Campus de São Carlos

IDENTIFICAÇÃO EM PROCESSO DE
MECANISMOS DE DESGASTE DE REBOLOS

JOÃO JORGE DE FARIA GOMES

Orientador: Prof. Dr. João Fernando G. de Oliveira

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Núcleo de Manufatura Avançada

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 23 / 08 / 01

Ass.: *Guilherme*

**Identificação em Processo de Mecanismos de Desgaste de
Rebolos**

Autor: João Jorge de Faria Gomes

Orientador: Prof. Dr. João Fernando Gomes de Oliveira

Tese apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos, da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para a obtenção
do título de DOUTOR EM ENGENHARIA
ÁREA : ENGENHARIA MECÂNICA.

DEDALUS - Acervo - EESC

31100036734

São Carlos

2001

Class. TESE-EESC
Cutt. 2496
Tombo T0195/01

1199068

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

G633i Gomes, João Jorge de Faria
Identificação em processo de mecanismos de
desgastes de rebolos / João Jorge de Faria Gomes --
São Carlos, 2001.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 2001.

Área: Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. João Fernando Gomes de
Oliveira.

1. Monitoramento. 2. Desgaste. 3. Emissão acústica.
4. Abrasivo. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **JOÃO JORGE DE FARIA GOMES**

Tese defendida e julgada em 25-06-2001 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Tit. **JOÃO FERNANDO G. 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. **JAIME GILBERTO DUDUCH**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **ROLF BERTRAND SCHROETER**
(Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC)

APROVADO

Dr. **CARLOS ALBERTO FORTULAN**
(Fundação Parque de Alta Tecnologia São Carlos)

APROVADO

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

JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

À meus pais, em memória,
e à minha esposa e filho
pelo incentivo e apoio

Agradecimentos

Gostaria de apresentar meus sinceros agradecimentos :

Ao Prof. Dr. João Fernando Gomes de Oliveira, pela sua generosidade no compartilhamento de seu grande conhecimento com seus alunos e orientados, pela valiosa contribuição de suas orientações, pela amizade, apoio e incentivo.

À FAPESP pelo financiamento da bolsa de estudos e da reserva técnica.

Aos amigos Bicudo, Juarez, Nelson e Reginaldo pelo agradável convívio e frutífero diálogo.

À Sra. Irene Libardi, pelo auxílio e atenção constantes.

Aos colegas do NUMA que estão sempre prontos a ajudar nos projetos do laboratório.

Aos professores das disciplinas da pós-graduação que realizei.

Aos técnicos do LAMAFE, “Seu” Adão, Zé Carlos e Botelho, com quem tenho amizade desde o mestrado.

Aos funcionários do departamento de Engenharia Mecânica pela atenção dispensada em todas as ocasiões.

Índice

ÍNDICE	I
LISTA DE FIGURAS.....	IV
GLOSSÁRIO.....	IX
RESUMO	X
ABSTRACT	XI
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE MONITORAMENTO DA RETIFICAÇÃO	6
2.1 Fundamentos do Monitoramento do Processo de Retificação.....	8
2.1.1 Problemas da Retificação	9
2.1.2 Grandezas Físicas.....	9
2.1.2.1 Forças de Corte.....	11
2.1.2.2 Corrente Elétrica do Motor	12
2.1.2.3 Vibrações de Baixa Frequência	16
2.1.2.4 Emissão Acústica	17
2.1.3 Sensores e Tratamento do Sinal.....	18
2.1.3.1 Aplicação em Ambiente Industrial	20
2.1.3.2 Tratamento do Sinal.....	21
2.1.4 Estratégias de Monitoramento	22
2.2 Monitoramento com Múltiplos Sensores.....	25
2.2.1 Métodos de Monitoramento.....	27
2.2.1.1 Redes Neurais	27
2.2.1.2 Lógica Fuzzy (Nebulosa).	31
2.2.1.3 Reconhecimento de Padrões.....	33
2.2.1.4 Árvores de Decisão.....	35
2.2.2 Aplicações de Sistemas Inteligentes.....	35
2.3 Mecanismos de Desgaste de Rebolos.....	46
2.3.1 Conceitos Básicos sobre Desgaste	46

2.3.2	Investigações Experimentais sobre Mecanismos de Desgaste	48
2.3.3	Uniformidade do Desgaste	55
3	SISTEMAS DE AVALIAÇÃO DA TOPOGRAFIA DE REBOLOS EM PROCESSO.....	56
3.1	Medição do Estado de Afiação de Rebolos pela Dispersão da Luz Refletida	56
3.1.1	Concepção Básica do Sistema	57
3.1.2	Resultados e Discussão.....	62
3.1.3	Conclusões.....	69
3.2	Sistema para Avaliação da Topografia de Rebolos em Tempo Real.	69
3.2.1	Concepção Geral do Sistema	71
3.2.2	Resultados.....	75
3.2.3	Conclusões.....	84
4	DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA DETERMINAÇÃO EM PROCESSO DO REGIME DE DESGASTE DE REBOLOS	86
4.1	Proposta do Sistema DEAR e Princípios de Funcionamento.....	86
4.2	Concepção básica	87
4.3	Programa do Sistema de Mapeamento da Distribuição de Energia Acústica na Retificação. 90	
5	APLICAÇÃO DO SISTEMA DE MAPEAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ACÚSTICA DE RETIFICAÇÃO NO REBOLO (DEAR) NA IDENTIFICAÇÃO DO REGIME DE DESGASTE	93
5.1	Experimentos iniciais com o Sistema DEAR.....	93
5.1.1	Experimentos para Desenvolvimento de uma Metodologia para Identificação do Tipo de Desgaste 100	
5.1.2	Setup utilizado em Experimentos no Laboratório	100
5.1.3	Setup Portátil de Aquisição de Dados	101
5.1.4	Sensor Óptico.....	103
5.2	Identificação dos Mecanismos de Desgaste.....	105
5.2.1	Desgaste do Tipo Frágil.....	106
5.2.1.1	Verificação Metrológica da Perda diametral do Rebolo.....	106
5.2.1.2	Verificação do Mecanismo de Desgaste Frágil com o Mapa do Rebolo	108

5.2.2	Comparação entre o mapa Óptico e o mapa DEAR de um Rebolo que apresenta Desgaste do tipo Frágil.....	114
5.2.3	Desgaste do tipo Dúctil	116
6	DISCUSSÃO E SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS	121
7	CONCLUSÕES.....	124
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	126

Lista de Figuras

FIG.1- 1 MICROGRAFIA MEV COM AMPLIAÇÃO DE 200X, DE UM SETOR DE REBOLO COM UMA ÚNICA CAMADA DE GRÃOS DE DIAMANTE, FIXADOS POR NÍQUEL ELETROLÍTICO, HWANG ET AL (2000).....	2
FIG.2- 1 RELAÇÃO DOS PRINCIPAIS PROBLEMAS ENFRENTADOS NA RETIFICAÇÃO, OLIVEIRA (1995).....	9
FIG.2-2 SITUAÇÃO DA AUTOMAÇÃO DA RETIFICAÇÃO, OLIVEIRA, DORNFELD & SCHNEIDER (1994).	10
FIG.2-3 GRÁFICO DE ERRO ARRASTE DO EIXO ÁRVORE, VISHNUPAD, SHIH & SHIN (1995).	12
FIG.2-4 MODELO DE RETIFICAÇÃO CENTERLESS, DE UM CILINDRO DE PAREDE FINA, ALLANSON ET AL (1989).....	13
FIG.2-5 POTÊNCIA DE RETIFICAÇÃO DURANTE O SPARK-OUT, ALLANSON ET AL (1989). .	14
FIG.2-6 MUDANÇA NA CURVA DE POTÊNCIA DE RETIFICAÇÃO, WAKUDA & INASAKI (1991).....	15
FIG.2-7 MUDANÇA NA CURVA DA POTÊNCIA, QUANDO OCORRE UMA QUEIMA, INASAKI (1991).....	15
FIG.2-8 PRINCIPAIS FONTES DE EA NA RETIFICAÇÃO DE METAIS, KÖNIG & MEYEN (1990).	17
FIG.2-9 VARIEDADE DE TIPOS DE SENSORES PARA APLICAÇÃO EM MÁQUINAS FERRAMENTAS, BYRNE ET AL (1995).....	19
FIG.2-10 ESTRUTURA DE UM SENSOR DE EA(FONTE BOSH), KÖNIG & MEYEN (1990).	21
FIG.2-11 ESTRATÉGIAS DE MONITORAMENTO UTILIZANDO THRESHOLD, DORNFELD, KÖNIG & KETTELER (1993).	23
FIG.2-12 DESENVOLVIMENTO DA MÁQUINA FERRAMENTA INTELIGENTE, PROPOSTA POR MORIWAKI, BYRNE ET AL (1995).	26
FIG.2-13- ESTRUTURA DE UM NÓ DE REDE NEURAL.....	28
FIG.2-14 - ESTRUTURA DA UMA REDE NEURAL COM UM NÓ DE SAÍDA.	29
FIG.2-15 ESTRUTURA POSSÍVEL PARA MONITORAMENTO DE PROCESSOS DE RETIFICAÇÃO, KÖNIG & KLUMPEN(1993).	31
FIG.2-16 EXEMPLO DE UM CONJUNTO FUZZY E FUNÇÃO ASSOCIAÇÃO, SAKAKURA & INASAKI (1993).	32
FIG.2-17 EXEMPLO DE REGRAS FUZZY, SAKAKURA & INASAKI (1993).....	33
FIG.2-18 ALGORITMO DE RACIOCÍNIO FUZZY, SAKAKURA & INASAKI (1993).	33
FIG.2-19 ESQUEMA DE RECONHECIMENTO DE PADRÕES DE DISTRIBUIÇÃO LIVRE, DU, ELBESTAWI & WU(1995).	34

FIG.2-20 ESQUEMA DE FUNÇÕES DISCRIMINANTES EM RECONHECIMENTO DE PADRÕES, DU, ELBESTAWI & WU(1995).....	35
FIG.2-21 CONFIGURAÇÃO DE HARDWARE DO IDIAS, MORI ET AL (1992).	36
FIG.2-22 SETUP EXPERIMENTAL PARA IDENTIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DO PROCESSO, UTILIZANDO ÁRVORE DE DECISÃO, JUNKAR, FILIPIC & BRATKO (1991).....	37
FIG.2-23 ERROS TÍPICOS DE FORMA, BILATOS & WEBSTER (1993).....	39
FIG.2-24 CONJUNTOS FUZZY E PROTÓTIPOS DA FORMA DOS EIXOS, BILATOS & WEBSTER (1993).....	40
FIG.2-25 MELHORIA NA REDUÇÃO DO ERRO DE FORMA, DEVIDO AO CONTROLE FUZZY DOS ENCOSTOS, BILATOS & WEBSTER (1993).	40
FIG.2-26 MATRIZ DE DECISÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO PARA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA, LEZANSKI & RAFALOWICZ (1993).....	41
FIG.2-27 ESQUEMA DO SETUP, LEZANSKI & RAFALOWICZ (1993).	42
FIG.2-28 ESQUEMA DO SETUP EXPERIMENTAL, VISHNUPAD, SHIH & SHIN (1995).	44
FIG.2-29 ESQUEMA DE TIPOS DE DESGASTE: A - DESGASTE POR ATRITO, B – FRATURA DO GRÃO E C – FRATURA DA LIGA, SHIMAMUNE & ONO (1983).	47
FIG.2-30 ILUSTRAÇÃO DA DECOMPOSIÇÃO DA FORÇA DE RETIFICAÇÃO, SHIMAMUNE & ONO (1983).	47
FIG.2-31 VARIAÇÃO DAS COMPONENTES DA FORÇA DE RETIFICAÇÃO EM RELAÇÃO AS CONDIÇÕES DRESSAGEM EM RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA, SHIMAMUNE & ONO (1983).	49
FIG.2-32 VARIAÇÃO DAS COMPONENTES DA FORÇA DE RETIFICAÇÃO EM RELAÇÃO AS CONDIÇÕES DRESSAGEM EM RETIFICAÇÃO PLANA, SHIMAMUNE & ONO (1983).....	49
FIG.2-33 VIDA DO REBOLO COM DESGASTE PREDOMINANTEMENTE DÚCTIL, LIMITADA POR CHATTER, SHIMAMUNE & ONO (1983).....	50
FIG.2-34 VIDA DO REBOLO COM DESGASTE PREDOMINANTE FRÁGIL, SHIMAMUNE & ONO (1983).....	51
FIG.2-35 ALTERAÇÃO DA DENSIDADE DA DISTRIBUIÇÃO DAS ARESTAS DEVIDO AO DESGASTE RADIAL, SHIMAMUNE & ONO (1983).....	52
FIG.2-36 GRÁFICO OBTIDO EM RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DA VARIAÇÃO DA VIDA DO REBOLO EM RELAÇÃO A VELOCIDADE DA PEÇA, SHIMAMUNE & ONO (1983).....	52
FIG.2-37 GRÁFICO DA VIDA REBOLO EM RELAÇÃO A FORÇA DE RETIFICAÇÃO INICIAL, SHIMAMUNE & ONO (1983).	53
FIG.2-38 GRÁFICO DA VIDA DO REBOLO EM RELAÇÃO AO GRAU DE RECOBRIMENTO DA DRESSAGEM, SHIMAMUNE & ONO (1983).	53
FIG.2-39 CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE DESGASTE DO REBOLO, SUAS CONSEQUÊNCIAS E CAUSAS, OLIVEIRA (1993).....	54
FIG.3- 1 CONCEPÇÃO GERAL DO SISTEMA, OLIVEIRA (1992).....	57

FIG.3- 2 A PASTILHA PCD S2301-128Q, OLIVEIRA (1992).	58
FIG.3- 3 DIAGRAMA DE TEMPORIZAÇÃO DO SISTEMA, OLIVEIRA (1992).	59
FIG.3- 4 EXEMPLO DE TELA DE LEITURA COM VALORES NUMÉRICOS, OLIVEIRA (1992).	60
FIG.3- 5 TELA COM EXEMPLO DE LEITURA COM ARMAZENAMENTO DOS DADOS, OLIVEIRA (1992).	61
FIG.3- 6 O GRÁFICO DO LADO ESQUERDO FOI OBTIDO COM UM REBOLO RECÉM DRESSADO E O DO LADO DIREITO COM O MESMO REBOLO JÁ DESGASTADO, OLIVEIRA (1992).	61
FIG.3- 7 SETUP MONTADO EM UMA RETIFICADORA PLANA MARCA TRIPET, OLIVEIRA (1992).	62
FIG.3- 8 VISUALIZAÇÃO DA TRAJETÓRIA DO FEIXE DE LASER, OLIVEIRA (1992).	63
FIG.3- 9 VARIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DA LUZ NO PCD DURANTE A USINAGEM, OLIVEIRA(1992).	63
FIG.3- 10 REBOLO PREPARADO PARA ANÁLISE VISUAL E DETALHE AUMENTADO, ONDE SE OBSERVA OS “ESPELHOS” DO LADO DESGASTADO, OLIVEIRA (1992).	64
FIG.3- 11 VARIAÇÃO DE AG AO LONGO DA VIDA DO REBOLO, OLIVEIRA (1992).	64
FIG.3- 12 COMPORTAMENTO DE AG NORMALIZADO DURANTE A VIDA DO REBOLO, OLIVEIRA(1992).	66
FIG.3- 13 FORÇA TANGENCIAL DE RETIFICAÇÃO X AG , OLIVEIRA (1992).	66
FIG.3- 14 RELAÇÕES ENTRE FORÇA TANGENCIAL/NORMAL X AG NORMALIZADO, OLIVEIRA (1992).	67
FIG.3- 15 VARIAÇÃO DA INTENSIDADE LUMINOSA DURANTE A VIDA DO REBOLO, OLIVEIRA(1992).	68
FIG.3- 16 RELAÇÃO ENTRE FORÇA E INTENSIDADE LUMINOSA, OLIVEIRA (1992).	68
FIG.3- 17 ESQUEMA DO SETUP PARA MEDIÇÃO DE ÁREAS PLANAS USANDO UM SENSOR FOTOELÉTRICO, SATA ET AL (1972).	70
FIG.3- 18 ESQUEMA DE OPERAÇÃO DA EMISSÃO/CAPTAÇÃO DA LUZ INCIDENTE SOBRE A SUPERFÍCIE DO REBOLO, KLEIN (1994).	70
FIG.3- 19 CONCEPÇÃO GERAL DO SISTEMA, KLEIN (1994).	71
FIG.3- 20 METODOLOGIA PARA O MAPEAMENTO DA ÁREA PLANA DE DESGASTE DO GRÃO ABRASIVO, OLIVEIRA, COELHO & KLEIN (1994).	72
FIG.3- 21 TELA PRINCIPAL DO PROGRAMA DE CONTROLE, KLEIN (1994).	75
FIG.3- 22 REBOLO COM SETORES SELECIONADOS POR RETICULADOS, KLEIN (1994).	76
FIG.3- 23 FOTO DIGITALIZADA, À ESQUERDA E IMAGEM EM PRETO E BRANCO, À DIREITA, KLEIN (1994).	76
FIG.3- 24 IMAGENS DO SETOR 2 OBTIDAS PELO SISTEMA, COM O REBOLO EM ROTAÇÃO REDUZIDA, COM MAIOR SENSIBILIDADE À ESQUERDA E MENOR À DIREITA, KLEIN (1994).	77
FIG.3- 25 IMAGENS OBTIDAS PELO SISTEMA PROPOSTO COM O REBOLO A 2750 RPM, KLEIN (1994).	77

FIG.3- 26 SIMULAÇÃO DA VARREDURA DO SENSOR COM PASSO DE 0,28 MM, KLEIN (1994).	78
FIG.3- 27 EXPERIMENTO DE RETIFICAÇÃO COM MEDIÇÃO INTERMITENTE, KLEIN (1994).	79
FIG.3- 28 EXPERIMENTO DE VERIFICAÇÃO DA REPETIBILIDADE POSICIONAL, KLEIN (1994).	79
FIG.3- 29 ANÁLISE ESPACIAL DO DESGASTE DE UMA REGIÃO DE 30X12 MM ² , DA SUPERFÍCIE DO REBOLO, KLEIN (1994).	81
FIG.3- 30 DISTRIBUIÇÃO DOS NÍVEIS DE REFLEXÃO RELATIVOS AMACIADO, KLEIN (1994).	82
FIG.3- 31 COMPARAÇÃO DE NÍVEIS RELATIVOS DE REFLEXÃO, KLEIN (1994).	83
FIG.3- 32 VARIAÇÃO DOS VALORES DE REFLEXÃO NA VIDA DO REBOLO, KLEIN (1994).	83
FIG.3- 33 GRÁFICO DOS ÍNDICES DE DESGASTE X FORÇAS NORMAIS, KLEIN (1994).	84
FIG. 4- 1 ESQUEMA DA CONCEPÇÃO BÁSICA DO SISTEMA DEAR.	88
FIG. 4- 2 PROCEDIMENTO DE CONSTRUÇÃO DO MAPA DO REBOLO, NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO.	89
FIG. 4- 3 MAPA DA SUPERFÍCIE ATIVA DO REBOLO, OBTIDA A PARTIR DO SINAL DE EA DETECTADO DURANTE UMA DRESSAGEM COM PROFUNDIDADE DE 1µM.	90
FIG. 4- 4 PAINEL DO PROGRAMA DE AVALIAÇÃO DA UNIFORMIDADE DE ATUAÇÃO DO REBOLO.	91
FIG. 4- 5 DIAGRAMA DO PROGRAMA BÁSICO DE PROGRAMA DE AVALIAÇÃO DA UNIFORMIDADE DE ATUAÇÃO DO REBOLO, DIVIDIDO EM BLOCOS EXPLICATIVOS.	92
FIG. 5- 1 GRÁFICO OBTIDO NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO DE AÇO ENDURECIDO COM REBOLO AL ₂ O ₃ MACIO, O PADRÃO GRÁFICO INDICA QUE HOVE REDUÇÃO DA ROTAÇÃO DO REBOLO.	94
FIG. 5- 2 GRÁFICOS OBTIDOS NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO DE AÇO ENDURECIDO COM REBOLO AL ₂ O ₃ DURO, SEM VARIAÇÃO DE ROTAÇÃO DO REBOLO.	94
FIG. 5- 3 GRÁFICOS DA RETIFICAÇÃO DE AÇO ENDURECIDO COM REBOLO AL ₂ O ₃ MACIO ONDE SE OBSERVA A CONCENTRAÇÃO E O DESLOCAMENTO DAS REGIÕES MAIS UTILIZADAS A CADA CICLO.	95
FIG. 5- 4 GRÁFICO OBTIDO DURANTE A RETIFICAÇÃO DE UMA PEÇA DE AÇO ENDURECIDO COM REBOLO DE CBN.	96
FIG. 5- 5 GRÁFICO OBTIDO NA RETIFICAÇÃO DE AÇO ENDURECIDO COM REBOLO AL ₂ O ₃ MACIO.	97
FIG. 5- 6 GRÁFICOS DA DRESSAGEM DE UM REBOLO DESGASTADO.	98
FIG. 5- 7 GRÁFICO QUE MOSTRA TRÊS PASSES DE DRESSAGEM.	99
FIG. 5- 8 GRÁFICOS OBTIDOS EM CICLOS DE RETIFICAÇÃO SUBSEQUENTES.	99
FIG. 5- 9 LOCALIZAÇÃO DE SENSORES INSTALADOS NA RETIFICADORA CNC ZEMA.	101
FIG. 5- 10 SETUP PORTÁTIL INSTALADO EM UMA MÁQUINA DE PRODUÇÃO.	103

FIG. 5- 11 SENSOR ÓPTICO CONSTRUÍDO DE ACORDO COM AS INFORMAÇÕES DE KLEIN(1994).	104
FIG. 5- 12 MONTAGEM DO SENSOR ÓPTICO NA FRENTE DO REBOLO.	104
FIG. 5- 13 ESQUEMA DO PROCEDIMENTO DE CÓPIA DE PERFIL DO REBOLO.	107
FIG. 5- 14 GRÁFICO DA EVOLUÇÃO DA ALTURA DO DEGRAU.	108
FIG. 5- 15 MAPAS DEAR DE OITO CICLOS CONSECUTIVOS DE RETIFICAÇÃO E SEUS GRÁFICOS DE POTÊNCIA CORRESPONDENTES, QUE MOSTRAM AS DUAS FASES DE UM DESGASTE DO TIPO FRÁGIL, A FASE 2, OU SEJA, O EMPASTAMENTO OCORRE A PARTIR DO SÉTIMO CICLO.	109
FIG. 5- 16 MAPA DEAR OBTIDO COM UM REBOLO EMPASTADO E O GRÁFICO DA POTÊNCIA CONSUMIDA PELO EIXO ÁRVORE, CORRESPONDENTE.....	111
FIG. 5- 17 MAPA DEAR DE UM CICLO DE RETIFICAÇÃO, COM PROFUNDIDADE DE CORTE DE 3,5 MM NO DIÂMETRO, QUE INDICA A OCORRÊNCIA DE DESGASTE FRÁGIL. TAXA DE AMOSTRAGEM : 1 LINHA/SEG., AS 3200 DIVISÕES VERTICAIS CORRESPONDEM AO PERÍMETRO TOTAL DO REBOLO (360°).....	113
FIG. 5- 18 MAPAS DA TOPOGRAFIA DO REBOLO GERADOS NA DRESSAGEM, COM PASSES DE PROFUNDIDADE 1µM.....	114
FIG. 5- 19 MAPA ÓPTICO DO REBOLO E MAPA DEAR DA FAIXA ATIVA DO REBOLO.	115
FIG. 5- 20 MAPAS DEAR DE SEIS CICLOS DE RETIFICAÇÃO CONSECUTIVOS, QUE INDICAM QUE ESTÁ OCORRENDO DESGASTE DO TIPO DÚCTIL.	117
FIG. 5- 21 MAPAS DEAR DE DEZ CICLOS DE RETIFICAÇÃO CONSECUTIVOS, QUE MOSTRAM A EVOLUÇÃO DO DESGASTE DO TIPO DÚCTIL, QUE CORRESPONDE À INTENSIFICAÇÃO DAS ÁREAS MAIS CLARAS DO GRÁFICO.	118
FIG. 5- 22 GRÁFICO DO COMPORTAMENTO DO NÍVEL DA VIBRAÇÃO AO LONGO DE 10 CICLOS DE RETIFICAÇÃO, UTILIZANDO UM REBOLO QUE APRESENTA DESGASTE DO TIPO DÚCTIL. O NÍVEL DE VIBRAÇÃO RMS É APENAS UMA REFERÊNCIA EM RELAÇÃO AO ESTADO DE VIBRAÇÃO INICIAL DA MÁQUINA	119
FIG. 5- 23 COMPARAÇÃO ENTRE MAPAS ÓPTICOS E MAPAS DEAR DE UM REBOLO QUE APRESENTA DESGASTE DO TIPO DÚCTIL.....	120
FIG. 6- 1 ESQUEMAS QUE SINTETIZAM OS RESULTADOS OBTIDOS, COM OS DOIS TIPOS DE MECANISMOS DE DESGASTE EM RELAÇÃO ÀS INDICAÇÕES DE POTÊNCIA, VIBRAÇÃO E DIMENSÃO DO DIÂMETRO DO REBOLO	122

Glossário

Lista de termos utilizados neste trabalho que são específicos e pouco conhecidos.

Centerless- retificação ou retificadora onde a peça não é fixada entre centros.

Spark-out- fase final da operação de retificação, quando o rebolo para de avançar.

Chatter- vibração regenerativa.

Drift- deriva da medição.

FFT- transformada rápida de Fourier.

Leakage- perda de definição do sinal devido à baixa velocidade de amostragem.

Multipixel- múltiplos pontos sensíveis à luz.

RMS- média quadrática.

Retrofitting- atualização de equipamento.

