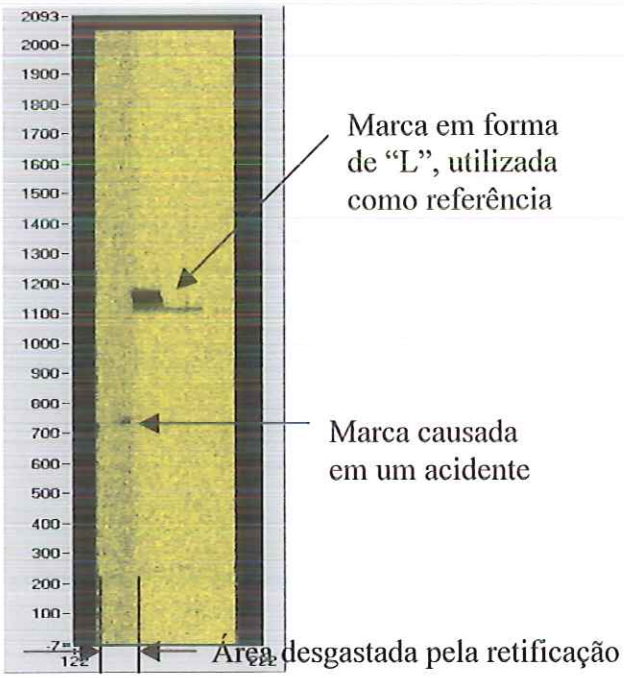


FIGURA 4.4 - Mapa da superfície ativa do rebolo, obtida a partir do sinal de EA, detectado durante uma dressagem com profundidade de 1μm.

Na Figura 4.4, pode-se observar três regiões mais escuras: a faixa escura à esquerda é gerada pelo nível mais baixo do sinal nesta região, devido ao desgaste ocorrido durante a retificação que reduziu a altura dos grãos. As outras duas regiões apresentam a cor negra, pois ali não houve contato com o dressador. São duas cavidades superficiais, uma delas em forma de "L", esculpida para referência e a outra surgiu acidentalmente.

- Avaliação do processo de retificação center-less, em função do valor médio de interação entre o rebolo de corte e o comprimento do componente a ser usinado.

O painel deste programa é mostrado na Figura 4.5. Neste painel, pode-se configurar as seguintes variáveis: taxa de amostragem, número de amostras por aquisição, nível requerido do sinal de gatilho, canais para aquisição, canal do gatilho, placa de aquisição. Possui também opções para gravação e leitura de arquivos. Além disso, permite adquirir sinais de mais canais e que se edite todos os elementos que o compõe, como por exemplo escalas de gráficos, formatos e tamanhos.

FIGURA 4.5 - Painel do programa utilizado neste trabalho.

A Figura 4.6 apresenta o diagrama do programa citado acima, dividido em blocos explicativos.

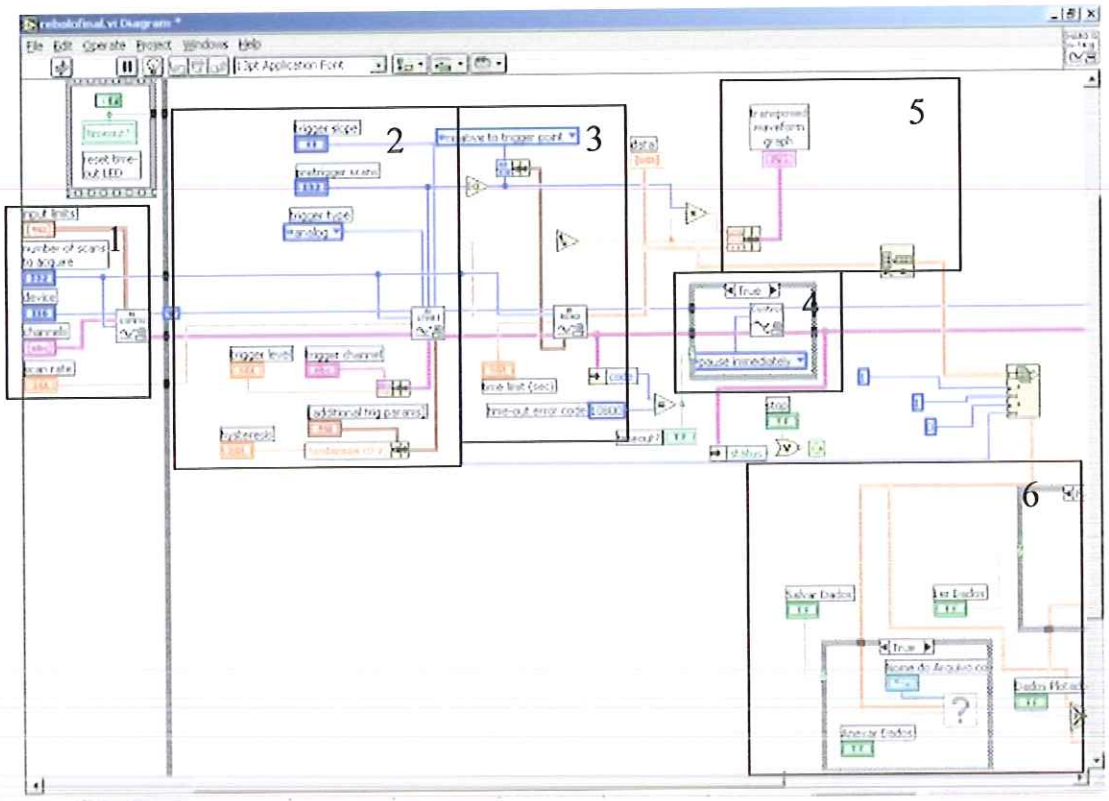


FIGURA 4.6 - Diagrama do programa usado neste trabalho.

Bloco 1 – São definidas as variáveis de controle e aquisição de dados, onde são configurados o canal, a taxa e o número de aquisição a serem feitos.

Bloco 2 – São definidas as variáveis necessárias para a configuração e controle do trigger como: canal utilizado, tipo de trigger, tensão de referência que determina o disparo e tipo de sinal (crescente ou decrescente).

Bloco 3 – Encontra-se a sub-VI AI READ, responsável pela leitura dos dados onde estão ligadas algumas variáveis de controle de trigger, aquisição e limite de tempo.

Bloco 4 – É feito um controle de tempo, ou seja, se após um determinado limite de tempo nenhum dado foi adquirido, o processo é interrompido.

Bloco 5 – São plotados os dados adquiridos em dois gráficos: o primeiro (2D) mostra a intensidade do sinal de emissão acústica pelo tempo e o segundo (3D) mostra o comprimento perimetral da superfície do rebolo pelo tempo de retificação, sendo que a intensidade do sinal de EA é dada pela escala de cores.

Bloco 6 – Mostra a estrutura responsável pela gravação e leitura dos dados adquiridos.

5 APLICAÇÃO DO SISTEMA DE MAPEAMENTO PARA DIAGNÓSTICO DE ANOMALIAS NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CENTER-LESS DE MERGULHO.

5.1 Experimentos iniciais

Com o objetivo de se conhecer os principais fatores que influenciam o processo center-less, testes preliminares foram realizados. Foram verificadas as influências dos parâmetros, ciclo de desbaste ou velocidade de avanço em desbaste, tempo de "sparkout" e rotação do rebolo de arraste (ver tabela 3), na qualidade final da peça, considerando a circularidade e acabamento superficial da mesma.

TABELA 3 - Parâmetros utilizados em testes preliminares.

Ciclo de desbaste ou velocidade de avanço (mm/min)	Tempo de "Sparkout" (s)	Rotação do rebolo de arraste (rpm)
0,37	0,3	17
0,78	0,6	36
	1,4	

Após os testes, foram obtidos os seguintes resultados, mostrados na Tabela 4.

TABELA 4 - Resultado dos testes realizados.

	Teste								
PARÂMETROS	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ciclo desbaste (mm/min)	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,37	0,37	0,37	0,37
Tempo de Sparkout (s)	1,4	0,6	0,3	0,6	0,3	0,6	0,3	0,6	0,3
RPM arraste	17	17	17	36	36	17	17	36	36
RESULTADOS	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Erro de Circularidade (μm)	15	14	12	14	14	3	2	3	3
Rugosidade (Ra)	0,50	0,40	0,50	0,42	0,40	0,30	0,30	0,31	0,34

Os testes mostraram que a rotação do rebolo de arraste, dentro da faixa estabelecida, e o tempo de "sparkout" pouco contribuíram para a melhoria da qualidade da peça. Anteriormente aos experimentos, a peça apresentava variação na circularidade de 20 μm e rugosidade de Ra = 0,50 μm. Verificou-se, entretanto, que o parâmetro ciclo de desbaste contribuiu significativamente para melhoria das condições do produto, visto que, quanto maior o tempo do ciclo de desbaste, ou seja, quanto menor a velocidade de avanço, melhor a circularidade da peça. Assim, em função dos experimentos realizados e com base em informações adicionais, concluí-se que:

(i) O ciclo de desbaste (velocidade de avanço em desbaste) influencia significativamente a circularidade da peça.

(ii) As condições de dressagem em muito influenciam a qualidade da peça fabricada. Durante os testes preliminares, como no decorrer do trabalho, buscava-se alcançar na peça, ao longo do processo de retificação de acabamento, removendo-se 0,02mm no diâmetro por ciclo, erro de circularidade máximo de 2μm e rugosidade superficial de 0,3μm Ra.

A retificadora center-less utilizada neste trabalho dispõe de um sistema de dressagem, acionado por um sistema hidráulico e comandado por válvula. Dependendo da abertura da válvula, têm-se maiores ou menores velocidades de dressagem, tanto no rebolo de corte, quanto no rebolo de arraste. Este sistema de dressagem dificulta, em alguns casos, aumentando desta forma, seu tempo de preparo pois em algumas situações, quando utiliza-se menores velocidades de dressagem tem-se queima da peça e, em outras, quando do uso de maiores velocidades de dressagem tem-se perfil roscado da peça.

(iii) Outro fator considerável, diz respeito à cilindricidade do componente produzido. Se a peça, após ser produzida, apresenta-se cônica, é necessária a intervenção sobre o processo a fim de ajusta-lo. Pode-se corrigir este problema através da regulagem de dois parafusos, localizados na estrutura superior da máquina, que fazem com que a mesa do conjunto régua/rebolo de arraste se desloquem no sentido de eliminar esta conicidade da peça.

Pode-se destacar também outros fatores que contribuem para a instabilidade do processo: desbalanceamento do rebolo de corte, excentricidade do rebolo de arraste, falhas no avanço do ciclo de desbaste, vibrações ocorridas durante processo, rotação excessiva do rebolo de arraste e falta de refrigeração/lubrificação durante o processo.

5.2 Experimentos para desenvolvimento de uma metodologia para avaliação de problemas de set-up

Os testes experimentais que serão apresentados neste trabalho foram realizados nos seguintes laboratórios:

- Laboratório de otimização de processos de fabricação do núcleo de manufatura avançada (LOPF/NUMA) – Foram realizados os testes preliminares, os testes de diagnóstico do processo de retificação center-less, bem como as medidas de acabamento superficial (parâmetro Ra).

- Laboratório de usinagem de ultraprecisão: Neste laboratório foram levantados os perfis de circularidade das válvulas retificadas.

Para todos os testes executados, foram retificadas hastes de válvulas de seção circular de aço forjado, conforme mostrado na Figura 5.1, que apresentavam diâmetro inicial de 9,45mm. As válvulas foram gentilmente cedidas pela empresa TRW do Brasil.

FIGURA 5.1 – Corpo de prova utilizado durante os experimentos

Os rebolos de corte e de arraste apresentavam as seguintes classes:

- Rebolo de corte: DA120/150P7V17 da marca SIVAT.
- Rebolo de arraste: 120RR da marca INABRA.

O fluido de corte semi-sintético da marca Microquímica foi utilizado nos experimentos com concentração de 3%.

EESC - USP Biblioteca CAMPUS DE S. CARLOS

Os testes foram realizados em uma retificadora cilíndrica center-less convencional, marca MICROMA, modelo E1, tal como mostrada na Figura 5.2, com 12,5 CV de potência disponível no motor principal, tendo o rebolo de corte rotação fixa de 55m/s. As hastes das válvulas foram retificadas com remoção de 0,02mm no diâmetro, por ciclo de retificação.

FIGURA 5.2 - Retificadora center-less Microma modelo E1.

Para análise do sinal de emissão acústica foram utilizadas duas unidades de monitoramento, modelos BM-12 e DM 42, ambas fabricadas pela empresa SENSIS – São Carlos. A configuração geral da unidade de monitoramento SENSIS BM-12 é mostrada na Figura 5.3, onde pode-se observar, na sua parte inferior, uma sequência de Leds, que é utilizada para avaliar a intensidade e a amplificação do sinal, o nível do ruído externo e o comportamento geral do sistema.

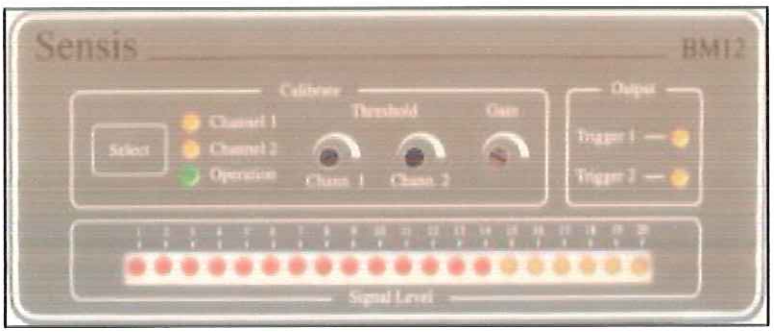


FIGURA 5.3 – Sistema de monitoramento Sensis BM-12.

