Campus de São Carlos

NOVA METODOLOGIA PARA
MONITORAMENTO DIMENSIONAL DE PEÇAS,
EM PROCESSO, UTILIZANDO UMA
RETIFICADORA CILÍNDRICA

GIULIANO CARDOZO MEDALHA

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

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 27 / 07 / 01

Ass.:

Guilherme

**NOVA METODOLOGIA PARA
MONITORAMENTO DIMENSIONAL DE PEÇAS,
EM PROCESSO, UTILIZANDO UMA
RETIFICADORA CILINDRICA**

Engº Giuliano Cardozo Medalha

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

DEDALUS - Acervo - EESC

31100036689

ORIENTADOR: Prof. Dr. João Fernando Gomes de Oliveira

São Carlos

2001

Class.	TESE - EESC
Cult.	3543
Tombo	T0161/01

st 1196748

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

M488n

Medalha, Giuliano Cardozo

Nova metodologia para monitoramento dimensional de
peças, em processo, utilizando uma retificadora
cilíndrica / Giuliano Cardozo Medalha. -- São Carlos,
2001.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2001.

Área: Engenharia Mecânica.

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

1. Emissão acústica. 2. Medição em processo. 3.
Automação industrial. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **GIULIANO CARDOZO MEDALHA**

Dissertação defendida e julgada em 10-07-2001 perante a Comissão Julgadora:

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

Aprovado

Prof. Tit. **ROSALVO TIAGO RUFFINO**
(Escola de Engenharia de São Carlos - USP)

Aprovado

Prof. Dr. **EVANDRO LUÍS LINHARI RODRIGUES**
(Escola de Engenharia de São Carlos - USP)

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 da EESC

Dedico este trabalho
ao meu pai Treniro, a minha mãe Deise,
a minha avó Maria e ao meu tio Cardozo,
em nome do amor, do carinho, da paciência,
da dedicação e dos valiosos ensinamentos e princípios.

Agradecimentos

A DEUS, agradeço de Corpo, Alma e Espírito, pela VIDA.

Ao professor João Fernando agradeço pela oportunidade, orientação e amizade, durante todo o período de elaboração deste trabalho.

Ao professor Reginaldo agradeço pela amizade e valiosas discussões a respeito do tema.

Agradeço aos professores Valentim (e seu aluno de doutorado Max) e Evandro do Depto. de Engenharia Elétrica, pelos importantes esclarecimentos.

Aos amigos Aldo, Dinho e Ronaldo, obrigado pela amizade, pela ajuda e pelo tempo dedicado nos trabalhos, nas discussões e nos bate papos.

A Irene, agradeço pela valiosa ajuda nos momentos difíceis e pelos ótimos momentos de descontração.

Agradeço a todos os colegas de trabalho do Laboratório de Otimização de Processos de Fabricação: Alexandre, Leonardo, Jalon, Eraldo, Marcelo, Octaviano, Carlos, Bob, Gustavo Meireles (na primeira fase), Douglas, Fabio, Tadeu, João e toda a turma da nova fase 2001.

Agradeço ao pessoal das secretarias de pós graduação e graduação e a todos os funcionários que ajudaram na realização deste trabalho.

A todos os meus amigos de São José do Rio Preto que indiretamente acompanharam a longa caminhada ate aqui (Márcio, Lúcio, Rodrigo, Marcelo, Nonato, Fabiano, Roberto, Ricardo, Matheus e Adriano), muito obrigado.

Aos meus primos e familiares, obrigado pela confiança e pelo incentivo.

Agradeço ao Eng. João Jorge da empresa Sensis Automação, pela ajuda com os equipamentos de hardware.

Agradeço ao Sr. Newton da Empresa FAC pela ajuda com o software LabView.

A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa de estudos, que permitiu dedicação integral ao programa de mestrado.

A EESC – USP pela oportunidade de continuar os estudos neste prestigiado e reconhecido centro de ensino.

Sumário

Lista de Figuras.....	3
Lista de Tabelas.....	8
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	9
Lista de Símbolos.....	10
Resumo.....	12
Abstract.....	13
1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1. OBJETIVOS.....	14
1.2. ESTRUTURAÇÃO DESTA DISSERTAÇÃO	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1. CONTROLE DE ACURACIDADE DE PEÇAS E MONITORAMENTO DIMENSIONAL EM PROCESSO ..	16
2.2. ERROS E FONTES DE ERROS EM MÁQUINAS FERRAMENTAS	23
2.2.1 Erros Geométricos.....	25
2.2.2 Classificação dos Erros de Máquinas – Quanto ao Tipo.....	26
2.2.3 Classificação dos Erros de Máquinas – Quanto ao Comportamento.....	35
2.3. ERROS DIMENSIONAIS EM RETIFICADORAS CILÍNDRICAS	36
2.3.1 Fatores que Levam ao Erro Diametral da Peça.....	38
2.3.2 Soluções Adotadas para Minimizar os Erros Diametrais em Retificadoras	39
2.4. SISTEMAS DE MONITORAMENTO	41
2.4.1 Sensores.....	43
2.4.2 Encoders Ópticos Rotacionais	52
2.5. UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS BASEADOS EM EMISSÃO ACÚSTICA PARA O MONITORAMENTO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	59
2.5.1 Processamento do Sinal de EA.....	61
2.5.2 A Utilização de EA para a Detecção de Contato Rebolo / Peça	64
2.6. A RETIFICAÇÃO INTELIGENTE.....	69
2.6.1 Sistema de Detecção de contato.....	70
2.6.2 Sistema para Detecção de Falhas	73
2.6.3 Sistema para Calibração da Posição do Rebolo	75
2.6.4 Sistema de Dressagem Inteligente	76
2.6.5 Sistema para Detecção de Colisão	78

3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL.....	79
3.1. INTRODUÇÃO	79
3.2. BANCO DE ENSAIOS.....	79
3.3. HARDWARE PARA AQUISIÇÃO DOS SINAIS	80
3.4. SOFTWARE UTILIZADO	84
4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	87
4.1. INTRODUÇÃO	87
4.2. CALIBRAÇÃO	88
4.3. ENSAIO PARA MEDIÇÃO DIMENSIONAL	90
4.4. ENSAIO PARA MEDIÇÃO DE EXCENTRICIDADE	91
5. RESULTADOS.....	92
5.1. DADOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE	92
5.2. REPETIBILIDADE E ACURACIDADE DO SISTEMA	96
5.3. ERROS DE FIXAÇÃO	97
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	99
6.1. TESTES DIMENSIONAIS	99
6.2. TESTE PARA MEDIR OS ERROS DE FIXAÇÃO	100
7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	101
8. BIBLIOGRAFIA.....	103
8.1. BIBLIOGRAFIA CITADA	109
8.2. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	115
9. ANEXOS	103
9.1. PROGRAMAS CNC UTILIZADOS	103
9.2. VI UTILIZADA NO SOFTWARE LABVIEW®	105
9.3. DISTRIBUIÇÃO T DE STUDENT E TESTE DE NORMALIDADE	106

Lista de Figuras

FIGURA 1 - Comparação dos Métodos Diretos e Indiretos de Medição em Processo (SHIRAISHI, 1989).....	18
FIGURA 2 – Medidor do Tipo Pinça (Garra) Calibrada (YANDAYAN & BURDEKIN 1996).....	20
FIGURA 3 – Sistema Óptico de Medição em Processo Baseado em Projeção (YANDAYAN & BURDEKIN 1996).....	21
FIGURA 4 – “ <i>Lay Out</i> ” de um Sistema de Medição em Processo Baseado no Método Pneumático – Hidráulico (YANDAYAN & BURDEKIN 1996).....	22
FIGURA 5 - Movimentos de um Corpo Rígido e Convenção de Sinais (SATO, 1998)	26
FIGURA 6 - Fontes de Erros Térmicos em Máquinas Ferramentas (SATO, 1998)...	28
FIGURA 7 - Princípio de Abbè (SLOCUM, 1992).....	32
FIGURA 8 - Fontes de Erros para Aproximações Direta e Indireta na determinação da variável medida (WECK & BIBRING, 1984).....	33
FIGURA 9 - Calibração Hipotética de um dos Erros Geométricos (SATO, 1998)....	36
FIGURA 10 - Desvio da Posição do Rebolo (Oliveira <i>et. al.</i> , 1994).....	37
FIGURA 11 - Evolução da Automação nos Processos de Usinagem (FELIPE JUNIOR, 1996).....	42

FIGURA 12 - Estrutura de um Sensor de EA (KONIG & MEYN, 1990).....	45
FIGURA 13 - Estrutura de um Sensor de EA com Acoplamento Fluidico (GOMES, 1997 – Fonte: SENSIS São Carlos).....	46
FIGURA 14 - Corte Esquemático de uma Arruela de Quartzo (BYRNE <i>et. al</i> , 1989).....	47
FIGURA 15 - Acelerômetro Piezoelétrico (MEIRELES, 2000).....	48
FIGURA 16 - Componentes de um LVDT (MACRO SENSORS CORPORATE, 2001).....	50
FIGURA 17 - Circuito de Medição de Temperaturas com Termopares (BICUDO, 1997).....	51
FIGURA 18 - Uma Vista Explodida de um Encoder Óptico Rotacional (ORLOSKY & AVOLIO, 1997).....	53
FIGURA 19 - Discos Ópticos para Encoders Incrementais e Absolutos (ORLOSKY & AVOLIO, 1997).....	54
FIGURA 20 - Canais A e B e os tipos de contagem: 1X, 2X e 4X (GORDON, 2000).	56
FIGURA 21 - Princípio Básico do Método de Emissão Acústica (POLLOCK, 1989)..	59
FIGURA 22 - Principais Fontes de EA na Retificação de Metais (KONIG & MEYEN, 1990).....	61
FIGURA 23 - Processamento de sinal no amplificador de EA, KLUFT (1994).....	63