Skewness- parâmetro estatístico que enfatiza a forma da amostra.

Kurtosis- parâmetro estatístico que enfatiza o perfil da amostra.

Teach-in- fase de treinamento para definição de valores limite de comparação.

Threshold- limite para comparação.

Feedforward- técnica de treinamento de redes neurais utilizando entradas modelo.

Backpropagation- técnica de ajuste de parâmetros de rede neural de acordo com as saídas previstas e as obtidas com entradas modelo.

Dressagem- operação de reafiação do rebolo, com a retirada de uma camada abrasiva com pequena profundidade.

Grau de recobrimento- relação entre a largura de atuação do dressador e o avanço por volta.

Resumo

GOMES, J.J.F. (2001) *Identificação em processo de mecanismos de desgaste de rebolos*. São Carlos, 2001. 131p. Tese(Doutorado)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema de monitoramento capaz de identificar em processo o mecanismo de desgaste ao qual o reboło está sendo submetido durante a retificação. Assim, inicialmente foram pesquisados os meios físicos, os tipos de sensores e estratégias utilizadas nos sistemas de monitoramento, o estágio atual de desenvolvimento e suas aplicações. Para que este sistema seja confiável e eficiente foi necessário estudar detalhadamente a fenomenologia dos mecanismos de desgaste do reboło. Este estudo permite definir parâmetros para identificação do tipo de desgaste que está ocorrendo, baseado em indicações fornecidas pelo monitoramento de variáveis cujo comportamento é conhecido, como potência consumida pelo motor do reboło e vibração ou ainda por medições metrológicas. Dois sistemas ópticos de mapeamento da superfície do reboło são apresentados e estes sistemas serviram como base para o desenvolvimento de um novo sistema de mapeamento da **Distribuição da Energia Acústica de Retificação** no reboło, DEAR. Realizaram-se experimentos com o novo sistema, monitorando simultaneamente outros meios físicos. Procurou-se desta forma relacionar o padrão gráfico do mapa gerado pelo novo sistema com o tipo de desgaste que estava ocorrendo, baseado nas informações obtidas no estudo dos mecanismos de desgaste. A análise dos resultados mostraram que o mapa DEAR pode ser utilizado para identificar o tipo de mecanismo de desgaste predominante que está ocorrendo no reboło, em processo. Esta informação é muito útil na escolha de ações corretivas para problemas da retificação.

Palavras chaves: monitoramento, desgaste, emissão acústica , abrasivo

Abstract

GOMES, J.J.F. (2001) *Identification in process of grinding wheel wearing mechanism*. São Carlos, 2001. 131p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP.

The objective of this work is the development of a monitoring system able to identify in process the grinding wheel wear mechanism . Thus, initially the physical quantities, sensors types and monitoring systems strategies, developing status and their applications were researched . To get a reliable and efficient system was necessary a detailed study of the grinding wheel wear mechanism phenomenology. This study allows to define parameters in order to identify which type of wear is occurring, using indication obtained by the monitoring variables whose behavior is known, such as grinding power, vibration or metrological measurement. Two grinding wheel surface optical mapping systems are presented, those systems were utilized as base to developing a new mapping system of Grinding Acoustic Energy Distribution (DEAR). Experiments have been done with the new system, monitoring simultaneously other physical quantities, looking for a way to link the mapping graphic patterns generates by the new system with the wear type which was occurring, based on information obtained from the wear mechanism study. The results and analysis have shown that the DEAR map can be used to identify the predominant wear mechanism type which is occurring on a grinding wheel, in process. This information is very useful in the corrective actions when facing a grinding problem.

Key words: monitoring, wear, acoustic emission, abrasive

1 Introdução

Nos últimos vinte anos, além da melhoria exponencial da acuracidade das peças produzidas, novos materiais estão sendo utilizados para produção de formas complexas com características superficiais específicas. Assim, é necessário produzir com mais qualidade em menos tempo, para compensar os altos custos dos novos materiais e processos, WESTKÄMPER & TÖNSHOFF (1993).

Para atender esta demanda, inovações tecnológicas significativas tem sido introduzidas em todos os processos de fabricação e especificamente no processo de retificação, que continua sendo amplamente utilizado pelas indústrias, para acabamento final em componentes de precisão. Estas inovações estão sendo introduzidas tanto no desenvolvimento de novas máquinas retificadoras, assim como nos parâmetros do processo.

As novas máquinas CNC mais automatizadas e precisas, possuem uma maior rigidez estrutural, mancais e fusos de alto desempenho que possibilitam uma alta precisão dos movimentos relativos. O controle destes movimentos é realizado por sistemas realimentados, cuja resolução pode chegar a $0,1\text{ }\mu\text{m}$.

Estas inovações possibilitam tanto a instalação de motores mais potentes para aumentar a velocidade de corte, como a construção de máquinas com características específicas, como por exemplo: movimentação orbital do rebolo, que permite usinar componentes que possuem eixo de rotação deslocado, como colos e pinos de virabrequim.

Estas máquinas permitem que o uso de rebolos superabrasivos, com grãos de CBN ou diamante, na retificação com altas velocidades de corte, sejam utilizadas pelas indústrias, TÖNSHOFF et al(1998).

Porém, nas linhas de produção com alto nível de automação, que são supervisionadas por poucos operadores, a demanda por eficiência e produtividade está acelerando a necessidade da utilização de sistemas de monitoramento. As aplicações de tais sistemas visam o desempenho das máquinas e aumentar a sua segurança.

Atualmente, já existem vários tipos de sistemas de monitoramento instalados em máquinas de produção. Estes sistemas são utilizados para controlar parâmetros críticos do processo ou para aumentar a segurança, sendo que os fabricantes de máquinas tem incorporado em seus modelos mais recentes, sistemas que possuem, comprovadamente, comportamento estável e confiável.

Porém, as aplicações de sistemas de monitoramento para prever a o fim de vida do rebolo não tem sido bem sucedidas, pois, apesar da grande produtividade e da excelente qualidade obtidas no processo de retificação, as características aleatórias das arestas de corte dos grãos abrasivos tornam o comportamento do processo instável.

Estas características devem-se ao mecanismo de corte dos grãos abrasivos, que é realizado por múltiplas arestas a cada instante. A Fig.1- 1 mostra uma micrografia MEV (microscópio de varredura de elétrons) , com ampliação de 200x, de um setor de rebolo de corpo metálico com uma única camada de grãos de diamante fixados por uma liga de níquel depositada por eletrólise.

Fig.1- 1 Micrografia MEV com ampliação de 200x, de um setor de rebolo com uma única camada de grãos de diamante, fixados por níquel eletrolítico, Hwang et al (2000).

O tamanho médio dos grãos mostrados nesta figura é de 90 μm , normalmente os rebolos superabrasivos são construídos com uma camada de pequena espessura, da ordem de alguns milímetros, depositada sobre um corpo metálico, porém, este é um rebolo especial construído para experimentos, justamente para melhorar a visualização do desgaste dos grãos.

Pode-se observar na Fig.1-1, a distribuição aleatória dos grãos abrasivos na superfície do rebolo, que é semelhante em todos os tipos de rebolo, mesmo nos convencionais. A diferença é que os rebolos utilizados para produção possuem várias camadas de grãos abrasivos superpostas, com os espaços entre grãos preenchidos com o material ligante.

Medições realizadas por vários pesquisadores mostraram que também há diferenças de altura entre grãos, portanto, nem todos os grãos presentes na superfície trabalham ao mesmo tempo, as características da distribuição dos grãos, assim como o estado de sua afiação representam a condição topográfica do rebolo. Esta topografia pode ser transformada de acordo com as condições de dressagem, forma do dressador e com os parâmetros utilizados na retificação.

Muitos trabalhos tem sido realizados por pesquisadores do mundo todo sobre o comportamento e a caracterização topográfica dos rebolos. VERKERK(1977) coordenou um projeto cooperativo internacional, com o objetivo de caracterizar topograficamente um determinado tipo de rebolo, deste projeto originaram-se métodos estáticos e dinâmicos.

Apesar da grande contribuição destes métodos para caracterização topográfica de rebolos, sua aplicação prática para avaliação do desempenho de um rebolo é muito restrita. Assim, um método de aplicação mais prática foi desenvolvido por NAKAYAMA & TAKAGI (1980), este método possibilita uma avaliação mais objetiva da topografia do rebolo, retificando um componente padronizado e calculando as relações entre taxas de remoção e pressão de contato. Um aperfeiçoamento deste método foi desenvolvido em São Carlos, por COELHO (1991), onde características térmicas da interação entre o rebolo e o corpo de prova também são avaliadas.

O grupo de pesquisas em Otimização de Processos de Fabricação - OPF, do Núcleo de Manufatura Avançada - NUMA, tem prestado valiosas contribuições ao desenvolvimento de metodologias e parâmetros para avaliação do condicionamento, comportamento e transformação topográfica do rebolo. Assim como, sobre outros aspectos do processo de retificação, dando ênfase à aplicabilidade ao ambiente industrial e à continuidade dos temas de pesquisas. Este grupo foi formado a partir da criação da linha de pesquisa sobre o processo de retificação em 1984, no Departamento de Engenharia Mecânica da EESC/USP, e tem se dedicado à pesquisa básica dos fenômenos e ao desenvolvimento de metodologia de monitoramento, procurando estabelecer uma relação consistente entre o(s) aspecto(s) que se deseja monitorar e o meio físico utilizado para este fim.

Este trabalho segue as diretrizes deste grupo, do qual o autor é membro, e seu objetivo principal é desenvolver uma metodologia para identificação do mecanismo de desgaste em rebolos ao longo do processo de retificação em ambientes industriais, utilizando um sistema de mapeamento da energia acústica de retificação.

O aspecto inédito desta tese é o desenvolvimento desta metodologia, pois, ainda não existe nenhum método ou sistema para avaliação topográfica do rebolo que possa ser utilizado para identificar o tipo de desgaste que está ocorrendo, em processo, no ambiente industrial.

Existem basicamente dois tipos de desgaste em rebolos: a perda de agressividade e o desgaste volumétrico. A ocorrência de um, de outro ou de ambos depende principalmente da especificação do rebolo, das condições da dressagem, das condições de retificação e da dureza da peça, BIANCHI (1990).

O desgaste devido a perda de agressividade, chamado desgaste dúctil, provoca aumento da força de corte, aumento na temperatura de corte, queima superficial e erros dimensionais devido a grande deformação da estrutura da máquina. Enquanto que o desgaste devido a fraturas chamado desgaste frágil, pode provocar: erros de forma, aumento da rugosidade e variações dimensionais, OLIVEIRA (1992).

Geralmente os dois tipos de desgaste aparecem simultaneamente, mas com intensidades diferentes. Para um maior controle das características dimensionais das peças produzidas o desgaste dúctil é preferido, uma vez que a geometria da superfície de contato do rebolo é mantida. Em aplicações onde as tolerâncias são mais abertas, o desgaste frágil pode ser interessante, devido ao efeito de reafiação do rebolo.

A produção de componentes de precisão implica em tolerâncias apertadas, logo o desgaste frágil ou a transição de desgaste dúctil para frágil é indesejável. Portanto, a identificação do tipo de desgaste que está ocorrendo é uma informação que pode ser utilizada na realização das seguintes ações:

- Otimizar condições de usinagem.
- Melhorar especificação do rebolo e do fluido de corte.
- Otimizar condições de dressagem.
- Estabelecer estratégias de monitoramento.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema de monitoramento capaz de identificar em processo o mecanismo de desgaste ao qual o rebolo está sendo submetido durante a retificação.

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

No capítulo 2 são apresentados os fundamentos do monitoramento do processo de retificação, compreendendo os problemas do processo que precisam ser monitorados, os meios físicos que podem ser utilizados, os sensores disponíveis para aplicação

industrial, o tratamento do sinal adquirido, estratégias de monitoramento e o monitoramento com múltiplos sensores. Neste capítulo também são abordados conceitos básicos sobre o desgaste do rebolo, investigações experimentais e uniformidade do desgaste.

No capítulo 3 são apresentados dois sistemas ópticos para avaliação da topografia do rebolo em processo, desenvolvidos por membros do OPF, que são precursores do sistema utilizado neste trabalho. Este estudo abrange as concepções básicas, a discussão sobre os resultados obtidos e as conclusões a que chegaram os pesquisadores.

No capítulo 4 é descrita a proposta de desenvolvimento de um sistema de mapeamento da energia acústica na retificação, os requisitos do sistema para instalação em ambiente industrial e seu princípio de funcionamento.

No capítulo 5 são apresentados os equipamentos de monitoramento utilizados nos experimentos em laboratório e em ambiente industrial, o sensor óptico utilizado para comparação de resultados e a metodologia desenvolvida para analisar as imagens geradas pelo sistema proposto.

No capítulo 6 é apresentada uma discussão dos resultados obtidos e uma síntese, associando o comportamento das características das imagens do mapa acústico com o comportamento de outras grandezas como potência consumida pelo eixo árvore e vibração.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 Conceitos Básicos sobre Monitoramento da Retificação

Atualmente considera-se que a aplicação de tecnologias de inteligência artificial utilizando microcomputadores de alto desempenho e controladores, é um meio de se conseguir produzir componentes de qualidade com mais eficiência, mesmo em pequenos lotes e com mudanças mais frequentes. A inteligência artificial (IA) pode ser definida como a capacidade de uma máquina executar tarefas normalmente associadas a inteligência humana como: inferência, aprendizado e auto-melhoramento.

Como o desempenho dos microcomputadores tem melhorado significativamente, enquanto o preço tem baixado, há uma expectativa crescente de que um grande volume de decisões operacionais simples possam ser delegadas às máquinas, deixando para o operador apenas as decisões mais importantes, permitindo que o mesmo possa supervisionar várias máquinas ao mesmo tempo.

A tendência de uso crescente de sistemas inteligentes aplicados ao processo de retificação é claro e sua reversão é improvável. A ciência da IA está se desenvolvendo rapidamente, já se dispõe de softwares sofisticados de IA para aplicações gerais que facilitam bastante a implementação destas técnicas, ROWE, LI & ALLANSON (1996).

Estas técnicas podem ser utilizadas para fazer a integração dos sinais de vários tipos de sensor, sistemas multisensores apresentam maior confiabilidade do que sistemas monossensor, devido a sua capacidade de monitorar diferentes grandezas afetadas pelo fenômeno em questão. Obviamente, a escolha das características adequadas, do sinal monitorado, é essencial. As características ideais devem ser sensíveis ao estado do processo e insensíveis às condições de trabalho. Além disso, o monitoramento da grandeza física da qual é extraída a característica deve apresentar uma boa relação custo/benefício, DU, ELBESTAWI & WU (1995).

Os sistemas monossensor são largamente aplicados atualmente e muitas máquinas CNC incorporam um ou vários tipos do mesmo, como por exemplo: balanceador em processo que utiliza um acelerômetro para detectar a vibração de desbalanceamento do rebolo, sistemas com sensores de toque para detectar variação de diâmetro, etc. Os sistemas multisensores surgiram a partir dos monossensores, com o objetivo de utilizar vários tipos de sinais que se complementam para gerar informações mais confiáveis. Porém os sistemas multisensores precisam ser mais desenvolvidos para conseguir expandir sua aplicação na indústria, que ainda é pequena.

Nesta revisão apresenta-se o desenvolvimento de sistemas multisensores para monitoramento do processo de retificação, estruturado da seguinte maneira:

- Fundamentos do monitoramento do processo de retificação, neste item são tratados os problemas de retificação e as grandezas físicas que podem ser utilizadas para monitorá-los. Os sensores existentes e os meios para adquirir e tratar sinais, para que se possa extrair as características relevantes. Também são apresentadas estratégias para implementação de controle a partir do nível das características extraídas.
- Monitoramento com múltiplos sensores, este item trata dos principais métodos utilizados para integração de sinais, extração de suas características e estratégias de decisão. Como exemplo de aplicação, apresenta-se o desenvolvimento de alguns sistemas multisensores e os resultados obtidos.
- Mecanismos de desgaste de rebolos, neste item são analisadas as características principais da fenomenologia do regime de desgaste do reboło e a associação destas com grandezas como força tangencial e normal de retificação, vibração, potência consumida pelo eixo árvore, desgaste radial do reboło e rugosidade obtida.

2.1 Fundamentos do Monitoramento do Processo de Retificação

Retificação é um processo de usinagem complexo, pois a remoção de material é realizada por múltiplas arestas de corte, que possuem formas aleatórias. Além disso o desgaste causa alterações na sua geometria, número e distribuição sobre a superfície do rebolo ao longo de uma operação, HUNDT, LEUENBERGER & REHSTEINER (1994).

Devido aos problemas inerentes à complexidade deste processo, ele está sujeito a perturbações periódicas ou aleatórias cujos efeitos nem sempre podem ser totalmente compensados, isto leva à adoção de parâmetros conservativos nos ciclos de retificação automatizados, para assegurar a qualidade requerida. Apesar disso peças com defeito e falhas em ciclos são observados com frequência.

Além das folgas flutuantes nas máquinas e da dispersão de sobremetal e dureza das peças, o principal fator de perturbação neste processo é a variação das propriedades do rebolo e modificações, dos parâmetros de processo, dependentes do operador.

Logo, não se pode esperar um comportamento constante e previsível da retificação, o que leva as indústrias a controlar estatisticamente ou continuamente as peças produzidas, em processo ou pós processo. Porém, a inspeção estatística consome tempo e é também apenas parcialmente confiável.

Assim, há uma necessidade crescente de sistemas de monitoramento que possam ser usados preventivamente para assegurar a qualidade da peça obra. Estes sistemas devem identificar erros na peça obra, dependentes do estado do processo, através de monitoramento em processo, KÖNIG & KLUMPEN (1993).

Os sistemas de monitoramento em processo podem ser utilizados para dar suporte às decisões do operador, uma vez que as máquinas ferramentas modernas trabalham em altas velocidades, utilizam grande quantidade de refrigerante e geralmente possuem carenagem de proteção. Tornando o monitoramento humano uma tarefa quase impossível.

Este tipo de sistema pode aumentar a produtividade de máquinas ferramentas caras, trabalhando com mínima assistência ou de forma automática em um terceiro turno ou nos fins de semana, TÖNSHOFF et al (1988).

Assim sistemas de monitoramento em processo, baseados em efeitos físicos produzidos durante a retificação, dressagem e condicionamento do rebolo, tornaram-se

essenciais para as retificadoras. Para melhorar a confiabilidade de sua produção e para protegê-las mais confiavelmente contra danos destrutivos, KLUFT (1994).

2.1.1 Problemas da Retificação

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

- operação de retificação
- operação de dressagem
- condicionamento do rebolo

A Fig.2- 1 mostra os principais problemas de retificação enfrentados pelas empresas usuárias do processo. Esta lista foi obtida em visitas a empresas, entrevistas aos usuários e também no levantamento apresentado por OLIVEIRA (1995).

Fig.2- 1 Relação dos principais problemas enfrentados na retificação, OLIVEIRA (1995).

2.1.2 Grandezas Físicas

Existem várias grandezas relacionadas ao processo de retificação que podem ser monitoradas em processo para o acompanhamento e controle. A Fig.2-2 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 sem solução industrial para automação, tais como: controle da queima por retificação, deformação térmica estrutural

das máquinas retificadoras, medida precisa da vida do rebolo, etc, OLIVEIRA, DORNFELD & SCHNEIDER (1994).

Fig.2-2 Situação da automação da retificação, OLIVEIRA, DORNFELD & SCHNEIDER (1994).

Porém, entre as grandezas apresentadas, algumas não são adequadas para utilização em aplicações no ambiente industrial atual. Neste ambiente, geralmente existe uma grande variedade de partículas dispersas no ar e nas proximidades da operação de usinagem: refrigerante e cavacos, o que dificulta muito a utilização de equipamentos óticos. Há também uma gama de ruídos na frequência audível pelo ouvido humano, impossibilitando a utilização de microfones que trabalhem dentro dessa frequência. Portanto, como o foco deste trabalho está em sistemas de monitoramento em processo, aplicáveis ao ambiente industrial atual, nos próximos itens serão apresentados sistemas baseados em grandezas que mais atendem este requisito.

2.1.2.1 Forças de Corte

Existem componentes mensuráveis da força de corte na maioria 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, KÖNIG & KETTELER (1993).

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, KÖNIG & KLUMPEN (1993).

O valor desta grandeza pode ser medido por meios diretos e indiretos. Os meios diretos avaliam o valor das componentes da força de corte, enquanto que os meios indiretos avaliam os efeitos das forças de corte em elementos da máquina que são solicitados em consequência destas forças, tal como: deflexão no eixo do porta ferramenta ou torque no eixo árvore, BYRNE et al (1995).

Existem muitas aplicações de sistemas que utilizam esta grandeza, segue-se a apresentação de alguns casos.

BRINKSMEIER & POPP (1991) desenvolvem um sistema de controle adaptativo auto ajustável para processos de retificação cilíndrica externa, que utiliza a força normal de retificação como variável de controle. A escolha da força normal deve-se a sua relação com várias características do processo, tais como: propriedades do abrasivo especificado, estado do rebolo, propriedades da peça obra, velocidade de avanço, velocidade periférica da peça, taxa de remoção de material e condições de refrigeração.

O sinal da força normal é adquirido através de transdutores de força piezelétricos instalados no ponto e contraponto da máquina. Basicamente, o sistema atua no controle do avanço e é realimentado com o valor da força normal adquirida. O valor medido é comparado com o valor desejado, a correção do avanço é realizada e o ciclo continua. Após a realização de experimentos, os pesquisadores concluem que: o monitoramento e controle da força normal permite a otimização do tempo do ciclo e também a detecção do desgaste do rebolo.

TÖNSHOFF et al, (1988) apresentam exemplos de monitoramento e controle de vários tipos de processos de usinagem, utilizando vários tipos de 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 piezelétrico, instalado abaixo do eixo árvore. Este sistema permite a otimização do tempo de ciclo e a obtenção de furos com boa circularidade. VISHNUPAD, SHIH & SHIN (1995) realizam um experimento de monitoramento da operação de retificação cilíndrica interna de mergulho, cujo objetivo é determinar a relação entre grandezas físicas e condições do processo, visando a aplicação em monitoramento. A medição do erro de arraste do eixo árvore é utilizada para monitorar a força tangencial de retificação.

Como pode ser visto na Fig.2-3 o sinal de um ciclo de retificação, adquirido a partir do sensor instalado no motor do eixo árvore, tem pouco ruído, facilitando os cálculos de equações características e valores estatísticos.

Fig.2-3 Gráfico de erro arraste do eixo árvore, VISHNUPAD, SHIH & SHIN (1995).

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

2.1.2.2 Corrente Elétrica do Motor

A potência efetiva do eixo árvore tem relação direta com o torque entregue pelo eixo do motor. Os eventos que ocorrem no eixo árvore refletem-se na potência requerida pelo motor, KÖNIG & KLUMPEN (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 motores de avanço, o atrito do 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 a 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 alterações possam ser detectadas, DORNFELD, KÖNIG & KETTELER (1993).

ALLANSON et al (1989) pesquisam os efeitos da deflexão do sistema peça-rebolo-máquina na dimensão final de cilindros de parede fina, no processo de retificação centerless. A Fig.2-4 mostra um esquema do modelo da operação.

Fig.2-4 Modelo de retificação centerless, 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 que se abrevie o tempo de spark-out. Para calcular esta sobremedida é necessário que se conheça a constante de tempo do sistema peça-rebolo-máquina.

Esta constante é o tempo necessário para ocorra relaxação da deflexão do sistema, ou seja voltar à posição em 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 o spark-out.

Assumindo as seguintes hipóteses: o coeficiente da força de retificação (força normal / força tangencial), é aproximadamente constante para todas as profundidades de corte, a velocidade de corte é constante e que a potência elétrica consumida pelo

processo é proporcional à mecânica, pode-se assumir, para efeitos de cálculo que a profundidade de corte é proporcional a potência. A Fig.2-5 mostra o sinal da potência de retificação durante o spark-out.

Fig.2-5 Potência de retificação durante o spark-out, ALLANSON et al (1989).

INASAKI (1991) realiza experimentos em retificação interna e propõe métodos de monitoramento em processo utilizando, também, a potência de retificação. O monitoramento da potência do eixo árvore permite calcular a constante de tempo T do sistema, que representa a resposta característica do sistema. A constante T 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 retificar e que a rigidez estática da retificadora não é grande o bastante. Na medida em que diminui a afiação do rebolo, T aumenta. Portanto, a constante T é um bom índice para determinar a vida do rebolo.

A Fig.2-6 mostra duas curvas do sinal de potência x tempo, uma refere-se ao início da vida do rebolo e a outra ao rebolo desgastado. Estas curvas são obtidas em experimentos de retificação interna, similares aos descritos acima, realizados em outra data. Pode-se observar que há uma mudança no nível e forma das curvas.

Fig.2-6 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 Fig.2-7.

Fig.2-7 Mudança na curva da potência, quando ocorre uma queima, INASAKI (1991).

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

THOMAS et al (1995) realizam experimentos em uma retificadora cilíndrica externa CNC e propõe um sistema de controle adaptativo em processo baseado no monitoramento do sinal de potência da retificação. Neste sistema a constante de tempo é determinada no início do ciclo. Monitorando e processando o sinal da 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 spark-out requerido também deve mudar.

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

2.1.2.3 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, o estado dos elementos rotativos da máquina, irregularidades da ferramenta e do material da peça obra, assim como a segmentação básica do cavaco, JUNKAR, FILIPIC & BRATKO (1991).

MORI et al, (1992) apresentam 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 frequências 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 por que se mistura com os sinais de interesse.

Um dos exemplos típicos, das mais significativas vibrações indesejáveis é o de chatter. Que pode ser separado em dois tipos: chatter da peça e chatter do rebolo. Embora, usualmente possuam quase a mesma frequência, as formas de ondas diferem, por que o chatter da peça é modulado pela frequência da rotação da peça e o chatter 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. Chegaram a conclusão de que o sistema obteve sucesso no diagnóstico das vibrações e nas ações

corretivas. Podendo ser aplicado com facilidade a outros tipos de processo de retificação.