O sistema SENSIS BM-12 é um aparelho totalmente analógico, basicamente composto por um circuito para amplificação do sinal bruto de emissão acústica, em 40db ou 60db, onde podem ser acoplados diferentes tipos de filtros, como passa baixa e passa alta.

O circuito principal do sistema é responsável pelo cálculo da média quadrática (RMS) do sinal de emissão acústica, já filtrado e amplificado. Os valores exatos das constantes de tempo, utilizadas no cálculo da média RMS do sinal de emissão acústica, não são acessíveis ao usuário, mas podem ser avaliados pela observação do comportamento do sinal através da sequência de leds.

Com relação a unidade de monitoramento DM 42, mostrada na Figura 5.4, este é um monitor digital de processos, que possui muitos recursos úteis na aquisição de sinais como: seleção de filtros de freqüência, armazenamento e recuperação de parâmetros de configuração, quatro entradas para sensores, saídas analógicas RMS e bruta, comparadores de nível de sinal entre outros parâmetros configuráveis.

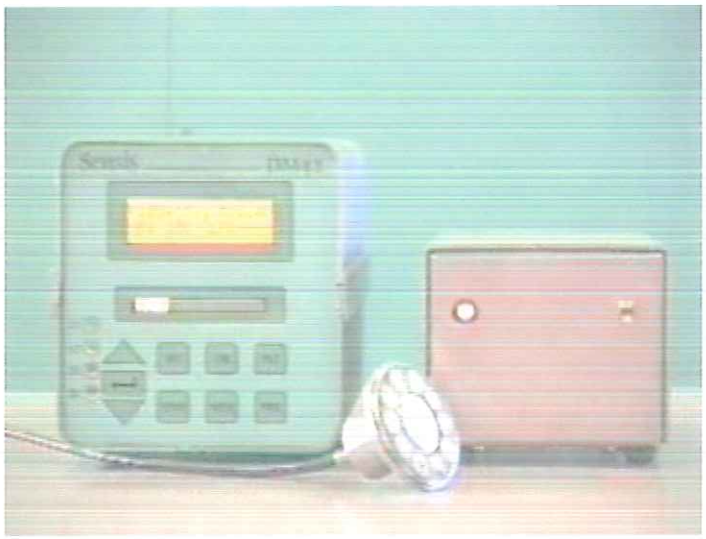


FIGURA 5.4 – Sistema de monitoramento Sensis DM 42.

Os sensores de emissão acústica utilizados foram instalados em partes específicas da retificadora. Um sensor de EA com base magnética foi fixado no suporte da régua de apoio, conforme mostrado na Figura 5.5, com o objetivo de captar as informações provenientes da interação entre rebolo de corte e peça. Pode-se observar também, na Figura 5.5, o sensor de proximidade preso junto a carenagem do cabeçote do rebolo de corte.

FIGURA 5.5 - Sensor de emissão acústica fixado no suporte da régua de trabalho.

Um segundo sensor de emissão acústica foi fixado no suporte do carro dressador do rebolo de corte, conforme mostrado na Figura 5.6, a fim de obter informações da operação de dressagem.

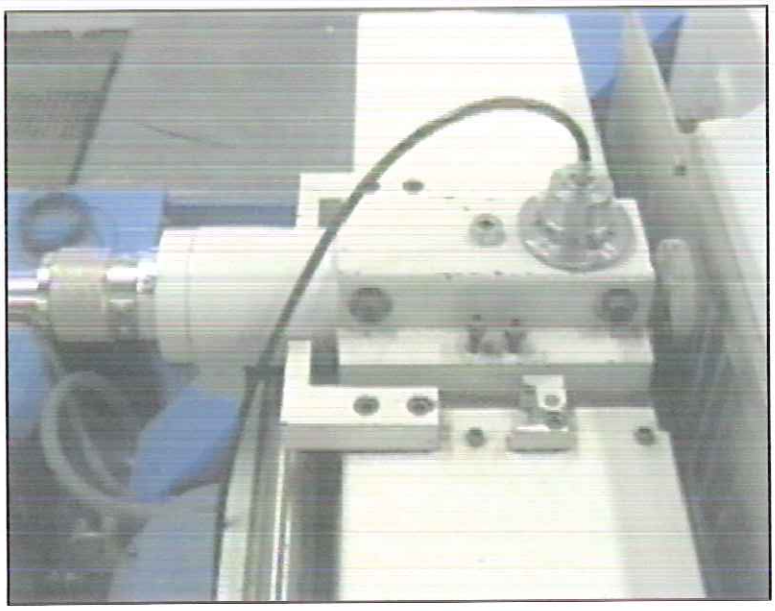


FIGURA 5.6 - Sensor de emissão acústica fixado junto ao carro do dressador do rebolo de corte.

Os sinais provenientes do sensor de EA fixado no suporte da régua, ou do sensor de EA fixado no suporte do carro do dressador, eram submetidos aos sistemas Sensis BM-12 ou DM 42. Após tratamento, os sinais eram enviados a uma placa de aquisição de dados da National Instruments, modelo DAQCard-AI-16E-4, com velocidade de aquisição de 500kS/s, instalada em um computador Pentium II, juntamente com o sinal fornecido pelo sensor de proximidade. O controle da placa de aquisição de dados foi realizado, usando-se o software Labview versão 5.1.

Para medidas de circularidade e cilindricidade das hastes das válvulas, foi usado medidor Rank Taylor Hobson, modelo Talyrond 250, como apresentado na Figura 5.7.

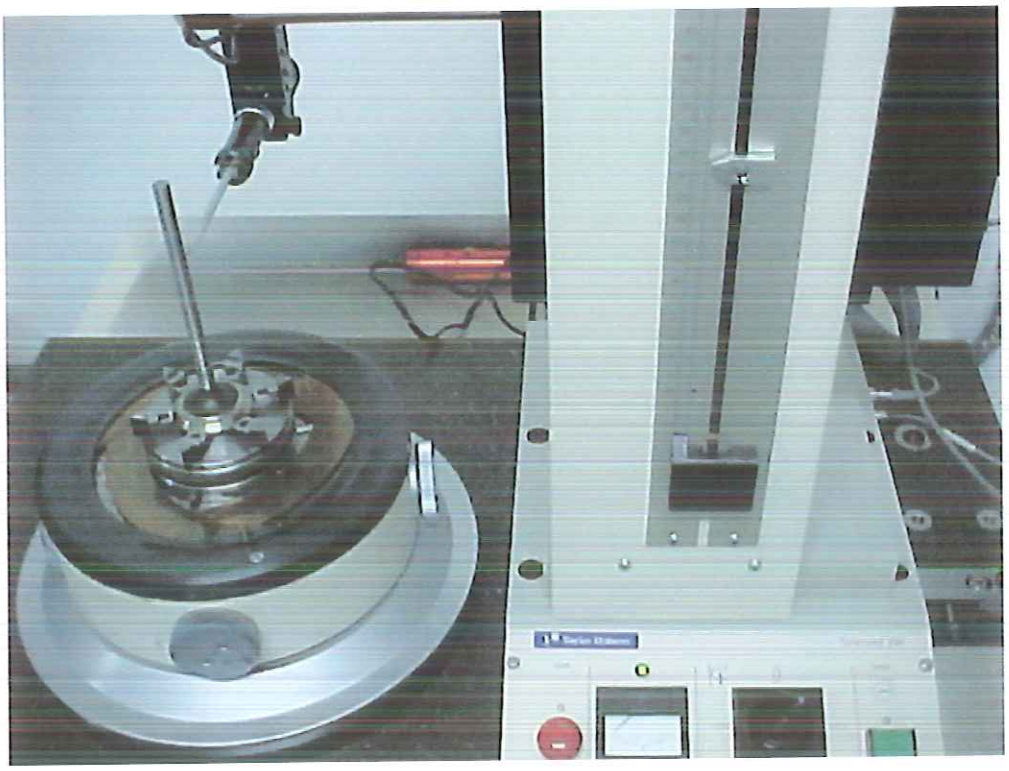


FIGURA 5.7 – Medidor de circularidade Talyrond 250.

O acabamento superficial das hastes das válvulas foi medido utilizando-se um rugosímetro portátil da marca Rank Taylor Hobson, modelo Surtronic 3P, conforme mostrado na Figura 5.8.

FIGURA 5.8 - Rugosímetro portátil usado durante experimentos.

5.3 Procedimento experimental

O adequado ajuste de parâmetros de máquinas, principalmente retificadoras, tem sido um desafio para operadores, técnicos, engenheiros e pesquisadores da mecânica. Fatores os mais distintos podem acarretar severos danos à qualidade do produto final levando à perda, em alguns casos, do componente gerando dificuldade ao operador da máquina, pois o mesmo necessita encontrar um "setup" que gere condições adequadas de trabalho e podendo este procedimento demandar excessiva quantidade de tempo para obtenção de um produto que atenda as especificações exigidas de fabricação.

É neste contexto que o monitoramento por emissão acústica pode auxiliar na otimização e controle das condições de trabalho, pois pode atuar sobre o processo, identificando anomalias, que muitas vezes não são facilmente detectadas pelo operador da máquina.

Durante este trabalho foram observados fatores que diretamente influenciaram nas condições de trabalho. No decorrer das tentativas para se encontrar a melhor maneira de se monitorar o processo, problemas foram propositadamente introduzidos com o intuito de criar uma fonte geradora de anomalias. Porém, outros problemas foram detectados ao acaso, gerando uma expectativa positiva com relação à potencialidade do sistema de monitoramento em evidenciar condições insatisfatórias de trabalho.

Na Tabela 5, pode-se observar as condições inadequadas de trabalho geradas propositadamente e na tabela 6 as observações feitas ao acaso durante o processo.

TABELA 5 – Condições experimentais levantadas durante este trabalho.

Condições geradas propositadamente
Dressagem eficiente
Peça boa
Desbalanceamento do rebolo de corte
Altura inadequada entre centros
Vibração usando shaker
Rotação elevada do rebolo de arraste
Retificação com refrigeração insuficiente
Retificação com ausência de refrigeração

TABELA 6 – Condições experimentais levantadas durante este trabalho.

Observações feitas ao acaso
Velocidades diferentes de dressagem
Rebolo de arraste excêntrico
Vibrações ocorridas no sparkout

Será descrito, nos tópicos seguintes, o procedimento experimental realizado para verificar a funcionalidade do sistema de monitoramento proposto neste trabalho.

5.3.1 Dressagem eficiente

Investigações durante dressagem utilizando sistema de mapeamento acústico do rebolo foram primeiramente realizadas por Tundisi (1999) para detectar anomalias ao longo de toda a área perimetral da superfície do rebolo, durante a retificação cilíndrica externa. O sistema de mapeamento acústico mostrou ser uma ferramenta capaz de apontar problemas relacionados com a dressagem.

Neste trabalho, investigando o processo de retificação center-less de mergulho, o sistema de mapeamento também foi utilizado com a mesma finalidade. Para tanto, uma marca foi criada na superfície do rebolo de corte. Vale ressaltar que, além de detectar os problemas relacionados com a superfície do rebolo, o sistema de

mapeamento foi capaz de detectar uma anomalia relacionada à cinemática do processo de dressagem.

5.3.2 Peça boa

Uma grande quantidade de trabalhos vem sendo desenvolvidos em muitos centros de excelência em pesquisa, na área de fabricação, tanto neste país (São Carlos, Uberlândia, Campinas, Santa Catarina, Bauru, Belo Horizonte, etc) quanto no exterior. Muitos destes trabalhos têm investigado o monitoramento e controle dos processos, a fenomenologia da usinagem dentro de diversos processos, dentre outros assuntos.

A maioria destes trabalhos tem sido de importância vital para um melhor entendimento dos processos de fabricação mecânica e tem, proporcionado um considerável salto quantitativo e qualitativo da pesquisa tecnológica no Brasil.

Como já sabido, as condições finais de acabamento superficial, o controle dimensional e a integridade da peça obra, quando necessitam ser obtidos dentro de condições estreitas de tolerância, causam uma exaustiva carga de trabalho ao operador de máquina.

A possibilidade de se observar, através de um mapa on-line, as condições que dizem respeito a circularidade da peça, parâmetro fundamental que dita a qualidade do método center-less, pode ser considerada como de fundamental importância tanto para o operador de máquina, quanto para técnicos e engenheiros de processo.

Visando estabelecer um padrão gráfico que determine a qualidade da peça retificada, um "setup" de máquina ótimo foi ajustado e testes foram realizados.

5.3.3 Rebolo de corte desbalanceado

Um dos problemas que, freqüentemente influencia o processo de retificação e cria uma instabilidade no mesmo está relacionado com o desbalanceamento do rebolo de corte. Com o intuito de verificar a influência deste desbalanceamento na qualidade final da peça retificada, bem como a possibilidade de monitoramento desta

anomalia com o sistema proposto, testes foram realizados criando uma condição inadequada de trabalho.

Nestes experimentos, um contra-peso foi fixado na flange do rebolo de corte como visto na Figura 5.9.