FIGURA 24 - Sinal bruto de EA e valor RMS (FELIPE JUNIOR, 1996).....	64
FIGURA 25 – Ciclo de Retificação em Mergulho (KLUFT, 1994).....	65
FIGURA 26 - Detecção de Contato Rebolo / Peça (INASAKI, 1985).....	66
FIGURA 27 – Variação do Nível do Sinal de EA com a Distância H (DORNFELD & CAI, 1984).....	67
FIGURA 28 - Problemas Relevantes em Monitoramento para Retificação (FELIPE JUNIOR, 1996).....	68
FIGURA 29 – Diagrama Esquemático da Detecção de Contato (FELIPE JUNIOR, 1996).....	71
FIGURA 30 – Remoção de Material na Retificação (FELIPE JUNIOR, 1996).....	73
FIGURA 31 - Sistema de Calibração da Posição do Rebolo (GOMES, 1997).....	76
FIGURA 32 – Dressagem para Eliminação de Falhas (FELIPE JUNIOR, 1996).....	78
FIGURA 33 – Lógica Programada para o Sistema Anti-Colisão.....	78
FIGURA 34 – Máquina Retificadora ZEMA G800.....	80
FIGURA 35 – Esquema da Bancada de Ensaios.....	80
FIGURA 36 – Montagem da Placa de Circuito Impresso no Pannel da Máquina, para Transmissão dos Sinais do Encoder.....	82
FIGURA 37 – Placa de Circuito Impresso para Recepção do Sinal.....	82

FIGURA 38 – Placas de Circuito Impresso que Fazem a Decodificação e o Tratamento dos Sinais do Encoder.....	83
FIGURA 39 – Sinal de EA (RMS) e dos Comparadores 1 e 2.....	84
A FIGURA 40 - Valore Típicos de Sobremetal e Tolerâncias Utilizadas na Retificação.....	87
FIGURA 41 – Desenho do Eixo Utilizado.....	88
FIGURA 42 – Ciclo de Retificação no Programa de Calibração.....	89
FIGURA 43 - Ciclo de Retificação no Programa de Testes Dimensionais.....	90
FIGURA 44 – Valores Medidos, Média, Desvio Sistemático e Desvio Aleatório. (Eixo 1: $\phi_{Ref.} = 24,4 \text{ mm}$).....	93
FIGURA 45 – Valores Medidos, Média, Desvio Sistemático e Desvio Aleatório. (Eixo 2: $\phi_{Ref.} = 29,7 \text{ mm}$).....	93
FIGURA 46 – Valores Medidos, Média, Desvio Sistemático e Desvio Aleatório. (Eixo 3: $\phi_{Ref.} = 34,050 \text{ mm}$).....	94
FIGURA 47 – Valores Medidos, Média, Desvio Sistemático e Desvio Aleatório. (Eixo 4: $\phi_{Ref.} = 39,6 \text{ mm}$).....	94
FIGURA 48 – Valores Medidos, Média, Desvio Sistemático e Desvio Aleatório. (Eixo 5: $\phi_{Ref.} = 44,8 \text{ mm}$).....	95

FIGURA 49 – Valores Medidos, Média, Desvio Sistemático e Desvio Aleatório. (Eixo 6: $\phi_{Ref.} = 49,7 \text{ mm}$).....	95
FIGURA 50 – Tela Gráfica Do Software LabView®.....	111
FIGURA 51 – Gráfico Originado pelo Teste de Normalidade (MINITAB®).....	112

Lista de Tabelas

TABELA 1 – Valores Experimentais do Diâmetro de Seis Corpos de Prova.....92

TABELA 2 – Valores de Repetibilidade do Sistema para os Seis Corpos de Prova..96

TABELA 3 – Repetibilidade e Desvio Sistemático dos Valores Obtidos.....97

TABELA 4 – Valores do Erro de Fixação para os Seis Corpos de Prova.....98

Lista de Abreviaturas e Siglas

Abreviatura ou Sigla	Unidade	Significado
CEP	-	Controle Estatístico de Processo
LVDT	-	Transformador Diferencial Linear Variável
CNC	-	Controle Numérico Computadorizado
<i>Spark Out</i>	-	Fase de Centelhamento na Retificação
C_{pk}	-	Capabilidade de máquina
EA	-	Emissão Acústica
AC	-	Corrente Alternada
DC	-	Corrente Contínua
HI	-	Nível de Tensão Alta (5V)
LO	-	Nível de Tensão Baixa (0V)
RPM	-	Rotações por Minuto
NEMA	-	National Electrical Manufacturers Association
IEC	-	International Electrotechnical Commission
RMS	-	Raiz Média Quadrática (Root Mean Square)
RAW	-	Valor “bruto” do Sinal de EA
FFT	-	Transformada Rápida de Fourier
RI	-	Retificação Inteligente
CLP	-	Controlador Lógico Programável
RS-485	-	Protocolo de Comunicação de Rede
P1	-	Variável para Armazenamento de Coordenada
P2	-	Variável para Armazenamento de Coordenada
VI	-	Sub-programa LabView (Virtual Instruments)
H_0	-	Hipótese Nula
H_a	-	Hipótese Alternativa

Lista de Símbolos

Símbolo	Unidade	Significado
E_x	mm	Componente de Erro na Direção X
E_y	mm	Componente de Erro na Direção Y
E_z	mm	Componente de Erro na Direção Z
USL	mm	Limite Superior da Tolerância
LSL	mm	Limite Inferior da Tolerância
F	N	Força
Q	C	Carga Elétrica
m	Kg	Massa
a	m/s^2	Aceleração
HI	V	Nível de Tensão Alta (+ 5)
LO	V	Nível de Tensão Baixa (0)
f	Hz	Frequência
g	m/s^2	Aceleração da Gravidade
V_s	m/s	Velocidade Periférica do Rebolo
V_w	m/s	Velocidade da Peça
ϕ	mm	Diâmetro (Peça, Rebolo, etc.)
a_d	μm	Profundidade de Dressagem
V_a	mm/min	Velocidade de Aproximação
H	μm	Distância Rebolo / Peça
D_f	mm	Diâmetro Final de Retificação
$D_{c_{min}}$	mm	Distância Mínima de Contato
S	mm	Sobremetal Necessário
$R_{máx}$	μm	Rugosidade Máxima
$R_{mín}$	μm	Rugosidade Mínima
K	mm	Agressividade e Rigidez do Rebolo
C_t	s	Constante de Tempo
n	RPM	Rotação da Peça

u_d	-	Grau de Recobrimento
b_d	μm	Largura de Contato do Dressador
a_p	mm	Avanço do Rebolo Após uma Revolução Completa da Peça
D	mm	Diâmetro da Peça
S	mm	Desvio Padrão Amostral
n	-	Número de Amostras
α	-	Intervalo de Confiança
ν	-	Número de Graus de Liberdade ($= n-1$)
t	-	Valor Tabelado para o Critério de Student
x_r	mm	Valores Medidos
$\bar{x}$	mm	Valor Médio das Medidas
R_I	μm	Repetibilidade dos Valores Medidos

Resumo

MEDALHA, G.C. (2001). *Nova Metodologia para Medição de Peças, em Processo, Utilizando uma Retificadora Cilíndrica*. São Carlos, 2001. 114p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Atualmente, a maior parte das indústrias de manufatura utiliza seus operadores de máquinas para fazer a verificação dimensional das peças usinadas. Esses operadores geralmente escolhem algumas amostras aleatoriamente, num determinado período de tempo, para fazer a inspeção manual, ou utilizam dispositivos de medição automáticos no lote todo. Esses procedimentos podem implicar em perda de tempo, ou grandes investimentos, o que eleva os custos do produto final. Este trabalho propõe uma nova metodologia para a medição de peças em processo de retificação, utilizando uma máquina retificadora com funções inteligentes. As tecnologias de um encoder incremental óptico rotacional e de um chip contador são utilizadas para fazer o monitoramento da posição do cabeçote porta rebolo. Utilizando um sistema de coordenadas baseado no Comando Numérico (CN) da máquina, associado a inspeção por Emissão Acústica (EA) pode-se monitorar a posição do rebolo do ponto de início ciclo de retificação até o início do contato com a peça. Os erros associados a deformação térmica da máquina e o desgaste do rebolo são levados em consideração e compensados. Desta maneira, é possível medir a dimensão e a excentricidade das peças geradas pela operação imediatamente anterior, com uma precisão suficiente. Este sistema pode ajudar na redução do nível de refugo e do tempo total de produção, criando um diferencial para o aumento da confiabilidade do processo e da automação.

Palavras Chave: Emissão Acústica, Medição em Processo, Automação Industrial

Abstract

MEDALHA, G.C. (2001). *New Methodology For In Process Workpiece Measurement, Using a Cylindrical Grinding*. São Carlos, 2001. 114p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Most of the industries today use their machine operators to make the Workpiece dimensional verification. For this task they generally chose samples, doing manual inspection, or use automatic measuring devices in a whole lot. These procedures can implies in loss of time, a high investment, what may raise the costs of the final product. This work proposes a new methodology for in-process workpiece gagging, using a grinding machine associated with intelligent functions. The technology of an incremental rotational optical encoder and an external counter chip are used to perform the wheel head position monitoring. Using a NC (Numerical Control) coordinate system associated with AE (Acoustic Emission) inspection it was possible to get the position of the grinding wheel from the start of the grinding cycle until the first contact with the workpiece. The errors associated with the grinding machine deformation and wheel wear are considered and compensated. Thus, it is possible to measure the dimension and the run out of the workpiece, generated by a previous operation, with enough precision. This system may help to reduce the scrap level and the overall production time, creating a differential for process reliability and automation.

Keywords: Acoustic Emission, In Process Measurement, Industrial Automation

1. Introdução

A retificação é considerada um processo usinagem de acabamento na indústria de manufatura. Por esse motivo, grande parte das peças que são retificadas necessita possuir uma quantidade de sobremetal suficiente para promover a melhoria da qualidade necessária. Tal sobremetal não deve ser exagerado, para que os desperdícios e perda de tempo sejam evitados. Isso mostra que a retificação é um processo que exige um monitoramento mais refinado das peças que recebe para serem trabalhadas, de maneira a se transformar num processo mais confiável.

As máquinas ferramentas, em geral, são sistemas mecânicos que possuem erros devido a vários fatores: temperatura, vibração, desgaste, etc. Esses erros sempre existirão e provocarão erros nas peças usinadas. Com o advento dos sistemas de monitoramento, como um requisito de automação, associados as máquinas CNC a compensação desses erros tornou-se viável.

Com a tendência crescente no melhoramento do projeto de máquinas, maior precisão dos componentes mecânicos (incluindo a utilização de novos materiais) e eletrônicos e dos próprios Comandos Numéricos das Máquinas, os sistemas de monitoramento se tornam cada vez mais importantes no fornecimento de informações para a realização de controle e compensação de erros.