2.1.2.4 Emissão Acústica

Segundo KÖNIG & MEYEN (1990) vários autores concordam que os fenômenos relacionados com a formação do cavaco na retificação podem ser subdivididos em duas fases. Inicialmente ocorre somente o escorregamento do grão abrasivo sobre o material, esta fase é chamada de elástica. Na segunda fase começam a ocorrer as deformações plásticas e a formação de cavaco. O processo de atrito, deformação plástica e remoção de cavaco que ocorrem na peça durante a retificação são acompanhadas por fenômenos relacionados ao rebolo como desgaste do grão abrasivo e fratura da liga. A intensidade destes fenômenos é diretamente proporcional ao sinal de EA mensurável. A Fig.2-8 mostra as principais fontes de EA na retificação de metais.

Fig.2-8 Principais fontes de EA na retificação de metais, KÖNIG & MEYEN (1990).

Segundo KÖNIG & MEYEN (1990) a EA gerada durante a operação de dressagem está associada às fraturas frágeis que ocorrem nos grãos abrasivos quando se chocam com o diamante dressador. A ruptura de grãos abrasivos gera um sinal de EA com uma banda de frequência extremamente larga. A energia deste sinal pode ser medida através do valor RMS ("root mean square") do nível do sinal detectado e é proporcional à velocidade de avanço e à profundidade do dressagem. A medição e análise da emissão acústica produzida pelo processo é uma técnica adequada para o propósito de otimização e controle do processo de retificação, como descrito por diversos pesquisadores. A hipótese básica é que a EA contém informação de interesse

sobre o micro-fenômeno mecânico do processo de retificação, do desgaste do rebolo e da operação de dressagem.

DORNFELD & CAI (1984) são os pioneiros a investigar o potencial da utilização da análise do sinal de EA para o monitoramento do processo de retificação visando a automação do mesmo e como uma ferramenta para investigar os seus fenômenos. Nesta investigação é utilizado o sinal de EA gerado durante uma operação de retificação plana para medir o empastamento do rebolo, o momento do contato peça/rebolo na aproximação e a perda de contato peça/rebolo no final do spark-out.

Quanto à detecção de contato peça/rebolo DORNFELD & CAI chegam a seguinte conclusão: O sinal de EA detecta acuradamente o momento do contato peça/rebolo na aproximação e a perda de contato no final do spark-out. Nos dois casos a sensibilidade do sinal de EA excede a da medição de força.

A grande sensibilidade inerente ao monitoramento por emissão acústica e às técnicas investigadas requerem que sejam tomadas precauções quando se utiliza monitoramento por EA para controle em processo. Deve-se verificar se as mudanças relativas no nível do sinal de EA com o avanço do rebolo (avanço de aproximação) estão adequadas à configuração rebolo/peça/refrigerante/máquina empregada. Este é um complicador para a aplicação de monitoramento por EA em retificação, uma vez que pequenas variações no estado de afiação do rebolo podem provocar mudanças significativas no nível do sinal.

Segundo DORNFELD (1992) as altas velocidades relativas entre rebolo e peça garantem uma fonte significativa de EA. Em muitos casos as outras técnicas empregadas, como realimentação por nível de força ou torque são insensíveis ao comportamento do processo de retificação por causa de sua baixa taxa de remoção de material.

Os objetivos principais no monitoramento do processo por EA são: detecção do momento de contato na aproximação, controle do tempo de sparkout, da dressagem e do desgaste do rebolo. Pode ser utilizado também para detectar vibração tipo "chatter" ou a deterioração do acabamento superficial.

2.1.3 Sensores e Tratamento do Sinal

Os sensores fazem a ligação entre o processo e os sinais elétricos que são adquiridos e posteriormente analisados, geralmente em sistemas eletrônicos microprocessados ou em microcomputadores.

Dependendo do seu projeto, os sensores convertem ou a velocidade ou a aceleração do sinal em uma voltagem 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 voltagem elétrica induzida em certos materiais, ou seja o efeito piezoelétrico.

Atualmente, estão disponíveis no mercado numerosos tipos de sensor para aplicação em monitoramento de processos de usinagem. A Fig.2-9 mostra a grande variedade de tipos de sensores existentes, para monitoramento de máquinas ferramenta, na figura estão citadas as aplicações.

Fig.2-9 Variedade de tipos de sensores para aplicação em máquinas ferramentas, BYRNE et al (1995).

Segundo KÖNIG & KLUMPEN (1993) a agressividade do ambiente dentro da máquina é freqüentemente uma grande restrição para outros tipos de sensores. Altas temperaturas, grandes quantidades de óleo refrigerante, desgaste abrasivo através de cavacos ou partículas demandam por um sensor de projeto robusto. Logo, na seleção de sensores para aplicações industriais são de fundamental importância a resistência da cápsula do sensor à óleos lubrificantes agressivos, o tipo de fixação requerido, a forma adequada de sua montagem e o seu custo. Utilizando este critério para a seleção,

somente uma pequena fração do grande número de sensores comerciais pode ser aceito como adequado.

2.1.3.1 Aplicação em Ambiente Industrial

A utilização de monitoramento em processo, nas indústrias, implicam em restrições, também, quanto ao sensor. Que é o elemento que faz a ligação entre a grandeza física medida e o sistema de aquisição. Em seguida apresentam-se vantagens e desvantagens dos sensores, para cada grandeza apresentada anteriormente:

- sensor de força: dinamômetros piezelétricos de alta precisão são muito caros, tornando a medição precisa das componentes da força de corte inadequada para aplicações industriais. Entretanto a utilização de células de carga, instaladas entre elementos que formam o caminho da força, tem crescido na indústria. Porém, o que impede a utilização mais ampla deste tipo de sensores é o “drift” de temperatura, nem sempre compensado adequadamente e as modificações significativas, necessárias no caso de “retrofitting”, KÖNIG & KLUMPEN (1993).
- sensor de corrente: sensores de efeito Hall são utilizados para detectar a variação na corrente, são baratos e fáceis de instalar no armário elétrico. Uma grande vantagem deste sensor em relação ao sensor de força é a ausência de “drift”. Apesar da resposta lenta a eventos, a medição da potência efetiva pode ser muito útil como suplemento para outros sensores, KÖNIG & KLUMPEN, (1993).
- sensor de vibração: Nos acelerômetros, o elemento ativo consiste de fatias ou discos piezelétricos, carregados por uma massa sísmica e fixados na capsula por uma presilha. Quando o acelerômetro está sujeito a uma vibração, a massa sísmica exerce uma força variável no elemento piezoelétrico e devido ao efeito piezoelétrico, esta força produz uma carga elétrica correspondente. Os acelerômetros são indicados para as seguintes aplicações: análise e medição de choque e vibração, monitoramento de vibração, análise modal e estrutural, testes de vibração e controle de qualidade, PRODUCT DATA BRÜEL & KJAER.
- sensor de emissão acústica: Segundo KÖNIG & MEYEN (1990) as ondas de ultrassom 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 à

superfície. Estas ondas tem suas amplitudes atenuadas exponencialmente no sentido da profundidade do material, BEDFORD & DRUMHELLER (1994).

Segundo BYRNE et al (1995) atualmente sensores de EA especialmente projetados para propósitos de monitoramento estão disponíveis no mercado, preenchendo os severos requisitos quanto à robustez. . A Fig.2-10 mostra a estrutura de um sensor de EA, com acoplamento mecânico por pressão de parafuso. As vantagens deste sensor são sua robustez e a facilidade de fixação.

Fig.2-10 Estrutura de um sensor de EA(fonte Bosh), KÖNIG & MEYEN (1990).

2.1.3.2 Tratamento do Sinal

O sinal elétrico fornecido pelo sensor necessita ser amplificado e tratado para que se possa extrair as características relacionadas com o processo a ser monitorado. A não ser em casos onde o sensor já fornece o nível da grandeza monitorada, como por exemplo: corrente elétrica ou força.

Para emissão acústica e vibração de baixa frequência técnicas semelhantes de tratamento são utilizadas. Em geral a pré amplificação é a primeira etapa, inclusive, já existem no mercado acelerômetros com pré amplificador embutido.

A segunda etapa é a filtragem que permite eliminar vários tipos de ruídos indesejáveis e destacar a informação na faixa de frequência selecionada. A parte do sinal remanescente, pode então passar para análises no domínio do tempo, da frequência ou conjuntas. No domínio do tempo várias características estatísticas, como: RMS(valor quadrático médio), máximo, mínimo, média, variância, desvio padrão, skewness, kurtosis, etc, podem ser úteis para análise.

Existem muitas aplicações que utilizam estas características, por exemplo: no monitoramento de vibrações de máquinas utiliza-se máximo, mínimo, média, RMS e desvio padrão, DU, ELBESTAWI & WU (1995).

O valor RMS e o valor retificado do sinal de emissão acústica é amplamente utilizado, com sucesso, para monitoramento de diversos problemas de retificação, porém a análise do espectro de frequência pode suprir situações onde a técnica do RMS não fornece resultados satisfatórios, WEBSTER, DONG & LINDSAY (1996).

A análise espectral pode fornecer informações sobre a dinâmica do processo. A análise espectral consiste de dois estágios: calcular o espectro, geralmente utilizando a FFT(fast fourier transform) e avaliação do espectro, para identificar faixas de frequência correspondentes ao evento que se deseja monitorar. Deve-se observar algumas limitações do método da FFT, como a resolução de frequência e a forma de janela adequada para reduzir o “leakage”.

Existem outras formas de se fazer a análise espectral, como o chamado cepstrum, que é definido como a transformada Fourier do log-espectro, outra técnica é análise espectral sequencial, baseada na transformada de Walsh.

A distribuição tempo-frequência pode ser vista como uma transformação que representa a energia ou a densidade do sinal simultaneamente no domínio do tempo e da frequência. Portanto, revela características dependentes do tempo que o simples espectro não mostra, DU, ELBESTAWI & WU (1995).

2.1.4 Estratégias de Monitoramento

A implementação de um sistema de monitoramento implica na utilização de uma estratégia para identificar a ocorrência de eventos, que representam problemas, durante a operação de usinagem. A estratégia mais simples é a determinação de um valor limite constante em relação ao tempo, ou seja, após a observação do comportamento do sinal durante alguns ciclos de usinagem considerados normais, é definido um valor de referência para o circuito de comparação, que quando é ultrapassado indica a ocorrência de um problema.

No caso de monitoramento de eventos que aumentam a magnitude do sinal, como: contato ferramenta/peça, colisão, etc, o valor limite deve ser maior que o máximo atingido durante os ciclos. Em caso contrário, eventos que reduzem a magnitude, como: falta da peça, falta de material, etc, o valor deve ser menor que o mínimo.

Estas estratégias podem ser aplicadas tanto ao monitoramento da magnitude do sinal no tempo, como ao monitoramento da magnitude de características do sinal, como: valor médio, desvio padrão, etc. Porém, necessitam de reajustes dos limites quando se

mudam condições do processo, tais como: material da peça, tipo de rebolo, etc, BYRNE et al (1995).

Outra estratégia é a utilização de limite dinâmico, neste caso o sistema de monitoramento calcula, em processo, uma curva limite, a partir do valor atual do sinal que está sendo adquirido. Esta curva limite é calculada através da adição de um dado número de desvios padrões, ao valor de cada amostra do sinal, formando uma curva similar à curva do sinal original, este procedimento é mais flexível e permite a ocorrência de pequenas mudanças nas condições do processo, sem ultrapassar o limite, FELIPE (1996).

O limite dinâmico também pode ser calculado a partir de um sinal armazenado. Neste caso calcula-se o limite a partir do sinal de um ciclo de usinagem normal, previamente adquirido. Este procedimento necessita de um ciclo inicial chamado “teach-in”. A partir do sinal armazenado pode-se calcular um limite superior e um inferior definindo uma faixa de trabalho, que acompanha a forma do sinal. Vide Fig.2-11.

Fig.2-11 Estratégias de monitoramento utilizando threshold, DORNFELD, KÖNIG & KETTELER (1993).

No caso da faixa de trabalho, que também pode ser definida com a utilização das outras estratégias a transgressão do limite superior representa um evento e a

transgressão do limite inferior outro, que são identificados por comparadores diferentes que atuam conduzindo a ações correspondentes a cada situação.

Existem outras estratégias para detectar alterações do processo, que relacionam vários parâmetros extraídos do sinal do sensor, como por exemplo: lógica fuzzy, redes neurais, reconhecimento de padrões, árvore de decisão, etc. Porém, estas estratégias geralmente são mais utilizadas em monitoramento multisensores ou na avaliação de várias características de um mesmo tipo de sensor, assunto que será tratado no item 2.2.1.

2.2 Monitoramento com Múltiplos Sensores

Um sistema que controle automaticamente todas as ações necessárias para execução de um ciclo de retificação, pode ser desenvolvido a partir da integração de sensores. O controle da máquina através da integração de sensores é similar à ação de um operador experiente, que utiliza seus diferentes sentidos para monitorar a operação de retificação.

Este sistema deve ter a capacidade de desempenhar funções atribuídas atualmente à operadores humanos, tais como: inspecionar a qualidade da peça, monitorar o estado da ferramenta, executar a ação necessária se algum problema acontecer e otimizar as condições de usinagem. O sistema deve ser construído de forma a possuir as funções de reconhecimento de padrões e tomada de decisões, LEZANSKI & RAFALOWICZ (1993).

A integração de sensores parece ser um modo razoável para se conseguir informações seguras sobre o estado da operação de usinagem, possibilitando a execução de operações sem assistência de operador humano ou minimamente assistida. A integração combina informações de vários sensores, uma vez que, a utilização de apenas um sensor pode não ser adequada para determinar o estado do processo, DORNFELD (1994).

Por exemplo: tem-se pesquisados intensamente o uso de sensores de emissão acústica integrados com sensores de força, para o monitoramento de desgaste de ferramenta.

A emissão acústica possui uma grande sensibilidade para o desgaste e fratura da ferramenta, porém sua grande dependência dos parâmetros do processo tem requerido a integração com tecnologias de monitoramento mais convencionais para reduzir esta dependência. Este é um bom exemplo de tecnologia de monitoramento que requer um cuidadoso processamento do sinal para extração de suas características e a integração com outro(s) sensor(es) para ser mais efetiva. Os sistemas multisensores apresentam muitas características de monitoramento inteligente. Geralmente, o monitoramento inteligente possui uma funcionalidade muito maior do que o monitoramento convencional porque pode responder a necessidades especiais da máquina ferramenta ou do processo que está monitorando.

MORIWAKI refere-se à capacidade do monitoramento inteligente quando faz a distinção entre a máquina ferramenta inteligente, onde o controle é realizado a partir da

capacidade de auto decisão, e a máquina convencional, controlada a partir de comandos pré determinados. A máquina inteligente tem a capacidade de utilizar experiência e conhecimento acumulados durante as operações anteriores, acumular conhecimento através de aprendizado e capacidade de filtrar entradas ambíguas(ruídos).

Certamente, um dos elementos críticos na armazenagem de informações, aquisição de conhecimento e filtragem de ruídos, está no sistema de monitoramento utilizado em processo durante a usinagem. A Fig.2-12 mostra o desenvolvimento da máquina ferramenta inteligente proposta por MORIWAKI.

O monitoramento inteligente preenche os requisitos citados acima, pois deve ter a capacidade para realizar algumas ou todas as tarefas citadas a seguir: auto calibração, processamento do sinal, tomar decisão, fusão de sensores e capacidade de aprender.

Fig.2-12 Desenvolvimento da máquina ferramenta inteligente, proposta por MORIWAKI, BYRNE et al (1995).

Processamento do sinal, neste caso, significa extração das características relacionadas ao processo a partir do sinal proveniente de cada sensor. A habilidade do sistema de monitoramento tomar decisão elimina etapas posteriores de processamento.

Fusão de sensores significa a capacidade de combinar ou adicionar a saída de vários sensores para obter uma decisão mais confiável quanto ao estado do processo. Um aspecto muito importante do sistema de monitoramento é a habilidade que o mesmo

deve ter para ‘aprender’ a partir de informações anteriores utilizando redes neurais ou outro tipo de método de monitoramento para um aumento contínuo de confiabilidade e robustez..

Portanto, o monitoramento inteligente é mais ou menos uma combinação de sensores convencionais, processamento de sinais, métodos de extração de características de sinais e estratégias de implementação que são integradas no sistema de monitoramento, BYRNE et al (1995).

2.2.1 Métodos de Monitoramento

Existem muitos métodos desenvolvidos e outros em desenvolvimento, para o monitoramento de processos. Contudo a sua estrutura básica é similar à dos seguintes: redes neurais, lógica fuzzy reconhecimento de padrões ou árvores de decisão, DU, ELBESTAWI & WU (1995).

Estes métodos podem ser utilizados para interpretar vetores de medição, originados em sinais de vários tipos de sensor, assim como vetores originados em características de um só tipo de sensor.

2.2.1.1 Redes Neurais

As redes neurais são métodos computacionais que utilizam uma rede de processadores simples, densamente interligados em vez de um único e sofisticado processador central. A arquitetura das redes neurais e seus nós/processadores são similares aqueles encontrados no cérebro humano, vem daí o nome adotado para esta técnica.

Pode-se citar as seguintes características positivas das redes neurais:

- tolerância a falhas, descartando informações de nós defeituosos,
- flexibilidade – facilidade de ajustar-se a novos ambientes via aprendizado, dispensando reprogramação,
- pode lidar com dados inconsistentes e ruidosos, REGIER (1993).

Do ponto de vista estrutural, uma rede neural consiste de uma série de elementos computacionais não-lineares, conectados através de pesos e dispostos em camadas.

A adaptação ou capacidade de aprender, é uma das melhores características das redes neurais. Uma rede neural pode mapear um conjunto de padrões de entrada em padrões de saída simplesmente por exposição aos exemplos de mapeamento.

Este procedimento, chamado de ‘treinamento’ , permite a gradual adaptação dos pesos que conectam os nós, aproximando os resultados obtidos pela rede daqueles que eram esperados, ALMEIDA, BERNARDO & COPPINI (1996).

Atualmente já existe uma grande gama de aplicações de técnicas de redes neurais em diversos campos do conhecimento, assim como programas computacionais comerciais para treinamento e atribuição de pesos às conexões entre nós, assim como programas que fornecem ferramentas computacionais que facilitam a construção das redes.

Contudo, a técnica de redes neurais é um assunto amplo e neste trabalho a abordagem limita-se aos conceitos básicos das redes tipo feedforward com treinamento por back-propagation (retro propagação).

Este tipo de rede emprega sempre a função degrau ou a função sigmóide como função de ativação nos nós. Estas redes também chamadas perceptrons multi camadas podem formar arbitrariamente complexas decisões de contornos e representar qualquer função Booleana. O desenvolvimento do algoritmo de treinamento back-propagation, para determinação dos pesos das interligações tornou-se o mais popular entre pesquisadores e usuários deste tipo de redes neurais, SANTOS (1998).

Os nós constituem os elementos básicos em uma rede neural. A estrutura de um nó de uma rede é apresentada na Fig.2-13.

Fig.2-13- estrutura de um nó de rede neural.

Cada nó é constituído de N entradas (x_0 a x_{n-1}) além de uma entrada com valor fixo de 1. Cada entrada é multiplicada por um coeficiente denominado ‘peso’ (w_0 a w_{n-1}). A entrada com valor fixo é multiplicada por um coeficiente denominado ‘offset’ (θ , sendo posteriormente somados. O valor resultante (α) é então submetido a

uma função de ativação. Para o nó de saída, a função linear utilizada é a identidade ($f(\alpha) = \alpha$). No caso dos nós da camada oculta, utiliza-se a função não-linear sigmóide (eq. 1).

$$f(\alpha) = \frac{2}{1 + e^{-\alpha}} - 1 \quad (1)$$

A utilização de uma função não-linear na camada oculta possibilita que a rede neural modele problemas não-lineares,

Uma rede neural do tipo feedforward é composta por um conjunto de nós interligados, estruturados em camadas, vide Fig.2-14 . A primeira camada é de entradas. Em seguida encontram-se as camadas intermediárias, denominadas “ocultas”, que podem ser omitidas para solução de problemas simples, ou em número maior que 1 para problemas de maior complexidade. A camada de saída finaliza a estrutura da rede neural, onde o número de nós utilizados depende da natureza dos dados e da forma como estes serão interpretados.

Fig.2-14 - estrutura da uma rede neural com um nó de saída.

Existem três tipos de processadores nesta rede: a camada de entrada que aceita vetores contínuos de valores gerados a partir do sinal tratado, camadas ocultas que não interagem diretamente com o ambiente externo e a camada de saída que gera saídas para o ambiente externo. A tarefa dos nós ocultos é a classificação das informações contidas no vetor entregue na camada de entrada. Esta tarefa envolve essencialmente a eliminação do ruído contido na informação e a associação desta informação com padrões previamente definidos. Por exemplo: para o monitoramento de desgaste da ferramenta, o vetor de entrada contém informações dos sinais tratados e a saída

fornecida pela rede pode indicar se a ferramenta está boa ou desgastada, RANGWALA & DORNFELD (1990).

A função de mapeamento das entradas e saídas em uma rede neural é definida pelo seu conjunto de pesos e offsets. O valor de saída da rede neural feedforward é calculado de baixo para cima, a partir de um conjunto de entradas. Inicia-se pelo cálculo do valor de saída dos nós da primeira camada oculta. Continua-se com as camadas seguintes até chegar à de saída.

Para uma rede contendo N_E entradas e N_O nós na camada oculta, calculam-se os valores dos nós ocultos (x'_0 a x'_{N_E-1}) utilizando:

$$x'_j = f\left(\sum_{i=0}^{N_E-1} w^O_{ij} * x_i + \theta_j\right) \quad 0 \leq j \leq N_O - 1 \quad (2)$$

onde x_i é uma entrada, w^O_{ij} é um peso e θ_j é o offset associado ao nó oculto x'_j . A função de ativação $f()$, utilizada no cálculo acima, é a sigmóide (Eq. 1).

O cálculo do nó de saída é dado por:

$$y = \sum_{j=0}^{N_O-1} w^S_j * x'_j + \theta' \quad (3)$$

onde x'_j é um nó da camada oculta, w^S_j é um peso e θ' é o offset associado ao nó de saída y , BICUDO(1997).

O método utilizado para se ajustar os valores dos pesos e offsets para um dado mapeamento é denominado treinamento. O tipo mais comum de treinamento utiliza a back-propagation .

O treinamento supervisionado por back-propagation utiliza conjuntos de dados que contem vetores de entrada conhecidos e correspondentes valores de saída requeridos. O treinamento consiste da sucessiva: aplicação de vetores de entrada e comparação dos valores de saída calculados com os valores alvos. As diferenças entre os valores de saída calculado pela rede e os valores alvo, são utilizadas para ajustar os pesos. Este procedimento é repetido muitas vezes, até que os erros sejam minimizados e se obtenha uma aproximação considerada suficiente entre o modelo da rede e o conjunto de dados de treinamento, ROWE, LI & ALLANSON (1996).

As propriedades das redes neurais, como alta velocidade de processamento e tolerância a faltas, combinados com sua habilidade para estabelecer um processo interativo de aprendizado com o relacionamento entre variáveis de entrada e saída, faz com que sua utilização seja mais adequada para o caráter instável do processo de manufatura do que sistemas convencionais, que não conseguem atuar em eventos aleatórios do processo.

A Fig.2-15 ilustra uma possível estrutura de rede neural que pode ser utilizada para monitoramento do processo de retificação.

As entradas para a rede são parâmetros como: EA_{RMS} , potência efetiva, força normal, etc. Os dados básicos para a rede podem incluir informações como: fim da vida do rebolo, chatter detectado, queima detectada ou rugosidade muito alta. Dessa forma uma larga faixa de falhas do processo podem ser identificadas.

Fig.2-15 Estrutura possível para monitoramento de processos de retificação, KÖNIG & KLUMPEN(1993).

Este exemplo apresenta uma breve visualização das possibilidades abertas para o monitoramento do processo, KÖNIG & KLUMPEN(1993).

2.2.1.2 Lógica Fuzzy (Nebulosa).

A lógica Fuzzy (ou lógica nebulosa) tem por objetivo modelar os modos imprecisos de raciocínio, que desempenham papel importante na habilidade humana de tomar decisões em ambientes incertos. Esta habilidade depende, em certo aspecto, da

capacidade de inferir respostas a uma questão baseada em um conhecimento armazenado cuja fonte é imprecisa ou não confiável. O conceito básico envolvido na lógica nebulosa está na definição dos seus conjuntos, operadores e variáveis lingüísticas, ALMEIDA, BERNARDO & COPPINI (1996).

Um conjunto fuzzy define o mapeamento entre elementos do espaço de entrada e valores no intervalo $[0,1]$. A função associação é uma curva que define o valor do grau de associação atribuído a cada elemento no espaço de entrada. A função associação pode ser qualquer curva arbitrária, cuja forma seja a mais adequada, considerando: simplicidade, conveniência, velocidade e eficiência. As formas típicas das funções associação são as seguintes: triangular, retangular, trapezoidal, etc.

A base do processamento da lógica fuzzy, são regras do tipo SE-ENTÃO, onde a parte SE... é chamada de antecedente e a parte ENTÃO... de consequente. Conjuntos fuzzy, geralmente, possuem vários antecedentes que são combinados usando operadores fuzzy, a combinação gera um único valor.

Para se obter bons resultados é necessário agregar a saída de muitas regras em um conjunto fuzzy. Aplica-se então um método de defuzzification para se obter um único valor numérico, TETI & KUMARA (1997).

Pode-se citar como exemplo de regras de produção fuzzy, a relação entre velocidade de avanço na dressagem f_d , profundidade de dressagem a_d e rugosidade superficial R_z , expressado da seguinte maneira:

SE (f_d é mínimo) e (a_d é médio) ENTÃO (R_z é pequeno).