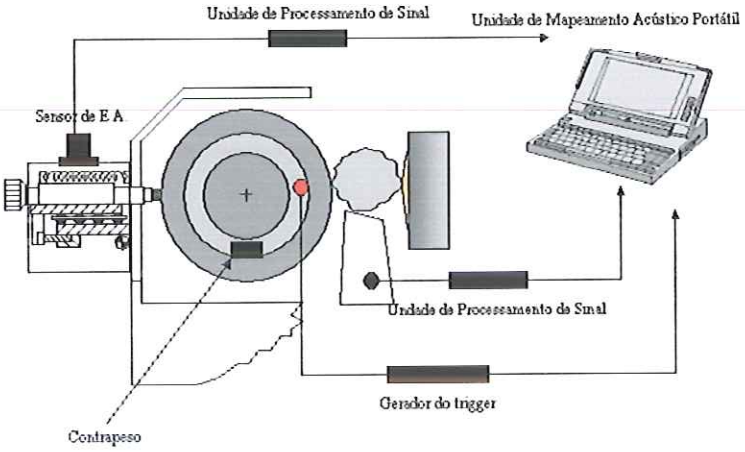


FIGURA 5.9 – Figura ilustrando fixação de um contrapeso na flange do rebolo de corte.

Através deste procedimento, foi criada uma condição tal que o contato entre rebolo de corte e peça passa a ocorrer mais fortemente em regiões específicas do rebolo. O desvio de circularidade gerado tem um número de lóbulos correspondente a relação existente entre o número de rotações do rebolo de corte e o número de rotações da peça.

Esta variação da profundidade instantânea de corte apresenta uma dada freqüência em relação a uma volta da peça, ocasionando, conseqüentemente, remoções diferenciadas de material ao longo do diâmetro da mesma, o que proporcionará uma condição instável no que diz respeito ao surgimento de vibrações, o que podem ser detectadas por um sensor de emissão acústica.

5.3.4 Altura inadequada entre centro da peça e centro dos rebolos

Reeka (1967), Konig (1980) entre outros têm estabelecido, através de diagramas, condições ótimas de trabalho durante a retificação center-less. Desta forma, verifica-se que uma distância incorreta entre o centro da peça e os centros dos

rebolos de corte e de arraste, durante processo pode resultar na obtenção de peças com circularidade ruim.

Este experimento cria, através da introdução de calços retificados sob a régua suporte (ver Figura 5.10), uma condição imprópria de se trabalhar na retificadora center-less.

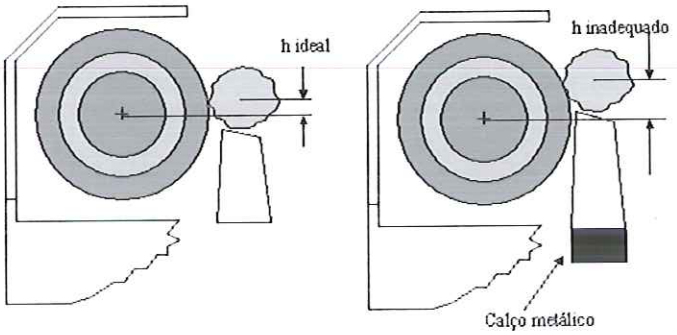
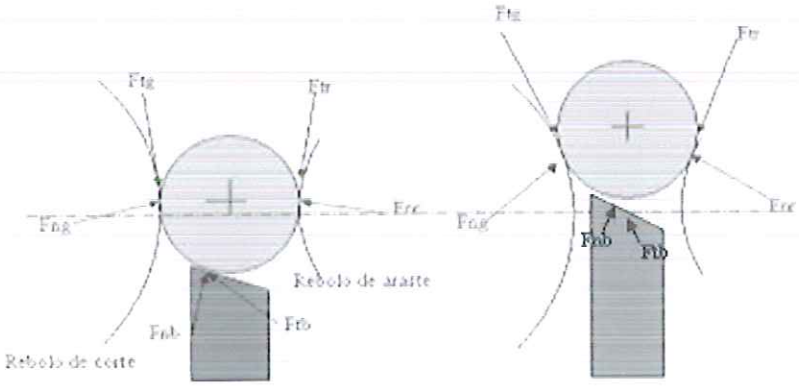


FIGURA 5.10 – Ilustração apresentando a introdução de calço metálico sob a régua de apoio, ocasionando condição inadequada de trabalho.

Calços de 3, 5 e 8mm foram utilizados durante os testes. Esta elevação da altura entre centros tende a alterar o posicionamento dos vetores força tangencial e normal aplicados durante retificação sobre a peça, como mostrado na Figura 5.11.



(a) (b)

FIGURA 5.11 – Alteração do posicionamento dos vetores força em função da modificação da altura entre centros. (a) Condição adequada de trabalho e (b) condição inadequada de trabalho.

Esta modificação na configuração geométrica pode causar uma instabilidade durante trabalho, acarretando em produtos obtidos fora de especificação. Assim,

testes foram realizados utilizando variadas alturas acima dos centros e buscando-se encontrar diferenças entre os mapas obtidos durante retificação.

5.3.5 Vibrações no processo center-less

Problemas causados devido a níveis excessivos de vibração durante retificação têm sido apontados há décadas por inúmeros pesquisadores. Buscando detectar fontes propagadoras de vibração durante o processo center-less e desta forma, criar um padrão gráfico que caracterize esta anomalia, situações inadequadas de trabalho foram criadas.

Uma primeira tentativa de se observar problemas durante retificação foi elaborada. Através deste procedimento, foram introduzidos, no alojamento da régua, suporte anéis de borracha, objetivando-se reduzir a rigidez do sistema, conforme mostrado na Figura 5.12. Diversas condições de ajuste do sistema foram realizadas, onde, através do uso de um martelo de impacto, foram observadas as frequências naturais principais do sistema.

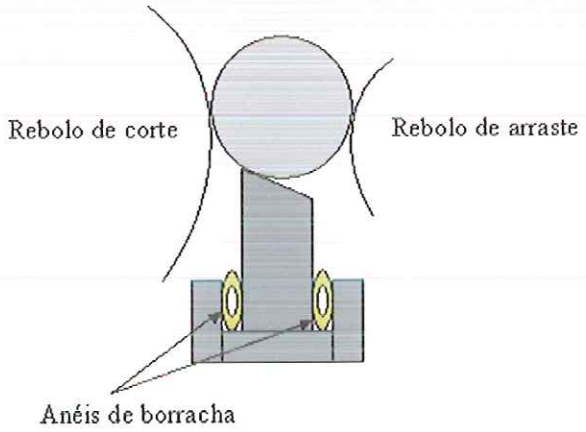


FIGURA 5.12 – Anéis de borracha introduzidos no suporte da régua de apoio.

Foi observado porém, que em função das condições de fixação do sistema, a freqüência natural gerada pela peça, durante usinagem, não seria alta o suficiente para excitar a freqüência natural da régua e, conseqüentemente, gerar vibração no sistema e esta ser detectada pelo sistema de mapeamento acústico do processo.

Uma segunda tentativa foi realizada, onde uma parte da régua suporte foi fresada até que sua espessura, neste local, atingisse a medida de 1,5mm. A Figura 5.13 apresenta o perfil da régua utilizada durante o teste.

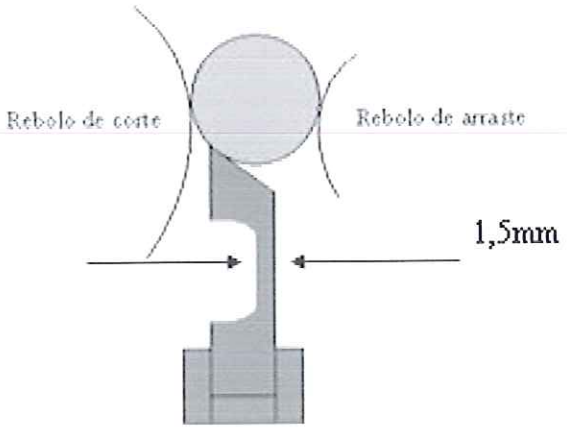


FIGURA 5.13 – Representação esquemática da região onde a régua de apoio foi fresada.

O martelo de impacto foi novamente usado para aquisição da função resposta em freqüência (sinal de entrada pelo sinal de saída) e para verificar as características modais do sistema. A resposta do sistema à entrada impulsiva foi medida através de um acelerômetro posicionado na extremidade contrária à excitação. De posse das freqüências naturais da régua, os valores de rigidez foram obtidos. Mesmo observada a alta rigidez do sistema e uma condição, onde a espessura da régua era muito pequena, um teste foi realizado, retificando-se um eixo. O resultado obtido não foi satisfatório, tendo a régua se partido durante o teste.

Uma terceira tentativa foi realizada, onde utilizou-se um excitador eletrodinâmico para excitar a máquina durante os experimentos. O "shaker" foi fixado na estrutura da retificadora center-less, utilizando-se uma haste que, através de um sinal senoidal forçou o sistema a vibrar na freqüência natural da régua. Mesmo com o uso de um excitador, não foi possível simular condições instáveis de trabalho na retificadora center-less.

Desta forma, partiu-se para tentativa de excitar a retificadora cilíndrica CNC Zema, alocada no LOPF, para verificar a possibilidade de monitoramento de vibrações durante o processo e resultados satisfatórios foram obtidos.

5.3.6 Retificação com rotação excessiva do rebolo de arraste

O controle da rotação da peça, durante o processo de retificação está intimamente ligado à rotação do rebolo de arraste, ao seu coeficiente de atrito e à sua condição de dressagem. De acordo com Oliveira (1994), para ciclos curtos de retificação é recomendável que se utilize uma maior rotação para a peça, pois isto acarreta em uma maior distribuição de calor e, conseqüentemente menor temperatura de retificação.

Nesta condição de trabalho, em casos onde a rotação da peça ultrapassa um determinado limite, acarretando instabilidade ao processo, o fluido de corte tende a infiltrar-se entre a régua de trabalho e a peça, reduzindo a componente de atrito entre estes elementos. Para este "setup" inadequado, a peça pode girar, em algumas situações, com a mesma velocidade periférica do rebolo de corte e, em casos extremos, pular para fora da área de retificação, podendo causar danos ao processo.

Um outro problema, causado devido à excessiva rotação do rebolo de arraste está associado às vibrações auto-excitadas. Esta condição inadequada de trabalho leva a obtenção de peças com perfil facetado. Para se detectar este problema, foi utilizado, em processo, uma rotação do rebolo de arraste que contraria as condições ideais de trabalho, a fim de obter padrões gráficos que se diferenciem do padrão gráfico de uma peça retificada adequadamente.

5.3.7 Retificação com pouca quantidade e ausência de fluido de corte

O emprego de fluidos de corte nas operações de usinagem, objetiva reduzir o custo total das partes usinadas ou então aumentar a taxa de produção. Nos últimos tempos, grandes avanços tecnológicos foram obtidos, causando aumento na qualidade dos fluidos de corte.

Um fator fundamental que influenciou consideravelmente na melhoria da qualidade dos fluidos de corte foi a pressão exercida por agências de proteção ambiental e agências de saúde, para que os produtos sejam comercializados com mais segurança e causem menos danos ao meio ambiente.

Muitos estudos têm proclamado o uso, de quantidades mínimas de fluido de corte. O principal obstáculo desta técnica para substituir os fluidos de corte em retificação é que a energia gerada no processo, dissipada como calor, provoca temperaturas elevadas. Isto pode resultar em danos térmicos à peça e conduzir a imperfeições dimensionais. Os fluidos de retificação controlam estes efeitos indesejáveis ao fornecer lubrificação e resfriamento. A lubrificação reduz a potência de retificação e a geração de calor, ao mesmo tempo em que também melhora a qualidade superficial e reduz o desgaste do rebolo. O resfriamento remove o calor do rebolo e/ou da peça.

Com o intuito de detectar danos gerados devido a condições de refrigeração/lubrificação deficientes, utilizando o sistema de mapeamento acústico, hastes de válvulas foram retificadas com o uso de pouca quantidade de fluido e com nenhuma quantidade de fluido.

5.4 Resultados e análise

5.4.1 Velocidades diferentes de dressagem

Um fator que apresenta grande influência sobre as condições do processo center-less é a dressagem do rebolo de corte. O estabelecimento de condições cinemáticas controladas, que consistem no deslocamento do dressador em relação ao rebolo em movimento de rotação, para a operação de dressagem, é de grande importância para obtenção de componentes com requisitos de qualidade e integridade superficial e dimensional controladas.

Desta forma, uma investigação acerca do processo de dressagem apresenta caráter fundamental para uma melhor compreensão das características da máquina operatriz utilizada e, desta maneira, é possível atuar sobre as condições de setup de máquina com o objetivo de se obter condições otimizadas de trabalho.

Na retificadora center-less utilizada neste trabalho, o sistema de dressagem tanto do rebolo de corte como do rebolo de arraste, era comandado por uma válvula reguladora que, em função de sua abertura, controlava o passo de dressagem. O

conjunto então trabalhava dressando o rebolo de corte no sistema ida-retorno. A Figura 5.14 ilustra a dressagem nos dois sentidos.

O sistema de alinhamento do carro dressador é ajustado através de um came seguidor que estabelece um paralelismo entre a ponta do dressador e a superfície do rebolo. Falhas no alinhamento entre dressador e rebolo tem influência direta sobre a topografia ativa do rebolo, o que pode acarretar sérios problemas, às condições da peça durante a retificação.