1.1. Objetivos

Este trabalho tem por objetivos propor uma nova metodologia para medição de peças em processo, utilizando a própria máquina como um sistema de medição. O resultado das medições poderá ser utilizado para se corrigir a operação de usinagem imediatamente anterior, avaliar a sua capacidade ou ainda avaliar o volume de material retirado, para a obtenção de parâmetros de desempenho no processo de retificação (relação G e peças por dressagem).

1.2. Estruturação desta Dissertação

Para isso, essa dissertação foi estruturada em nove capítulos:

- O Capítulo 1 dá uma introdução do trabalho;
- O Capítulo 2 mostra uma revisão bibliográfica dos assuntos necessários a construção da base científica necessária a conclusão deste trabalho;
- O Capítulo 3 descreve o desenvolvimento experimental: os equipamentos e materiais utilizados para a realização do experimento;
- O Capítulo 4 descreve o método experimental: procedimentos de ensaio, calibração e obtenção de resultados;
- O Capítulo 5 mostra os resultados do trabalho experimental;
- No Capítulo 6 são discutidos os resultados obtidos;
- O Capítulo 7 descreve as conclusões do trabalho;
- O Capítulo 8 mostra a lista de referências bibliográficas citadas e consultadas;
- O Capítulo 9 foi utilizado para descrever o material em anexo.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Controle de Acuracidade de Peças e Monitoramento Dimensional em Processo

Em geral, erros dimensionais sempre existirão em qualquer peça usinada, o que significa que a dimensão final sempre será diferente da dimensão nominal. Entretanto, esses erros devem existir dentro de um determinado limite dado pelas tolerâncias dimensionais, para que a qualidade dimensional necessária seja obtida.

Segundo SHIRAISHI (1989), para se produzir uma determinada peça com uma dimensão definida em uma faixa de tolerâncias, é necessário fabricar tal peça da maneira mais econômica possível, segundo suas especificações de projeto.

O controle de qualidade pode utilizar os métodos tradicionais de medição de peças, tais como métodos de inspeção manual. Isso requer muitas vezes que as peças sejam removidas da vizinhança das máquinas, para as áreas de inspeção apropriadas, resultando num fator de atraso para a produção. Procedimentos de inspeção amostral podem também ser aplicados através de técnicas de Controle Estatístico de Processos (CEP). Entretanto, esses procedimentos garantem apenas que uma faixa média de defeitos (esperados) sejam gerados durante o processo. Em adição, existe o risco de que algumas peças defeituosas não sejam detectadas.

Outro método tradicional de controle de qualidade é a inspeção completa do lote de peças. Se as peças forem defeituosas, elas podem ser rejeitadas ou retrabalhadas, o que gera um custo adicional. Consequentemente, os custos de inspeção de peças por métodos convencionais, em alguns casos, se igualam ou excedem os custos de produção (YANDAYAN & BURDEKIN, 1997).

Assim, a grande tendência atual no controle da acuracidade de peças caminha na direção do uso de dispositivos de medição em processo. Porém, nos últimos anos, grande parte dos instrumentos desenvolvidos com essa finalidade possui custos elevados ou, na sua aplicação, tiveram sucesso apenas em laboratório, com poucos deles realmente atuando no chão de fábrica de um sistema de produção.

O termo “medição em processo” significa a medição de uma determinada dimensão de uma peça, enquanto essa está na máquina e, preferivelmente, enquanto o processo está em progresso. Um sistema de medição em processo desejável, é aquele que faz as medições com o mínimo de dificuldades, sem provocar interrupções no processo (YANDAYAN & BURDEKIN, 1997).

Se muitas peças nominalmente idênticas são feitas em uma máquina e nenhuma dimensão é verificada, os erros irão variar de peça para peça, podendo ser divididos em dois tipos: erros aleatórios, que não podem ser controlados pelo operador, e erros sistemáticos, os quais podem ter suas causas identificadas e corrigidas.

Se um número suficiente de peças é fabricada e medida, os erros encontrados, de maneira geral, seguirão uma característica dada pela Distribuição Gaussiana dos Processos Aleatórios. Os erros aleatórios compreendem as variações dadas pela máquina e pelas modificações nela introduzidas durante o seu uso. Tais variações podem ser consideradas como uma combinação de erros devido a estrutura da máquina, as variações nos mancais, ao atrito, as folgas, aos erros devido aos operadores e aos sistemas de controle em máquinas automáticas, etc. Tais erros serão descritos no segundo tópico desta revisão.

Se os valores médios dos resultados medidos, obtidos a partir de um número suficiente de peças, são observados durante um período de tempo, existirá uma tendência nos desvios encontrados, causada pelos erros sistemáticos. Esses erros podem ser reduzidos através de técnicas adequadas de correção, baseadas em inspeção, a qual envolve métodos de medição e controle em processo, em ciclo ou pós processo. Os dois últimos métodos são descritos abaixo (ZHAN-QIANG *et. al.*, 1998):

- Medição em Ciclo: Normalmente aplicada a Centros de Usinagem e, diferentemente da medição em processo, a medição em ciclo é feita quando o processo é interrompido. Com este método de medição, a peça pode ser avaliada antes ou depois do corte ou antes de uma mudança de setup. Este método transforma a máquina de usinagem em uma máquina de medir em coordenadas.

- Medição Pós-Processo: A peça usinada é removida do processo e transportada por um dispositivo independente até uma máquina de medição, onde será inspecionada. A grande vantagem deste método é que ele inclui os efeitos de todas as fontes de erros que afetam a peça naquele setup. Porém, muito tempo é desperdiçado nesse tipo de inspeção, o que inviabiliza a inspeção de grandes lotes.

Segundo YANDAYAN & BURDEKIN (1997), a medição e controle em processo é necessária quando os erros sistemáticos variam significativamente, durante a fabricação de uma peça. Além disso, ela se torna uma boa combinação para a manufatura automatizada, particularmente para máquinas ferramentas controladas numericamente, pela possibilidade de realimentação com informações de controle.

Em processos de usinagem de alta precisão, os desvios geométricos tais como circularidade e cilindridade afetam substancialmente a acuracidade das peças e, além disso, não é tão fácil melhorar a acuracidade de forma, da mesma maneira com que se faz com a acuracidade dimensional. Uma comparação entre os métodos diretos e indiretos de medição em processo é mostrada na FIGURA 1.

	Direto	Indireto
Princípio de Medição
Principais Características	<p>(1) Aplicável a diâmetros limitados pela faixa do instrumento</p> <p>(2) Medição em diâmetros internos e formas complexas é dificultada</p> <p>(3) Efeitos como desgaste da peça, erros da máquina e distorções da peça são levados em consideração</p> <p>(4) As medições podem ser feitas em máquinas com baixa qualidade dimensional</p>	<p>(1) Aplicável a uma vasta gama de diâmetros</p> <p>(2) Realização de medição em diâmetros internos e formas pode ser realizada</p> <p>(3) A medição é estritamente afetada pelo instrumento</p> <p>(4) As técnicas existentes são muito úteis quando aplicadas em máquinas de alta qualidade dimensional</p>

FIGURA 1 - Comparação dos Métodos Diretos e Indiretos de Medição em Processo (SHIRAISHI, 1989).

As principais características desejadas para um sistema de medição em processo são listadas abaixo (YANDAYAN & BURDEKIN 1997):

- (1) Alta resolução e acuracidade;
- (2) Medição Rápida;
- (3) Construção de Baixo Custo;
- (4) Flexibilidade – Larga Faixa de Diâmetros;
- (5) Ajustes manuais não Necessários;
- (6) Independente da Temperatura Ambiente;
- (7) Independente da Textura Superficial e do Material;
- (8) Equipamentos Necessários não Devem Ficar Próximos da Peça;
- (9) Todos os Erros devem ser Considerados na Medição: Medição Direta

Existem cinco métodos principais de medição em processo, que podem ser classificados de acordo com o princípio de operação que utilizam: métodos mecânicos, métodos ópticos, métodos pneumáticos, métodos ultra-sônicos e métodos elétricos. Tais métodos são descritos e ilustrados abaixo:

1. Métodos Mecânicos

Um método mecânico de medição em processo pode ser definido como aquele em que o transdutor de medida opera em contato mecânico com a peça. Podem ser utilizados métodos diretos de medição, tais como pinças calibradoras ou discos de fricção, ou métodos indiretos, que utilizam sondas mecânicas que se defletem no contato com a peça e que têm sua posição de topo sempre conhecida.

A Figura 2 mostra medidores mecânicos do tipo pinça calibrada e sua utilização em máquinas retificadoras com comando numérico.

FIGURA 2 – Medidor do Tipo Pinça (Garra) Calibrada (YANDAYAN & BURDEKIN 1997)

Os sistemas do tipo pinça mostrados na FIGURA 2 são muito utilizados no processo de retificação. A faixa de diâmetros pode variar de 5 até 190 mm com repetibilidade de 5 μ m. Os inconvenientes deste método são: o desgaste das partes que tocam a peça e a necessidade de um setup cuidadoso para cada tamanho de peça retificado, o que aumenta o tempo total de produção (YANDAYAN & BURDEKIN 1997).

2. Métodos Ópticos

Os sistemas ópticos de medição em processo têm um módulo transmissor que emite luz, a qual é captada por um sensor fotoelétrico ou por lentes de projeção. Entre o emissor e o receptor está a peça a ser medida.

Os sistemas ópticos apresentam as seguintes vantagens:

- O contato direto entre o transdutor de medição e a peça não é necessário o que impossibilita a danificação da peça;
- A distância do objeto a ser medido e o sensor pode ser grande;
- O tempo de resposta depende apenas dos componentes eletrônicos utilizados no sensor;
- As variações de luz podem ser convertidas em sinais elétricos ou imagem projetada em escala graduada.

As principais desvantagens dos sistemas ópticos estão nos altos custos dos equipamentos necessários e nas impurezas existentes nos ambientes de produção, que podem prejudicar a passagem da luz. A FIGURA 3 mostra um tipo de sistema óptico de medição em processo.

FIGURA 3 – Sistema Óptico de Medição em Processo Baseado em Projeção
(YANDAYAN & BURDEKIN 1997)

3. Métodos Pneumáticos

Nestes métodos, um medidor pneumático é colocado a uma certa distância da peça, enviando um fluxo de ar para a mesma. O sistema de medição então mede a queda de pressão entre o medidor e a peça, quando a mesma está sendo usinada, convertendo essa variação em um sinal elétrico.

A FIGURA 4 mostra um sistema pneumático utilizado na medição em processo.