As variáveis linguísticas MIN(mínimo), P(pequeno), M(médio), G(grande) e XG(muito grande) formam um conjunto fuzzy e são quantificadas pela função associação conforme a Fig.2-16. A Fig.2-17 mostra a regra acima, expressada pela função associação com a forma de triângulo.

Fig.2-16 Exemplo de um conjunto fuzzy e função associação, SAKAKURA & INASAKI (1993).

Fig.2-17 Exemplo de regras fuzzy, SAKAKURA & INASAKI (1993).

A Fig.2-18 mostra um exemplo de lógica fuzzy que usa duas regras R_1 e R_2 .

Fig.2-18 Algoritmo de raciocínio fuzzy, SAKAKURA & INASAKI (1993).

Quando entradas reais f_{d0} e a_{d0} são fornecidas, elas são avaliadas quanto ao seu grau de associação aos conjuntos fuzzy na parte antecedente e então calcula-se α_i , que indica o grau de aplicabilidade da regra i . O conjunto fuzzy na parte consequente é modificado de acordo com α_i e composto como apresentado na figura. Finalmente, o centro de gravidade do conjunto fuzzy composto é tomado como a saída R_{z0} , SAKAKURA & INASAKI (1993).

2.2.1.3 Reconhecimento de Padrões

Em geral métodos de reconhecimento de padrões podem ser divididos em dois grupos: métodos estatísticos, também chamados métodos não determinísticos de classificação e métodos de distribuição livre, também chamados métodos determinísticos de classificação.

Métodos estatísticos são baseados na estimativa de Bayes. Estes métodos calculam a densidade da probabilidade de que um determinado vetor medição, que contem características dos sinais, pertença às determinadas condições do processo.

O desempenho dos métodos estatísticos dependem da função distribuição de probabilidade, se esta função estiver perto da função Gaussiana, a estimativa de Bayes pode ser uma boa classificação. Entretanto, no monitoramento de processos de

manufatura, a função distribuição é geralmente desconhecida e pode ser diferente da Gaussiana, por isto normalmente os métodos de distribuição livre são preferidos.

Os métodos de distribuição livre são baseados na similaridade entre o vetor medição e vetores de padrões que representam as condições do processo. Do ponto de vista geométrico, as características dos sinais monitorados $X\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ definem um espaço que também contém os vetores dos padrões das condições do processo $P\{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$. O vetor amostra x_c , que contém os valores das características também é representado neste espaço.

A similaridade entre o vetor amostra e os vetores dos padrões pode ser medida pela distância entre os dois. A distância mínima é então utilizada para classificar o vetor amostra como o correspondente a determinado padrão.

Na Fig.2-19 está apresentado um exemplo simples, onde as características do processo são: x_1 , x_2 e x_3 , os padrões do processo são p_1 , p_2 e p_3 . Dado um vetor amostra x_c , as distâncias entre a amostra e os padrões são respectivamente d_1 , d_2 e d_3 . Como d_1 é a menor distância, estima-se que a amostra é obtida quando a condição do processo é representada por p_1 .

Fig.2-19 Esquema de reconhecimento de padrões de distribuição livre, DU, ELBESTAWI & WU(1995).

Existem muitas maneiras de se calcular distâncias e definir padrões, o que resultou em vários métodos de distribuição livres.

Em geral, reconhecimento de padrões pode ser visto como uma decomposição do espaço amostral em dois subespaços, definidos por uma função discriminante. Existem vários tipos de função discriminante, como mostra a Fig.2-20. O desempenho do método de reconhecimento de padrões depende do tipo de função discriminante, da distribuição das amostras para aprendizado e da definição das condições do processo, DU, ELBESTAWI & WU(1995).

Fig.2-20 Esquema de funções discriminantes em reconhecimento de padrões, DU, ELBESTAWI & WU(1995).

2.2.1.4 Árvores de Decisão

A árvore de decisão pode ser construída a partir de instruções ou de exemplos. No monitoramento de processos de usinagem, as instruções para tomada de decisões são frequentemente: imprecisas, incompletas e subjetivas. Por outro lado, exemplos podem ser obtidos a partir de experimentos sistemáticos, portanto, aprendizado a partir de exemplos é geralmente preferido.

Atualmente métodos práticos para aprendizado a partir de exemplos estão disponíveis, na forma de programas de computador bastante eficientes. Um exemplo deste tipo de programa é o “Assistant Professional”.

Este programa faz parte de uma família que, dado um conjunto de treinamento, extrai o domínio do conhecimento na forma de uma árvore de decisão. Os exemplos de treinamento são especificados por valores e classes de atributos. Durante o processo de aprendizado, a árvore é construída recursivamente, utilizando a entropia como medida para selecionar o mais “informativo” atributo e dividindo o conjunto de treinamento em subconjuntos em cada passo recursivo.

Nesta árvore de decisão, os nós internos representam atributos, ligações correspondem a valores dos atributos e folhas são classes. A árvore de decisão pode ser interpretada como um conjunto de regras de classificação que servem para classificar novos exemplos descritos apenas por atributos, JUNKAR, FILIPIC & BRATKO (1991).

2.2.2 Aplicações de Sistemas Inteligentes

MORI et al(1992), apresentaram um sistema inteligente de monitoramento e diagnóstico em processo para vibrações em retificação cilíndrica, chamado IDIAS, Intelligent DIAGnostic Sistem. Uma técnica de Inteligência Artificial híbrida, onde se

combinam redes neurais com um sistema especialista, permite que o IDIAS execute procedimentos totalmente automáticos para diagnosticar vibrações indesejáveis.

A rede neural inicialmente detecta e identifica o tipo de vibração a partir dos padrões do espectro dos sinais de vibração. Então o sistema especialista planeja a estratégia para eliminar ou reduzir a vibração identificada utilizando uma base de conhecimento.

As vibrações da retificação são medidas no contra-ponto da retificadora utilizando um acelerômetro. Um analisador de FFT faz a aquisição do sinal de vibração após o mesmo ser devidamente amplificado. O espectro do sinal de vibração entre 0 e 2 kHz com 5 Hz de resolução é obtido pelo analisador de FFT e os valores do espectro são então mandados para o PC através de uma interface padrão GPIB.

O PC primeiramente identifica o estado das vibrações a partir do padrão do espectro com a rede neural e então o sistema especialista planeja a estratégia para eliminar ou reduzir as vibrações identificadas. Os diagnósticos resultantes são então apresentados ao operador através da tela do computador e do sintetizador de voz.

Os sinais de vibração registrados em testes preliminares são utilizados para o treinamento da rede neural, após passarem pelo analisador de FFT. O IDIAS foi desenvolvido utilizando uma montagem de equipamentos de medição e análise de vibração, simples e de aplicações gerais e um computador pessoal. A Fig.2-21 mostra a configuração do hardware do IDIAS.

Fig.2-21 Configuração de hardware do IDIAS, MORI et al (1992).

Este sistema de diagnóstico em processo de vibrações foi testado em retificação cilíndrica, apresentando bons resultados. Embora este sistema tenha sido desenvolvido e testado em retificação cilíndrica, ele pode facilmente ser aplicado em outros tipos de retificação devido a sua simplicidade e características abertas da técnica de IA.

JUNKAR, FILIPIC & BRATKO (1991) apresenta um procedimento para identificação de vibrações, onde é utilizado um programa de árvore de decisão com aprendizado por exemplos. O sinal de vibração é adquirido a partir de um acelerômetro fixado na peça obra, em uma retificadora plana. A Fig.2-22 mostra o setup do experimento.

Fig.2-22 Setup experimental para identificação das condições do processo, utilizando árvore de decisão, JUNKAR, FILIPIC & BRATKO (1991).

A análise espectral é realizada na faixa de frequência audível, entre 0 e 10 kHz, que contem informações a respeito da ação de corte dos grãos. Os seguintes atributos do espectro são extraídos continuamente:

- área total do espectro (SpArea),
- frequência do pico de máxima amplitude(MaxAmplX),
- frequência do pico de máxima área(MaxAreaX),
- frequência do ponto central da área espectral(AreaCX) e
- entropia estimada do espectro.

Simultaneamente, um especialista observa e avalia parâmetros tecnológicos, tais como: rugosidade superficial, faiscamento, sons e vibrações, classificando o desempenho das operações como: bom, médio, ruim ou fraco.

Realizaram-se 83 medições durante a vida do rebolo, onde a relação entre os atributos e as classes é estabelecida. Estes dados são fornecidos para o programa de árvore de decisão, que estabelece um algoritmo que reflete as correlações entre atributos e o impacto destes atributos na determinação das classes.

Realizaram-se testes, que classificaram corretamente 76,3% dos exemplos de teste. Considerando-se que as classes não tem uma fronteira bem definida, uma vez que foram definidas somente por especialistas; e classificando como incorreto o erro por dois níveis, ou seja estimar *bom* quando o correto seria *ruim*, a proporção de acerto é 92,1%.

Analisando a estrutura da árvore, nota-se que o atributo mais informativo é a área total do espectro (SpArea), confirmando que é altamente relacionada com o consumo de potência. Observa-se também a ausência atributos que foram descartados, provavelmente por que repetem informações já fornecidas por outros atributos.

A identificação de correlações entre atributos e seu significado na evolução das condições do processo possui um grande potencial de aplicação no controle de processos de retificação.

BILATOS & WEBSTER (1993) utilizam lógica fuzzy para controlar a retificação de forma de eixos utilizados em fusos de esferas, cuja forma deve ser quase a de um cilindro perfeito. O processo de retificação de um fuso de esferas é dividido em duas operações, cada uma com sua estratégia própria. A primeira operação é de retificação de forma para se obter um cilindro quase perfeito e a segunda a retificação das pistas de esferas.

Na retificação de forma, para compensar o erro introduzido pela força normal de retificação, são utilizados suportes de encosto (lunetas), ao longo do comprimento do eixo. Cada luneta possui dois encostos, que podem ser movimentados nas direções vertical e horizontal. São basicamente atuadores lineares que empurram o eixo contra o rebolo, em oposição a força normal, assegurando que a mesma profundidade de corte seja mantida ao longo do eixo.

O erro de paralelismo originado no torneamento contribui para tornar o controle das lunetas mais complexos. No processo convencional os reajustes das lunetas são

realizados por um operador experiente, após cada passe. Parando a máquina, tomando medidas ao longo do eixo e ajustando os encostos e reiniciando.

Os reajustes constantes são necessários por que a cada passe, o diâmetro em contato com os encostos diminui. Este reajuste depende inteiramente da “sensibilidade” do operador, freqüentemente, refinada ao longo de vários anos. Na Fig.2-23 estão mostrados alguns erros típicos de forma.

Fig.2-23 Erros típicos de forma, BILATOS & WEBSTER (1993).

O ajuste de cada apoio depende do erro que se quer compensar, por exemplo para corrigir o eixo em forma de cela, Fig.2-23 a), é necessário ajustar o apoio vertical central para cima e os dois apoios horizontais nas pontas para frente contra o eixo, para cada tipo de erro ajustes específicos são necessários.

O sistema formado pelo eixo, suportes, rebolo e retificadora é muito complexo. Devido a complexidade deste sistema é praticamente impossível estabelecer um modelo matemático preciso de um processo de retificação com múltiplos apoios ou definir uma estratégia de reajustes dos suportes de apoio para todas as formas de eixos.

O procedimento escolhido para tratar este problema é a utilização da lógica fuzzy para identificar a forma do eixo, a partir de protótipos que representam as formas típicas dos eixos. A identificação da forma do eixo, possibilita a determinação da medida que cada apoio deve ser movimentada de acordo com a experiência do operador e resultados experimentais.

São definidos seis subconjuntos fuzzy, a partir da experiência do operador de que as posições mais importantes para o ajuste dos apoios é no meio do comprimento do eixo e nas pontas e da hipótese de dois diâmetros são iguais e o outro é maior ou menor, como se pode ver na Fig.2-24.

conj. fuzzy	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6
significado	centro pequeno	centro grande	cabeça pequena	cabeça grande	rabo pequeno	rabo grande
protótipo	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
forma

Fig.2-24 Conjuntos fuzzy e protótipos da forma dos eixos, BILATOS & WEBSTER (1993).

Um sistema para retificação deste tipo foi desenvolvido pelo autor para retificação de cilindros de produção de filmes plásticos. Utilizam-se lunetas com encostos munidos de motores de passo independentes, com alta resolução de controle do movimento de cada um. Um sensor de dimensão realiza a medição do diâmetro, após cada passe, nas seções transversais já definidas.

Após o sistema identificar a forma do eixo, a partir da informação do sensor, ajustes nos encostos são executados de acordo com valores pré – estabelecidos para aquela determinada forma. A Fig.2-25 apresenta um gráfico de erro de paralelismo x número de passes, onde nota-se a grande melhoria alcançada com a utilização do sistema de controle fuzzy, enquanto o especialista precisou de 14 passes para reduzir o erro de paralelismo, o sistema fuzzy precisou de apenas três.

Fig.2-25 Melhoria na redução do erro de forma, devido ao controle fuzzy dos encostos, BILATOS & WEBSTER (1993).

Logo, podem ser conseguidos significativos benefícios financeiros com a redução do tempo de ciclo, além de reduzir a experiência necessária ao operador, com a utilização deste sistema.

LEZANSKI & RAFALOWICZ (1993) apresentaram um sistema para monitoramento do estado do processo durante a operação de retificação, onde foi proposto um sistema com estrutura modular e hierárquica utilizando múltiplos sensores.

Para que o sistema de monitoramento possa reconhecer o estado do processo de retificação são necessários diferentes tipos de dados relacionados ao processo. Por isso levando-se em conta as limitações de hardware, o sistema foi montado com sensores para realizar as seguintes medições em processo: força de corte normal e tangencial, vibração, emissão acústica, diâmetro e circularidade. Foram medidos também a potência de retificação, deslocamento do rebolo e rotação da peça e do rebolo. Este conjunto de sinais permite que se avalie o processo de retificação em diversos aspectos por que os sinais fornecem diferentes grupos de características do processo.

O controle inteligente de processos de usinagem pode, em geral, ser tratado como um problema de tomada de decisão. A Fig.2-26 mostra um esquema da estrutura da matriz de decisão.

Fig.2-26 Matriz de decisão do sistema de monitoramento para retificação cilíndrica, LEZANSKI & RAFALOWICZ (1993).

O núcleo deste sistema é uma matriz de decisão, as colunas representam indicações dos sinais dos sensores utilizados para avaliação do processo. As linhas representam as ações de controle necessárias para manter o processo no estado desejado. Os elementos da matriz são valores das características extraídas das leituras dos sensores pelo processamento dos sinais.

Na definição dos valores limites para as características extraídas dos sensores, deve-se adotar um critério apropriado para avaliação da qualidade do processo. Neste caso o critério adotado foi o de tempo de ciclo de retificação mínimo para se atingir determinada qualidade. A Fig.2-27 apresenta um esquema do setup montado para os experimentos.

Fig.2-27 Esquema do setup, LEZANSKI & RAFALOWICZ (1993).

Os experimentos foram realizados em uma retificadora cilíndrica modificada. O hidráulico convencional de avanço foi substituído por um motor de passo, um redutor com parafuso sem fim e um fuso de esferas. Isso permite obter uma resolução de

movimento de 0,25 a 0,5 μm . Foram empregados mancais hidrostáticos no eixo do rebolo e nas guias e a potência do motor do rebolo foi aumentada para 10 kW. Um sistema microcomputadorizado modular MSK foi utilizado para registrar os sinais dos sensores e para controlar o motor de avanço. Um IBM PC foi utilizado para o processamento dos sinais.

Após a realização dos experimentos os pesquisadores chegaram a conclusão de que o procedimento de tomada de decisão utilizado permitiu a integração das informações dos sensores. Além disso os resultados obtidos confirmaram a efetividade do monitoramento do estado do processo, utilizando forças, vibração, emissão acústica e geometria da peça obra. Porém investigações posteriores são necessárias para definir algoritmos apropriados para aprendizagem e reconhecimento de padrões que deverão ser incorporados ao sistema de monitoramento. Em particular futuros trabalhos devem ser focalizados na efetividade das metodologias de sensoreamento por emissão acústica e na sua análise.

VISHNUPAD, SHIH & SHIN (1995) descrevem um esquema de monitoramento de um processo de retificação de mergulho interna, onde utilizam vários tipos de sensores para coletar sinais relacionados com a qualidade da peça, que é depois comparada com medições pós-processo.

O setup experimental consiste de uma retificadora CNC, um sensor de emissão acústica para detectar EA proveniente do eixo do rebolo, um sensor de potência para detectar a potência de retificação, uma sonda capacitiva para medir o erro de arraste do eixo do rebolo e um acelerômetro para medir a vibração proveniente do eixo do rebolo. A Fig.2-28 mostra um esquema de montagem do experimento.

Foram realizados experimentos variando-se seguintes as condições do processo: velocidade de avanço, rotação do rebolo, rotação da peça, velocidade de dressagem, profundidade de dressagem e velocidade de oscilação transversal do rebolo.

Os dados experimentais coletados foram analisados utilizando um “pacote” estatístico: Statistical Analyses Software (SAS) para achar a correlação entre os sinais adquiridos, as condições do processo e os parâmetros alvo desejados, tais como: rugosidade, circularidade e batimento.

O objetivo de se achar esta correlação é determinar as variáveis de mais influência para posterior treinamento de uma rede neural.

Fig.2-28 Esquema do setup experimental, VISHNUPAD, SHIH & SHIN (1995).

Após a análise dos resultados chegaram à conclusão de que determinadas frequências de alguns tipos de sensores podem ser utilizados para prever parâmetros de saída como rugosidade, circularidade e batida. Porém, é necessário realizar mais experimentos para poder treinar uma rede neural que possua a efetiva capacidade de prever a qualidade final da peça a partir das condições que estão ocorrendo durante o processo.

Segundo MEREDITH(1998), o monitoramento do processo está evoluindo em um processo de três estágios. Inicialmente focalizando os próprios sistemas, em um segundo estágio obtendo informações do processo através de múltiplos sensores. O último estágio será o efetivo controle adaptativo, onde haverá constante ajuste do processo às condições da ferramenta e da peça obra.

Atualmente estão disponíveis hardware e software sofisticados e de alto desempenho que podem ser utilizados para tratamento do sinal fornecido pelo sensor ou dos sensores. Contudo, para que as técnicas de tratamento de sinais produzam bons resultados, é necessário que os sinais, de onde são extraídas as características sensíveis às condições do fenômeno monitorado, possuam uma alta taxa sinal/ruído.

Pois, se a quantidade de ruído do sinal for muito grande, as frequências de interesse também serão afetadas, alterando o valor da característica escolhida para avaliação. Como as técnicas de tratamento e integração de sinais utilizam estes valores para interpretar as condições do fenômeno, o resultado será distorcido e provavelmente errado.

Porém, um requisito essencial para se conseguir sucesso no monitoramento de um processo é conhecer precisamente os eventos que ocorrem desde o início até o final do mesmo, para que se possa estabelecer a correlação correta entre o evento e a respectiva alteração no sinal.

Neste trabalho, o fenômeno de desgaste do rebolo é investigado, com o objetivo de definir um sistema de monitoramento em processo para previsão do fim da vida do rebolo. O fim da vida do rebolo causa vários tipos de erros e geralmente é percebido pelas suas consequências na peça, tais como: queima, erro de forma, erro dimensional, chatter, etc.

Existem vários tipos de desgaste que podem ocorrer. Para conseguir prever o fim da vida do rebolo, muitos pesquisadores tem utilizado técnicas multisensores, devido ao fato que cada um deles altera as grandezas físicas monitoráveis com diferentes intensidades. Assim, pode-se supor que um sistema que tenha a capacidade de interpretar o estado de desgaste do rebolo, também pode ser aplicado a outras etapas do processo de retificação.

2.3 Mecanismos de Desgaste de Rebolos

Com o decorrer do processo de retificação, o desgaste do rebolo aumenta e este deve passar por uma operação de dressagem antes que comece a produzir peças com defeito. A dressagem serve para obter agressividade e corrigir a forma da superfície do rebolo.

A determinação do momento da dressagem deve ser feita criteriosamente, para evitar a rejeição de peças produzidas com queima superficial, trincas, rugosidade alta, etc. Contudo, se a redressagem for realizada antes do necessário haverá desperdício de rebolo e de tempo, uma vez que o rebolo ainda possui capacidade de corte satisfatória, AGUIAR (1997).

Normalmente, em indústrias, regras para redressagem são estabelecidas de forma a se garantir a produção, implicando em desperdício. Se o rebolo for de CBN o prejuízo será maior, uma vez que, o custo do mesmo é cerca de vinte vezes o custo de um rebolo convencional com dimensões semelhantes.

Portanto, um sistema que monitore o desgaste do rebolo, com alto grau de confiabilidade, compensaria o investimento rapidamente, devido a crescente utilização de rebolos de CBN. Além disso, um maior controle sobre o processo de desgaste contribuiria para aumentar o grau de automação.

Entretanto, para o desenvolvimento de um sistema de monitoramento do desgaste do rebolo é necessário que se entenda a causa e o efeito deste processo na superfície do rebolo durante as operações de retificação, para se conseguir estabelecer correlações corretas entre o fenômeno que está ocorrendo com grandezas monitoráveis.

2.3.1 Conceitos Básicos sobre Desgaste

A variação da força de retificação devido ao desgaste contínuo das arestas de corte, afeta: a vida do rebolo, a acuracidade da peça obra e a deformação da estrutura da máquina. Esta variação pode ser analisada a partir dos eventos que ocorrem em um grão abrasivo.

A Fig.2-29 mostra um esquema simplificado da estrutura de sustentação de cada grão abrasivo, onde aparecem três grãos abrasivos e o ligante que os une, sendo que um deles está cortando um material. Estão representados na figura três tipos de desgaste que acontecem durante a retificação.

Fig.2-29 Esquema de tipos de desgaste: A - desgaste por atrito, B – fratura do grão e C – fratura da liga, SHIMAMUNE & ONO (1983).

Segundo SHIMAMUNE & ONO (1983) a força de retificação é estreitamente relacionada com o desgaste das arestas cortantes e cada uma de suas componentes nas direções normal e tangencial, pode ser decomposta em duas parcelas.

$$F = F_t + F_n = (f_t'' + f_t') + (f_n'' + f_n')$$

Onde, (f_n' e f_t') é parcela da força relativa a formação do cavaco e (f_n'' e f_t'') é relativa ao atrito entre área plana de desgaste e peça.

A Fig.2-30 ilustra as duas parcelas das forças tangencial e normal de retificação agindo em um grão, durante a retificação.

Fig.2-30 Ilustração da decomposição da força de retificação, SHIMAMUNE & ONO (1983).

O aumento da área plana em contato com a peça é causado pela abrasão mecânica e pelo desgaste termoquímico difuso, enquanto que a fratura reduz a área de contato. A abrasão mecânica é proporcional a energia de retificação para formação do cavaco ou seja o produto da parcela da força tangencial para formar o cavaco pelo comprimento de contato (L), isto é ($f_t' \times L$).

O desgaste difuso é proporcional a temperatura de contato do grão e ao tempo de contato, isto é (L/V) onde V é a velocidade periférica do rebolo. Este tipo de desgaste tende a crescer linearmente quando a temperatura atinge um valor crítico.

A fratura é proporcional a força tangencial de retificação agindo no grão e ao tempo de contato (L/V).

Segundo OLIVEIRA (1992) o número de arestas de corte aumenta com o início da retificação, permanecendo constante por um longo intervalo de tempo. O desgaste por atrito aumenta progressivamente as áreas planas dos grãos, provocando um aumento na força de retificação. Com o aumento da força pode ocorrer fratura no grão ou no ligante reduzindo estas áreas e consequentemente, a força de retificação.

O desgaste devido a perda de agressividade, chamado desgaste dúctil, provoca aumento da força de corte, aumento na temperatura de corte, queima superficial e erros dimensionais devido a grande deformação da estrutura da máquina. Enquanto que o desgaste devido a fraturas é chamado desgaste frágil, pode provocar: erros de forma, aumento da rugosidade e variações dimensionais.

Geralmente os dois tipos de desgaste aparecem simultaneamente, mas com intensidades diferentes. Para um maior controle das características das peças produzidas, o desgaste dúctil é preferido uma vez que a superfície de contato do rebolo é mantida. As condições de retificação, de dressagem e a especificação do rebolo definem o tipo de desgaste dominante que vai ocorrer.

O empastamento é outro tipo de desgaste que ocorre durante a retificação, este fenômeno ocorre quando cavacos penetram nos espaços entre grãos abrasivos e entopem os mesmos. Isto acarreta um alto nível de atrito entre rebolo/peça, por que o rebolo fica apenas atritando contra a peça sem retirar material, na maior parte do tempo de um ciclo de retificação.

2.3.2 Investigações Experimentais sobre Mecanismos de Desgaste

SHIMAMUNE & ONO (1983) realizaram uma série de experimentos para verificar as deduções teóricas que surgiram como resultado do equacionamento metódico dos efeitos da condição de dressagem e dos parâmetros de operação sobre a variação da força de retificação em relação ao tempo. Nestes experimentos são observados também a vibração da peça obra e os danos térmicos, neste sub item são apresentados alguns resultados.

A Fig.2-31 mostra um gráfico obtido a partir de uma retificação cilíndrica externa, onde somente as condições de dressagem são alteradas, f_d e t_d , são respectivamente: velocidade e profundidade de dressagem. Pode-se observar uma rápida redução nas componentes da força de retificação para curva de $f_d = 0.3$ mm/rev. Esta redução é devida a liberação de grãos pelo desgaste frágil.

Fig.2-31 Variação das componentes da força de retificação em relação as condições dressagem em retificação cilíndrica, SHIMAMUNE & ONO (1983).

A Fig.2-32 mostra um gráfico obtido de forma semelhante ao anterior, para retificação plana.