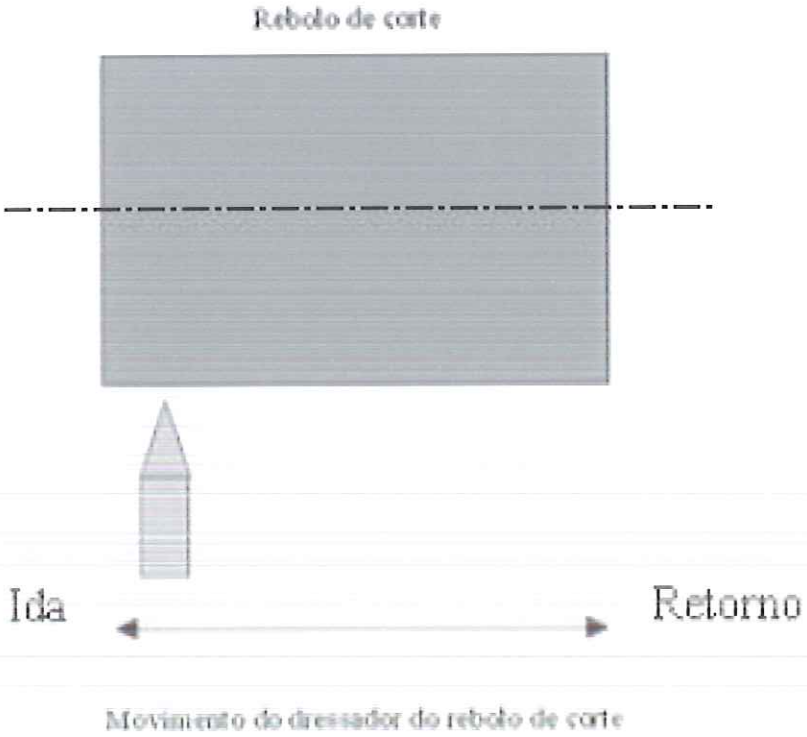


FIGURA 5.14 - Desenho esquemático mostrando movimento de dressagem em dois sentidos.

A Figura 5.15 apresenta dois mapas caracterizando o processo de dressagem do rebolo de corte. O mapa 1 representa a condição ideal de dressagem, no sentido de ida do dressador, para obtenção de componentes com requisitos pré-estabelecidos de acabamento superficial e circularidade, ou seja, com valores de passo (Sd) e profundidade (ad) de dressagem adequados.

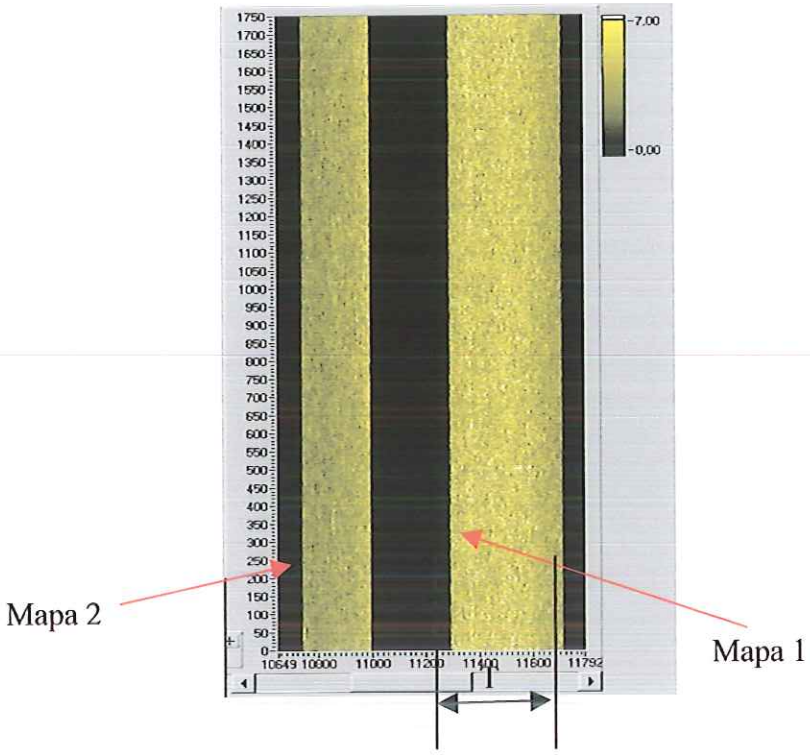


FIGURA 5.15 - Mapas representando variações no avanço e na profundidade de dressagem.

Verifica-se entretanto, no mapa 2, que caracteriza a dressagem no sentido do retorno do dressador (vem), uma redução no tempo de dressagem "T" e uma diminuição na atividade acústica, caracterizada pela menor intensidade da cor amarela do mapa. Uma escala de cores foi definida durante a realização dos experimentos, a qual define a coloração preta para baixa intensidade acústica e a coloração amarela para alta intensidade acústica.

Estes diferentes comportamentos, obtidos para uma mesma condição de abertura de válvula controladora de dressagem acarretam em problemas na operação de dressagem. Um menor tempo "T" de dressagem resulta em um maior passo de dressagem que causa um condicionamento não adequado ao rebolo, possibilitando a obtenção de peças com pior acabamento superficial. Desta forma, através do uso do sistema de mapeamento do processo pode-se atuar sobre o processo de maneira a solucionar o problema existente, que diz respeito a variação das condições de dressagem.

5.4.2 Correção de falhas na superfície do rebolo

Os gráficos mostrados nas Figuras 5.16 e 5.17 evidenciam uma falha na superfície do rebolo, causada propositadamente. Porém, marcas na superfície do rebolo podem, por exemplo, ser ocasionadas por um desgaste irregular que, diretamente irá afetar a vida do rebolo e a acuracidade da peça (GOMES, 2001).

A determinação do momento da dressagem deve ser feita criteriosamente para evitar a rejeição de peças produzidas que, nesta fase do processo possuem um alto valor agregado. A vantagem deste monitoramento consiste em se evitar que o operador utilize a dressagem mais que o necessário, acarretando em um maior tempo para realização da operação e maior consumo de rebolo de corte e dressador. Assim, após o primeiro passe de dressagem, esta é continuada até que o rebolo apresente o contorno desejado, como mostrado na Figura 5.18.

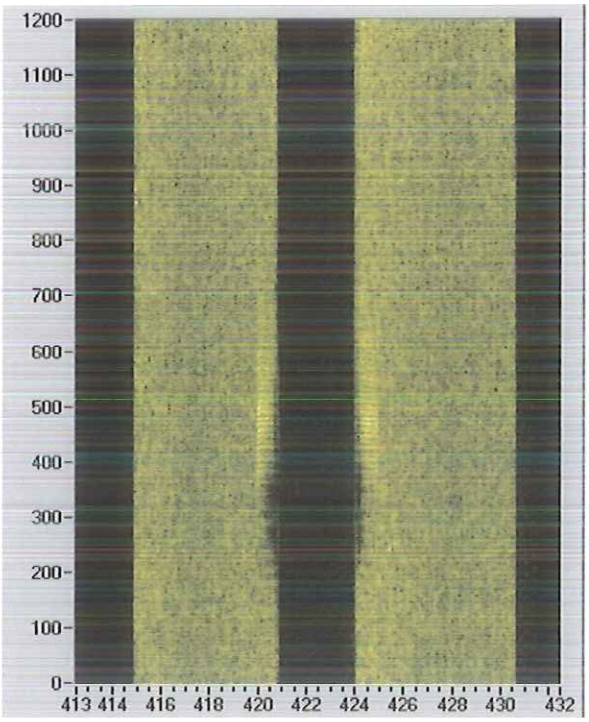


FIGURA 5.16 - 1º e 2º passes de dressagem, realizados para a correção da superfície do rebolo.

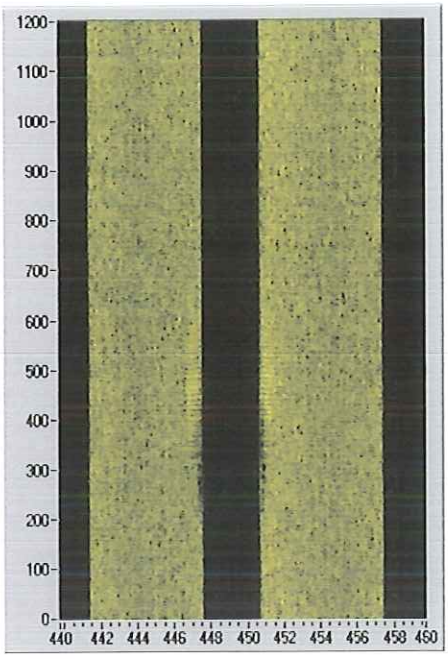


FIGURA 5.17 - $3^{\underline{0}}$ e $4^{\underline{0}}$ passes de dressagem, realizados para correção da superfície do rebolo.

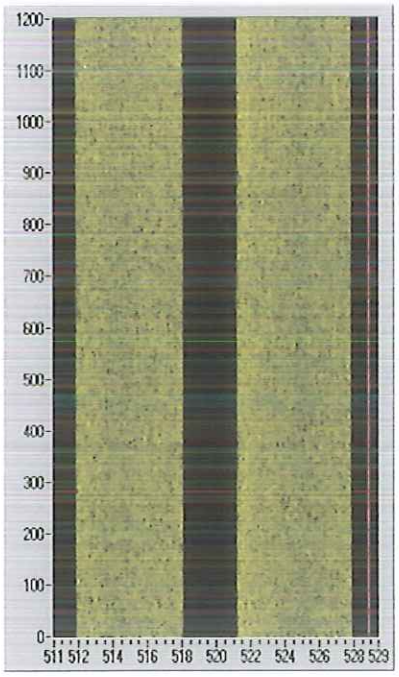


FIGURA 5.18 - Últimos passes de dressagem, realizados para correção da superfície do rebolo.

5.4.3 Rebolo de arraste excêntrico

Como se sabe, problemas como desbalanceamento ou excentricidade de rebolos tendem a causar sérios danos às condições de retificação. Para a retificação center-less, este problema pode se agravar ainda mais devido ao uso de dois rebolos durante o processo: o rebolo de arraste e o rebolo de corte. O rebolo de arraste pode ser considerado como a principal peça que compõe a estrutura da retificadora center-less, pois este cria uma condição não encontrada na retificação cilíndrica entre pontas ou em qualquer outro tipo de retificação, que é o controle da rotação da peça, e cria uma pressão necessária da peça sobre o rebolo, auxiliando no processo de remoção de material.

Um ponto importante a ser mencionado é que, para rotações definidas dos rebolos de corte e de arraste, a rotação da peça é obtida através da equação:

$$N_p = N_{ra} \times \frac{D_{ra}}{D_p} \qquad (10)$$

Onde:

Np = Rotações da peça por minuto

Nr_a = Rotações do rebolo de arraste por minuto

Dr_a = Diâmetro do rebolo de arraste

Dp = Diâmetro da peça

Assim, para as condições de retificação descritas abaixo:

Rotações do rebolo de corte por minuto (Nr_c) = 3150rpm

Rotações do rebolo de arraste por minuto = 20 rpm

Diâmetro do rebolo de corte = 303mm

Diâmetro do rebolo de arraste = 203mm

Diâmetro da peça = 9,0mm

Tempo de ciclo de retificação (Tciclo) = 8,5s

Os seguintes valores foram encontrados:

Rotações da peça por minuto (Np) = 451rpm

Rotações da peça por segundo (Np_s) = 7,52rps

Levando-se em consideração um tempo total de ciclo de retificação de 8,5s, temos:

Rotações da peça por ciclo (Npciclo) = 63,92 voltas por ciclo de retificação.

Rotações do rebolo de arraste por ciclo (Nr_aciclo) = 2,83 voltas por ciclo.

Através de verificação das condições de circularidade do rebolo de arraste utilizando um relógio comparador, foi encontrada uma excentricidade de 0,01mm. Este valor é considerável, pois a taxa de remoção de material por ciclo de retificação, foi definida como 0,02mm.

Sendo assim, a Figura 5.19 apresenta os tempos T1, T2 e T3, sendo que cada um destes tempos define uma volta do rebolo de arraste. Verifica-se na primeira volta (T1), uma variação no nível do sinal de emissão acústica, pois as faixas escuras verticais representam ausência do sinal e as faixas amarelas representam atividade acústica considerável.

Graficamente (Figura 5.19) observa-se, aproximadamente, 60% de atividade acústica em uma volta do rebolo de arraste, ou seja, em 40% da volta do rebolo de arraste a peça praticamente não é retificada. Este acontecimento pode acarretar em um desgaste irregular na superfície dos rebolos de corte e de arraste e imperfeições na qualidade do produto final poderão ser observadas.

Foram realizados testes, variando-se a rotação do rebolo de arraste, conforme mostrado nas Figuras 5.20, 5.21, 5.22 e 5.23 e foi verificado que em função das alterações no número de rotações do rebolo de arraste, o espaçamento entre a falhas no sinal de emissão acústica também eram modificados.

Após estes experimentos, o eixo do rebolo de arraste foi removido da retificadora center-less e retificado com o objetivo de sanar o problema de excentricidade observado.

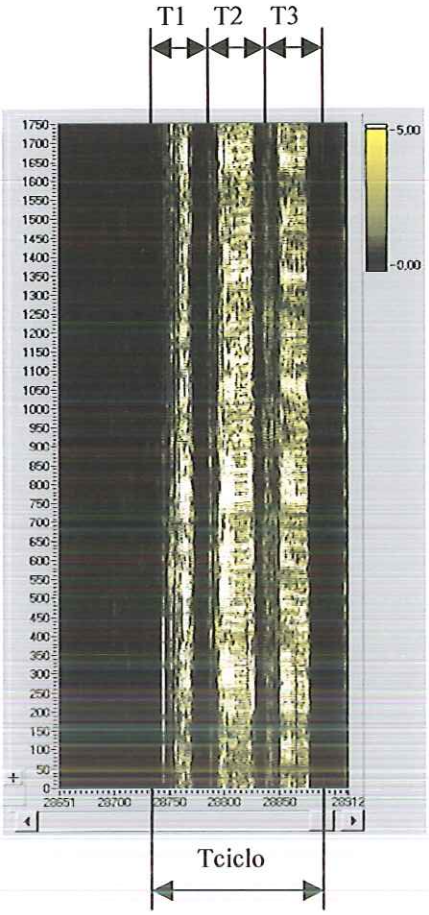


FIGURA 5.19 - Rebolo de arraste excêntrico (20rpm).