FIGURA 4 – “Lay Out” de um Sistema de Medição em Processo Baseado no Método Pneumático – Hidráulico (YANDAYAN & BURDEKIN 1997)

Os sistemas de medição baseados no método pneumático apresentam as seguintes vantagens:

- Não é afetado pelo material, seja ele metálico ou não;
- São considerados sistemas de medição e controle rápidos;
- Podem ser aplicados em uma faixa de temperaturas altas.

As principais desvantagens dos métodos pneumáticos são: a variação da distância entre os sensores e a peça (devido as variações de forma que a peça possui) e as impurezas presentes no ambiente industrial.

4. Métodos Elétricos

Segundo YANDAYAN & BURDEKIN (1997), vários tipos de técnicas elétricas de campo, tais como indutância e capacitância, podem ser aplicadas aos sistemas de medição em processo. Transdutores de indutância ou capacitância têm sido utilizados para medir variações no raio de peças ou para detectar deflexões do eixo árvore. Entretanto, os tipos indutivos são insensíveis a peças não metálicas e os

tipos capacitivos são sensíveis a presença de fluido de corte que têm alta constante dielétrica.

Sistemas que se utilizam LVDTs (descritos na pág. 43) podem ser utilizados como transdutores de deslocamento para dispositivos que utilizam sondas de contato. Porém a utilização desses sistemas ocupa espaço e ainda não é extremamente confiável para as aplicações industriais.

5. *Métodos Ultra-Sônicos*

Neste método, ondas de ultra-som são emitidas contra a peça e refletidas num receptor. O tempo de propagação das ondas depende da variação da distância entre a superfície de trabalho e o transdutor. Pela determinação deste tempo, pode-se determinar essa distância.

Em determinadas configurações do sistema essa distância pode implicar indiretamente no tamanho da peça. Este método exige um ambiente de trabalho limpo e um espaço suficientemente grande para colocação dos equipamentos necessários, além disso, sua confiabilidade é baixa (SHIRAISHI 1989).

2.2. Erros e Fontes de Erros em Máquinas Ferramentas

Máquinas Ferramentas controladas numericamente são instrumentos flexíveis que permitem a confecção de peças complexas em pequenos e médios lotes, com maior precisão e repetibilidade, custos reduzidos e tempos de usinagem cada vez menores.

Entretanto, tais instrumentos são fundamentalmente mecânicos e, portanto, estão sujeitos a erros que afetam a qualidade dimensional final das peças usinadas. Esses erros, provenientes das mais diferentes fontes e inerentes à própria estrutura da máquina, modificam o posicionamento previsto para a ferramenta e a posição prevista de usinagem, acarretando o que na literatura é denominado de erro total.

SATO (1998) considera o erro total como sendo a diferença vetorial entre as posições comandada (ideal) e a atingida (real). A diminuição do erro total a um nível considerado pequeno, na fase de projeto, provoca custos impraticáveis na fase de

execução. A concepção e construção de máquinas com distribuição de massa mais conveniente, com elementos extremamente precisos, construídos a partir de materiais especiais, com coeficientes de dilatação próximos de zero, demanda, além de pessoal qualificado, tempo e equipamentos sofisticados. Porém, mesmo que isso fosse possível, os desgastes naturais de utilização da máquina gerariam ainda erros ao longo do tempo.

A qualidade de uma máquina ferramenta está relacionada com a sua capacidade de gerar componentes mecânicos com geometrias e dimensões finais idênticas às planejadas no projeto. Entretanto, devido a problemas que são inerentes aos sistemas que compõem uma máquina ferramenta, o correto posicionamento de todos os seus elementos de movimentação é alterado, provocando assim, desvios nas peças usinadas. As diversas fontes que causam tais desvios são consideradas fatores de erros (DI GIACOMO apud SATO, 1998).

Para aumentar a acuracidade de uma máquina ferramenta pode-se utilizar duas linhas diferentes de trabalho. Uma dessas linhas relaciona-se com as modificações nos elementos físicos da máquina, enquanto a outra se resume em minimizar os problemas existentes através de programas computacionais (KRENG *et al.*, 1994).

Na primeira linha de trabalho estão incluídos o aumento na precisão mecânica dos elementos da máquina ou as modificações nos elementos já construídos. Tais soluções normalmente não são facilmente aceitas devido aos seguintes fatores:

- Os custos para se construir elementos de grande precisão, em geral, são maiores do que a vantagem alcançada com a utilização dos mesmos;
- Modificações nas máquinas que já estão em funcionamento tornam-se difíceis de serem implementadas devido às limitações técnicas.

Na segunda linha de trabalho, está a compensação de erros através de programas computacionais, que é uma técnica mais factível para minimizar os erros existentes em máquinas ferramentas. Através de programas de compensação, é possível manter a precisão nas peças usinadas dentro de níveis bastante razoáveis a um custo conveniente. Um procedimento de compensação faz uso de informações previamente obtidas sobre os erros da máquina.

Os sistemas de medição em processo comerciais podem ser utilizados na obtenção dessas informações. Porém, essa alternativa se torna prejudicada pela necessidade de flexibilidade, pois a variação geométrica e dimensional das peças exige que o sistema seja ajustado a cada mudança de produto e sistemas auto-ajustáveis apresentam custos elevados. Por outro lado, devido a grande acuracidade desejada, esses sistemas necessitam de calibração para o seu funcionamento, o que implica em um aumento do tempo de máquina parada.

2.2.1 Erros Geométricos

As Máquinas Ferramentas são compostas por mesas, guias, fusos, eixos e outras estruturas que possuem características individuais.

São denominados erros geométricos os erros da geometria de uma máquina, que causam movimentos indesejáveis entre os seus componentes provocando erro na dimensão e na geometria das peças fabricadas. Em máquinas ferramentas, estes “deslocamentos” indesejáveis acabam modificando o posicionamento previsto para a ponta da ferramenta e a posição prevista para a usinagem, acarretando o que se convencionou chamar de erro total.

Para máquinas que possuem três eixos de movimentação tal erro pode ser denominado de erro volumétrico (SATO, 1998). O erro volumétrico é dado pela eq. (1), onde E_x , E_y e E_z são componentes do erro nas direções X, Y e Z, respectivamente.

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (1)$$

Para introduzir a terminologia utilizada no tratamento dos erros geométricos, considera-se um carro de uma máquina ferramenta como sendo um corpo rígido transladado ao longo de uma guia. Os movimentos indesejáveis que ocorrem em outras direções, que não a direção preferencial, são considerados erros, como observado na FIGURA 5.

FIGURA 5 Movimentos de um Corpo Rígido e Convenção de Sinais (SATO, 1998)

Observando a FIGURA 5 percebe-se que dois desses erros são erros de translação, definidos como **Erros de Retilneidade** (Vertical e Horizontal), enquanto os outros três erros são de rotação, denominados de “**Roll**”, “**Pitch**” e “**Yaw**”, conforme a direção de movimento do elemento. Um sexto erro pode ser também observado. Este ocorre na própria direção preferencial e é conhecido como Erro de Posicionamento ou ainda por **Erro de Posição**.

Cada um dos elementos de movimentação de uma máquina ferramenta possui os seis erros individuais descritos, também chamados de erros paramétricos, além dos eventuais erros que ocorrem entre eles, tais como erros de perpendicularidade e paralelismo.

2.2.2 Classificação dos Erros de Máquinas – Quanto ao Tipo

Segundo SATO (1998), os tipos de erros existentes em máquinas ferramentas são: erros quasi-estáticos ou estáticos, erros dinâmicos, erros cinemáticos, erros da ferramenta e erros da peça.

2.2.2.1 Erros Quasi-Estáticos

Os erros quasi-estáticos são aqueles que causam desvios na posição relativa entre a ferramenta e a peça e que variam lentamente com o tempo (SLOCUM, 1992). Esses erros são relacionados com a estrutura da máquina ferramenta (HOCKEN, 1980). Segundo KIRINDENA & FERREIRA ^{a b} (1994), os erros quasi-estáticos contribuem com aproximadamente 70% do erro total de máquinas ferramentas. São considerados erros quasi-estáticos:

- **Erros Devido a Carregamentos**

Os erros quasi-estáticos devido a carregamentos são aqueles causados por forças que variam lentamente devido a eventuais movimentos relativos. Tais forças podem ser:

- a) *Cargas devido ao peso próprio da máquina*

A distribuição do peso na máquina não é constante, podendo ocorrer deflexões na estrutura devido a deslocamentos de cabeçotes, carros, montagem de dispositivos e outros componentes.

- b) *Cargas devido ao peso próprio das peças*

O peso da peça usinada pode produzir deformações nas guias / barramentos e deflexões na estrutura da máquina. Além destes esforços, existem também aqueles devido a *fixações incorretas, projetos descuidados, materiais fora de especificação, etc.*

- **Erros Termicamente Induzidos**

Os desvios ocorridos na posição relativa entre ferramenta e peça, devido a variações de temperatura na máquina ferramenta, são denominados erros termicamente induzidos ou simplesmente erros térmicos.

Dentre as diversas fontes possíveis de erro em máquinas ferramentas, os termicamente induzidos são, atualmente, os que mais contribuem para o erro final (BRYAN, 1990). Isto provavelmente, porque as outras espécies de erros foram intensamente estudadas ao longo do tempo e, sendo compreendidas, os erros causados por elas puderam ser minimizados ou até mesmo eliminados. Além disto, como disse PEREIRA (1995), “as crescentes velocidades de corte, que aumentam a geração de calor, somadas à diminuição do tamanho das máquinas, ou seja, há menor massa para distribuir e dissipar mais calor, em geral, contribuem para que as Influências térmicas sejam cada vez mais evidentes”.

As fontes de erros térmicos e as possíveis causas de calor que podem afetar as máquinas ferramentas são descritas no diagrama da FIGURA 6.

FIGURA 6 – Fontes de Erros Térmicos em Máquinas Ferramentas (SATO, 1998)

O diagrama da FIGURA 6 apresenta seis fontes de influências térmicas:

1. Influências do ambiente:

Inclui as variações de temperatura onde está localizada a máquina. Depende da existência ou não de climatização do ambiente, da temperatura externa e de calor gerado por outras máquinas nas proximidades, etc.

2. Sistema de Refrigeração:

Os fluidos que circulam pela estrutura da máquina redistribuem e alteram a temperatura das partes da estrutura. Se o sistema de refrigeração não for eficaz, pode haver um aquecimento demasiado em partes da estrutura da máquina e da peça, promovendo assim, variações no posicionamento relativo entre peça e ferramenta.