Fig.2-32 Variação das componentes da força de retificação em relação as condições dressagem em retificação plana, SHIMAMUNE & ONO (1983).

O acentuado crescimento das componentes da força de retificação para curva de $f_d=0.1$ mm/rev, deve-se a queima. A queima e a liberação de grãos são eventos que estabelecem o fim da vida do rebolo. Observa-se também que o valor das forças iniciais de retificação são proporcionais ao grau de recobrimento da dressagem.

A Fig.2-33 apresenta gráficos obtidos em retificação cilíndrica, que mostra um desgaste do tipo dúctil, onde o fim da vida é determinado por vibração chatter.

Fig.2-33 Vida do rebolo com desgaste predominantemente dúctil, limitada por chatter, SHIMAMUNE & ONO (1983).

Este gráficos refletem um resultado típico de desgaste por perda de agressividade, onde a força de retificação aumenta gradualmente com o aumento desgaste por atrito. Este comportamento deve-se a uma retificação leve em relação a agressividade do rebolo.

Este tipo de desgaste aumenta a superfície de contato entre os grãos abrasivos e a peça obra. Como se pode observar no gráfico força x tempo as componentes da força crescem gradualmente até o momento em que decrescem acentuadamente aos 23,5 min. Neste momento ocorre o desgaste volumétrico com a liberação de grãos, este é o fim da vida do rebolo.

No instante anterior a liberação de grãos ocorrem marcas de chatter na superfície da peça e aumento da vibração da peça. O desgaste radial ΔR apresenta um crescimento linear até alcançar o fim da vida, quando passa a crescer rapidamente.

A rugosidade da superfície retificada é grande no início devido a influencia da dressagem, mas diminui com o andamento do processo, sendo menor no final do que no início.

A Fig.2-34 mostra gráficos obtidos experimentalmente, durante o processo retificação cilíndrica, onde observa-se o desgaste volumétrico, causado pela liberação de grãos abrasivos, neste caso os parâmetros de retificação são pesados em relação as condições de dressagem.

Fig.2-34 Vida do rebolo com desgaste predominante frágil, SHIMAMUNE & ONO (1983).

Pode-se observar que a rugosidade é menor no início devido ao efeito da dressagem, mas aumenta com a liberação dos grãos. Enquanto que a vibração aumenta no momento da liberação para diminuir em seguida.

A Fig.2-35 mostra a densidade da distribuição das arestas cortantes na superfície do rebolo, para o caso da figura anterior, indicando que as arestas geradas pela dressagem, quando o desgaste radial $\Delta R = 0$, desaparecem devido a desgaste radial de 6 μm, uma vez que a maior densidade de arestas geradas na dressagem possui altura de 5 μm.

Fig.2-35 Alteração da densidade da distribuição das arestas devido ao desgaste radial, SHIMAMUNE & ONO (1983).

A Fig.2-36 apresenta gráficos obtidos em retificação cilíndrica externa, onde a vida do rebolo é plotada contra a velocidade da peça, para três condições de dressagem. A figura indica que a vida do rebolo é reduzida quase que na proporção inversa do crescimento da velocidade da peça.

Fig.2-36 Gráfico obtido em retificação cilíndrica externa da variação da vida do rebolo em relação a velocidade da peça, SHIMAMUNE & ONO (1983).

A Fig.2-37 mostra um gráfico obtido em retificação cilíndrica, da vida do rebolo em relação a força de corte inicial, sendo f_{i0} a força após a dressagem e $f_{i\infty}$ a força no equilíbrio.

Fig.2-37 Gráfico da vida do rebolo em relação a força de retificação inicial, SHIMAMUNE & ONO (1983).

A Fig.2-38 mostra um gráfico da vida do rebolo contra o grau de recobrimento da dressagem, sendo as linhas cheias referentes a termino da vida devido a queima e as linhas tracejadas devido a chatter.

Fig.2-38 Gráfico da vida do rebolo em relação ao grau de recobrimento da dressagem, SHIMAMUNE & ONO (1983).

Nota-se que a vida do rebolo é inversamente proporcional ao grau de recobrimento e que o tipo de termino da vida, queima ou chatter, depende da profundidade de corte t e da velocidade da peça v , ou seja a queima ocorre quando t é grande e v é pequeno e muda facilmente para chatter quando t é pequeno e v grande.

Os resultados obtidos mostram que o monitoramento do desgaste do rebolo, por meios cuja implementação é relativamente simples, é viável, pois, a força tangencial apresentada nos gráficos foi medida a partir da corrente de alimentação do motor do rebolo. A vibração da peça, medida simultaneamente, também foi mostrada. Pode-se observar nas figuras 2-37 e 2-38 que o comportamento das grandezas monitoradas no

fim da vida do rebolo definem o tipo de desgaste. Esta informação permite a seleção de outro rebolo, caso a duração da vida do primeiro, em relação às condições de retificação e dressagem esteja muito curta.

A Fig.2-39 mostra uma classificação geral dos tipos de desgaste, suas consequências e causas, abordados aqui, neste estudo.

	Consequencia do tipo de desgaste	Causa
<p>fratura da liga</p>	<ul style="list-style-type: none"> - perda de perfil - desgaste nas áreas duras da peça - aumento da rugosidade 	<ul style="list-style-type: none"> - rebolo mole - estrutura muito aberta - comprimento de contato é muito curto
<p>fratura do grão</p>	<ul style="list-style-type: none"> - perda de perfil - desgaste em áreas duras da peça - aumento da rugosidade 	<ul style="list-style-type: none"> - friabilidade do grão é muito alta - comprimento de contato é muito curto - estrutura é muito aberta - dressagem passo grande
<p>perda de agressividade</p>	<ul style="list-style-type: none"> - redução da rugosidade - tendência de chatter - aquecimento da peça 	<ul style="list-style-type: none"> - baixa friabilidade dos grãos - rebolo muito duro - comprimento de contato longo - estrutura muito fechada
<p>empastamento</p>	<ul style="list-style-type: none"> - deterioração da rugosidade - esfregamento metal/metal - vibração - intensa geração de calor 	<ul style="list-style-type: none"> - baixa friabilidade dos grãos - rebolo muito duro - comprimento de contato longo - estrutura muito fechada

Fig.2-39 Classificação dos tipos de desgaste do rebolo, suas consequências e causas, OLIVEIRA (1993).

A tabela mostrada acima apresenta aspectos práticos do processo que podem ser usados como indicadores do tipo de desgaste predominante em uma operação de retificação. Esta análise é de grande valia quando se tem como objetivo melhorar a especificação de uma ferramenta ou otimizar o desempenho de uma operação de retificação.

Tudo que foi visto trata do desgaste geral do rebolo, entretanto, geralmente o desgaste é irregular no perímetro, o que acarreta problemas adicionais, como o aumento da vibração.

2.3.3 Uniformidade do Desgaste

Geralmente a distribuição das massas em um rebolo não é uniforme devido às suas características construtivas. No caso de rebolo convencional, trata-se de um aglomerado prensado de ligante e grãos abrasivos; no caso de rebolos superabrasivos, uma fina camada de ligante e grãos superabrasivos é depositada sobre um corpo central leve, metálico ou de compósito.

Além disso um deslocamento entre o centro de gravidade e o eixo de rotação pode ser causado por uma montagem excêntrica da flange do rebolo no eixo árvore. Portanto, é necessário balancear o rebolo, estaticamente e dinamicamente, antes que se comece a produção de peças.

Um rebolo desbalanceado gera uma força dinâmica que induz um relativo movimento vibratório entre a peça e o rebolo. Esta vibração causa marcas “chatter” na superfície retificada. Portanto um balanceamento preciso do rebolo é necessário para produzir superfícies com boa qualidade, OZAWA, YUI & MITSUI (1990).

Contudo, mesmo depois de um balanceamento inicial preciso, há um desgaste irregular dos grãos pela força de retificação, devido à sua distribuição aleatória. Esta irregularidade não permite que o desgaste seja uniforme ao longo do perímetro do rebolo. Logo, um desgaste acentuado também pode causar desbalanceamento, este fato é mais crítico quando há desgaste frágil com o desprendimento de pequenas porções da camada abrasiva.

O empastamento que pode ocorrer tanto no regime de desgaste dúctil como no frágil, também é irregular ao longo do perímetro, pois, trata-se do preenchimento pelo cavaco do espaço entre grãos, o que depende da distribuição dos mesmos.

3 Sistemas de Avaliação da Topografia de Rebolos em Processo

O primeiro sistema de mapeamento da superfície do rebolo em processo, foi proposto por OLIVEIRA(1992), visando quantificar o desgaste dos grãos abrasivos e a uniformidade do processo de retificação.

Um segundo sistema foi proposto por KLEIN (1994), este sistema também utiliza um sensor ótico para adquirir a informação, como o primeiro. Porém o tipo de luz utilizada e a lógica da aquisição são diferentes.

Neste item é apresentado o desenvolvimento da proposta de cada um dos dois primeiros sistemas, assim como os resultados e conclusões obtidos com os experimentos realizados.

3.1 Medição do Estado de Afiação de Rebolos pela Dispersão da Luz

Refletida

Este sistema, proposto por OLIVEIRA(1992), baseia-se na utilização de um feixe laser emitido na direção da superfície do rebolo e cuja reflexão é projetada em um sensor multipixel do tipo PCD (Plasma Coupled Device) com 128 pixels, controlado por um microcomputador.

A dispersão da luz refletida é inversamente proporcional à área de topo e à densidade de grãos abrasivos na superfície do rebolo. Estes parâmetros estão diretamente relacionados com o desgaste do rebolo.

Assim o sensor PCD é capaz de avaliar o grau de dispersão da luz refletida que está diretamente relacionada com o grau de afiação do rebolo. Por exemplo : através do desvio padrão da intensidade de luz incidente no sensor.

Além do desgaste do rebolo, outras grandezas do processo podem ser calculadas a partir da intensidade de luz percebida pelo sensor PCD, como por exemplo: a regularidade da topografia do rebolo e variação do diâmetro do rebolo.

3.1.1 Concepção Básica do Sistema

Fig.3- 1 Concepção geral do sistema, OLIVEIRA (1992).

A Fig.3- 1 apresenta a concepção geral do sistema, onde pode-se observar os elementos principais: emissor de raio laser, sensor ótico e sua placa de acionamento, placa A/D, placa de interface entre o controlador do PCD e o microcomputador e microcomputador.

Uma vez, que este sistema fornece um sinal proporcional a intensidade da luz refletida, incidente sobre o sensor, pode-se supor que o maior valor do sinal, ocorre quando a superfície do rebolo estiver completamente espelhada. Enquanto que na condição de agressividade máxima, ou seja rebolo recém dressado com os parâmetros adequados, a resposta do sistema é mínima, pois o grau de dispersão é máximo.

Portanto, o sinal gerado por este sistema é proporcional a uma composição dos efeitos da densidade dos grãos ativos com a área média de desgaste, que são parâmetros diretamente relacionados ao nível de desgaste do rebolo.

Na construção do sistema utilizou-se uma fonte de luz colimada (Laser He-Ne), uma placa com fotodiodos (PCD – Plasma Coupled Device), um circuito de interfaceamento, do qual faz parte uma interface A/D (Analógica/ Digital) e um microcomputador onde é executado um software.

O sensor é posicionado de forma a interceptar o feixe de luz refletido pela superfície do rebolo. A intensidade de luz percebida por cada pixel do sensor, é adquirida pelo microcomputador, com estes dados pode-se calcular os parâmetros para avaliação da agressividade.

Utilizou-se um sensor ótico em estado sólido, fabricado pela empresa japonesa HAMAMATSU PHOTONICS K. K., modelo PCD LINEAR IMAGE SENSOR S2301-128Q, que possui 128 fotodiodos dispostos em linha. As dimensões de cada fotodiodo são : 36 μ m de largura por 2500 μ m de altura e distância entre elementos de 14 μ m.

A faixa de fotodiodos está encapsulada em uma pastilha cerâmica que dispõe de uma janela de quartzo sobre a área sensível, vide Fig.3- 2.

Fig.3- 2 A pastilha PCD S2301-128Q, OLIVEIRA (1992).

Esta pastilha contém os circuitos necessários para realizar a varredura sequencial dos fotodiodos. Assim, após receber um sinal para iniciar a varredura, a carga armazenada em cada fotodiodo é enviada ao pino de saída de vídeo.

A frequência da varredura sequencial é definida por um sinal de clock de 3 fases. Logo, o sinal de saída de cada fotodiodo é proporcional ao produto da intensidade da luz incidente pelo período de repetição de varredura.

Uma placa de acionamento, fabricada pelo mesmo fabricante do sensor, modelo PCD DRIVER/ AMPLIFIER C2325-22S é utilizada para fornecer os sinais necessários ao funcionamento do sensor. Esta placa recebe como entradas um sinal de clock de até

250 kHz e um pulso de início de varredura e fornece as seguintes saídas : sinal de conversão para placas A/D (trigger), sinal de fim de varredura (B-EOS), sinal de vídeo para ajustes (vídeo monitor) e sinal de vídeo para utilização normal (vídeo data).

A placa de acionamento utiliza o sinal de clock fornecido por uma fonte externa como base para se derivar a temporização do sensor. O ciclo de varredura inicia quando a placa de acionamento recebe um pulso positivo que é sinal de início (start).

É então disparada uma sequência de três varreduras seguidas, sendo que o intervalo entre elas é igual a largura do pulso de aquisição. Em cada varredura o seguinte procedimento é executado : seleciona-se o primeiro fotodiodo, seu sinal é então conectado ao pino de saída, ficando disponível para amostragem. Repete-se este procedimento até que os 128 pixels tenham sido percorridos, um sinal de fim de varredura é emitido ao final da leitura do último pixel.

O tempo de varredura de cada fotodiodo é igual a 4 vezes o período do sinal do relógio. A Fig.3- 3 mostra o diagrama de temporização do sistema.

Fig.3- 3 Diagrama de temporização do sistema, OLIVEIRA (1992).

A placa de interface utilizada entre o microcomputador e a placa de acionamento, foi elaborada no LAMAFE, fornece tensões de alimentação reguladas e o sinal de clock para a placa de acionamento.

Foi utilizada uma frequência de clock de 50 kHz, devido a limitações do hardware quanto ao tempo de processamento, armazenamento e apresentação da imagem no monitor. O sinal de início de varredura é emitido pelo microcomputador e

transmitido para o controlador através de um acoplamento ótico com a placa de interface.

O sinal é então adquirido pela placa A/D através de uma conexão direta com um pino da placa de acionamento.

Desenvolveram-se dois softwares no laboratório, um para fazer a leitura do sensor e preparar os dados para análise. Este software de leitura e apresentação, controla a programação da placa A/D, o armazenamento dos dados e a apresentação gráfica. O segundo faz a análise estatística dos resultados.

software de apresentação possui 4 modos de operação :

- Leitura contínua – apresenta um gráfico da situação atual da superfície do rebolo, sendo continuamente atualizado.
- Leitura única com valores numéricos – apresenta o gráfico de uma varredura e os valores numéricos correspondentes a cada pixel do sensor, os dados de uma varredura são perdidos quando a tela é atualizada. A Fig.3- 4 mostra um exemplo de leitura neste modo.

Fig.3- 4 Exemplo de tela de leitura com valores numéricos, OLIVEIRA (1992).

- Média de 15 amostras – apresenta-se um gráfico similar ao anterior, mas construído com os valores médios de cada pixel, utilizando os dados obtidos com as últimas 15 amostras.
- Amostras com armazenamento de dados : apresenta gráficos de cada varredura levemente deslocados, sequencialmente, de forma a representar a topografia da

superfície do rebolo em 3D. Este modo permite que os dados sejam armazenados em disco. A Fig.3- 5 mostra a tela neste modo de leitura.

Fig.3- 5 Tela com exemplo de leitura com armazenamento dos dados, OLIVEIRA (1992).

A Fig.3- 6 mostra dois resultados típicos obtidos com este sistema, o gráfico do lado esquerdo foi obtido com o rebolo recém dressado e o outro com o mesmo rebolo já desgastado, após a usinagem de 2000 mm³ de aço ABNT 1045.

Fig.3- 6 O gráfico do lado esquerdo foi obtido com um rebolo recém dressado e o do lado direito com o mesmo rebolo já desgastado, OLIVEIRA (1992).

Pode-se observar nas figuras a significativa variação da dispersão da luz, esta dispersão pode ser avaliada através da utilização dos momentos de primeira ordem (desvio padrão) e de segunda ordem (variância), OLIVEIRA (1992).

Os parâmetros baseados na dispersão da luz que foram criados para calcular as características topográficas do rebolo são os seguintes : pixel médio (p_m), parâmetro de agressividade AG e AG normalizado, oscilação radial OS e grau de regularidade.

A utilização de parâmetros relacionados a dispersão da luz, apresenta a vantagem de não ser afetada pela intensidade da fonte luminosa.

Na medição da agressividade do rebolo pode-se utilizar também parâmetros baseados na intensidade de luz percebida pelo sensor. Apesar destes parâmetros serem influenciados pela intensidade da fonte de luz, eles apresentam uma boa sensibilidade as alterações do processo.

No próximo item são apresentados gráficos plotados em função dos parâmetros citados, cada parâmetro utilizado é então brevemente descrito.

3.1.2 Resultados e Discussão

Foram realizados experimentos com uma retificadora plana tangencial, marca Tripet, com acionamento hidráulico da mesa, mancais hidrodinâmicos nas guias e no eixo porta rebolo. Na mesa da retificadora foi montado um dinâmetro piezoelétrico de duas componentes para registro das forças de corte, a fonte de laser e o sensor fotosensível, com sua placa de acionamento estão localizados próximos ao rebolo, a direita. O setup pode ser observado na Fig.3- 7, a seguir.

Fig.3- 7 Setup montado em uma retificadora plana marca Tripet, OLIVEIRA (1992).

Inicialmente são executados procedimentos para alinhamento da feixe de laser, de forma a manter o centro do feixe refletido no centro de janela do PCD. A Fig.3- 8 apresenta a visualização do feixe e sua reflexão incidente no sensor PCD.

Fig.3- 8 Visualização da trajetória do feixe de laser, OLIVEIRA (1992).

Nos experimentos foram utilizados dois rebolos de óxido de alumínio com características diferentes, dois tipos de aço e diversas condições de dressagem e de usinagem. Este tipo de abrasivo é utilizado amplamente na indústria para retificação de aços. Um dos objetivos dos experimentos é observar a influência dos parâmetros de usinagem nos resultados obtidos. Nos dois experimentos finais da série realizada, foram medidas também as forças de corte.

Na Fig.3- 9 são apresentadas curvas que representam a distribuição de luz na superfície do sensor, estas curvas são similares as encontradas em todos os experimentos.

Fig.3- 9 Variação da distribuição da luz no PCD durante a usinagem, OLIVEIRA(1992).

Pode-se observar um crescimento nítido dos valores da intensidade dos pixels centrais, no decorrer da usinagem. Este resultado, que comprova a suposição de que a área “espelhada” do rebolo aumenta com o desgaste, foi testado fazendo a retificação de um corpo de prova de aço, com metade da largura de um rebolo recém dressado.

Quando a metade do rebolo ativa atingiu o fim de vida, realizou-se uma inspeção visual, utilizando molduras milimetradas e luz especial que realçaram os espelhos formados nos topos dos grãos desgastados, como se pode ver na Fig.3- 10.

Fig.3- 10 Rebolo preparado para análise visual e detalhe aumentado, onde se observa os “espelhos” do lado desgastado, OLIVEIRA (1992).

Os parâmetros propostos anteriormente para quantificar a dispersão da luz foram calculados, utilizando os dados obtidos nos experimentos. O gráfico apresentado na Fig.3- 11 foi plotado com os valores de AG em função do volume específico retificado.

Fig.3- 11 Variação de AG ao longo da vida do rebolo, OLIVEIRA (1992)

O parâmetro AG representa o grau de dispersão da luz incidente no sensor e seu cálculo é semelhante ao do desvio padrão. Neste gráfico nota-se que no teste 5 houve uma grande variação de intensidade nos primeiros 60 mm³ / mm removidos.

Esta variação ocorreu devido à influência de dois fatores principais:

- Aderência de cavacos no rebolo, causando um escurecimento da superfície e aumentando a dispersão da luz,
- Depósito de resíduos nas placas de vidro que protegem o laser e o PCD.

A Fig.3- 12 mostra o comportamento do parâmetro AG normalizado na faixa útil, durante a vida do rebolo. A normalização de AG filtra as variações no nível médio de intensidade de cada pixel, devido a fatores externos ao processo, como variação na intensidade de luz da fonte ou cavacos aderidos no rebolo.

A normalização do valor da agressividade AG pode ser realizada dividindo o valor da intensidade de cada pixel pelo valor da intensidade máxima obtida, neste estudo concebeu-se uma forma conveniente de fazer a normalização dos dados, chamada determinação da faixa útil. A faixa útil é definida da seguinte forma:

- O valor de mínima intensidade entre os 128 pixels é determinado para cada leitura;
- O valor da intensidade de cada pixel é decrescido do valor mínimo;
- O valor de máxima intensidade é determinado a partir dos novos valores, em cada leitura;
- O valor da intensidade de cada pixel é dividido pelo valor obtido subtraindo-se a intensidade mínima da máxima.

O gráfico a seguir mostra que influências tanto nas variações de intensidade como nas condições de usinagem não tem ação significativa neste parâmetro, que apresenta um comportamento único em relação ao volume removido.

Fig.3- 12 Comportamento de AG normalizado durante a vida do rebolo, OLIVEIRA(1992).

As forças de usinagem foram medidas durante o processo, em dois experimentos, os resultados mostraram um crescimento contínuo das mesmas, ao longo da vida do rebolo. A Fig.3- 13 mostra o crescimento da força tangencial.

Fig.3- 13 Força tangencial de retificação x AG , OLIVEIRA (1992).

Os gráficos de AG normalizado x força tangencial, plotados com os resultados obtidos nos experimentos mostram claramente a força tangencial é inversamente proporcional a AG normalizado, ou seja quando AG normalizado diminui com o

aumento da densidade de áreas de desgaste, a força aumenta. Este resultado está de acordo com a teoria de SHIMAMUNE & ONO(1983).

A Fig.3- 14 apresenta dois gráficos obtidos em dois experimentos com rebolos diferentes, sendo um de Ag normalizado x força tangencial e o outro de AG normalizado x força normal.

Fig.3- 14 Relações entre força tangencial/normal x AG normalizado, OLIVEIRA (1992).

Os parâmetros propostos para avaliar o comportamento da intensidade de luz incidente também foram utilizados, a Fig. 3.54 mostra o gráfico obtido a partir dos valores calculados para I128, I60 e I30.

Os valores destes parâmetros são calculados pelo somatório dos valores dos pixels, I128 é a somatório da intensidade dos 128 pixels do sensor, I60 é o somatório da

intensidade dos 60 pixels adjacentes ao pixel médio e I30 é o somatório da intensidade dos 30 pixels adjacentes ao pixel médio.

O parâmetro definido como pixel médio pode ser associado à posição da superfície média do rebolo. Pois sua equação determina a posição do pixel que recebe a intensidade média de luz, durante uma leitura.

Pode-se observar na Fig.3- 15 um crescimento contínuo das curvas ao longo das passadas do rebolo na peça.

Fig.3- 15 Variação da intensidade luminosa durante a vida do rebolo, OLIVEIRA(1992)

O gráfico da Fig.3- 16 mostra a correlação da força com a intensidade luminosa, a dispersão observada provavelmente origina-se na dispersão da medição das forças devido ao aquecimento do corpo de prova na retificação a seco.

Fig.3- 16 Relação entre força e intensidade luminosa, OLIVEIRA (1992).

Os números de conversão são valores atribuídos pela interface A/D para quantificar os níveis da intensidade luminosa percebida pelos pixels.

3.1.3 Conclusões

Um sistema ótico baseado na medição, em processo, da dispersão da luz refletida pela superfície do rebolo, durante o período em que é atingida por um feixe de laser, foi proposto e desenvolvido. O princípio de funcionamento deste sistema baseia-se em sistemas desenvolvidos no campo da medição de textura superficial.

Este sistema utiliza o princípio da medição do grau de dispersão da luz para avaliar o estado da superfície do rebolo. Uma vez que, o grau de dispersão é inversamente proporcional ao nível do desgaste do rebolo.

O sistema desenvolvido obteve bons resultados, em experimentos de retificação a seco, demonstrando que é capaz de avaliar, de forma direta, em processo, o aumento da área de desgaste e da densidade de grãos abrasivos na superfície do rebolo.

Os parâmetros concebidos para otimizar a leitura, calculados por equações estatísticas eliminam ruídos da medição e tornam o processo de medição mais confiável. O parâmetro AG, normalizado por uma faixa útil, definida pelos valores máximo e mínimo de uma varredura, mostrou uma boa correlação com as forças de corte.

3.2 Sistema para Avaliação da Topografia de Rebolos em Tempo Real.

KLEIN(1994) propôs e desenvolveu um sistema de mapeamento do rebolo em processo que utiliza a medição da intensidade de luz refletida na superfície do rebolo para avaliar seu estado. A proposta deste sistema é fornecer além de informações a respeito do estado geral da superfície do rebolo, a avaliação das áreas desgastadas dos grãos, suas localizações e as quantificações aproximadas destes desgastes.

O sistema proposto por KLEIN (1994) teve como base a pesquisa feita por Sata et al (1972) que fazia a medição das áreas planas do desgaste dos grãos abrasivos, inclusive em processo. Este sistema usa um sensor fotoelétrico para detecção de pulsos de luz refletidos pelas áreas planas dos grãos, como mostra a Fig.3- 17.

Fig.3- 17 Esquema do setup para medição de áreas planas usando um sensor fotoelétrico, SATA et al (1972).

Porém, devido a baixa velocidade de resposta deste sistema, normalmente os resultados mais confiáveis são obtidos na medição pós-processo, com o rebolo rodando lentamente.