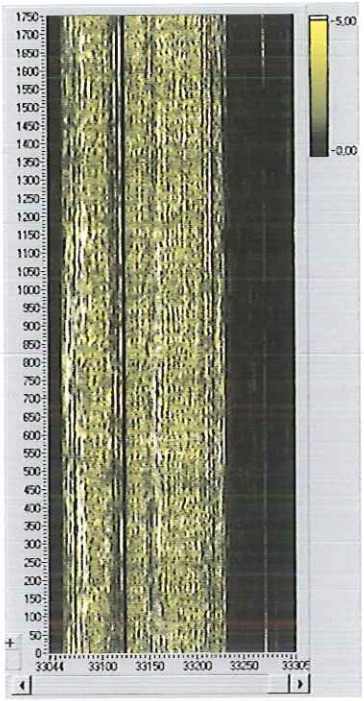


FIGURA 5.20 - Rebolo de arraste excêntrico (11rpm).

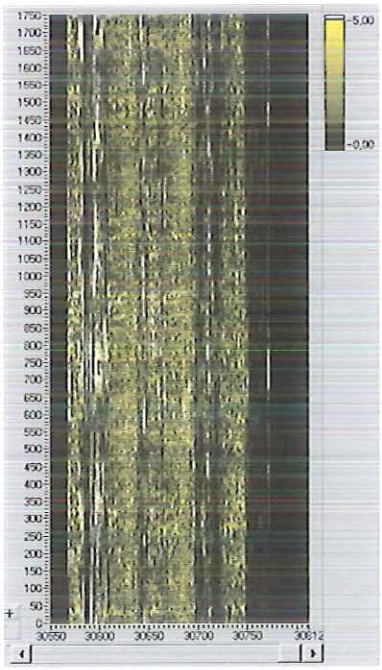


FIGURA 5.21 - Rebolo de arraste excêntrico (28 rpm).

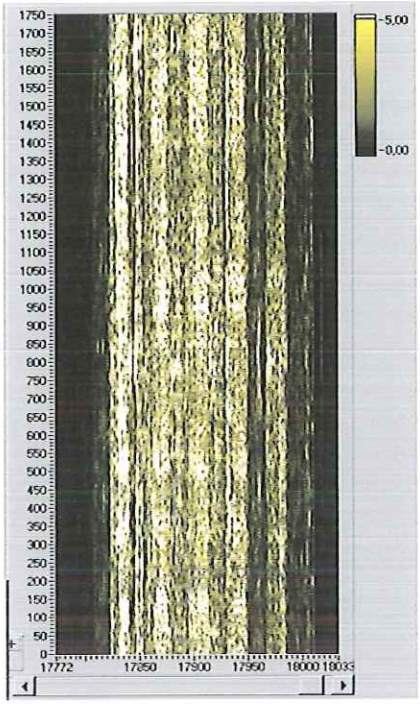


FIGURA 5.22 - Rebolo de arraste excêntrico (35rpm).

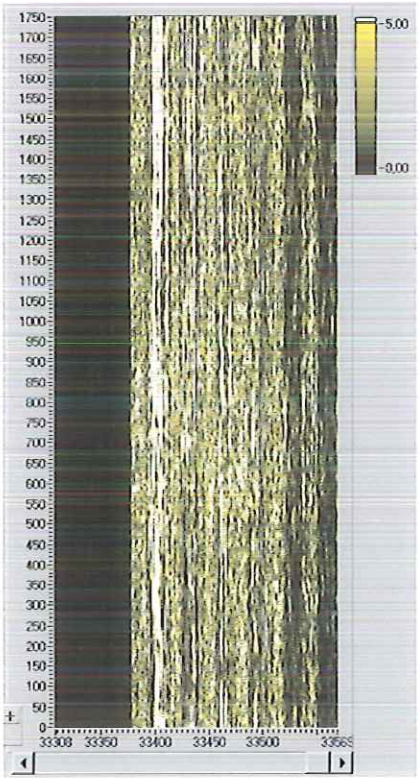


FIGURA 5.23 - Regulagem ruim do rebolo de arraste (42rpm).

5.4.4 Retificação adequada de haste de válvula.

Os parâmetros de regulagem de máquina, tais como avanço de corte, tempo de "sparkout", rotação dos rebolos de corte e de arraste, influenciam consideravelmente o processo. A geometria formada pelos rebolos de corte e de arraste e a peça proporciona à retificação center-less sua estabilidade, permitindo assim, se adequadamente estabelecida, a obtenção de peças com excelente circularidade.

Um fator de grande relevância é a distância existente entre o centro da peça e o centro dos rebolos. REEKA (1967) estudou o complexo mecanismo de formação de circularidade e criou um diagrama, já apresentado neste trabalho no item 2.3.1, que, baseado nas relações existentes entre o diâmetro do rebolo de corte, diâmetro do rebolo de arraste e diâmetro da peça, pode-se obter a distância adequada do centro da peça aos centros dos rebolos de corte e de arraste e desta forma consegue-se fabricar peças com ótima circularidade.

Baseado nas informações fornecidas por REEKA (1967), a retificadora foi regulada com uma distância de 7,5mm entre o centro da peça e o centro dos rebolos, utilizando uma régua de apoio com topo de metal duro apresentando uma inclinação de 30^0.

Após o estabelecimento das condições de trabalho da máquina, como ciclo de desbaste, sparkout e rotação do rebolo de arraste, bem como de uma acertada condição de refrigeração/lubrificação e de uma adequada dressagem dos rebolos de corte e de arraste, foram retificadas hastes de válvulas, que apresentavam um diâmetro inicial de 9,02mm. Durante cada ciclo de retificação de acabamento retirava-se 0,02mm no diâmetro da válvula.

Em função da utilização de condições ideais de trabalho, foram obtidas amostras com satisfatório erro de circularidade, como mostrado no mapa da Figura 5.24.

Verificou-se uma uniformidade do padrão gráfico do mapa acústico, onde os vetores que compõem os sinais de emissão acústica estão totalmente preenchidos, caracterizando o contato permanente do rebolo de corte com a peça, ou seja, as variações na profundidade instantânea de contato entre rebolo e peça não são consideráveis e o resultado foi a obtenção de um erro de circularidade de 1,8μm.

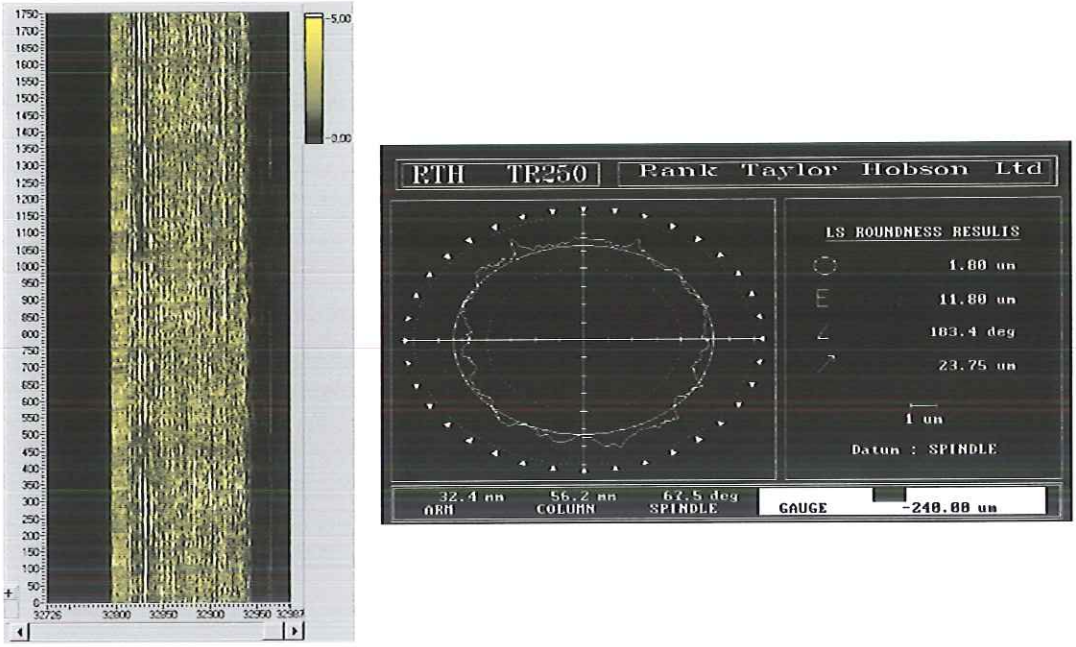


FIGURA 5.24 - Retificação padrão de válvula com boa circularidade.

5.4.5 Retificação com rebolo de corte desbalanceado.

Considerando que todo rebolo apresenta um leve desbalanceamento, este afeta o processo a medida que, mesmo a sua menor amplitude em sincronismo com a rotação da peça pode gerar um perfil com circularidade insatisfatória na peça. A fim de verificar a possibilidade de detecção desta anomalia, o rebolo de corte foi propositadamente desbalanceado através da introdução de um contra-peso na flange do mesmo.

Através deste procedimento, foi possível obter um desbalanceamento considerável no rebolo de corte. Durante este experimento utilizou-se 3150rpm para o rebolo de corte e 20rpm para o rebolo de arraste. A relação entre a rotação do rebolo de corte e da peça foi de 8:1.

A Figura 5.25 apresenta o resultado obtido durante a retificação de haste de válvula com o rebolo de corte desbalanceado. Um considerável erro de circularidade (3,70μm) pode ser observado. A relação existente entre as rotações do rebolo de arraste e da peça, que é controlada pelo rebolo de arraste, permitiu a obtenção de uma peça com 8 lóbulos.

Este desbalanceamento gera uma maior instabilidade no processo, devido à variação da profundidade instantânea de corte, associado a um alto nível de vibração da retificadora e, desta forma, o perfil de circularidade da peça apresenta-se como insatisfatório.

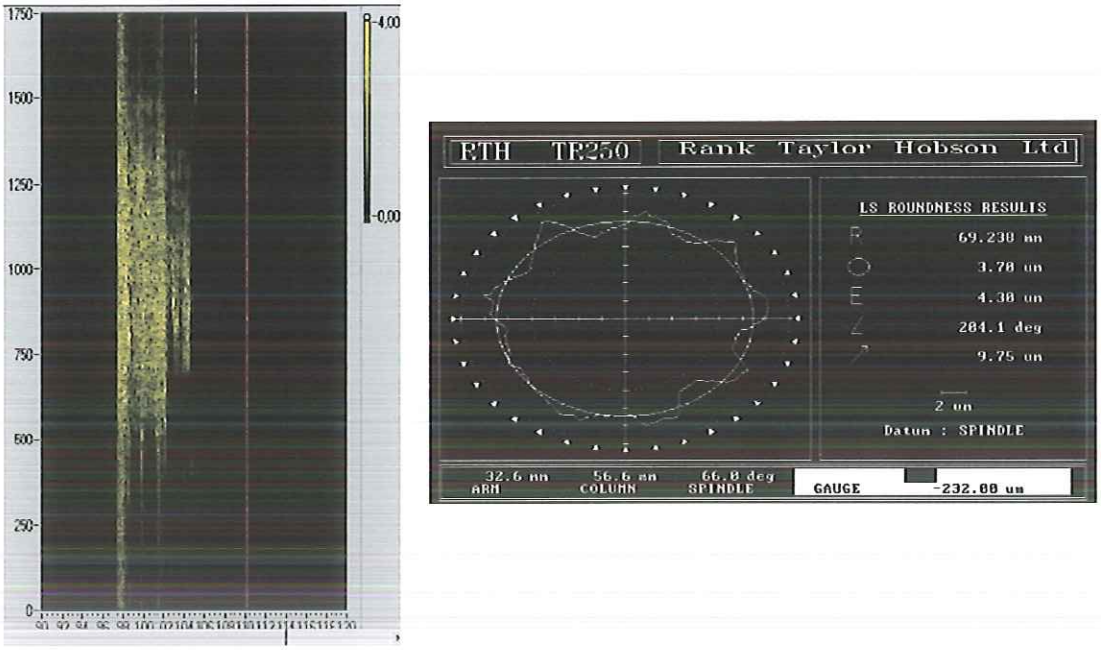


FIGURA 5.25 - Retificação de válvula com rebolo de corte desbalanceado.

5.4.6 Retificação com altura inadequada da régua de apoio.

A fim de possibilitar uma diferenciação entre os padrões gráficos de condições de "setup" adequado e inadequado, procurou-se estabelecer uma situação distante daquela apresentada por Reeka (1967) para obtenção de peças com boa circularidade.

Para tal, buscou-se aumentar a altura do centro da peça em relação a linha de centro dos rebolos, através da inserção de calços retificados de 3, 5 e 8mm sob a régua suporte. Com este procedimento, a distância entre centros passou a ser maior, ou seja, houve um aumento no ângulo γ. Os demais parâmetros de "setup" de máquina permaneceram inalterados, em relação a condição ótima de "setup".