3. Pessoas:

A presença de pessoas próximas à máquina contribui para a alteração de temperatura, que também modifica o posicionamento relativo entre a peça e a ferramenta.

4. Máquinas:

As máquinas existentes, além de outros equipamentos, contribuem na geração de calor e modificam o comportamento térmico dos componentes da máquina durante o seu funcionamento.

5. Processo de Usinagem:

O calor gerado durante o processo de usinagem também contribui para erros térmicos.

6. Memória Térmica:

As máquinas ferramentas são constituídas por diferentes materiais que respondem de forma diferente a variação de temperatura. Cada elemento necessita de um intervalo de tempo diferente para entrar em equilíbrio térmico com o ambiente. Durante esse período chamado de “soak out”, o elemento pode ter sua geometria modificada e sofrer temporariamente distorções.

Observando-se o diagrama da FIGURA 6, pode-se dizer ainda que as cinco primeiras fontes de calor descritas afetam o sistema por meio de três possíveis formas de transferência de calor: condução, convecção e radiação. O calor gerado, por sua vez, pode ser classificado em dois grupos distintos: as temperaturas uniformes diferentes de 20°C e as temperaturas não uniformes.

As temperaturas uniformes diferentes de 20°C são caracterizadas por temperaturas resultantes de influências capazes de atuar na máquina como um todo. Segundo BICUDO (1997), diferentes materiais são utilizados na construção de máquinas, ferramentas e peças, com diferentes coeficientes de expansão térmica. Quando submetidos a temperaturas diferentes de 20°C esses materiais sofrem deformações térmicas diferentes, dando origem a um erro chamado de “expansão diferencial”. As únicas fontes de calor responsáveis por temperaturas uniformes diferentes de 20°C são o ambiente e o sistema de refrigeração.

As temperaturas não uniformes englobam gradientes e variações de temperatura. Quando a máquina é ligada, seus elementos se encontram à temperatura ambiente. Com o passar do tempo, cada elemento varia sua temperatura, da ambiente

para a de regime. Como estes elementos estão em contato com a estrutura da máquina, à medida que eles aquecem, transmitem calor para a mesma. Portanto, durante este processo, a estrutura da máquina assume diversos estados térmicos.

2.2.2.2 Erros Dinâmicos

Os erros dinâmicos, por sua natureza, variam consideravelmente no tempo. Estes erros afetam as características das peças e em geral, estão associados aos movimentos ou comportamentos dinâmicos das máquinas (HOCKEN, 1980). Estes erros podem ser separados em erros do eixo árvore e erros devido a vibrações (SATO, 1998):

a) Erros devido ao eixo árvore

Muitas máquinas ferramentas possuem um eixo árvore que é o responsável pela movimentação da peça durante a usinagem, e outros em que o eixo árvore é responsável pela movimentação da ferramenta. Ele suporta a peça, como por exemplo no caso de tornos, ou a ferramenta, no caso de fresadoras e retificadoras cilíndricas, portanto, erros inerentes a ele produzem uma forte influência sobre o erro final da peça (PINOVAR apud PEREIRA, 1995). Esses erros podem ser causados por problemas de projeto, folgas, desgaste nos mancais, esforços além da capacidade do eixo, etc.

b) Erros devido a vibrações

As máquinas ferramentas estão sujeitas a uma série de fatores que causam, durante qualquer movimentação, vibrações. Alguns destes fatores são:

- c) Desbalanceamento de partes rotativas (eixos, fusos, mancais e ferramentas – rebolos, fresas, etc.);
- d) Problemas no processo de corte: ferramentas de pontas múltiplas desalinhadas; Deterioração excessiva da ponta da ferramenta; Condições de usinagem inadequadas;
- e) Problemas de movimentação de elementos devido ao desgaste das guias e mancais, etc.;
- f) Fonte externa de vibração como o solo inadequado, onde a máquina está instalada;

Os erros dinâmicos afetam as características das peças usinadas, as suas dimensões e prejudicam os componentes da máquina.

2.2.2.3 Erros Cinemáticos

PEREIRA (1995) diz que os erros cinemáticos são aqueles que ocorrem devido ao não sincronismo entre os elementos de movimentação de uma máquina ferramenta, enquanto esta executa uma operação de corte, medição, posicionamento, etc. Dentre as principais causas dos erros cinemáticos podem ser citados (BIN *apud* PEREIRA, 1995):

- a) Erros de passo de rosca de fusos e porcas ou engrenagens;
- b) Folgas;
- c) Desgastes nos pontos de contato entre os elementos;
- d) Erros de acionamentos dos motores;
- e) Erros na leitura dos encoders ou das réguas lineares.

2.2.2.4 Erros da Ferramenta e da Peça

Existem erros que estão associados às ferramentas e peças e que possuem influência significativa no erro total das peças usinadas (HOCKEN, 1980). Estes erros podem ocorrer devido a inadequada fixação de peças ou ferramentas, ao desgaste da ferramenta, às tensões internas dos materiais, etc.

2.2.2.5 Outros Tipos de Erros

Outros tipos de erros podem ocorrer em máquinas ferramentas (SATO, 1998):

- **Transgressão do princípio de Abbè**

A recomendação original do professor Abbè diz basicamente que “a linha de referência de um sistema de medição deve ser colinear com a linha de medição da peça”. Em muitos instrumentos o princípio de Abbè não é seguido, isto é, o eixo de

referência da escala do sistema de medição não é colinear com o eixo geométrico da peça a ser medida. A esta distância dá-se o nome de Braço de Abbè.

BRYAN (1979) propõe uma generalização do Princípio de Abbè e enuncia que: *“o erro de Abbè é o deslocamento que ocorre na linha de medição causada pelos possíveis movimentos angulares que surgem devido ao Braço de Abbè. Se estes movimentos angulares não estão presentes tem-se uma concordância com o princípio de Abbè”*.

Este princípio se estende as máquinas ferramentas quando, por exemplo, os sistemas de medição da máquina (encoder, régua linear, etc.) estão distantes da ferramenta de uma distância fixa. Assim, erros nos movimentos de um carro porta ferramentas podem ser amplificados por essa distância e transmitidos a peça. Isto pode resultar também em desvios de retilneidade horizontal e vertical, além de erros de posicionamento axial (SLOCUM, 1992).

Na FIGURA 7 estão apresentadas duas situações: uma, onde o eixo de medição coincide com a da escala (micrômetro) e outra, onde o eixo de medição e a escala não coincidem (paquímetro). Nesta última situação os dados do movimento angular devem ser usados para corrigir a leitura.

FIGURA 7 – Princípio de Abbè (SLOCUM, 1992)

• Propagação de Erros Numéricos

Os programas computacionais, em máquinas numericamente controladas, são utilizados para controle de movimentação e leitura de posição de seus elementos. Naturalmente, a propagação de erros numéricos nestes programas é uma fonte de erros. Estes erros podem ser minimizados através de uma preparação mais cuidadosa desses programas.

• **Erros Devido ao Princípio de Medição Utilizado na Máquina**

Na medida do posicionamento de um componente móvel de uma máquina ferramenta CNC o método de medição utilizado pode também ser afetado por diferentes tipos de erros. Segundo WECK & BIBRING (1984), existem vários métodos para se determinar uma medida de posicionamento de um componente móvel:

a) Determinação Direta ou Indireta do Valor Medido

Na determinação direta do valor medido a magnitude é obtida pela comparação entre a variável medida e um valor de referência sem um processo intermediário. Na medição indireta a variável que está sendo determinada é convertida em alguma outra quantidade física. Assim, o valor medido é dado pela aplicação de alguma relação física.

A FIGURA 8 compara três métodos de medida direta e indireta, mostrando os principais erros associados a cada um deles.

Medição Direta	Medição Indireta	
O Sistema de Medição opera linearmente e é diretamente acoplado à haste de movimentação da máquina	Carro e Transdutor - Separados	Carro e Transdutor Integrados
	Conversão de movimento linear em rotacional por pinhão e cremalheira	Medição Linear do Movimento pela rotação do fuso operante

Fontes de Erros: Temperatura Erros da Escala Erros Angulares ou Lineares Intersecção da Escala	Fontes de Erros: Erro de Passo, Pinhão / Cremalheira Excentricidade do Pinhão Temperatura Erros do Transdutor Erros na Intersecção da Cremalheira	Fontes de Erros: Deformação Elástica no Fuso Erros de Passo Desgaste no Fuso Erros no Transdutor Temperatura / Backlash

FIGURA 8 – Fontes de Erros para Aproximações Direta e Indireta na Determinação da Variável Medida (WECK & BIBRING, 1984)

b) Determinação Analógica ou Digital do Valor Medido

Um método analógico para a determinação de um valor medido é caracterizado pelo fato de que, dentro de uma determinada faixa de medidas, um valor pode ser associado continuamente a cada magnitude da variável medida. Um exemplo disso seria um potenciômetro no qual existe uma relação contínua entre a variável medida (deslocamento) e a variável analógica de saída (voltagem).

Na determinação digital de uma variável, o movimento a ser medido é dividido em partes iguais e o valor medido é expresso como um múltiplo da menor divisão. O valor medido é então obtido, pela contagem das seções individuais do deslocamento, ou pela leitura direta dos valores de posição, e deve ser avaliado e indicado pela utilização de uma unidade eletrônica.

A determinação analógica de um valor medido não permite que se trabalhe com escalas muito precisas. Um potenciômetro, por exemplo, consegue medir variações de posicionamento com acuracidade máxima de 0,01 mm. Assim, a utilização desses sistemas se restringe a máquinas e robôs de baixa precisão.

c) Determinação Absoluta ou Relativa do Valor Medido.

Em uma determinação incremental de uma variável, sinais periódicos são contados enquanto se movem ao longo do caminho de deslocamento. Como os pulsos devem iniciar em algum ponto, este tipo de medição é conhecido como *medição relativa*.

A determinação absoluta de uma variável é caracterizada pela relação fixa entre a variável medida e o valor medido. Cada posição de uma escala é relacionada unicamente com as faixas de uma barra de códigos por exemplo.

As vantagens mais importantes da medida absoluta sobre a incremental são:

- Cada valor medido está relacionado a um ponto fixo e pode ser lido diretamente, assim erros cumulativos não ocorrem;
- O correto valor medido é “armazenado” mesmo se ocorrer uma interrupção não planejada (como uma falha elétrica, por exemplo) sem a necessidade de precauções especiais.