Similarmente, o sistema de KLEIN (1994) utiliza uma fonte que emite um feixe de luz contra a superfície do rebolo, de forma que o ângulo de incidência seja igual ao de reflexão. Assim, posicionando o sensor fotossensível com a mesma inclinação apenas a luz refletida, proveniente da fonte do sistema, será captada.

Este objetivo foi atingido encapsulando um sensor fotoelétrico e deixando como entrada de luz um furo de 5mm de comprimento e 0,6 mm de diâmetro, cujo eixo está orientado com a direção média dos raios refletidos pela superfície do rebolo.

A Fig.3- 18 mostra como é realizada a captação pelo sensor, da luz emitida por uma pequena lâmpada tipo “pingo – d’água “. Observa-se que somente as radiações paralelas ao eixo do furo do encapsulamento do sensor, cujas distâncias ao eixo não superem o valor do raio, serão captadas.

Fig.3- 18 Esquema de operação da emissão/captação da luz incidente sobre a superfície do rebolo, KLEIN (1994).

A sincronização da aquisição de dados com a rotação do rebolo através de um gatilho, estabelece um ponto de referência que é utilizado na análise dos resultados, para localizar as posições das regiões da superfície do rebolo mais ou menos solicitadas.

3.2.1 Concepção Geral do Sistema

A Fig.3- 19 mostra um esquema da concepção geral do sistema.

Fig.3- 19 Concepção geral do sistema, KLEIN (1994).

Pode-se observar na figura os módulos básicos do sistema, que são as seguintes:

- Circuito de sincronização: trata-se de um acoplador ótico, posicionado de forma que uma lamina fixada à polia do eixo árvore intercepte a chave ótica a cada rotação do rebolo, produzindo um pulso que é usado como gatilho para sincronizar a aquisição de dados,
- Dispositivo de deslocamento do sensor: sistema construído para deslocar o sensor sobre a superfície do rebolo, paralelamente ao eixo do mesmo. Este sistema tem a capacidade de controlar a posição e a velocidade do deslocamento,
- Sensor : transdutor óptico / eletrônico que capta radiações luminosas,
- Condicionador de sinais : modulo que possui 3 estágios, inicialmente amplifica o sinal do sensor com ganho unitário, em seguida filtra o sinal cujo nível médio está abaixo de um limite mínimo, considerado como “ruído de fundo”. O último estágio amplifica o sinal remanescente, com ganho ajustável através de um potenciômetro,

- Circuito de Interface : este modulo desempenha as seguintes funções: protege a porta paralela impedindo que sinais externos com valores incompatíveis com sua capacidade de operação a atinjam; conversão analógica / digital do tipo instantâneo (“flash”); circuito de gatilhamento que transforma o pulso de formato irregular em retangular e filtra os sinais espúrios; indicação do fluxo de operação através de leds e circuito de conexão com a porta paralela, padrão centronics,
- Microcomputador Pc : utilizado para controle da aquisição, processamento, apresentação e análise dos dados.

A Fig.3- 20 mostra o processo de aquisição, onde se observa a construção do vetor, cujos valores representam a posição das áreas planas de desgaste, através da detecção dos feixes de luz refletidos em cada rotação do rebolo.

Fig.3- 20 Metodologia para o mapeamento da área plana de desgaste do grão abrasivo, OLIVEIRA, COELHO & KLEIN (1994).

O tamanho de cada área plana pode ser estimado pelo número de amostras detectadas por grão multiplicado pela distância entre duas amostras. A composição dos vetores adquiridos em cada rotação, lado a lado, forma a matriz correspondente a reflexão luminosa da superfície do rebolo.

A resolução do sistema é determinada pelos seguintes parâmetros: diâmetro do furo do encapsulamento do sensor, taxa de amostragem velocidade de avanço transversal do sensor. A distância entre duas amostras na direção perimetral δ pode ser calculado pela seguinte equação:

$$\partial \equiv \left(\frac{V_s}{S_r} \right) * 10^{-3} [mm] \quad (1)$$

Onde: S_r = taxa de amostragem [1/s];

V_s = velocidade tangencial do rebolo [m/s]

A uniformidade da distribuição de grãos pode ser avaliada em duas direções, perimetral e axial. Presumindo que a imagem da superfície do rebolo é representada pela matriz $WF[i,j]$, onde as colunas j estão alinhadas com direção axial Y_{wf} e as linhas i com a direção perimetral X_{wf} .

Os valores são considerados nulos quando a reflexão não é detectada e unitários no caso da detecção completa da reflexão. A distribuição das áreas planas de desgaste na direção perimetral pode ser obtida através do seguinte procedimento. Um vetor que indica o nível de reflexão ao longo do perímetro é construído e cada valor $Y_{wf}[i]$ é o resultado da soma dos elementos da coluna i da matriz $WF[i,j]$, i.e. :

$$Y_{wf}[j] = \sum_{i=1}^m WF[i,j] \quad (2)$$

Onde: m = número de amostras na direção axial.

Este vetor pode ser plotado contra as linhas de índice j para mostrar o comportamento deste parâmetro ao longo do perímetro do rebolo. O programa deste sistema pode apresentar esta plotagem na tela em ambas direções axial e perimetral, vide Fig.3- 21.

O valor médio de Y_{wf} ao longo do perímetro do rebolo pode ser obtido pela seguinte equação:

$$\bar{Y}_{wf} = \frac{\sum_{j=1}^n Y_{wf}[j]}{n} \quad (3)$$

Onde o número de amostras na direção perimetral é calculado por:

$$n = \frac{\pi \cdot D_s \cdot S_r}{V_s} \quad (4)$$

Onde: D_s é o perímetro do rebolo em [m].

A porcentagem de áreas planas, P_{wf} pode ser calculada como segue:

$$P_{wf} = \frac{\bar{Y}_{wf}}{m} * 100 \quad [\%] \quad (5)$$

O desvio padrão S_{wf} das áreas planas de desgaste na direção perimetral pode ser calculado por:

$$S_{wf} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \left(Y_{wf}[j] - \bar{Y}_{wf} \right)^2}{n-1}} \quad (6)$$

Este valor mostra a uniformidade do processo de desgaste na superfície do rebolo. Uma boa distribuição de grãos ao longo da superfície do rebolo gera um valor mais constante de Y_{wf} , o que resulta em um baixo valor do desvio padrão S_{wf} .

No caso onde a distância entre os grãos é consideravelmente maior que a resolução do sistema, obtém-se um valor grande para S_{wf} mesmo para um fenômeno de desgaste bem distribuído. Neste caso deve-se calcular uma nova curva suavizada, utilizando média móvel ou outra técnica de filtragem. A partir dos valores da matriz $WF[i,j]$, outras técnicas de processamento de dados podem ser usadas para avaliar várias características da topografia do rebolo.

Vários programas foram desenvolvidos para dar suporte para o sistema de mapeamento, os principais são descritos a seguir.

Programa de manuseio de arquivos de imagens no padrão PCX – programa utilizado para converter fotografias digitalizadas, de setores do rebolo, em matrizes cujos termos são correspondentes aos valores de cinza (0 a 255) de cada um dos elementos da imagem (pixel) da fotografia digitalizada. Estas matrizes são utilizadas para simular e para checar os resultados obtidos com o sistema de mapeamento. O programa também pode reconverter a matriz para o padrão PCX.

Programa de controle da aquisição de dados – este programa controla a aquisição e permite a análise de dados armazenados. No modo de aquisição são exigidos 03 parâmetros para configuração inicial : deslocamento axial do sensor a cada amostragem, diâmetro do rebolo e rpm do rebolo.

Com estes dados o programa calcula os outros parâmetros relacionados e só inicia se os valores fornecidos forem compatíveis com as restrições internas, senão pede novos valores. Após a primeira aquisição todas as demais funções ficam disponíveis.

No modo de recuperação de dados, o arquivo recuperado é apresentado na tela com as imagens e gráficos correspondentes, como pode ser visto na Fig.3- 21. As demais funções do programa ficam disponíveis a partir deste momento.

Fig.3- 21 Tela principal do programa de controle, KLEIN (1994).

Pode-se observar na figura a superfície de corte do rebolo, representada pelas linhas horizontais, correspondentes a cada série da amostragem perimetral, no terço inferior da tela. A linha superior corresponde ao lado do rebolo mais próximo do operador.

Os gráficos situados respectivamente acima e à direita do gráfico da superfície, correspondem ao somatório dos valores de intensidade alinhados com o eixo do rebolo e transversalmente ao eixo, os valores utilizados em ambos os gráficos são normalizados em função do maior valor obtido no respectivo somatório.

Nesta tela são apresentadas também outras informações úteis e além disso o programa possui outros recursos, como por exemplo: seleção e identificação de áreas específicas da superfície do rebolo, alteração de escalas de gráficos e filtragem de valores usados na plotagem dos gráficos.

3.2.2 Resultados

Foi realizado um experimento inicial, utilizando um rebolo de granulometria média, que após dressado, teve apenas metade de sua largura de corte desgastada no processo de retificação. Selecionou-se, então alguns setores característicos da superfície de corte, como se observa na Fig.3- 22, que foram fotografados.

Fig.3- 22 Rebolo com setores selecionados por reticulados, KLEIN (1994).

Estas fotografias foram ampliadas para servir de referência e o setor 2 foi escolhido para realização de outros testes, por apresentar um desgaste bastante característico. Esta fotografia foi digitalizada com uma resolução de 200 dpi e 256 níveis de cinza, esta fotografia digitalizada foi convertida então para preto e branco, utilizando uma taxa de corte de 20% em relação ao valor do branco total (255). A Fig.3- 23 mostra a foto digitalizada e a imagem em preto e branco.

Fig.3- 23 Foto digitalizada, à esquerda e imagem em preto e branco, à direita, KLEIN (1994).

Observa-se, que o maior contraste da imagem em preto e branco permite delinear com mais nitidez as áreas de desgaste. Foram então captadas imagens do setor 2 do rebolo, analisado anteriormente, com o rebolo girando em duas rotações diferentes. A Fig.3- 24 mostra imagens captadas pelo sistema em velocidade reduzida, com as cores invertidas e dois níveis de sensibilidade.

Fig.3- 24 Imagens do setor 2 obtidas pelo sistema, com o rebolo em rotação reduzida, com maior sensibilidade à esquerda e menor à direita, KLEIN (1994).

A Fig.3- 25 mostra imagens obtidas com o rebolo girando em rotação de regime, 2750 rpm correspondente a uma velocidade tangencial de 28 m/s, o setor 2 está indicado para que se possa avaliar visualmente o resultado inicial do sistema proposto.

Fig.3- 25 Imagens obtidas pelo sistema proposto com o rebolo a 2750 rpm, KLEIN (1994).

O programa de manuseio de arquivo de imagens foi então utilizado para simular os resultados previstos do sistema. Com os seguintes objetivos: definir meios para validação dos resultados obtidos pelo sistema e estabelecer valores adequados para os parâmetros de configuração do sistema e de processamento das imagens.

A simulação foi realizada deslocando-se um círculo de raio variável, cujo diâmetro simula o do orifício do sensor, sobre a matriz fornecida pelo programa, correspondente a uma fotografia digitalizada de um setor selecionado da superfície do rebolo. Este círculo desloca-se pela matriz em passos ordenados, iguais ao seu diâmetro, percorrendo totalmente as duas dimensões da matriz.

Uma nova matriz é gerada com os termos provenientes da totalização dos valores dos termos, da matriz original, abrangidos pelo círculo em cada posição. Este procedimento simula a varredura do sensor sobre a superfície do rebolo.

A fotografia digitalizada do setor 2 foi processada pelo programa, variando-se o tamanho dos passos de varredura e uma das sequências de imagens obtidas são apresentadas na Fig.3- 26.

Fig.3- 26 Simulação da varredura do sensor com passo de 0,28 mm, KLEIN (1994).

A sequência mostrada na figura representam as imagens obtidas nos estágios de processamento a partir da fotografia digitalizada do setor 2 (a), com 256 níveis de cinza e resolução menor (b), com 4 níveis de cinza (c), apenas preto e branco (d) e (e). As imagens em branco e preto podem ser utilizadas para comparação com as imagens obtidas com o sistema de mapeamento. Observa-se que a imagem do item (d) é bastante similar aquela mostrada na Fig.3- 24.

O sistema foi então avaliado em um processo de retificação plana a seco. Inicialmente foram realizados alguns experimentos para determinar os valores adequados de ajuste do sistema para otimizar o detalhamento da imagem captada.

Uma vez configurado o sistema, realizou-se um experimento com retificação plana, utilizando um rebolo 38A 46 LVS, rotação 2750 rpm e corpo de prova ABNT 4341.

O resultado final obtido neste experimento é mostrado na Fig.3- 27. Esta figura mostra as 5 últimas imagens obtidas pelo sistema, uma vez que, as primeiras imagens estavam totalmente negras por se tratar de imagens de um rebolo recém-dressado.

Fig.3- 27 Experimento de retificação com medição intermitente, KLEIN (1994).

Apenas metade da largura do rebolo foi utilizada na retificação, o que pode ser observado nas imagens, pois metade de largura permanece negra até o fim da vida do rebolo. As imagens mostram a claramente a evolução do desgaste dos grãos.

A imagem ou a matriz, gerada pelo mapeamento do rebolo ao longo do processo é composta por vetores adquiridos em mais de uma revolução, logo, é necessário avaliar a repetibilidade do sincronismo do sistema. A Fig.3- 28 mostra as imagens, de um setor selecionado do rebolo, obtidas em dois momentos, na primeira revolução do rebolo, à esquerda e ao término do processo, à direita.

Fig.3- 28 Experimento de verificação da repetibilidade posicional, KLEIN (1994).

Observa-se que as imagens são bastante similares, havendo apenas algumas pequenas distorções com deslocamentos da ordem de um reticulado, estas distorções são aceitáveis para o sistema e sua correção implicaria em maior complexidade de hardware e software. Portanto, decidiu-se manter apenas um gatilho para sincronizar a aquisição.

A repetibilidade quanto à variação do sinal devido a distância do sensor até a superfície do rebolo também foi testada. As imagens, de um setor selecionado, obtidas no início e no fim do experimento, apresentaram apenas pequenas diferenças nos contornos das áreas desgastadas, da ordem de um reticulado para uma variação de 0,5 V no sinal, ou seja 10% do sinal. Conclui-se que o sistema também possui boa repetibilidade em função da variação do sinal.

Utilizou-se então o sistema para avaliar a evolução do desgaste dos grãos da superfície do rebolo, analisando as imagens resultantes de duas maneiras, local e global. A análise local focaliza o desgaste dos grãos e a análise global focaliza a distribuição do desgaste ao longo da superfície do rebolo. Neste experimento, o banco de ensaios foi acrescido de um dinamômetro piezoelétrico de duas componentes e de um ploter HP.

A partir dos dados armazenados do experimento, selecionou-se uma matriz parcial contida na matriz completa da superfície do rebolo, correspondente a uma área de $30 \times 12 \text{ mm}^2$. A Fig.3- 29 mostra uma composição espacial destes dados, que permite uma melhor visualização da evolução do desgaste.

Um dos ciclos é aquele que gerou as imagens da Fig.3- 26 e no outro utilizou-se o mesmo rebolo, que foi propositadamente descentralizado em $4\mu\text{m}$ na direção transversal ao eixo.

Fig.3- 30 Distribuição dos níveis de reflexão relativos amaciado, KLEIN (1994).

Estas imagens mostram claramente a diferença entre um processo de retificação normal e outro com anomalias. Calculou-se então o desvio padrão de cada um dos conjuntos de dados. O desvio padrão foi escolhido como parâmetro de análise por representar o distanciamento dos valores em relação ao comportamento médio, destacando a ocorrência de anomalias no processo. A Fig.3- 31 mostra um gráfico composto pelos resultados obtidos.

Fig.3- 31 Comparação de níveis relativos de reflexão, KLEIN (1994).

Pode-se observar na figura a grande diferença do volume retificado, ou seja, uma pequena descentralização do rebolo causou uma diminuição de aproximadamente 40% na vida do rebolo.

A Fig.3- 32 mostra as frequências percentuais dos níveis 0, 1, 2 e 3 de reflexão, obtidas no experimento onde foram medidas as forças normais de retificação até a ocorrência de queima superficial do corpo de prova. Estas frequências são fornecidas pelo sistema de mapeamento.

Fig.3- 32 Variação dos valores de reflexão na vida do rebolo, KLEIN (1994).

Como se observa nesta figura as frequências de nível 3 crescem subitamente no final da vida do rebolo, indicando um aumento repentino das áreas planas de desgaste, representadas pelos pontos brancos. Correspondentemente as frequências de nível zero, que representam os grãos afiados, diminuem. Estes valores foram totalizados e

contrapostos ao das forças normais, medidas nos experimentos, como pode ser visto na Fig.3- 33.

Fig.3- 33 Gráfico dos índices de desgaste x forças normais, KLEIN (1994).

Este gráfico mostra uma boa correlação entre as duas variáveis, concordando com as hipóteses já discutidas a respeito do crescimento das forças de retificação com o desgaste dos grãos e confirmando o resultado obtido pelo sistema de mapeamento do rebolo.

3.2.3 Conclusões

Um sistema ótico baseado na medição, em processo, da reflexão da luz refletida pela superfície do rebolo, durante o período em que é iluminado por um feixe de luz colimada, foi proposto e desenvolvido. O princípio de funcionamento deste sistema baseia-se em sistemas desenvolvidos no campo da medição de textura superficial e no sistema desenvolvido por OLIVEIRA (1992).

Este sistema utiliza o princípio da medição do grau de reflexão da luz para avaliar o estado da superfície do rebolo. Uma vez que, o grau de reflexão é proporcional ao nível do desgaste do rebolo.

O sistema desenvolvido obteve bons resultados, em experimentos de retificação a seco, demonstrando que é capaz de avaliar, de forma direta, em processo, o aumento da área de desgaste e da densidade de grãos abrasivos na superfície do rebolo.

Este sistema possui diversos recursos para processamento e apresentação dos dados, permitindo que se faça tanto análises qualitativas como quantitativas do nível de desgaste do rebolo. A análise de imagens geradas em momentos diferentes demonstraram que a repetibilidade de sincronismo e de variação do sinal é compatível com a resolução do sistema.

A comparação da evolução dos valores de desgaste, medidos pelo sistema, com a evolução dos valores da força normal de retificação mostrou que as duas variáveis tem o mesmo comportamento.

4 Desenvolvimento de um Sistema para Determinação em Processo do Regime de Desgaste de Rebolos

O desenvolvimento de um sistema de monitoramento, confiável e eficiente, envolve uma pesquisa metódica das características do processo que poderão ser correlacionadas com as grandezas utilizadas para monitorar as condições do desgaste do rebolo. Assim é preciso avaliar as diferentes formas em que o desgaste se apresenta, os meios que podem ser utilizados para detectá-lo e as ações corretivas necessárias para cada estado.

Pode-se relacionar, como exemplo, alguns sintomas do desgaste, com as grandezas que podem ser utilizadas:

- perda de agressividade, caracterizado pelo desgaste tipo dúctil, causa um aumento na vibração da peça e no consumo de potência,
- perda de perfil, caracterizado como desgaste frágil, pode causar um aumento no nível de vibração da máquina; a potência fica constante com algumas flutuações e o nível da EA é sensível a ocorrência de chatter,
- queima, a EA por sua grande sensibilidade a alterações no comportamento do processo, geralmente sofre maior dispersão, que pode ser confirmada checando outras grandezas, como a potência consumida que aumenta,
- empastamento, causa um aumento na vibração da peça e dispersão da EA, devido ao esfregamento metal/metal.

Cada tipo de sensor pode fornecer muitas informações. Um dos aspectos deste trabalho é investigar as relações entre o sinal medido e o fenômeno, considerando as modificações na sensibilidade de cada tipo de grandeza devido ao sistema aplicado, por exemplo: rebolos grandes e pesados possuem uma grande inércia de rotação retardando a resposta do sensor de potência, máquinas com mancais de rolamento produzem ruídos com frequências na faixa da EA e precisam ser filtrados, etc.

4.1 Proposta do Sistema DEAR e Princípios de Funcionamento

Um novo sistema de mapeamento do rebolo utiliza a EA como sinal para compor um gráfico 3D, que representa a distribuição da energia acústica 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 da aquisição.

O sensor de EA e o sensor de proximidade são robustos e resistem à detritos sólidos e líquidos, sendo adequados para o uso em ambientes industriais. Além disso, sua instalação é simples e rápida, dependendo do local escolhido para posicionamento, o sensor de EA pode ser fixado com parafuso, necessitando apenas de um furo com rosca. O sensor de proximidade deve ser posicionado próximo à flange do rebolo para detectar a passagem de um ressalto e pode ser fixado, por exemplo em um furo passante, vide Fig. 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 conecta-los ao monitor de EA e à placa de aquisição do computador.

A desvantagem da EA ser um meio indireto de sensoriamento está sendo superada pela utilização de software e hardware atuais, de alta performance, 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 da ordem de dois pontos por milímetro do perímetro do rebolo utilizado nestes experimentos. Isto é possível devido ao recurso de seleção do valor da constante de tempo para o cálculo do RMS do sinal de EA, disponível no equipamento da Sensis da ordem de microsegundos.

A representação numérica da imagem formada pelo gráfico 3D é uma matriz de valores da magnitude RMS do sinal de emissão acústica, adquirido durante a retificação. Devido à grande velocidade de aquisição utilizada, este 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.

4.2 Concepção básica

A Fig. 4- 1 mostra um esquema da concepção básica do sistema de mapeamento da distribuição de energia acústica de retificação (DEAR) .

Fig. 4- 1 Esquema da concepção básica do sistema DEAR.

Pode-se observar na figura os elementos que compõe o sistema, descritos a seguir:

- Sensor de EA: capta o sinal bruto de EA, proveniente do contato dressador/rebolo ou do contato peça/rebolo em outro tipo de medição,
- Monitor de EA: amplifica, filtra e calcula o nível RMS do sinal fornecido pelo sensor de EA, 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: 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. No sistema de mesa, é utilizado um microcomputador PC.

O levantamento de cada linha da imagem do sistema DEAR é reiniciado sequencialmente a cada rotação do rebolo, quando o microcomputador recebe o pulso de gatilho 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 digitalizados pela placa A/D.

Estes vetores são dispostos um ao lado do outro, sequencialmente, obedecendo a escala do tempo. O gráfico obtido é apresentado 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 seleccionados 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 Fig. 4-2 mostra uma ilustração do procedimento de construção do gráfico 3D, durante o processo de retificação.

Fig. 4- 2 Procedimento de construção do mapa do rebolo, no processo de retificação.

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. A resolução máxima é obtida quando se utiliza uma constante de tempo mínima, no equipamento utilizado a constante de tempo mínima é de 10 μ s.

Isto possibilita obter a resolução de 0,5 mm do perímetro de um rebolo de diâmetro 450 mm, girando a 1800 rpm. Neste caso a taxa de amostragem deve ser de 90.000 amostras/s para adquirir aproximadamente 2900 pontos por revolução. Estes valores

foram utilizados para os testes na retificadora do OPF, em outras máquinas testadas foram selecionados outros valores em função das diversas condições de trabalho utilizadas.

O referenciamento angular somente em um ponto apresenta repetibilidade compatível com a resolução do gráfico, como demonstrado por KLEIN (1994), e devido a simplicidade de sua instalação permite que o sistema seja portátil.

4.3 Programa do Sistema de Mapeamento da Distribuição de Energia Acústica na Retificação.

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

- 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 a falta de contato entre os grãos e o dressador,
- Mapeamento topográfico: realizando a dressagem com uma profundidade mínima, da ordem de $1\text{ }\mu\text{m}$, não há desgaste de grãos pois nesta região ocorre o contato elástico entre dressador/rebolo. A imagem produzida desta forma representa a superfície ativa do rebolo. A Fig. 4- 3 mostra um gráfico obtido com este procedimento.

Fig. 4- 3 Mapa da superfície ativa do rebolo, obtida a partir do sinal de EA detectado durante uma dressagem com profundidade de $1\text{ }\mu\text{m}$.

Nesta figura 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” foi esculpida para referência e a outra surgiu acidentalmente.

- Avaliação da atuação do rebolo na retificação: esta função foi desenvolvida no âmbito deste trabalho, cada vetor gerado pelo sistema de mapeamento, durante a retificação, é composto por pontos cujo valor corresponde ao nível RMS do sinal gerado por todos os grãos abrasivos, da largura de corte, que se encontram na mesma posição angular.

O painel deste programa é mostrado na Fig. 4- 4. 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.

Fig. 4- 4 Painel do programa de avaliação da uniformidade de atuação do rebolo.

A Fig. 4- 5 apresenta o diagrama do programa citado acima, dividido em blocos explicativos.

Fig. 4- 5 Diagrama do programa básico de programa de avaliação da uniformidade de atuação do reboło, dividido em blocos explicativos.

No bloco 1 são definidas as variáveis de controle da aquisição de dados: placa utilizada, canais, taxa de aquisição e número de amostras a ser adquirido.

No bloco 2 são definidas as variáveis necessárias para a configuração e o controle do trigger: canal utilizado, tipo de trigger(digital ou analógico), pré-trigger, tensão de referência que determina o “disparo”, tipo de rampa(crescente ou decrescente).

No bloco 3 localiza-se o ícone AI Read responsável pela leitura dos dados. No bloco 4 controla-se o limite de tempo para o início da aquisição, se este limite for ultrapassado o processo é interrompido.

No bloco 5 são plotados os dados adquiridos em dois gráficos: o primeiro(2D) mostra a intensidade do sinal de emissão acústica pelo tempo e no segundo(3D) é mostrado o comprimento do perímetro da superfície do reboło pela largura de corte do mesma, sendo a intensidade do sinal de emissão acústica é determinada pela escala de cores.

O bloco 6 mostra a estrutura responsável pela gravação e leitura dos dados adquiridos.