O mapa acústico do processo quando dá introdução de um calço retificado de 3mm sob a régua de apoio não se diferenciou muito da imagem obtida quando da

retificação adequada de uma peça, mostrada na Figura 5.24. A circularidade da peça, obtida durante estes testes, foi considerada satisfatória.

A Figura 5.26 apresenta o mapa acústico quando utilizou-se um calço de 5mm sob a régua suporte e, pode-se observar também um desbalanceamento do rebolo de corte.

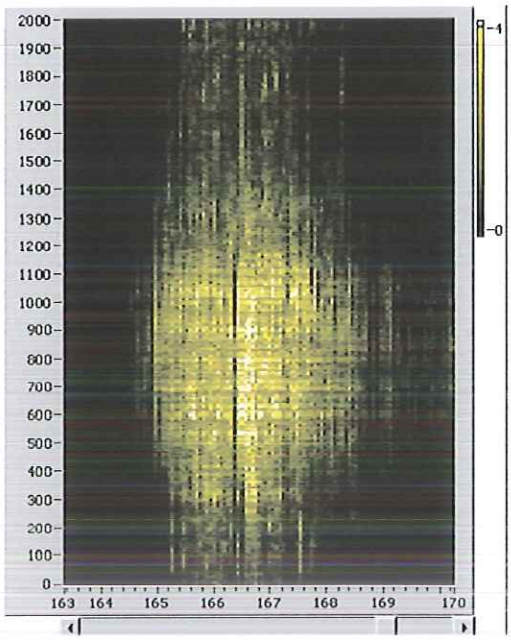


FIGURA 5.26 - Mapa obtido durante retificação com o uso de calço de 5mm sob a régua de apoio.

Através do mapa apresentado na Figura 5.27 pode-se observar um comportamento heterogêneo dos sinais de emissão acústica. Neste caso, um calço de 8mm foi montado sob a régua de apoio.

Podem ser vistas regiões caracterizando ausência, condição normal e saturação dos sinais de emissão acústica. Os pontos escuros no mapa indicam ausência de sinal, os pontos amarelos condição normal e os pontos brancos condição de saturação do sinal.

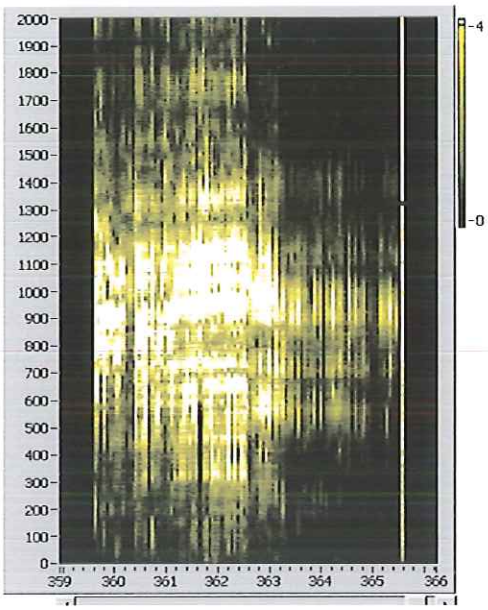


FIGURA 5.27 - Mapa obtido durante retificação com o uso de calço de 8mm sob a régua de apoio.

Uma explicação simplificada pode ser apresentada para esta condição de retificação, pois a medida em que se estabelece uma condição de trabalho inadequada, os vetores força agem de tal forma a criar uma instabilidade no processo center-less. Este desequilíbrio, em alguns momentos, faz com que a peça perca o contato com a régua suporte, conforme Figura 5.28, acarretando em ausência de sinais de emissão acústica.

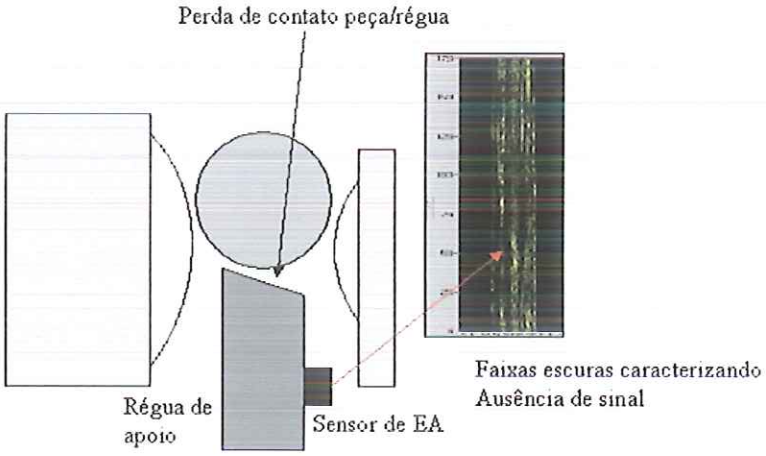


FIGURA 5.28 – Perda de contato da peça com a régua de apoio acarretando em ausência de sinal durante processo.

Com o desenvolvimento da retificação do componente, este, que anteriormente flutuava sobre a régua, agora é forçado, eventualmente (ver Figura 5.29) contra a régua causando uma saturação no nível do sinal.

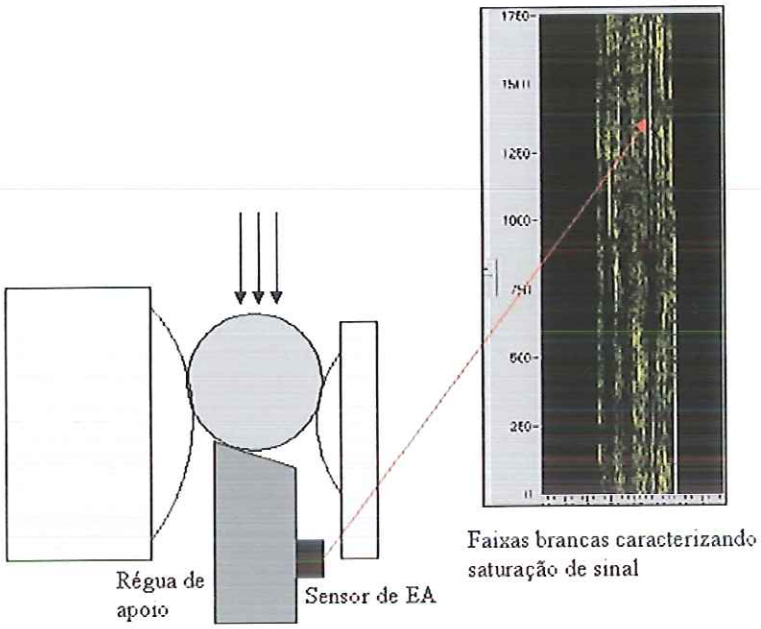


FIGURA 5.29 – Representação do contato forçado entre régua de apoio e peça.

Em condições "quase normais" de retificação, que também pode ser observada nestas condições de trabalho, tem-se uma interação satisfatória entre o rebolo de corte e a peça. Desta forma, o sistema de mapeamento foi capaz de caracterizar uma anomalia, que em muito pode deteriorar as condições de trabalho, seja por um desgaste heterogêneo do rebolo de corte ou rebolo de arraste ou por um desgaste excessivo da régua de apoio ou também uma qualidade insatisfatória da peça fabricada. A circularidade da peça obtida nesta condição foi considerada muito ruim, apresentando facetamentos visíveis.

5.4.7 Vibrações durante retificação.

Problemas em retificação podem, subitamente, ocorrer devido a uma série de causas. Dentre estas, as vibrações forçadas e as vibrações auto excitadas estão entre as mais comumente encontradas e podem acarretar sérios danos a qualidade final da

peça, pois os requisitos dimensionais e superficiais são elevados, a profundidade de corte é pequena e mesmo a menor amplitude de vibração pode, avariar as condições do processo.

Vibrações forçadas são causadas por distúrbios externos ao processo tais como o eixo de rebolo desbalanceado, vibração em rolamentos, erros de fabricação e montagem. Por outro lado, vibrações auto-induzidas estão geralmente associadas aos modos de vibração natural da estrutura da máquina. Fontes de vibrações auto-induzidas podem estar relacionadas a forças cíclicas e desbalanceadas ou desgaste irregular do rebolo de corte.

O desgaste do rebolo de corte, durante o processo pode gerar irregularidades no processo de retificação, causando variações na força de corte que, dinamicamente, podem excitar a estrutura da máquina. Isto pode levar a variações na profundidade local, durante sucessivos passes do rebolo, causando vibração.

A Figura 5.30 mostra o mapa obtido durante a retificação quando, repentinamente, a máquina vibrou. Pode-se verificar na área destacada do mapa, padrões inclinados que diferem do padrão geral do mapa e que caracterizam o fenômeno de vibração durante o processo, quando não existe nenhuma correlação entre o fenômeno e a rotação do rebolo.

A existência dos padrões inclinados gerados no mapa se devem ao sincronismo do gatilho de aquisição que só ocorre quando o ressalto da flange passa pelo sensor de proximidade e a taxa de aquisição é função do tempo. Assim, uma freqüência de excitação, que seja diferente da freqüência de rotação do rebolo, implica em atraso ou antecipação na aquisição de um determinado ponto.

O mapa mostrado na Figura 5.31 foi obtido quando da retificação de eixos na retificadora cilíndrica CNC Zema na qual, foi utilizado um shaker para excitar a máquina. São observados também padrões inclinados ascendentes e descendentes, obtidos em função da variação da freqüência de excitação do sistema.

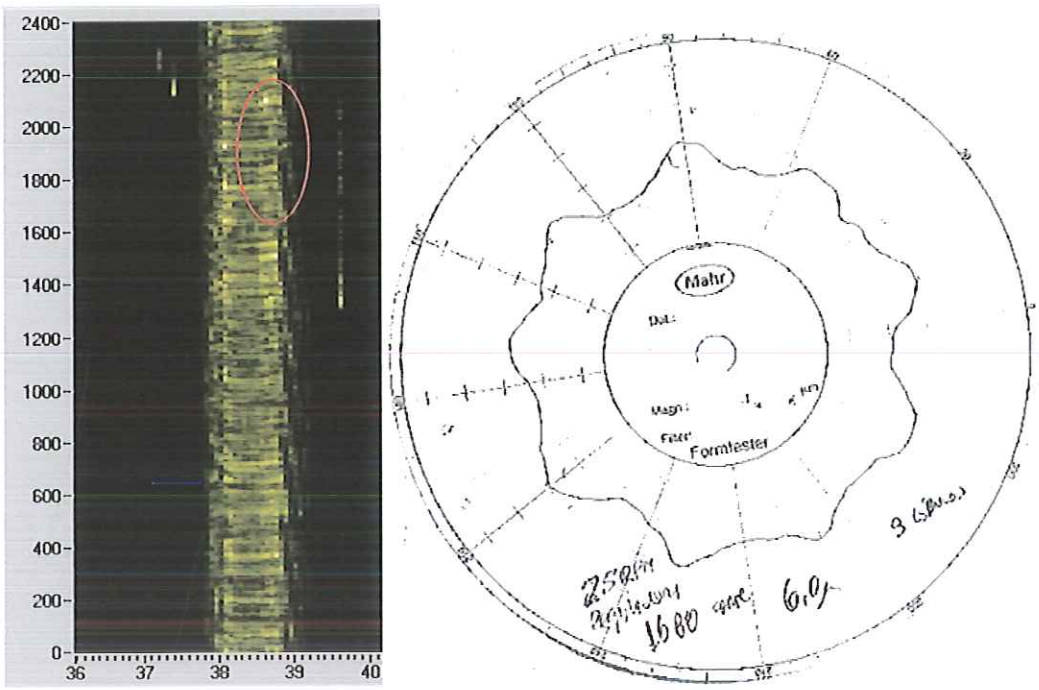


FIGURA 5.30 - Vibração durante "sparkout".

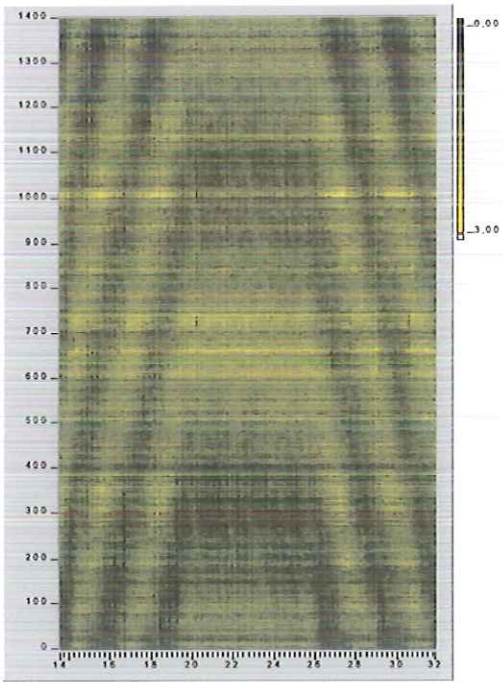


FIGURA 5.31 - Simulação de vibração com "shaker".

5.4.8 Rotação elevada do rebolo de arraste

Certas dificuldades no processo de retificação reduzem sua produtividade, restringindo sua alta acuracidade de forma, bem como um melhor acabamento das peças. Quando, em retificação center-less, a rotação da peça é extremamente alta, vibrações auto-excitadas podem ser observadas.

Para se observar problemas relacionados à rotação excessiva do rebolo de arraste, utilizou-se durante experimento, uma rotação de 70rpm. Os corpos de prova retificados com esta condição apresentaram perfil insatisfatório de circularidade, mostrado na Figura 5.32, onde observou-se um número de lóbulos idêntico ao perfil facetado obtido na peça.