- **Erros devido a fatores imprevisíveis**

Por mais cuidadoso que seja o operador ou perfeito que seja o processo, sempre ocorrem influências imprevisíveis que alteram as condições ideais de funcionamento da máquina, provocando assim o aparecimento de novos erros.

2.2.3 Classificação dos Erros de Máquinas – Quanto ao Comportamento

Segundo SATO (1998), os erros, de maneira geral, podem ser classificados quanto ao seu comportamento e pode-se dizer que são compostos por três parcelas distintas: a aleatória, a sistemática e a histerética:

- **Erros Sistemáticos** são os erros que permanecem constantes em grandeza e sinal ou variam, de acordo com uma lei definida, quando um número considerável de medições de um mesmo valor é efetuado sob as mesmas condições. Uma vez determinados, ocorrem de maneira previsível em todo o trabalho das máquinas. Estes erros podem ser compensados através de programas computacionais (SHEN & DUFFIE apud SATO, 1998).

- **Erros Aleatórios** por sua vez são resultados de influências externas e internas, não controladas, que provocam o aparecimento de erros não repetitivos, em geral diferem para cada leitura, podendo-se apenas ter noção dos seus limites. Tais erros somente podem ser avaliados estatisticamente (SLOCUM, 1992). Em muitos casos, assume-se que os erros aleatórios são normalmente distribuídos. Mesmo que sejam mantidas “constantes” todas as variáveis externas ou internas durante a realização dos testes, os erros aleatórios estarão sempre presentes, provocando variações nas medições sucessivas.

- **Histerese** é o erro que pode ser observado, em cada posição de medida, quando os dois sentidos de aproximação, ida e volta, são avaliados. A parte de histerese pode ser reduzida através de um projeto mais adequado e/ou ajustes mecânicos (FRENCH & HUMPHRIES apud SATO, 1998).

A FIGURA 9 mostra o resultados de uma calibração hipotética de um dos seis erros de um elemento de máquina ferramenta. Este gráfico foi criado com o erro sendo medido um certo número de vezes em cada posição do carro nos dois sentidos

de deslocamento do mesmo, isto é, ida e volta. As expressões (1) – (4) apresentadas nessa figura foram propostas por WECK & BIBRING (1984).

FIGURA 9 – Calibração Hipotética de um dos Erros Geométricos (SATO, 1998)

A parcela de erros chamada de **histerese** é a diferença entre os valores médios do erro nos sentidos de ida e volta do carro, para cada posição de medição.

A parcela **sistemática** é obtida utilizando-se a média das trajetórias de “ida e volta”. Por esta definição, os erros de “ida” e “volta” que possuírem a mesma grandeza e sinais contrários vão produzir erro sistemático nulo, apesar de presentes.

A parcela **aleatória** do erro é o valor igual a ± 3 vezes o desvio padrão. O desvio padrão é obtido a partir dos dados de erros medidos para cada posição de calibração do elemento. Este valor é determinado separadamente para cada um dos sentidos de deslocamento, porém pode-se assumir que a máquina está mecanicamente ajustada e as parcelas aleatórias dos erros são as mesmas para ambos os sentidos.

2.3. Erros Dimensionais em Retificadoras Cilíndricas

O processo de retificação é considerado de grande importância na indústria de manufatura, sendo responsável por aproximadamente 20 % de todas as operações de usinagem (OLIVEIRA *et. al.*, 1994).

A retificação de precisão é utilizada amplamente na obtenção de grande acuracidade dimensional, assim como na obtenção de qualidade de forma e de acabamento. Portanto, um dos parâmetros de grande interesse a ser controlado, durante a usinagem, em retificação cilíndrica, é o diâmetro da peça.

Os problemas dimensionais apresentados pelo processo de retificação cilíndrica são distintos em relação aos outros processos. Enquanto que em fresamento as deformações nos eixos X, Y e Z são importantes, em retificação, a distância rebolo/peça tem importância diferenciada nas operações de mergulho (BICUDO, 1997).

Ainda hoje, em grande parte das empresas de manufatura, para que as tolerâncias apertadas sejam atingidas, o operador mede a dimensão das peças produzidas por amostragem interrompendo a produção para realizar correções na máquina, quando essa dimensão está muito próxima da tolerância especificada.

Como pode ser visto na FIGURA 10, o diâmetro final da peça é determinado pelo dobro da distância entre a superfície do rebolo e o centro da peça durante a usinagem (BICUDO, 1997).

FIGURA 10 – Desvio da Posição do Rebolo (OLIVEIRA *et. al.*, 1994)

2.3.1 Fatores que Levam ao Erro Diametral da Peça

Segundo BICUDO (1997), vários fatores podem contribuir para que esta distância desejada não seja alcançada, resultando no erro diametral na peça. A seguir apresenta-se uma descrição sobre os erros mais influentes no processo de retificação e suas possibilidades de correção:

Desgaste do rebolo:

Existe uma grande tendência, em retificação de precisão, de se adotar rebolos mais duros, para se conseguir melhores manutenção da forma superficial. Esta característica desses rebolos, aliada à pequena quantidade de material retirado nas operações de acabamento, contribui para que o desgaste do rebolo seja minimizado. Para se evitar que este desgaste acumulado possa comprometer a tolerância da peça, pode-se calcular a perda diametral do rebolo por peça, e determinar o número de peças a serem usinadas entre dressagens, dentro do limite de tolerâncias. Outras maneiras de se compensar o desgaste do rebolo são por meio de medição em processo, ou simplesmente subtraindo o valor do desgaste a cada peça no CNC da retificadora.

Deformação Mecânica da Máquina:

Quando o rebolo é avançado contra a peça, durante a usinagem, as forças envolvidas no processo provocam deformações na estrutura da máquina. Na fase de centelhamento (“*spark out*”), quando o rebolo pára de avançar, a tensão acumulada faz com que este ainda avance um pouco mais. Com isso, um pouco mais de material é retirado da peça e a deformação causada pelas forças de corte é minimizada. Portanto, se o processo de usinagem inclui uma fase de centelhamento suficientemente longa, as deformações mecânicas também podem ser minimizadas.

Erros Geométricos ou Cinemáticos:

As máquinas ferramentas são compostas de várias estruturas interligadas, tais como base, mesas, guias, fusos, eixos, entre outras. O cuidado com que este conjunto é montado, assim como as características individuais de cada uma das partes, definem a geometria da máquina (HOCKEN, 1980). Como estes erros geométricos

são repetitivos, em retificação eles podem ser compensados na preparação da máquina. Como exemplo, para se compensar um erro de passo no fuso em uma operação de mergulho, basta que a coordenada da posição final do rebolo seja alterada. Um erro de paralelismo da superfície do rebolo em relação à linha de centro da peça também pode ser compensado pelo ajuste de paralelismo da mesa entre pontos.

Erros Aleatórios:

São erros não repetitivos, tais como folgas em guias e fusos e erros de acionamento. Eles definem a capacidade (C_{pk}) da máquina (FELIPE JUNIOR, 1996), que é calculada por:

$$C_{pk} = \min \left[\frac{USL - \bar{X}}{3\sigma}, \frac{\bar{X} - LSL}{3\sigma} \right]$$

onde USL e LSL representam respectivamente os limites máximo e mínimo na folha de processo para uma dada grandeza dimensional, $\bar{X}$ é a média dos valores obtidos para esta grandeza em peças usinadas pela máquina e σ é o desvio padrão dessas medidas. Idealmente aceita-se como C_{pk} adequado para uma máquina, um valor igual a 1,33 para processos estáveis e 1,67 para processos cronicamente instáveis (CARPINETTI, 2000).

Deformações Térmicas na Máquina:

Pode-se verificar que no processo de aquecimento, as máquinas sofrem grandes deformações até que seja atingida uma temperatura estável. Após esta estabilização, as deformações passam a ser de ordem menor, tendo como causa a variação de calor gerado por motores, atrito, usinagem, ambiente, entre outros. Uma das formas mais utilizadas para se minimizar os erros térmicos de uma retificadora é mantê-la ligada por várias horas antes de se iniciar a produção de peças.

2.3.2 Soluções Adotadas para Minimizar os Erros Diametrais em Retificadoras

As soluções práticas atualmente adotadas para minimizar os erros diametrais em retificadoras são (BICUDO *et. al.*, 1994):

Dressagens Frequentes:

O suporte do diamante dressador é geralmente fixado ao cabeçote porta-peças da máquina, a uma distância constante do centro da peça. A posição do rebolo é referenciada em relação às coordenadas da ponta do diamante durante a dressagem, sendo este valor atualizado no CNC. Portanto, o erro provocado por qualquer deformação que possa estar ocorrendo (na direção de mergulho) é eliminado durante uma dressagem com profundidade suficiente. Apesar de solucionar o problema, este método resulta em um consumo excessivo de rebolo e, conseqüentemente, maior custo de produção. Existe uma tendência de se utilizar rebolos mais duros, assim como os super abrasivos de alto custo em operações de acabamento, onde o desgaste em usinagem é mínimo (BRINKSMEIER & ÇINAR apud BICUDO, 1997). Esta tendência é pouco compatível como método mencionado. Frequentes dressagens também resultam em aumento de tempo não produtivo.

Medição em Processo:

Este é um método muito preciso para se conseguir a dimensão desejada da peça durante a usinagem. Um sistema de medição em processo pode medir o diâmetro da peça no início, durante ou no final do cliço de usinagem. A medição pode ser feita utilizando-se um dispositivo do tipo pinça com apalpadores. Estes entram em contato físico como a peça em rotação, podendo atingir resoluções de até 5µm (SHIRAISHI, 1989). Vale ressaltar que certos tipos de operações de retificação não se adequam a este tipo de medição entre elas:

– **Peças não Circulares:**

O sistema deve ser montado em uma superfície de referência estável na máquina para garantir alta resolução na medição. Caso lhe seja permitida a movimentação a fim de acompanhar a rotação de uma superfície não circular, sua acuracidade será afetada.

– **Peças Escalonadas de Grandes Dimensões:**

É necessário mais de um sensor para a aplicação de medição em processo neste tipo de usinagem. Isto acarreta aumento de custos.

– **Peças com Corte Interrompido:**

Algumas peças dotadas de rasgos apresentam problemas para o sensor de medição. Durante a revolução, o sensor tende a entrar no rasgo resultando em alto nível de vibração. Isto acaba prejudicando o bom funcionamento do sistema.