5 Aplicação do Sistema de Mapeamento da Distribuição de Energia Acústica de Retificação no Rebolo (DEAR) na Identificação do Regime de Desgaste

São realizados experimentos iniciais para verificar a consistência das imagens geradas pelo sistema, com os eventos que estão ocorrendo na superfície do rebolo, detectados por outros meios de monitoramento. Segue-se então, experimentos específicos onde se estabelece relações entre o tipo de desgaste previsto pelos padrões da imagem do mapa com outras grandezas cujo comportamento já é conhecido.

5.1 Experimentos iniciais com o Sistema DEAR

Os experimentos iniciais com o sistema de mapeamento, apresentaram bons resultados. A ordenada dos gráficos representa o número de pontos adquiridos ao longo do perímetro do rebolo a cada rotação completa e a abcissa o número de rotações amostradas, que é diretamente relacionado ao tempo decorrido durante a amostragem . Alguns gráficos também apresentam o sinal da potência consumida pelo motor do eixo árvore, como explicado anteriormente o programa utilizado possui grande flexibilidade para aumentar o número de sinais adquiridos.

Nestes gráficos o sinal da potência está sendo utilizado apenas como referência, porém o nível do sinal da potência pode ser utilizado como um parâmetro para destacar as regiões desgastadas do rebolo, A Fig. 5- 1 mostra um gráfico obtido durante uma retificação com condições pesadas de corte, onde houve redução da rotação do rebolo.

As curvas mostradas nos padrões da imagem são geradas pela seguinte razão: o gatilho de sincronização da aquisição só ocorre quando o ressalto da flange passa pelo sensor de proximidade e a taxa de aquisição é função do tempo, assim, uma redução da rotação do rebolo implica em atraso na aquisição de um determinado ponto. Ou seja, um ponto situado em uma região mais solicitada, representada por uma faixa clara, vai demorar mais para ser adquirido e vai aparecer em uma ordenada maior do gráfico. Este efeito é mais pronunciado à medida que o rebolo se afasta do ponto de sincronização, devido ao somatório dos atrasos.

A Fig. 5- 2 mostra os gráficos obtidos em um ciclo de retificação, onde não há variação da rotação do rebolo.

Fig. 5- 1 Gráfico obtido no processo de retificação de aço endurecido com rebolo Al_2O_3 macio, o padrão gráfico indica que houve redução da rotação do rebolo.

Fig. 5- 2 Gráficos obtidos no processo de retificação de aço endurecido com rebolo Al_2O_3 duro, sem variação de rotação do rebolo.

O gráfico mostrado na parte inferior de figura é da potência consumida, como se observa a potência se manteve estável durante o ciclo, confirmando o resultado mostrado pelo mapa do rebolo, pois, apesar da distribuição da energia não ser uniforme ao longo do perímetro do rebolo, as regiões mais solicitadas permanecem na mesma posição angular, sem alteração significativa da intensidade. Portanto, a potência consumida a cada rotação do rebolo é aproximadamente a mesma.

A Fig. 5- 3 mostra gráficos obtidos em vários ciclos de retificação, cada faixa corresponde a um ciclo.

Fig. 5- 3 Gráficos da retificação de aço endurecido com rebolo Al_2O_3 macio onde se observa a concentração e o deslocamento das regiões mais utilizadas a cada ciclo.

Observa-se nesta figura a mudança da posição angular das regiões mais solicitadas. Especialmente, de uma região localizada entre as ordenadas 900 e 1000, que se intensifica até o quarto ciclo, havendo uma migração a partir do quinto ciclo e uma nova estabilização entre as ordenadas 1250 e 1650. Estas regiões geram áreas de concentração de energia em determinadas posições angulares do perímetro do rebolo a cada volta, isto resulta em vibrações periódicas proporcionais à rotação do rebolo, cuja magnitude aumenta com a intensificação da solicitação.

A Fig. 5- 4 mostra um gráfico obtido durante a retificação de um corpo de prova de aço endurecido com rebolo de CBN, em um ciclo otimizado com avanço rápido no início. O início do gráfico, com linhas escuras indica a excentricidade da peça. As faixas horizontais mostram a manutenção dos grãos na mesma posição, uma vez que o padrão de distribuição da energia acústica não varia. O sinal de potência mostra boa correlação com o mapa, apresentando um crescimento no início que corresponde à região mais clara do mapa.

Fig. 5- 4 Gráfico obtido durante a retificação de uma peça de aço endurecido com rebolo de CBN.

A Fig. 5- 5 mostra um gráfico obtido na retificação de aço endurecido com rebolo Al_2O_3 macio. Este gráfico mostra um tipo de desgaste onde os grãos estão sendo liberados, ou seja o rebolo está perdendo diâmetro, uma vez que as regiões de concentração de energia não se estabilizam. Pode-se observar picos no gráfico da potência, que indicam que a cada aumento na energia de corte há uma liberação subsequente de grãos.

Fig. 5- 5 Gráfico obtido na retificação de aço endurecido com rebolo Al_2O_3 macio.

A Fig. 5- 6 mostra gráficos obtidos na dressagem de um rebolo desgastado. Observa-se nesta figura que foram necessários sete passes de dressagem para obter uma superfície uniforme do rebolo. No primeiro além da faixa escura central, correspondente a região desgastada pelo contato rebolo/peça, o contato rebolo/dressador ocorre apenas em parte do perímetro.

A partir do quarto passe começa a ocorrer o contato com todo o perímetro, mas o rebolo ainda apresenta duas regiões desgastadas. Somente no sétimo passe é obtida uma superfície ativa uniforme.

Este comportamento confirma uma das hipóteses iniciais desta pesquisa mostrando que o desgaste não é uniforme. Portanto o sinal de um sensor de vibração sintonizado na frequência de rotação do rebolo mostraria um nível crescente com a evolução do desgaste.

Fig. 5- 6 Gráficos da dressagem de um rebolo desgastado.

A Fig. 5- 7 mostra uma dressagem, onde foram necessários três passes para recuperar quase totalmente a superfície do rebolo.

Observa-se que neste caso o desgaste foi mais uniforme, pois há o contato do perímetro completo do rebolo/dressador desde o primeiro passe.

A Fig. 5- 8 mostra uma sequência de gráficos obtidos em ciclos de retificação subsequentes, com rebolo mole e peça de aço 1020 e condições de corte leves, onde se observa um pequeno crescimento no sinal de potência que corresponde ao aparecimento de pequenas regiões mais claras.

Fig. 5- 7 Gráfico que mostra três passes de dressagem.

Fig. 5- 8 Gráficos obtidos em ciclos de retificação subsequentes.

5.1.1 Experimentos para Desenvolvimento de uma Metodologia para Identificação do Tipo de Desgaste

Foram realizados experimentos em laboratório e também em chão de fábrica. O ambiente controlado do laboratório permite explorar detalhadamente todos os aspectos de um experimento e utilizar equipamentos especiais, que geralmente são encontrados apenas neste ambiente.

Como a proposta deste trabalho é desenvolver um sistema para ser utilizado na indústria, os resultados obtidos necessitam ser complementados com outros obtidos em experimentos realizados em chão de fábrica. Geralmente, no ambiente de chão de fábrica existem muitos tipos de interferência devido a quantidade de máquinas próximas e a rede elétrica existente é bastante ruidosa. Assim, é necessário testar a imunidade do sistema a estas perturbações, verificando a consistência dos resultados obtidos neste ambiente.

5.1.2 Setup utilizado em Experimentos no Laboratório

A máquina utilizada nos experimentos é uma retificadora CNC marca ZEMA modelo Z800, que possui guias e mancais hidrostáticos. As condições utilizadas foram : rebolo tipo AA80G6V, rotação do rebolo 1800 rpm, rotação da peça 150 rpm e fixação tipo ponto e contra-ponto.

O local mais adequado para instalação dos sensores de EA neste tipo de fixação é o contraponto, que foi especialmente modificado nesta máquina para acomodar vários sensores. A Fig. 5- 9 mostra a localização do sensor EA (emissão acústica) de aquisição e do sensor de proximidade, que fazem parte do setup destes experimentos e o sensor EA de controle.

O sensor EA de controle é utilizado como equipamento de segurança nesta máquina, para detectar colisão e na automatização de ciclos de usinagem detectando contato. Observa-se também na figura o cabo de conexão do sensor de proximidade, este sensor está parafusado em um furo da carenagem do cabeçote porta rebolo e conectado ao sistema de monitoramento por emissão acústica (DM42).

O DM42 é um monitor digital de processos fabricado pela empresa Sensis, que possui muitos recursos úteis na aquisição de sinais como: seleção de filtros de frequência, armazenagem e recuperação de parâmetros de configuração, quatro entradas

para sensores, saídas analógicas RMS e bruta, comparadores de nível de sinal entre outros parâmetros configuráveis.

O sensor EA de aquisição também está conectado ao DM42, os dois sinais são então enviados para placa de aquisição da National Instruments, cuja velocidade máxima é de $1,25 \times 10^6$ amostras/segundo. Esta placa está instalada em um microcomputador Pentium II e é controlada através do software Labview.

Fig. 5- 9 Localização de sensores instalados na retificadora CNC ZEMA.

Nos experimentos, também foi adquirido o sinal de potência consumida pelo eixo árvore, fornecido por um sensor do tipo Hall e o sinal de vibração fornecido por um acelerômetro instalado no contra-ponto. Este setup é utilizado para gerar todos os mapas DEAR, para gerar o mapa óptico a única modificação necessária é substituir o sensor de EA pelo sensor óptico, o sensor óptico será descrito com mais detalhes mais a frente dentro deste item.

5.1.3 Setup Portátil de Aquisição de Dados

As dificuldades encontradas para fazer medições em chão de fábrica podem dificultar ou até impossibilitar a realização das mesmas. Uma vez que, os equipamentos que compõe o setup devem dispor de recursos necessários para no mínimo adquirir, visualizar e armazenar os dados obtidos no experimento e normalmente, o espaço entre as máquinas é pequeno e as bancadas disponíveis para colocação de equipamentos são poucas e improvisadas.

Outro problema é a instalação de sensores dentro da carenagem, na área de trabalho da máquina, onde além do espaço reduzido, a temperatura é alta e durante a usinagem o refrigerante é espalhado, atingindo tudo que está dentro da carenagem. Além disso a rede de tensão geralmente não dispõe de tomadas aterradas.

Um requisito muito importante, por se tratar de um ambiente de produção onde as máquinas só podem parar por pouco tempo, é que a instalação seja rápida e não prejudique o andamento normal do processo.

O setup portátil formado pelo notebook Pentium III, software Labview 5.1, placa de aquisição da National Instruments de 1,25 Ms/s e DM42, funcionou muito bem, pois atende a todos os requisitos citados acima:

- recursos do setup – este notebook com placa de aquisição e rodando o Labview fornece uma grande variedade de recursos na aquisição dos dados, na visualização dos mesmos e na armazenagem. Permite também visualizar e armazenar vários tipos de processamento dos dados adquiridos. O DM42 também possui vários recursos, o que torna o gerenciamento deste setup bastante flexível.
- rede elétrica - o notebook é alimentado por bateria e não depende de aterramento, sua fonte é bivolt automática. A fonte do DM42 possui um subsistema de filtragem eficiente, também é bivolt e pode trabalhar sem aterramento, apesar que o ideal é dispor de aterramento.
- área de trabalho da máquina – os sensores de EA e de proximidade são pequenos e robustos o suficiente para serem instalados com facilidade e rapidez na área de trabalho e para resistir ao ambiente agressivo. A sua instalação não prejudica o andamento normal da produção.
- espaço entre as máquinas – o espaço ocupado pelo notebook e pelo DM42 é reduzido e podem ser acomodados facilmente em bancadas improvisadas. Como se pode observar na Fig. 5- 10, que mostra o setup portátil instalado em uma máquina de produção.

Fig. 5- 10 Setup portátil instalado em uma máquina de produção.

5.1.4 Sensor Óptico

O mapa óptico é obtido através da captação da luz refletida pela superfície do rebolo, esta reflexão é mais intensa nas áreas onde há concentração de grãos abrasivos que apresentam desgaste da área plana de topo “wear flats” ou partículas de metal incrustadas que funcionam como espelhos. Logo, a imagem gerada com este procedimento pode ser utilizada para localizar as áreas mais desgastadas da superfície do rebolo, assim como, para verificar a distribuição do desgaste ao longo da superfície.

Para gerar o mapa óptico foi construído um sistema semelhante ao desenvolvido por KLEIN(1994), porém foram utilizados somente os dois estágios iniciais do sistema original, os outros estágios foram substituídos do seguinte modo: no segundo estágio de amplificação utilizou-se um DM42 que fornece um sinal analógico que pode ser adquirido por placas de aquisição comerciais, instaladas em microcomputador PC.

Os dois estágios iniciais são o sensor e o pré-amplificador, o sensor utiliza um foto transistor TIL78 montado em um suporte, cuja única entrada de luz é um tubo com diâmetro interno de 0,5 mm, a direção do eixo do tubo é a mesma do eixo do suporte, cujo ângulo de inclinação é igual ao ângulo de inclinação do eixo do feixe de luz emitido pela fonte de luz, isto restringe a direção do feixe de luz captando somente aquele proveniente da reflexão da luz emitida pela fonte do sensor. A Fig. 5- 11 mostra o sensor óptico construído para os experimentos, conforme as informações de KLEIN(1994).

Fig. 5- 11 Sensor óptico construído de acordo com as informações de KLEIN(1994).

Pode-se observar na figura as orientações dos eixos do suporte do foto transistor e da fonte de luz. Para construir a fonte de luz é utilizado um soquete e uma lâmpada tipo “pingo d’agua”. No pré-amplificador foram utilizados componentes similares ao do projeto original, com pequenas adaptações para funcionar com o novo foto transistor.

A Fig. 5- 12 mostra a montagem do sensor óptico em frente do rebolo.

Fig. 5- 12 Montagem do sensor óptico na frente do rebolo.

Como se observa na figura este sensor foi montado na frente da superfície do rebolo utilizando uma base magnética, o procedimento para gerar o mapa óptico é movimentar

o rebolo no eixo Z, mantendo uma posição fixa no eixo X, sem refrigeração. A posição fixa do eixo X é aquela que estabelece uma distância entre o sensor e a superfície do rebolo onde o ganho do sinal é o maior possível.

5.2 Identificação dos Mecanismos de Desgaste

A identificação do tipo de mecanismo de desgaste do rebolo que está ocorrendo durante a retificação, é fundamental para diagnosticar o estado do processo e definir ações corretivas. Assim, para que este diagnóstico, baseado no mapa DEAR, seja confiável, é necessário conhecer a relação entre a imagem gerada pelo sistema e o tipo de mecanismo que ela representa.

Os eventos que ocorrem na superfície do rebolo podem ser relacionados com o tipo de desgaste predominante e as ações corretivas utilizam estratégias diferentes para cada um deles. A Tab.5- 1 mostra as relações entre fenômenos característicos do tipo de desgaste predominante com algumas indicações mensuráveis e a expectativa de comportamento do mapa DEAR.

Identificação de mecanismos de desgaste				
Tipo desgaste predominante	Fases	Fenômenos relacionados	Indicações	Características do mapa DEAR
Frágil	1	Liberação de grãos abrasivos Perda de perfil do rebolo	Potência consumida pelo eixo árvore constante Variação diametral do rebolo	Imagem instável, sem tendência definida
	2	Ondulações perimetrais Empastamento do rebolo Aumento da vibração	Oscilação da potência consumida Aumento do nível do sinal de vibração(suave)	Estabilização de padrões horizontais
Dúctil	1	Retenção de grãos abrasivos Aumento das áreas planas de desgaste no topo dos grãos	Aumento da potência consumida pelo eixo árvore e do nível do sinal de vibração Diâmetro do rebolo se mantém	Intensificação crescente dos padrões horizontais da imagem
	2	Empastamento do rebolo Queima da peça e/ou forte vibração	Aumento significativo da potência consumida pelo eixo árvore e do nível do sinal de vibração	Continua a intensificação crescente dos padrões horizontais

Tab.5- 1 Relacionamento de fenômenos característicos do tipo de desgaste predominante com indicações mensuráveis e com o mapa DEAR.

Pode-se observar nesta tabela que é possível relacionar a característica da imagem com a fase de evolução do desgaste de ambos os tipos: dúctil ou frágil. Esta relação pode ser estabelecida através do comportamento de parâmetros medidos simultaneamente com a geração do mapa, o sinal da potência consumida no eixo árvore e a vibração, ou após, medição do desgaste do perfil do rebolo.

A relação entre estes parâmetros e a evolução de cada tipo de desgaste foi definida a partir de informações obtidas com experimentos realizados por membros do OPF, com experimentos realizados pelo próprio autor, durante o curso de mestrado e de informações obtidas na literatura. Assim, os experimentos descritos a seguir estão classificados quanto ao tipo de mecanismo de desgaste. Neles, pretende-se provar experimentalmente as hipóteses formuladas na Tab.5- 1.

5.2.1 Desgaste do Tipo Frágil

O tipo predominante de desgaste é determinado pela combinação de três fatores principais que são: as condições de retificação, de dressagem e a especificação do rebolo. A seleção do tipo de desgaste mais adequado a uma determinada operação depende da tolerância requerida, pois, no desgaste do tipo frágil não há queima superficial da peça devido a auto afiação.

Esta característica é bastante utilizada em operações em que a tolerância de forma é mais aberta, ou seja, em operações onde o desprendimento de camadas da superfície abrasiva afeta principalmente a dimensão da peça. Neste caso o rebolo deve ser dressado antes que a variação dimensional supere a tolerância exigida.

5.2.1.1 Verificação Metrológica da Perda diametral do Rebolo

Nesta série de experimentos o objetivo foi quantificar o desgaste do perfil do rebolo, o procedimento utilizado foi o seguinte: Após a dressagem foram realizados 8 ciclos de mergulho em um eixo de aço SAE 1020 com profundidade de corte de 0,5 mm no ciclo inicial, 0,7 mm no terceiro a 1,0 mm nos demais, no diâmetro e baixa velocidade de avanço 0,1 mm/min. O rebolo utilizado foi um AA60GV.

Esta velocidade de avanço e este tipo de material foram escolhidos na tentativa que o rebolo apresentasse um desgaste predominante do tipo Dúctil. Após cada mergulho, o perfil do rebolo foi copiado em um eixo de aço SAE1020 e a altura do degrau formado pela parte desgastada do rebolo medida com um micrômetro. A Fig. 5- 13 mostra um esquema do procedimento de cópia de perfil do rebolo.

Fig. 5- 13 Esquema do procedimento de cópia de perfil do rebolo.

Os ciclos de retificação foram realizados até que o empastamento da superfície do rebolo se tornou bastante acentuado, porém, a medição da evolução da altura do degrau mostrou que houve um desgaste volumétrico excessivo da camada abrasiva, a Tab.5- 2 mostra uma tabela com os valores medidos da altura do degrau.

nro. Ciclo ret.	$\Phi_{\text{menor}}(\text{mm})$	$\Phi_{\text{maior}}(\text{mm})$	$\Phi_{\text{ma}} - \Phi_{\text{me}}$
1	25.182	25.19	8
2	24.81	24.817	7
4	24.592	24.604	12
5	24.459	24.47	11
7	24.1	24.115	15

Tab.5- 2 Valores medidos da altura do degrau.

A Fig. 5- 14 mostra o gráfico construído com os valores da tabela acima.

A reta que aparece no gráfico é uma reta de tendência calculada pelo método dos mínimos quadrados. Os valores obtidos nesta medição de desgaste volumétrico, são considerados elevados em relação a valores conhecidos de desgaste volumétrico em rebolos que apresentam desgaste do tipo “dúctil”.

Portanto, pode-se concluir que também está ocorrendo um desgaste do tipo “frágil”, ou seja, como o desgaste não é uniforme sobre todo perímetro, quando a força

de retificação que está atuando sobre áreas que são mais solicitadas, excede um determinado limite, há o desprendimento de uma pequena quantidade da camada abrasiva. Ao longo do processo este fenômeno causa um grande desgaste no perfil, neste caso, formando um degrau entre a faixa ativa e a faixa não utilizada, isso ocorre devido ao fato da dureza do rebolo utilizado ser muito baixa (dureza G).

Fig. 5- 14 Gráfico da evolução da altura do degrau.

O desprendimento de camadas causa uma reafiação que modifica a distribuição da força de retificação e consequentemente a da energia acústica. Logo, o comportamento do rebolo mostrado pelos mapas obtidos com o sistema DEAR, deve apresentar uma boa correlação com o resultado metrológico. A análise dos mapas DEAR deve ser feita pela observação das faixas horizontais obtidas. Caso as faixas se mantenham há indicação de não desprendimento dos grãos abrasivos . Caso as faixas horizontais se transformem há indicação de desprendimento de grãos e portanto de transformação topográfica.

5.2.1.2 Verificação do Mecanismo de Desgaste Frágil com o Mapa do Rebolo

A Fig. 5- 15 mostra mapas DEAR de oito ciclos consecutivos de retificação e seus correspondentes gráficos de potência, que indicam a ocorrência das duas fases do mecanismo de desgaste do tipo frágil. A ordenada do mapa DEAR representa o perímetro completo do rebolo e a abcissa, o intervalo de duração de cada ciclo. A ordenada do gráfico de potência representa o valor em volts proporcional ao nível da potência e abcissa é a mesma dos mapas DEAR.

Fig. 5- 15 Mapas DEAR de oito ciclos consecutivos de retificação e seus gráficos de potência correspondentes, que mostram as duas fases de um desgaste do tipo frágil, a fase 2, ou seja, o empastamento ocorre a partir do sétimo ciclo.

O tempo total decorrido durante os ciclos de retificação foi 36 minutos e a profundidade total de corte foi 7,2 mm no diâmetro. Observa-se na figura uma faixa horizontal larga e escura, que ocupa a região central do perímetro do rebolo, o tamanho desta faixa apresenta uma variação em cada ciclo, mas, está presente ao longo dos ciclos. Provavelmente, esta faixa indica níveis variáveis de desbalanceamento, durante os experimentos foi necessário parar o rebolo e como o balanceamento dinâmico, disponível nesta máquina, é feito com o enchimento de câmaras localizadas no flange do rebolo, através de controle manual e verificação visual de um indicador analógico, pequenas diferenças entre balanceamentos são comuns. As manchas acinzentadas nas bordas de alguns ciclos também é causada pelo mesmo problema de desbalanceamento. As linhas vermelhas mostram padrões que vão se modificando ao longo dos ciclos até atingir uma certa estabilidade a partir do sétimo ciclo. As variações que aparecem no

início de cada ciclo decorrem do contato inicial do rebolo com a peça feito com um sistema automático de detecção de contato.

Pode-se observar na figura, áreas mais claras que começam a crescer no mapa do segundo ciclo e aumentam no terceiro ciclo, estas áreas correspondem às áreas mais solicitadas na faixa ativa do rebolo, que contém os grãos mais desgastados. Estes grãos geram um alto nível de energia acústica, representado pela cor branca, correspondente ao alto nível da força atuante sobre os mesmos.

No mapa do quarto ciclo observa-se uma modificação acentuada na evolução das áreas claras, indicando uma redistribuição da energia acústica, após atingir um máximo no ciclo anterior. As cores mais claras deste mapa mostram uma distribuição mais homogênea da energia acústica, sobre a faixa ativa.

As três áreas citadas anteriormente estão apresentando cores mais escuras, provavelmente, houve uma reafiação das mesmas em consequência do desprendimento da camada desgastada. Porém, no quinto ciclo ocorre novamente uma concentração das áreas mais solicitadas em posições semelhantes às do terceiro ciclo, mas, abrangendo uma área maior. Esta concentração aumenta até o sexto ciclo, quando, ocorre uma alteração que indica que há um grande empastamento do rebolo, este evento mostra que o desgaste do tipo frágil passou para a fase 2.

O mapa dos ciclos sete e oito mostram características compatíveis com a suposição de que o desgaste frágil está em sua segunda fase, pois, o empastamento de metal na superfície do rebolo ajuda a segurar os grãos, mantendo o diâmetro do rebolo, esta retenção de grãos é indicada pela estabilização dos padrões, que pode ser verificada visualmente.

Os gráficos de potência mostram um comportamento que indicam a ocorrência destes eventos, o sinal mantém um nível médio em torno de 2 V até o final do quinto ciclo, quando há um aumento no nível que passa para 2,2 V até o final do sexto ciclo. Observa-se no sexto ciclo uma alteração forte, mas de curta duração, a partir do sétimo ciclo o sinal apresenta uma amplitude de variação muito grande, que se mantém até o final do oitavo, porém o nível médio continua em torno dos 2,2 V.

A Fig. 5- 16 apresenta um mapa DEAR do oitavo ciclo e o gráfico do sinal da potência consumida pelo eixo árvore, correspondente. A ordenada do mapa DEAR representa o perímetro completo do rebolo, os números correspondem ao número de pontos adquiridos em cada rotação do mesmo. A ordenada no gráfico da potência mostra o nível do sinal em (V) que é proporcional ao nível da potência. A abcissa nos

dois gráficos representa o tempo decorrido e a aquisição dos dois sinais é sincronizada, sendo que o valor indicado corresponde a 1 linha/segundo .

Fig. 5- 16 Mapa DEAR obtido com um rebolo empastado e o gráfico da potência consumida pelo eixo árvore, correspondente.

A imagem mostrada na Fig. 5- 16 indica um comportamento instável da superfície do rebolo, as faixas verticais claras indicam áreas onde a energia acústica está aumentando até que repentinamente diminui e a faixa se torna escura. Esta variação da energia indica que a força também está variando, alternando rapidamente entre o máximo e o mínimo. Este comportamento é confirmado pelo gráfico da potência consumida.