A deterioração macrogeométrica da condição final do componente retificado foi devida a uma soma de fatores. Um destes fatores é influenciado pela formação de um filme fino de lubrificante entre a régua de apoio e a peça devido a instabilidade de rotação da peça em função do "setup" escolhido. Este fato contribui para que haja a perda de contato da peça com a régua. Em um segundo instante, a peça que havia momentaneamente perdido o contato com os rebolos e a régua entra novamente na região de corte e é severamente retificada. Desta maneira forma-se um perfil facetado na peça.

Este processo cíclico induz o aparecimento de vibrações no qual é possível ouvir os ruídos gerados durante o corte em função da instabilidade criada pela elevada rotação do rebolo de arraste. Assim, o sistema de mapeamento mostrou-se eficiente na detecção desta anomalia.

O mapa da Figura 5.32 claramente mostra o surgimento das vibrações durante retificação. A Figura 5.33 apresenta, de forma ampliada, a região do mapa em que é possível se observar os padrões inclinados decorrentes da vibração do sistema.

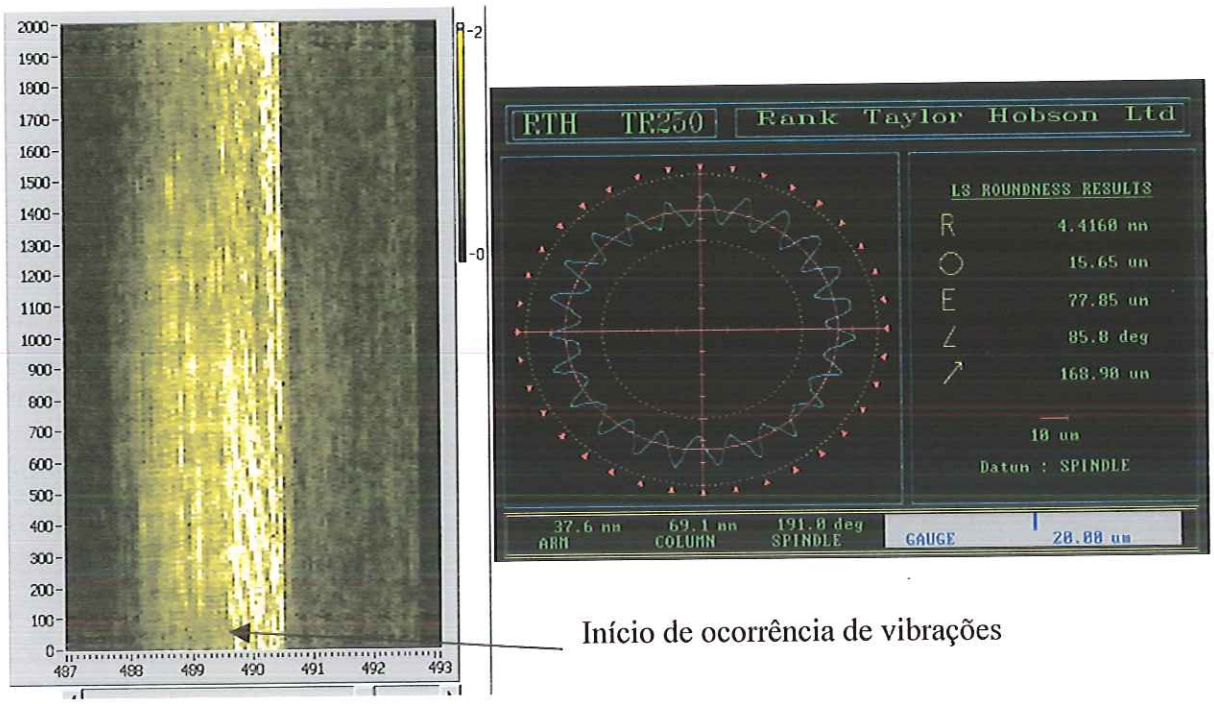


FIGURA 5.32 – Mapa obtido durante retificação utilizando rotação elevada do rebolo de arraste.

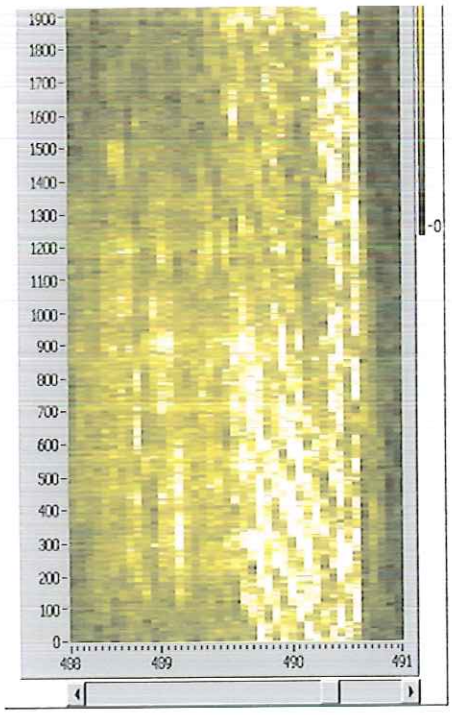


FIGURA 5.33 – Ampliação do mapa da Figura 5.32

5.4.9 Retificação com pouca quantidade e ausência de fluido de corte

A taxa de calor gerado durante o processo de retificação é reduzida pela ação direta dos fluidos de corte de maneira decisiva para a não ocorrência de danos térmicos superficiais na peça.

Além da refrigeração, os fluidos de corte contribuem também para a lubrificação da peça e agem diretamente sobre a integridade superficial, evitando a formação de tensões residuais de tração na sua superfície.

O mapa da Figura 5.34 representa a retificação de haste de válvula, em que foi utilizada pouca quantidade de fluido de corte, sendo obtida um erro de circularidade de 20μm na peça. Verificou-se em várias regiões da peça marcas de queima, ocasionadas pela alta temperatura gerada durante o processo, em função da pouca quantidade de fluido de corte usada.

Nota-se, na região destacada do mapa, áreas escuras, caracterizando ausência de sinal acústico e áreas amarelas, caracterizando o contato rebolo de corte/peça. Em função das condições deficientes de fornecimento de fluido de corte, a peça, a partir de um determinado ponto, passou a se contrair e dilatar periodicamente, acarretando em uma condição de corte intermitente, contribuindo ainda mais para uma condição imprópria de circularidade.

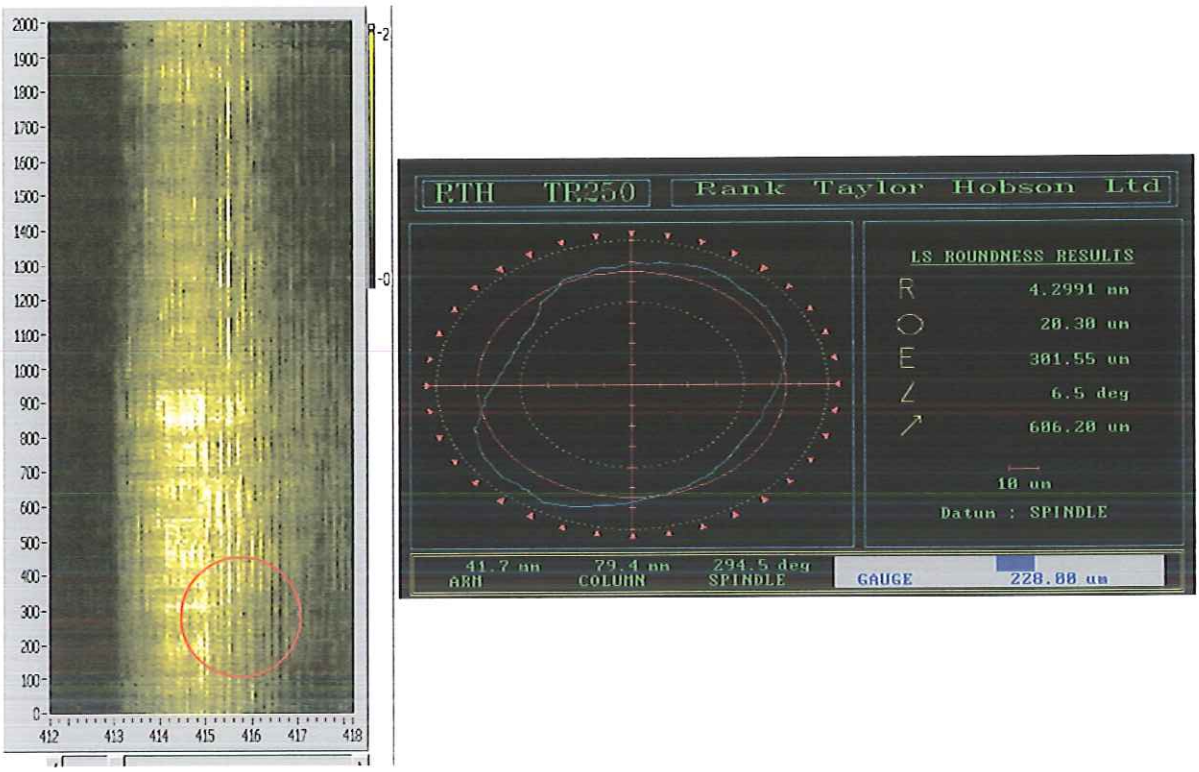


FIGURA 5.34 – Mapa representando retificação com pouca quantidade de refrigeração.

Uma condição ainda mais agressiva de retificação foi registrada pelo mapa da Figura 5.35, onde foi utilizada a retificação a seco. A severidade do processo é representada pelas linhas verticais do mapa, onde pode ser visto, claramente, desde o início da retificação, a alternância entre contato e ausência de contato do rebolo com a peça.

A dilatação e contração da peça causadas pela ausência de fluido de corte, fez com que a remoção de material em pontos distintos de contato rebolo/peça fosse modificada, acarretando em alterações no padrão do mapa acústico.

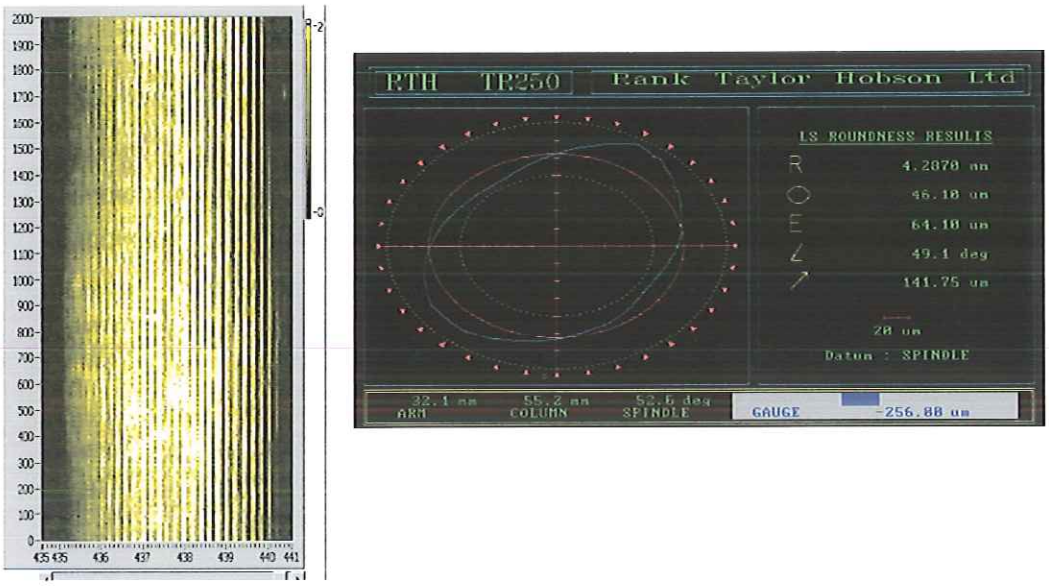


FIGURA 5.35 – Mapa representando retificação com ausência de fluido de corte.

5.5 Análise conclusiva

Em função dos resultados obtidos pode-se afirmar que o objetivo do trabalho foi alcançado. As dificuldades iniciais foram superadas abrindo-se desta forma um campo sem fim de possibilidades de estudos sobre a fenomenologia, monitoramento e automação do processo de retificação center-less.

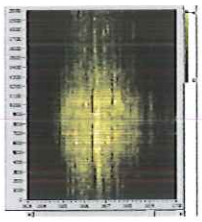
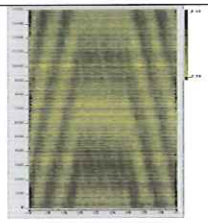
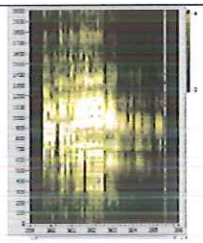
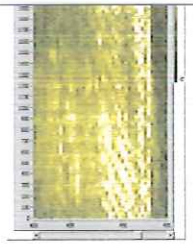
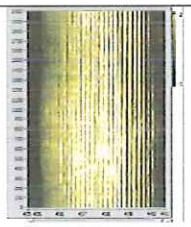
O sistema de monitoramento proposto e implementado foi capaz de detectar anomalias durante retificação e dressagem. Os mapas característicos de cada condição de retificação possibilitam atuar sobre o processo de maneira a se obter condições otimizadas de trabalho.

Os experimentos realizados com o intuito de detectar os principais parâmetros que influenciam o processo center-less, como: ciclo de desbaste, tempo de sparkout, rotação dos rebolos, dressagem e outros, em muito contribuíram para um melhor entendimento e compreensão de alguns aspectos científicos e tecnológicos da retificação.