– **Células Flexíveis de Manufatura:**

A montagem deve permitir grande flexibilidade para que peças diferentes possam ser usinadas na mesma célula. Com isto, torna-se difícil obter uma base estável para o sistema de medição.

– **Centelhamento na Retificação:**

A fase de centelhamento na retificação é caracterizada pela remoção extra de material da peça depois de cessado o avanço do rebolo pelo CNC. Esta remoção de material é causada pelo alívio de tensão na máquina, acumulada durante a usinagem pela ação das forças de corte. A quantidade de material removida nesta fase depende de diversos fatores tais como condições de usinagem, afiação do rebolo, material da peça, etc. Por este motivo, a utilização da medição em processo torna-se menos atraente quando se utilizam ciclos de corte como centelhamento longo (ROWE *et. al.*, apud BICUDO, 1997), uma vez que, quando o sistema dá a ordem de parada do avanço, a dimensão da peça ainda sofre uma redução significativa durante o tempo de centelhamento. Tal redução diametral não pode ser controlada, resultando em um erro de medição.

2.4. Sistemas de Monitoramento

Os sistemas de monitoramento do processo de usinagem provocaram uma grande alteração nas relações entre os subsistemas que o compõem. A FIGURA 11 mostra a evolução da automação desses processos, com o advento do CNC e dos sistemas de monitoramento dedicado, mostrando as mudanças nas relações entre os subsistemas humano (H), controle CNC (C) e máquina (M).

FIGURA 11 – Evolução da Automação nos Processos de Usinagem (FELIPE JUNIOR, 1996)

Antes do CNC, a relação existente era entre o homem e a máquina. Todos os comandos da máquina eram manuais e o homem tinha que ficar o tempo todo ao seu lado executando a operação. Com o advento do CNC, a relação homem / controle passou a ser mais forte. A máquina passou a realizar operações sem o auxílio do homem, que passou a apenas programar o controle da máquina. Com os sistemas de monitoramento dedicado, a tendência é que haja relação forte somente entre o controle e a máquina. O homem ficaria somente supervisionando e, no caso de alguma falha de operação da máquina, o próprio controle resolveria o problema (FELIPE JUNIOR, 1996).

Existem diversos métodos de monitoramento dedicado que podem ser utilizados em um processo de usinagem. Esses métodos são dependentes das variáveis da máquina e do processo que serão monitoradas. Dessa forma, para determinar o método a ser utilizado, deve-se inicialmente analisar os requisitos do cliente, no caso o gerente da fábrica ou o funcionário responsável pela linha. Será ele quem fornecerá as informações relativas ao processo e/ou à máquina necessárias para a especificação dos equipamentos de *hardware* (sensores, módulos de entrada/saída, botoeira etc.) que farão o monitoramento (MEIRELES, 2000).

Atualmente, para processos de usinagem, os sistemas de monitoramento dedicado existentes são usados para monitorar as condições da ferramenta e da peça. As razões para se instalar esse tipo de sistema de monitoramento, na perspectiva do usuário, dizem respeito às melhorias da estabilidade do processo, detecção de quebra da ferramenta, redução do tempo improdutivo, compensação de erros dimensionais, verificação dimensional, entre outros (BYRNE *et. al.*, 1995)

Os sistemas de monitoramento dedicado podem enviar as informações obtidas tanto para o *software* de supervisão, onde serão processadas e visualizadas de forma clara, quanto para o próprio controle da máquina, para que este atue no processo.

Um sistema de monitoramento, segundo BYRNE *et. al.* (1995) dedicado deve possuir os seguintes requisitos:

- Tempo de resposta curto;
- Máxima confiabilidade operacional;
- Alta capacidade de integração dentro do sistema de manufatura;
- Alta robustez;
- Baixo custo de instalação;
- Operação com o usuário amigável com um mínimo de calibração;
- Tamanho reduzido;
- Mínimas modificações de instalação no sistema de manufatura;
- Baixa manutenção.

2.4.1 Sensores

Segundo MEIRELES (2000) a utilização de sensores para a realização do monitoramento nas máquinas e processos tem se tornado cada vez mais comum nas indústrias que buscam o aumento da qualidade e produtividade, uma vez que eles fornecem informações mais precisas e confiáveis. Essas informações, se tratadas de forma adequada, podem fornecer subsídios necessários para o diagnóstico preciso dos problemas das máquinas e processos e análises reais de produtividade e *status* da produção.

O uso de múltiplos sensores (combinação de diferentes sensores) está aumentando conforme o preço de cada tipo de sensor diminui. Praticamente todas as empresas que oferecem sistemas de monitoramento têm pelo menos dois tipos de sensores no mercado. Isto pode trazer vantagens, pois aproveita-se as diferentes características de cada um dos sensores, aumentando a faixa de aplicação e confiabilidade do sistema (KRISHNAMURTHY & PUGAZHENDI apud MEIRELES, 2000).

O monitoramento dos sistemas de usinagem é necessário para assegurar um ótimo desempenho dos processos e das máquinas. O foco do monitoramento pode ser tanto a máquina (monitoramento do desempenho e diagnósticos), a ferramenta (desgaste, alinhamento, lubrificação), a peça (dimensões e geometria, rugosidade, tolerâncias) e o próprio processo (formação de cavaco, temperatura, energia consumida).

Os sensores para o monitoramento do processo devem atingir os seguintes requisitos (BYRNE *et. al.*, 1995):

- A medição deve ocorrer o mais próximo possível da máquina;
- Não deve haver redução na rigidez estática e dinâmica da ferramenta;
- Não deve haver restrição de espaço útil de usinagem e dos parâmetros de corte;
- Devem ser livres de desgaste e de manutenção, ser facilmente trocados e possuir um baixo custo;
- Devem ser resistentes à sujeira, cavacos e interferências mecânicas, eletromagnéticas e térmicas;
- Devem funcionar independentemente da ferramenta e da peça;
- Devem adequar-se às características metrológicas;
- Devem transmitir o sinal de forma confiável.

Os sensores mais usados em processos de usinagem são: emissão acústica, potência, força, aceleração/vibração, deslocamento e temperatura.

2.4.1.1 Sensores de Emissão Acústica

Os sensores de EA são de fácil instalação, tanto em máquinas novas quanto em máquinas com vários anos de uso. Além disso, segundo BYRNE *et. al.* (1995), os sensores de EA são especialmente projetados quanto a sua robustez, para suportar as agressividades do meio (temperatura, óleo refrigerante, cavaco, etc.). Por serem pouco intrusivos, estão sendo utilizados com muita frequência em máquinas de usinagem, principalmente para a detecção de quebra da ferramenta.

A emissão acústica precisa de um meio físico de propagação. Os meios mais utilizados são os componentes metálicos que fazem parte da estrutura das máquinas, e que estão numa região próxima, de aproximadamente 150 mm, da região onde ocorre o fenômeno (geralmente perto da operação de usinagem). A capsula do sensor de acoplamento mecânico deve ser bem fixada à estrutura da máquina por pressão de parafuso ou por uma base magnética (GOMES, 1997).

O sensor de EA também pode ser fixado no tubo do fluido de corte, utilizando este como meio físico para propagação do sinal (BYRNE *et. al.*, 1995). A FIGURA 12 mostra o desenho esquemático da estrutura de um sensor de Emissão Acústica com acoplamento mecânico.

Uma outra alternativa é a utilização de sensores que detectam o sinal de EA diretamente do rebolo ou da peça em rotação. O sinal de EA detectado é transferido sem contato (de maneira indutiva) para um receptor fixo que está conectado à unidade de análise (GOMES, 1997).

FIGURA 12 – Estrutura de um Sensor de EA (KONIG & MEYN, 1990)

A FIGURA 13 mostra a estrutura de em sensor de EA com transmissão do sinal através de meio fluídico.

FIGURA 13 – Estrutura de um Sensor de EA com Meio Fluidico (GOMES, 1997 –
Fonte: SENSIS São Carlos)

2.4.1.2 Sensores de Potência

Um sensor de potência mede a potência consumida pelo motor ou a variação de frequência do motor, geralmente numa faixa de trabalho de 0 a 200KHz. Sua medição baseia-se no princípio de medição da corrente e da tensão do motor. Por ser de fácil instalação, os sensores de potência são utilizados em larga escala no monitoramento de máquinas de usinagem (MEIRELES, 2000)

A corrente consumida pelo motor é medida usando-se sensores de efeito Hall. O efeito é baseado na interação entre o movimento de condutores elétricos e um campo magnético externo. Nos metais, estes condutores são os elétrons. Quando um elétron se move através de um campo magnético, sobre o mesmo age uma força lateral que empurra o elétron para o lado, tornando-o mais negativo que o lado oposto. Assim, o campo magnético e a corrente elétrica produzem a chamada diferença de potencial Hall transversal, cujo sinal e amplitude dependem da intensidade do campo magnético e da corrente elétrica (JEMIELNIAK, 1999).

Os sensores de efeito Hall constituem-se numa forma de medição indireta das forças de corte através da medição da potência consumida pelo motor. A vantagem desta medição indireta das forças de corte reside no posicionamento do sensor no

motor da máquina, ou seja, isolado do ambiente industrial que, via de regra, é bastante agressivo.

2.4.1.3 Sensores de Força

Alguns sensores para medição contínua e indireta utilizados em sistemas de monitoramento avaliam as componentes da força de corte ou as grandezas derivadas a partir dessas componentes, tais como o torque. Todos os sistemas de monitoramento baseados nesse princípio utilizam o fato de que o desgaste da ferramenta causa um aumento nas componentes da força de corte (BYRNE *et. al.*, 1989)

Os sensores para medir força normalmente são formados por arruelas de carga de quartzo. Essas arruelas são transdutores piezoelétricos que convertem a deformação, provocada pela aplicação de uma força, em uma carga elétrica. Em um amplificador de carga, a carga é convertida em tensão elétrica. Devido à alta resolução do quartzo, é possível medir forças da ordem de 1N sob uma pré-carga de várias toneladas (MEIRELES, 2000).