Comparando-se os eventos que ocorrem nos dois gráficos, no domínio do tempo, pode-se observar que os picos de máximo no gráfico da potência estão alinhados com faixas verticais de cor clara no mapa DEAR e os de mínimo estão alinhados com faixas verticais de cor escura. Sendo que a faixa vertical preta no mapa DEAR alinhada com a posição 180, representa um pequeno intervalo de tempo onde o nível de EA é praticamente nulo ao longo de todo o perímetro do rebolo, indicado. O vale que ocorre no sinal da potência consumida, alinhado com a mesma posição da abcissa, mostra que a força também é praticamente nula, confirmando a boa correlação entre a representação das duas grandezas.

Observa-se também que a amplitude de variação do sinal da potência está muito grande, provavelmente, a instabilidade da força de atrito devido ao empastamento também está sendo responsável pelas variações de potência e consequentemente, da força de retificação. Esta operação de retificação é claramente anormal e não resulta em peças com qualidade aceitável.

Um outro tipo de verificação de perda do perfil do rebolo foi realizada, neste caso as condições utilizadas foram escolhidas para ocorrência de desgaste frágil, pois o rebolo utilizado continua sendo mole (AA80G6V), o material da peça é temperado e a velocidade de avanço 0,15 mm/min. A Fig. 5- 17 mostra o mapa DEAR de um único ciclo de retificação, com profundidade de corte de 3,5 mm no diâmetro e o gráfico de potência consumida correspondente. Os parâmetros dos gráficos são os mesmos utilizados nos gráficos mostrados anteriormente. Esta retificação foi feita sem interrupções para evitar os problemas do ensaio anterior (desbalanceamento e dificuldades de visualização).

Observa-se na figura uma constante reafiação do rebolo, não havendo variações significativas na evolução das áreas de cores claras, porém observa-se que a partir da posição 400 há um pequeno aumento no nível do sinal de potência e que este se mantém até o final do ciclo. Esta alteração no sinal de potência é correspondida por um padrão mais uniforme da imagem, o que indica que o desgaste passou para a segunda fase, devido ao empastamento que resulta em maior retenção dos grãos e conseqüente aumento de potência.

Fig. 5- 17 Mapa DEAR de um ciclo de retificação, com profundidade de corte de 3,5 mm no diâmetro, que indica a ocorrência de desgaste frágil. Taxa de amostragem : 1 linha/seg., as 3200 divisões verticais correspondem ao perímetro total do rebolo (360°).

Para verificar a dimensão do desgaste da faixa ativa do rebolo, que supostamente é grande, o mapa do rebolo foi gerado em seguida, dressando o rebolo com passes de profundidade 1 μm . Este procedimento permite que se gere uma imagem que representa a topografia da superfície do rebolo.

Deste modo, também é possível medir a altura do degrau formado entre as faixas ativa e não utilizada, como se observa na Fig. 5- 18.

Fig. 5- 18 Mapas da topografia do rebolo gerados na dressagem, com passes de profundidade $1\mu\text{m}$.

Como se observa na figura, foram necessários 9 passes para eliminar completamente o degrau, o que confirma o desgaste acentuado do rebolo provocado pelas condições utilizadas. A relação entre o volume de rebolo consumido e o volume de material retirado caracteriza o desgaste do tipo frágil.

5.2.2 Comparação entre o mapa Óptico e o mapa DEAR de um Rebolo que apresenta Desgaste do tipo Frágil

Para comparar os mapas, o seguinte procedimento foi utilizado: o mapa DEAR foi gerado durante um ciclo de retificação, após o termino do ciclo, o sensor óptico foi

posicionado e o mapa óptico gerado. A Fig. 5- 19 mostra o mapa óptico(esquerda) do rebolo e o mapa DEAR da faixa ativa do rebolo.

Fig. 5- 19 Mapa óptico do rebolo e mapa DEAR da faixa ativa do rebolo.

Este rebolo possui três níveis de desgaste, uma faixa mais a esquerda sem desgaste, uma intermediária com pouco desgaste devido à cópia do perfil e a última situada mais a direita com o desgaste máximo. Estas faixas podem ser observadas no mapa óptico, porém somente a faixa destacada em vermelho é representada no mapa DEAR, por ser a

faixa ativa. Pois o mapa DEAR é gerado a partir do nível da EA gerada durante a usinagem, que só ocorre na faixa ativa do rebolo,

Apesar das representações serem diferentes, comparando os dois mapas, pode-se verificar que há alguma correlação direta entre as imagens, nos dois mapas as áreas claras representam as áreas de maior desgaste e as escuras o inverso. Pode-se observar que os dois mapas apresentam uma distribuição semelhante de áreas claras e escuras, sobre a faixa ativa do rebolo. Este fato reforça as conclusões baseadas nos mapas DEAR.

5.2.3 Desgaste do tipo Dúctil

O desgaste do tipo dúctil ocorre quando a liga que aglomera os grãos abrasivos não se rompe com a evolução do desgaste, aumentando o desgaste das áreas planas de topo dos grãos, este tipo de comportamento é característico de rebolos considerados “duros”. Neste caso, com a evolução do desgaste, a força de retificação vai aumentando até que ultrapassa um determinado limite, neste momento há um crescimento repentino da força que pode queimar a superfície da peça e/ou danificar o rebolo ou a retificadora.

O aumento repentino da força é indicado também pela potência consumida pelo eixo árvore, porém, a potência é pouco sensível e relativamente lenta para prever o momento da queima e/ou para evitar danos ao rebolo e na máquina. Os resultados obtidos com o mapa DEAR demonstram que este método mostra a evolução do desgaste do rebolo com mais sensibilidade e que possui uma velocidade de resposta muito mais rápida.

A utilização deste tipo de rebolo é necessária quando a tolerância de forma é mais importante, pois, desta forma o perfil do rebolo é garantido. Muitas indústrias utilizam frequentemente rebolos perfilados com geometrias complexas e estas só podem ser mantidas se o ligante do rebolo apresentar uma grande resistência como aqueles utilizados em rebolos “duros”.

Os mapas mostrados a seguir foram obtidos em uma retificadora que utiliza rebolo perfilado e retira uma grande quantidade de sobremetal a cada passe com velocidades de avanço altas, gerando uma grande força de retificação. A magnitude das forças envolvidas neste processo são grandes o suficiente para quebrar partes do rebolo, danificando a máquina e sua carenagem, caso o desgaste do rebolo atinja níveis elevados. Os procedimentos de segurança utilizados nesta máquina, como dresser com grande frequência o rebolo minimizam o problema, mas não resolvem totalmente.

O ideal neste caso seria dispor de um sistema de monitoramento conectado ao CNC, que detecte de maneira confiável o nível máximo de desgaste antes que ocorra o colapso e comande, via CNC, o eixo do rebolo para recuar rapidamente (G0). Um sistema como este evitaria a ocorrência de acidentes aleatórios, por exemplo: caso a evolução do desgaste de um rebolo recém trocado seja diferente daquela verificado no rebolo anterior. Estes testes foram feitos em uma máquina de produção de válvulas de motores em uma indústria no ABC/SP.

Neste caso o procedimento que estava sendo utilizado era uma dressagem a cada cinco peças, a Fig. 5- 20 mostra mapas DEAR de seis ciclos consecutivos de retificação, onde observa-se a evolução do nível de intensidade da energia acústica a partir do primeiro ciclo, após a dressagem.

Fig. 5- 20 Mapas DEAR de seis ciclos de retificação consecutivos, que indicam que está ocorrendo desgaste do tipo dúctil.

O nível de segurança é atingido na quinta peça, quando uma nova dressagem é feita, comparando os mapas da quinta e da sexta peça, que foi retificada com o rebolo recém dressado observa-se uma grande diferença na distribuição da energia acústica,

pois, a concentração de áreas claras indicam que um nível muito alto de energia está sendo gerado. As linhas vermelhas foram colocadas sobre o mapa para salientar o crescimento das áreas claras ao longo dos ciclos.

A Fig. 5- 21 mostra os mapas obtidos em um experimento onde o limite do processo foi testado.

Fig. 5- 21 Mapas DEAR de dez ciclos de retificação consecutivos, que mostram a evolução do desgaste do tipo dúctil, que corresponde à intensificação das áreas mais claras do gráfico.

Foram retificadas dez peças em seguida, ou seja, o dobro da quantidade normalmente utilizada. Os mapas mostram claramente o aumento da energia ao longo dos ciclos, até que, no décimo mapa as áreas claras praticamente cobrem toda a área do

mapa, neste momento houve a quebra de uma parte do rebolo, indicando que o limite do processo foi ultrapassado.

As linhas vermelhas mostram a intensificação do padrão similar para a retificação de cada peça. Observa-se que a correlação entre a evolução do nível de energia acústica com a evolução dos tons de cores é coerente. Pois, examinando visualmente estas imagens, verifica-se o aumento das áreas de tons mais claros que correspondem diretamente ao aumento da energia e consequentemente ao aumento do nível de desgaste. A intensificação das áreas claras nos últimos ciclos e a forte vibração percebida pelo operador da máquina indicam que o desgaste do tipo dúctil passou para a segunda fase devido ao empastamento do rebolo.

A Fig. 5- 22 mostra um gráfico construído com o nível máximo do sinal de vibração adquirido em cada ciclo de retificação da Fig. 5- 21.

Fig. 5- 22 Gráfico do comportamento do nível da vibração ao longo de 10 ciclos de retificação, utilizando um rebolo que apresenta desgaste do tipo dúctil. O nível de vibração RMS é apenas uma referência em relação ao estado de vibração inicial da máquina

Os valores mostrados na ordenada deste gráfico são proporcionais ao nível de vibração, porém não são absolutos, por isso não está citada a unidade de medida. Os pontos mostrados são correspondentes ao nível máximo RMS de vibração, medido em cada ciclo de retificação. Observa-se na figura um nível crescente de vibração, com uma inflexão maior nos ciclos finais, quando o empastamento aumenta.

A Fig. 5- 23 mostra uma comparação entre mapas DEAR, gerados ao longo de 20 ciclos de retificação e mapas ópticos gerados com o rebolo desgastado numa

operação de retificação plana. Este ensaio adicional foi feito em uma outra empresa. O material é um aço ferramenta D3, endurecido e retificado com um rebolo com a especificação 38A 46 L VBE. Pode-se observar a correspondência entre as regiões que mostram desgaste nos dois tipos de mapas.

Estes mapas ópticos foram gerados com um setup otimizado em relação aquele utilizado para gerar o mapa óptico mostrado na Fig. 5- 19, por isso a visualização está melhor. O padrão dos mapas DEAR indica que está ocorrendo um desgaste do tipo dúctil, pois as áreas claras estão se intensificando continuamente ao longo dos ciclos.

Fig. 5- 23 Comparação entre mapas ópticos e mapas DEAR de um rebolo que apresenta desgaste do tipo dúctil.

6 Discussão e Síntese dos Resultados Obtidos

Os resultados obtidos mostram que existe uma grande correlação entre a representação da evolução da distribuição da energia acústica de retificação ao longo dos ciclos pelo mapa DEAR, com os fenômenos que estão ocorrendo na superfície do rebolo. Mostrando que as características da imagem são compatíveis com a teoria sobre mecanismos de desgaste de rebolos.

A análise destas imagens pode fornecer um diagnóstico em processo que só poderia ser obtido através da integração de sinais de vários tipos de grandezas, no caso da utilização da potência e da vibração, o diagnóstico somente seria confiável depois da medição pós-processo do desgaste radial do rebolo.

Uma vez que, na primeira fase do desgaste dúctil há uma leve tendência de crescimento nas curvas de potência e vibração que pode ser confundida com o comportamento dessas curvas na primeira fase do desgaste frágil devido a inércia do sinal de potência, principalmente em máquinas que utilizam rebolos de peso elevado.

Na segunda fase do desgaste, onde há o empastamento do rebolo nos dois regimes, o nível de vibração pode crescer significativamente se o empastamento for muito severo, mesmo no desgaste do tipo frágil, devido ao efeito de maior retenção dos grãos causado pelo entupimento dos espaços entre grãos.

A medição do desgaste radial do rebolo, utilizada para confirmar o tipo de desgaste previsto pela vibração e pela potência, poderia ser realizada também em processo, utilizando um medidor radial da peça. Porém, este não é um dispositivo padrão em máquinas retificadoras e necessita de uma superfície específica para instalação.

Logo, o desenvolvimento de um sistema que utilize estes parâmetros para diagnóstico em processo, restringe significativamente sua aplicação, além de aumentar a complexidade de hardware e software necessários para integrar e processar os três sinais em tempo real.

A instalação do sistema proposto é simples e só depende do posicionamento adequado dos sensores, sendo que a integração dos sinais é apenas para sincronização da aquisição e não necessita de processamento conjunto. Assim, devido à relativa simplicidade do software, a imagem é gerada em tempo real.

Os padrões da imagem apresentam características específicas para cada tipo de desgaste e suas fases, que podem ser identificadas por um técnico treinado, com relativa

facilidade. A partir dos resultados obtidos elaborou-se os esquemas mostrados na Fig. 6-1 que relacionam o tipo de mecanismo de desgaste com as indicações fornecidas pela potência, vibração e dimensão do diâmetro do rebolo.

Fig. 6- 1 Esquemas que sintetizam os resultados obtidos, com os dois tipos de mecanismos de desgaste em relação às indicações de potência, vibração e dimensão do diâmetro do rebolo .

As imagens obtidas, quando o desgaste é do tipo dúctil mostram que as áreas mais solicitadas vão aumentando com a evolução do desgaste, sem deslocamento angular, até

atingir um nível muito intenso de solicitação, onde há estabilização destas áreas. Neste momento o rebolo já está totalmente empastado.

No esquema do desgaste dúctil estes eventos são representados por retas que se abrem na primeira fase e passam a ser paralelas na segunda fase. Neste caso há um crescimento pequeno e aproximadamente linear da potência e da vibração na primeira fase, seguido por um crescimento acentuado e aproximadamente exponencial na segunda, porém o desgaste radial do rebolo é praticamente nulo nas duas fases.

Na retificação que apresenta desgaste do tipo frágil, as imagens mostram áreas mais solicitadas que se deslocam quando atingem determinado tamanho, até apresentar uma relativa estabilidade, devido ao empastamento do rebolo, porém, neste caso a imagem apresenta um padrão de linhas verticais e horizontais que se mantém.

No esquema do desgaste frágil os eventos da primeira fase são representados por traços horizontais distribuídos e na segunda fase por linhas verticais e horizontais que se cruzam. Observa-se que na primeira fase há um leve aumento do nível geral de vibração com variações localizadas antes e depois do desprendimento de grãos, enquanto que o nível da potência é praticamente constante. Na segunda fase há aumento mais acentuado do nível da vibração e um aumento do nível da potência seguido por um comportamento instável. Neste caso observa-se um desgaste radial significativo do rebolo nas duas fases.

7 Conclusões

A partir dos resultados obtidos, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- Foi possível desenvolver um sistema que indica qual mecanismo de desgaste predominante está ocorrendo no rebolo, em processo. A aquisição de dados pode ser realizada durante vários ciclos de retificação, possibilitando a observação do desgaste e sua evolução.
- O sistema proposto e desenvolvido tem grande flexibilidade e pode ser facilmente transportado para trabalhos de campo. A instalação dos sensores utilizados é simples, necessitando somente pequenas adaptações na máquina. O software pode ser instalado em PC ou notebook que suportem placa de aquisição de alta velocidade.
- A identificação do tipo de desgaste possibilita a seleção de ações corretivas adequadas para otimização de processos de retificação, como: tipo de rebolo e de fluido de corte, condições de usinagem e de dressagem.
- Os padrões das imagens podem ser correlacionados com o comportamento de variáveis conhecidas como vibração, potência e desgaste radial. No caso da máquina dispor de sistemas que monitorem alguma dessas variáveis ou todas, pode-se associar o comportamento das mesmas com o mapa DEAR, para se obter diagnósticos mais rápidos.
- Os resultados obtidos estão de acordo com a teoria dos mecanismos de desgaste do rebolo.
- É possível identificar o tipo de mecanismo de desgaste que está ocorrendo, em processo, mesmo no ambiente industrial. Os sensores utilizados não são afetados pelo fluido refrigerante e nem por cavacos, sendo adequados para instalação dentro da carenagem das máquinas. O sistema não foi prejudicado pelos ruídos elétricos presentes neste ambiente, apresentando resultados semelhantes aos obtidos em laboratório.
- Neste trabalho os experimentos foram realizados em retificadoras cilíndricas e planas, porém, a metodologia desenvolvida pode facilmente ser estendida aos outros processos. Na retificação centerless e interna, por exemplo, os rebolos utilizados tem o mesmo tipo de construção daqueles estudados neste trabalho, os mecanismos de desgaste também são os mesmos e a instalação dos sensores pode ser feita da mesma

maneira: um sensor de proximidade para sincronização e um sensor de EA para sondagem.

Sugestões para trabalhos futuros

- Desenvolvimento de um sistema de reconhecimento de padrões de imagem, que pode fornecer um diagnóstico
- Algoritmo para extração de elementos e padrões gráficos horizontais do sinal de EA.
- Associar a este sistema informações da potência e qualidade para estabelecer automaticamente a decisão de dressagem do rebolo.
- Integrar o sistema a um CNC de arquitetura aberta para que os mapas sejam gerados na tela do CNC.

8 Referências Bibliográficas

A lista bibliográfica mostrada a seguir é composta apenas das referências citadas no presente trabalho.

AGUIAR, P.R., (1997) Monitoramento da queima superficial em processo de usinagem por retificação usando potência elétrica do motor e emissão acústica. Tese de doutoramento, Politecnica/USP/SEL.

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

ALMEIDA, S.L.R. et al.,(1996) Aplicação de lógica fuzzy e redes neurais para a otimização de condições de usinagem. Máquinas e Metais, jun, p96-106.

BEDFORD, A.; DRUMHELER, D.S., (1994). Rayleigh Waves. Introduction to Elastic Wave Propagation. ed. John Wiley e Sons, Chichester. p106-109.

BIANCHI, E.C. (1990). Ação das condições de dressagem na vida de rebolos na retificação de precisão. Dissertação de mestrado. USP/EESC/SEM.

BICUDO, L.A.M.C., (1997). Sistema de Compensação de Erros Térmicos Dimensionais para Retificadoras Cilíndricas Utilizando Redes Neurais. Tese de doutorado. USP/EESC/SEM.

BILATOS, S.B.; WEBSTER, J.A., (1993) Knowledge-based expert system for ballscrew grinding. Journal of engineering for industry, v.115, p230-235.

BRINKSMEIER, E.; POPP, C., (1991) A selftuning adaptative control system for grinding processes. Anais do CIRP, v. 40/1, p365-368

BYRNE et al.,(1995). Tool Condition Monitoring(TCM) – The Status of Research and Industrial Application. Annals of the CIRP, p1-27.

COELHO, R.T.(1991). Estudo experimental da profundidade de dressagem de rebolos na retificação de precisão usando o método do disco retificado. Dissertação de mestrado. USP/EESC/SEM.

DORNFELD, D.; CAI, H. G., (1984) An Investigation Of Grinding And Wheel Loading Using Acoustic Emission. *Transactions of the ASME*, v.106, p28-33.

DORNFELD, D., (1992) Application Of Acoustic Emission Techniques In Manufacturing. *NDT & E International*, v.25, n.6, p259-269.

DORNFELD, D.A.; KÖNIG, W.; KETTELER, G., (1993) Present state of tool and process monitoring in cutting. International CIRP/VDI conference.

DORNFELD, D. A (1994) Intelligent sensors for monitoring machining processes. Berkeley, CA 94720 USA.

DU,R.;ELBESTAWI;WU,S.M.(1995). Automated monitoring of manufacturing processes, part 1: monitoring methods. *Journal of Engineering for Industry*, v117,p121-132.

DU,R.;ELBESTAWI;WU,S.M.(1995). Automated monitoring of manufacturing processes, part 2: applications. *Journal of Engineering for Industry*, v117,p133-141.

FELIPE, J., (1996). Contribuição para Implementação de Funções de Retificação Inteligente (RI) Utilizando Técnicas de Monitoramento por Emissão Acústica. Tese de doutoramento, USP/EESC/SEM.

HUNDT, W. et al., (1994) An Approach to Monitoring of the Grinding Process Using Acoustic Emission (AE) Technique. *Annals of the CIRP*, v.43, n.1, p295-298.

HWANG, T.W. et al, (2000). High Speed Grinding of Silicon Nitride With Eletroplated Diamond Wheels, Part 1: Wear and Wheel Life. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, February 2000, v122, p32-41.

INASAKI, I, (1990) Monitoring and Optimization of Internal Grinding Processes. Annals of the CIRP, v.40/1, p359-362.

JUNKAR, M.; FILIPIC, B. ; BRATKO, I., (1991) Identifying the grinding process by means of inductive machine learning. Computers in industry, n.17, p147-153.

LEZANSKI, P; RAFALOWICZ, J., (1993) An Intelligent Monitoring System for Cylindrical Grinding. Annals of the CIRP vol. 42/1/1993.

KLEIN, C. , (1994) Sistema de mapeamento da superfície de rebolos durante o processo de retificação. Tese de doutoramento, USP/EESC/SEM.

KLUFT, W., (1994) A Monitoração dos Processos Reduz Custos e Desperdícios. Máquinas e Metais, v.10, p60-80.

KÖNIG, W.; MEYEN, H. P., (1990) AE In Grinding And Dressing: Accuracy And Process Reliability. In: 4TH INTERNATIONAL GRINDING CONFERENCE, Dearborn, Michigan, 1990. *Anais*. p526/1-526/20.

KÖNIG, W.; KLUMPEN, T., (1993) Monitoring and Sensor Concepts for Higher Process Reliability. In: 5TH INTERNATIONAL GRINDING, Cincinnati, Ohio, Annals.

MEREDITH, D., (1998) Practical tool condition monitoring. Manufacturing Engineering. jan, p34-39.

MORI, K.; KASASHIMA, N.; YAMANE, T.; NAKAI, T., (1992) An intelligent vibration diagnostic system for cylindrical grinding. JAPAN/USA symposium on flexible automation, v.2, p1097-1100.

NAKAIMA, K.; et al (1980). Sharpness evaluation of grinding wheel face by the grinding of steel ball. Annals of the CIRP. v1 , p227-228.

OLIVEIRA, J.F.G., (1992) Controle do estado de afiação de rebolos na retificação de precisão. Tese de livre docência, SEM/EESC/USP.

OLIVEIRA, J.F.G., (1993) Grinding cost reduction program, TRW

OLIVEIRA, J. F. G.; DORNFELD, D.; SCHNEIDER, C., (1994) A Otimização Da Dressagem e a Redução do Custo de Rebolos. Máquinas e Metais, v.5, p32-40.

OLIVEIRA, J.F.G.; DORNFELD, D.A.; WINTER, B., (1994) Dimensional Characterization of Grinding Wheel Surface Through Acoustic Emission. Annals of the CIRP, v.43, n.1, p291-304.

OZAWA, N.; YUI, A.; MITSUI, K, (1990) Development of a precision balancing method for grinding wheels. Bulletin of Japan society of precision engineering, v.24, n.4, p.297-302.

PRODUCT DATA BRÜEL & KJAER, (1999). Download www.bk.dk

RANGWALA, S.; DORNFELD, D. (1990) Sensor integration using neural networks for intelligente tool condition monitoring. Journal of engineering for industry, v.112, p219-228.

ROWE, W.B.; LI, Y.; MILLS, B.; ALLANSON, D.R., (1996) Application of intelligent CNC in grinding. Computers in industry, n.31, p45-60.

ROWE, W.B.; LI, Y.; MALKIN, S., (1994) Applications of Artificial Intelligence in Grinding. Annals of the CIRP vol. 43/2/1994.

REGIER, T., (1993) CS 294-5, Neural networks. University of California at Berkeley.

SAKAKURA, M.; INASAKI, I., (1993) Intelligent data base for grinding operations. Annals of the CIRP, v.42/1, p379-382.

SANTOS, M. T., (1998) Estudo do monitoramento do desgaste de fresa de topo baseado no emprego de sensores, tese de doutoramento, Politecnica/USP.

SATA, T., SUTO, T., Waida, T., and Noguchi, H, (1972) In-process measurement of the grinding process and its application. Proceedings of the international grinding conference, Pittsburgh, p.752.

SHIMAMUNE, T.; ONO, K.; (1983) Wheel life in grinding (artigo 1) – variation of grinding force components with the progress of grinding time. Bulletin of Japan society of precision engineering, v.17, n.1, p35-42.

SHIMAMUNE, T.; ONO, K.; (1983) Wheel life in grinding (artigo 2) – wheel life and selection of operating parameters in grinding. Bulletin of Japan society of precision engineering, v.17, n.2, p93-137.

TETI, R., KUMARA, S.R.T., (1997) Intelligent computing methods for manufacturing systems. Anais do CIRP, v.46/2, p629-652.

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

TOENSHOFF, H. K.; WULFSBERG, (1988) Development and trends in monitoring and control of machining processes, Annals of CIRP, v.37/ 2, p611-621.

TÖNSHOFF, H.K., KARPUSHEWSKI, B. & MANDRYSCH, T., (1998). Grinding Process Achievements and their Consequences on Machine Tools Challenges and Opportunities. Annals of the CIRP, v47, p651-668.

VERKERK, J. (1977). Final report concerning CIRP cooperative work on the characterization of grinding wheel topography. Annals of the CIRP. v2, p385-395.

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

WAKUDA, M; INASAKI, I., (1991) Detection Of Malfunctions In Grinding Processes. In: 4TH World Meeting on Acoustic Emission and 1ST International Conference on Acoustic Emission in Manufacturing, Boston, Massachusetts, 1991. Annals. p 494-501.

WEBSTER, J.; DONG, W. P.; LINDSAY, R., (1996) Raw acoustic emission signal analysis of grinding process. Anais do CIRP, v.45/1, p335-340.

WESTKÄMPER, E. & TÖNSHOFF, H.K., (1993). CBN or CD Grinding of Profiles. Annals of the CIRP, v42, p371-374.