Durante cada experimento foi possível investigar características particulares do processo e desta forma contribuir para o desenvolvimento da pesquisa em uma área distinta do conhecimento.

De forma geral, foi possível criar uma tabela (ver tabela 7) que caracteriza as principais anomalias do processo.

TABELA 7 – Principais anomalias do processo center-less.

Tipo de falha	Característica do mapa	Mapa
Desbalanceamento do rebolo de corte	Faixa horizontal indicando variação na profundidade instantânea de corte ao longo do perímetro do rebolo	
Vibrações durante a retificação	Faixas inclinadas indicando ausência de correlação entre o agente causador da vibração e a rotação do rebolo de corte	
Altura inadequada da régua de apoio	Comportamento heterogêneo dos sinais de EA. Regiões apresentam ausência, condição normal e saturação dos sinais	
Excentricidade do rebolo de arraste	Padrões verticais com freqüência de ocorrência igual a rotação do rebolo de arraste indicam excentricidade do rebolo de arraste	
Rotação elevada do rebolo de arraste	Padrões inclinados formados devido a vibração ocorrida em função de instabilidade do processo. Ruído característico	
Ausência de fluido de corte	Linhas verticais representando a alternância entre contato e ausência de contato do rebolo com a peça (dilatação e contração da peça)	

6 CONCLUSÕES

- É possível usar a análise do padrão RMS de emissão acústica para diagnóstico do processo de retificação center-less.

- Usando esta nova metodologia, é possível reconhecer problemas, durante retificação e dressagem, com baixa influência da flutuação do sinal RMS.

- O sistema desenvolvido apresenta grande flexibilidade e pode ser facilmente transportado para trabalhos de campo.

- A instalação dos sensores utilizados é simples, necessitando de apenas algumas alterações na máquina. O software pode ser instalado em um computador que suporte a placa de aquisição de dados.

- Existe uma correlação lógica entre os mapas obtidos e as falhas ocorridas durante os processos de retificação e dressagem.

- Um padrão simples orientado principalmente na direção horizontal indica um desbalanceamento do rebolo.

- Padrões verticais com freqüência de ocorrência igual a rotação do rebolo de arraste indicam excentricidade do rebolo de arraste

- Padrões inclinados indicam a ocorrência de vibração forçada ou chatter e a freqüência principal deve ser selecionada através da observação do número de padrões de rotação do rebolo

- Durante o processo de dressagem é possível criar um mapa 3D representando a forma do desgaste do rebolo e o número de dressagens necessárias para corrigir erros na superfície do rebolo.

- A utilização de excessiva rotação do rebolo de arraste acarreta em deterioração das condições macro-geométricas da peça, pois induz na geração de vibração, e o sistema de mapeamento é capaz de identificar esta anomalia.

- Condições de trabalho, em que se utiliza pouca quantidade de fluido ou ausência total de fluido, proporcionam uma fonte considerável de anomalias à retificação center-less e, através do uso do sistema de mapeamento, pode-se detectar este problema.

- O ciclo de desbaste (avanço de corte) influencia significativamente a circularidade da peça durante o processo de retificação center-less.

- A rotação do rebolo de arraste, dentro da faixa estabelecida nos testes preliminares, e o tempo de sparkout pouco contribuíram para a melhoria da qualidade da peça.

- As condições de dressagem em muito influenciam a qualidade de fabricação de um componente.

Sugestões para trabalhos futuros

- Desenvolver um sistema de reconhecimento de padrões de imagem, que possa fornecer um diagnóstico a respeito do processo de retificação center-less.

- Associar a este sistema de reconhecimento de padrões, um mecanismo que possa estabelecer automaticamente as decisões necessárias para correções de problemas durante dressagem e processo.

- Estudar a retificação center-less de passagem e verificar os parâmetros que significativamente influenciam este processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLANSON, D. R.; KELLY, S.; TERRY, S.; MORUZZY, J. L.; ROWE, W. B. (1989) Coping with compliance in the control of grinding processes.

BEDFORD, A.; DRUMHELER, D. S. (1994) Rayleigh waves. Introduction to elastic wavy propagation. John Wiley & Sons, p106-109.

BLUM, T., DORNFELD, D. A.(1990) Grinding process feedback using acoustic emission, 4th International grinding conference and exposition (Society of manufacturing engineering), Deaborn USA, 34p.

BYRNE, G., DORNFELD, D., INASAKI, I., KETTELER, G., KONIG, W., TETI, R. (1995) Condition Monitoring (TCM) – The Status of Research and Industrial Application. Annals of CIRP, v. 44, p541-561.

CHANG, Y. P.; DINIZ, A. E.; DORNFELD, D. A. (1992) Monitoring the grinding process through acoustic emission using a squirter. Proc. Japan-USA Symposium on flexible automation, ASME, San Francisco, p335-340.

DALL, A. H. (1946) Rounding effect in center-less grinding, Mechanical Engineering, p325-329.

DONG, W. P.; WEBSTER, J. A. (1996) Assessment of frequency characteristics of acoustic emission in grinding. IMEC – Manufacturing Engineering: 2000 and Beyond. P34-37.

DORNFELD, D. A.; CAI, H. G. (1984) An investigation of grinding and wheel loading using acoustic emission. Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, v106, p28-33.

DORNFELD, D. A. (1992) Application of Acoustic Emission Techniques in Manufacturing. NDT&E International, v25, p259-269.

DORNFELD, D., KONIG, W., KETTELER, G. (1993) Present State of Tool and Process Monitoring in Cutting. Internetional CIRP/VDI Conference, Dusseldorf. Proceedings of New Developments in Cutting.

FELIPE JR., J. (1996) Contribuição para Implementação de Funções de Retificação Inteligente (R. I.) Utilizando Técnicas de Monitoramento por Emissão Acústica. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 138p. Doutorado.

FURUKAWA, Y., MIASHITA M., SHIOZAKI S. (1971) Vibration analysis and work-rounding mechanism in center-less grinding. International Journal Machine Tools Design and Research, v11, p145-175.

GOMES, J. J. F. (2001) Identificação em Processo de Mecanismos de Desgaste de Rebolos. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 130p. Doutorado.

GOMES, J. J. F. (1997) Implementação de Sistema Automático de Calibração Dimensional em Retificadoras CNC utilizando Emissão Acústica. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 80p. Mestrado

GRABEC, I.; KULJANIC, E. (1994) Characterization of manufacturing processes based upon acoustic emission analysis by neural networks, Annals of the CIRP, p77-80.

GUO, C., MALKIN, S., KOVACK, J. A., LAURICH, M. (1997) Computer Simulation of Below-Center and Above-Center Center-less Grinding. Machining Science and Technology, v1(2), p235-249.

GUPTA, H. (1993) Surface integrity (II): microestructural aspects, University of Connecticut, lecture course.

GURNEY, J. P. (1964) An analysis of center-less grinding. ASME Journal of Engineering for Industry, v86, p163-174.

HASHIMOTO, F. (1999) Effects of friction and wear characteristics of regulating wheel on center-less grinding, 3rd International Machining and Grinding Conference.

INASAKI, I. (1985) Monitoring of dressing and grinding processes with acoustic emission signals. Annals of CIRP, v34, n1.

INASAKI, I. (1991) Monitoring and Optimization of Internal Grinding Processes. Annals of CIRP, v40, p359-362.

JUNKAR, M.; FILIPIC, B.; BRATKO, I. (1991) Identifying the grinding process by means of inductive machine learning. Computers in Industry, n17, p147-153.

KIM, H. Y.; KIM, S. R.; AHN, J. H., KIM, S. H. (2001) Process monitoring of center-less grinding using acoustic emission, Journal of Materials Processing Technology, p 273-278.

KING, R. I., HAHN, R. S. (1986) Handbook of Modern Grinding Technology. Chapman and Hall Advanced Industrial Technology Series, 360p.

KLUFT, W. (1994) A monitoração dos processos reduz custos e disperdícios. Máquinas e Metais, v10, p60-80.

KONIG, W.; MEYEN, H. P. (1990) AE in grinding and dressing: accuracy and process reliability. 4th International Grinding Conference, Dearborn, Michigan, p526/1-526/20.

KONIG, W.; KLUMPEN, T. (1993[a]) Process monitoring in grinding, dressing and sharpening processes. Production Engineering, v1, n1, p27-30.

KONIG, W.; KLUMPEN, T. (1993[b]) Monitor and sensor concepts for higher process reliability. 5th International Grinding, Cincinnati.

KONIG, W., KLUMPLEN, T. (1993) Monitoring and Sensor Concepts for Higher Process Reliability. 5th International Grinding, SME, Ohio.

KONIG, W. (1980) Tecnologia da Fabricação: Retificação, Brunimento e Lapidação, Tradução: Walter L. Weingaertner, v2, 254p.

LEZANSKI, P.; RAFALOWICZ, J. (1993) An intelligent monitoring system for cylindrical grinding. Annals of the CIRP, p393-396.

MALKIN, S. (1989) Grinding technology: teory and applications of machining with abrasives, Ellis Worwood.

MARINELLI FILHO, N. (1995) Revisão das Operações de Retificação Center-less de Passagem para Adequação aos Sistemas CAPP. Relatório da Disciplina Tópicos Avançados em CAPP da EESCUSP, 71p.

MIASHITA, M. (1982) Diagram for selecting chatter-free conditions of center-less grinding. Annals of CIRP, v31, p221-223.

MORI, K.; KASASHIMA, N.; YAMANE, T.; NAKAI, T. (1992), An intelligent vibration diagnostic system for cylindrical grinding. JAPAN/USA symposium on flexible automation, v2, p1097-1100.

NAKKEERAN P. R.; RADHAKRISHNAN V. (1988) Strategy for in-process control of workpiece quality in center-less grinding. American Society of Mechanical Engineers, v29, p65-73.

NIETO, F. J.; ETXABE, J. M.; GIMÉNEZ, J. G. (1998) Influence of contact loss between workpiece and grinding wheel on the roundness errors in center-less grinding. International Journal of Machine Tools and Manufacture Design, Research and Applications, p1371-1398.

OLIVEIRA, J. F. G. (1994) Center-less grinding panel. Technical Report TRW Engine Components, Europe, 510p.

OLIVEIRA, J. F. G. (1995) Monitoramento de operações de retificação de precisão. Trabalho apresentado em concurso para professor titular. SEM-EESC/USP, São Carlos.

OLIVEIRA, J. F. G.; et al. (1998) Intelligent grinding systems (igs): high reliability and automation level in precision grinding. Abrasives, p11-22.

REEKA, D. (1967) On the relationship between the geometry of the grinding gap and roundness error in center-less grinding, Ph.D. Dissertation, T. H. Aachen.

ROWE, W. B.; BARASH, M. M. (1964) Computer method for investigating the inherent accuracy of center-less grinding. International Journal of Machine Tool Design and Research, p91-116.

ROWE, W. B.; BELL, W. F.; BROUGH, D. (1987) Limit charts for high removal rate center-less grinding. International Jounal of Machine Tools and Manufacturing, v27, p15-25.

ROWE, W. B.; SPRAGETT, S.; GILL, R.; DAVIES, J. B. (1987) Improvements in center-less grinding machine design. Annals of CIRP, v36, p207-210

ROWE, W. B. (1979) Research into mechanics of center-less grinding. Precision Engineering, v1, p75-84.

TAKASU, S.; MASUDA, M. (1992) Through feed center-less grinding for light workpieces. Journal of the Japan Society of Precision Engineering, v57, p1977-1982.

THOMAS, D. A.; ALLANSON, D. R.; MORUZZI, J. L.; ROWE, W. (1995) In process identification of system time constant for the adaptative control of grinding. Journal of Engineering for Industry, v117, p194-201

TONSHOFF, H. K.; WULFSBERG, H. (1998) Development and trends in monitoring and control of machining processes, Annals of CIRP, v37/2, p651-668.

TONSHOFF, H. K.; KARPUSHEWSKI, B. & MANDRYSCH, T. (1998) Grinding process achievements and their consequences on machine tools challenges and opportunities. Annals of CIRP, v47, p651-668.

TUNDISI, J. E. M. (1999) Avaliação Perimetral da Superfície de Corte do Rebolo através da Emissão Acústica em Operações de Dressagem. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 62p. Mestrado.

UDUPA N. G. S.; SHUNMUGAM M. S.; RADHAKRISHNAN V. (1987) Influence of workpiece position on roundness error and surface finish in center-less grinding. International Journal of Machine Tools and Manufacturing, v27, p77-89

UDUPA N. G. S.; SHUNMUGAM M. S.; RADHAKRISHNAN V. (1987) Three-dimensional geometric analysis of the plunge center-less grinding process. Proceedings Inst. Mechanical Engineering, v201, p309-320.

VISHNUPAD, P.; SHIH, A. & SHIN, Y. C. (1995) Monitoring of an internal plunge grinding processes. 1st International and Machining Grinding Conference, SME, p352-371.

WEBSTER, J. (1999) Workpiece support design for high-speed shoe center-less grinding, 3rd International Machining & Grinding Conference, October 4 – 7.

WESTKAMPER, E.; TONSHOFF, H. K. (1993) CBN or CD grinding of profiles. Annals of the CIRP, v42, p371-374.

ZHOU, S.; PETROSKY, G. C.; LINDSAY, R. (1997) Improving workpiece roundness through center-less grinding cycle optimization, Annals of CIRP, p217-222.

ZHOU, S. S.; HOWES, T. D.; GARTNER, J. R. (1996) On the relashionship between setup parameters and lobing behavior in center-less grinding. Annals of CIRP, p341-346.