Quando um disco de cristal de quartzo é comprimido, gera-se uma carga elétrica. Uma arruela de carga de quartzo consiste de um ou dois discos anelares de cristal de quartzo, um eletrodo e uma carcaça com um plugue. A FIGURA 14 mostra uma arruela de quartzo:

FIGURA 14 – Corte esquemático de uma Arruela de Quartzo (BYRNE *et. al.*, 1989)

Analisando a FIGURA 14, a força “F”, a ser medida, deve agir uniformemente sobre a superfície anelar. A tensão de compressão gera um deslocamento proporcional no cristal de quartzo “Q”, que é convertida numa carga elétrica. A carga produzida é captada pelo eletrodo “E” e transportada à conexão do plugue “S”. “G” representa a carcaça e “W” uma parede elástica. A polaridade é arranjada de tal modo que a força de compressão produza uma carga negativa, a qual é convertida em uma tensão positiva no amplificador de carga. Essa tensão será visualizada através de um *display*, que a converte num valor interessante ao usuário final.

2.4.1.4 Sensores de Aceleração / Vibração

Sensores que medem aceleração e vibração são conhecidos como acelerômetros piezoelétricos. Eles baseiam-se no efeito piezelétrico dos cristais de quartzo ou de cerâmica para gerarem um sinal elétrico proporcional à aceleração aplicada (MEIRELES, 2000).

Em um acelerômetro, a tensão nos cristais ocorre como o resultado da imposição de uma força da massa sísmica sobre o cristal, conforme mostrado na FIGURA 15.

Dentro da faixa de frequência especificada, essa estrutura obedece a primeira Lei de Newton: $F = m.a$. Por isso, a quantidade total de carga acumulada é proporcional à força aplicada que, por sua vez, é proporcional à aceleração.

FIGURA 15 – Acelerômetro Piezoelétrico (MEIRELES, 2000)

2.4.1.5 Sensores de Deslocamento

Sensores para medir deslocamentos são conhecidos por LVDT, que significa sensor indutivo de deslocamento linear (*Linear Variable Differential Transformer* em inglês). Seu princípio de funcionamento baseia-se na conversão de um movimento retilíneo de um objeto no qual ele está acoplado mecanicamente, em um sinal elétrico correspondente. Sua precisão varia de milésimos de milímetros até alguns centímetros. Sua estrutura interna consiste de (MACRO SENSORS CORPORATE, 2001):

- Uma bobina primária centrada entre um par de bobinas secundárias espaçadas simetricamente da primeira. Essas são enroladas em um polímero com formato cilíndrico oco, reforçado com um vidro termicamente estável, encapsuladas contra umidade, embaladas dentro de um campo magnético de alta permeabilidade e então protegidas em um cilindro de aço. A montagem cilíndrica é a parte fixa do sensor de posição;
- O elemento móvel é chamado de armadura tubular separada (feita de um material magneticamente permeável) chamado de eixo central. Ele se movimenta axialmente dentro da bobina e é acoplado mecanicamente ao objeto do qual se deseja medir o deslocamento. O diâmetro interno da bobina é grande o suficiente para assegurar o espaçamento radial com relação ao eixo central, sem nenhum contato físico entre este e as bobinas;

Em operação, a bobina primária do LVDT é energizada por uma corrente alternada e amplitude e frequência conhecidas (excitação primária). O sinal de saída é a tensão diferencial alternada entre as duas bobinas secundárias, o qual varia com a posição axial do eixo central. Geralmente a tensão de saída AC (baixa) é convertida em uma tensão DC (alta) ou corrente, uma vez que são mais fáceis e convenientes de serem usados.

A FIGURA 16 mostra os componentes de um LVDT.

FIGURA 16 – Componentes de um LVDT ((MACRO SENSORS CORPORATE, 2001))

2.4.1.6 Sensores de Temperatura

Geralmente o termopar é adotado como o transdutor de temperatura, devido a algumas de suas características (BICUDO, 1997):

- Simples construção;
- Robusto;
- Baixo Custo;
- Não requer alimentação;
- Não manifesta auto aquecimento.

Os termopares são sensores que consistem de dois fios condutores de natureza distinta, consistindo de metais puros ou de ligas homogêneas, unidos por uma ponta, formando uma junção de medição, e que produz uma pequena tensão para uma dada temperatura. Seu princípio de funcionamento resulta do fato de que quando dois fios de metais desiguais são unidos de modo a formar um circuito de pelo menos duas juntas, uma corrente flui quando as juntas estiverem com diferentes temperaturas.

Este fenômeno é conhecido por efeito *Seebeck* (MEIRELES, 2000).

Assim, uma junta de medição é exposta ao fluido ou meio o qual está sendo medido e a outra é colocada num fluido (ou meio) com uma temperatura de referência conhecida. As extremidades das juntas são ligadas a um instrumento de medição. Quando as duas juntas estão em diferentes temperaturas, uma corrente passa pelo circuito, resultando em uma tensão milesimal. Medindo-se essa tensão, determina-se a temperatura da junta de medição, em função de uma calibração adequada.

Um termopar de grande utilização é o tipo T, cujas características são (BICUDO, 1997):

- Metais Utilizados: Cobre e Constantan
- Coeficiente de Seebeck (α): $38 (\mu\text{V} / ^\circ\text{C})$
- Erro do Fio: $0.8(^{\circ}\text{C})$
- Faixa de Utilização: -270 até $400 (^{\circ}\text{C})$

A FIGURA 17 mostra um circuito básico para medição de temperaturas com termopares.

Figura 17 – Circuito de medição de temperaturas com termopares (BICUDO, 1997)

2.4.2 Encoders Ópticos Rotacionais

2.4.2.1 Introdução

Um encoder rotacional é um dispositivo transdutor que transforma a posição angular de um eixo em sinais eletrônicos. Encoders ópticos rotacionais dominam as aplicações industriais, por motivos de confiabilidade, robustez e acuracidade. Devido aos vários graus de proteção ambiental que possuem, eles se adaptam a uma grande variedade de aplicações (ORLOSKY & AVOLIO, 1997).

Todos os encoders ópticos incluem os mesmos componentes básicos:

- Alojamento de Rolamento
- Fonte de Luz
- Máscara
- Disco de Código
- Foto-Detector
- Componentes Eletrônicos
- Tampa de Proteção (Carcaça).

2.4.2.2 Tipos de Encoders

Os encoders existem em duas principais variedades:

- Os de posição absoluta;
- Os de posição incremental.

A diferença principal está na forma com que a posição do eixo é representada no disco de códigos.

A FIGURA 18 mostra uma vista explodida de um encoder rotacional óptico.

FIGURA 18 – Uma Vista Explodida de um Encoder Óptico Rotacional (ORLOSKY & AVOLIO, 1997).

A FIGURA 19 mostra o que alguns especialistas consideram “o coração do encoder”, ou seja o seu disco óptico.

FIGURA 19 – Discos Ópticos para Encoders Incrementais e Absolutos (ORLOSKY & AVOLIO, 1997)

As trilhas de código (*"code tracks"*) de um encoder incremental consistem de linhas opacas espalhadas igualmente ao redor do disco, que atuam como um escudo para a luz (proveniente do emissor), alternando um caminho aberto/fechado para esta passar em direção ao foto receptor.

O número de linhas determina a resolução de um encoder incremental. Cem linhas de trilhas correspondem a cem interrupções de luz durante uma revolução do disco de código. O sinal eletrônico gerado pela cadência da luz no foto detetor é amplificado e convertido em ondas quadradas com valores de tensão alto e baixo (*"HI"* e *"LO"*), que correspondem a luz "ligada" e luz "desligada" na foto célula.

A trilhas de um encoder de posição absoluta são interpretadas como "bits" binários, onde cada trilha tem um número de seções opacas determinadas por sua localização no disco. A resolução deste tipo de encoder é normalmente determinada pelo número de trilhas, ou seja, um encoder de posição absoluta de 8 "bits" tem oito trilhas (ver FIGURA 19).

A interface eletrônica de um encoder de posição absoluta é mais complexa que a de um encoder de posição incremental. Por exemplo, em encoder absoluto de doze bits necessita de doze linhas de saída (1 para cada trilha), mais energia, terra, neutro (ligado a carcaça), num total de quinze condutores. Pensando-se em transmitir o sinal de cada linha de maneira diferencial, tem-se que o total de condutores é acrescido para vinte e sete.

Um encoder de posição incremental com a mesma resolução necessita apenas dos canais de saída A, B e Z e seus complementos: energia, terra e neutro, num total de nove condutores (ORLOSKY & AVOLIO, 1997).

Encoders incrementais são mais comumente utilizados do que encoders absolutos nas aplicações industriais, pois eles geralmente fornecem mais resolução a um baixo custo. Entretanto, eles devem ser reiniciados a posição de referência, caso haja uma queda de energia. Os encoders absolutos devem ser utilizados em aplicações em que a informação sobre a posição absoluta de um eixo seja dada sempre, mesmo em interrupções de energia. As vantagens de um encoder de posição absoluto são vistas quando (SENTE & BUYSE, 1995):

- A posição é mudada ou monitorada de maneira não freqüente e é desejável desligar a energia do encoder até o momento em que o dispositivo deva ser interrogado;
- Quando se torna impraticável reiniciar o sistema (*“reset the system”*), por falta de uma posição de referência confiável, como no caso de comportas de diques.

Encoders incrementais são tipicamente supridos pelos sinais dos canais A, B e Z. Os primeiros dois canais são ditos estarem em quadratura, que é, simplesmente, estarem eletricamente fora de fase por 90°, o que produz quatro estados distintos em cada ciclo. Um encoder que gera 2500 ciclos/rev. pode fornecer, portanto, 10000 estados por revolução (GORDON, 2000).

Esse arranjo em quadratura do sinal elétrico permite a realização de contagens nas direções horária e anti-horária (A lidera B ou B lidera A). O canal Z ou canal de indexação (*“index channel”*) provê um sinal do tipo pulso único por revolução, que é freqüentemente utilizado para contar o número de voltas de um eixo. Este sinal pode também, adicionalmente, ser utilizado como um *“reset”* ou como um sinal de velocidade (de baixa resolução) em operações de alta velocidade (ORLOSKY & AVOLIO, 1997).

2.4.2.3 Resolução de Encoders Incrementais e de Dispositivos de Controle

O tipo de detecção dos canais de um encoder em quadratura permite que sua resolução seja aumentada. Pela contagem apenas da borda de subida e de descida de um canal (A ou B), pode-se fornecer informações de contagem iguais ao número de trilhas de um disco óptico do tipo incremental.

Se a contagem for feita pela borda de subida e de descida de um dos dois canais (A ou B), pode-se obter uma resolução igual a duas vezes o número de trilhas. Pela contagem das duas bordas (subida e descida) dos dois canais (A e B) pode-se fornecer uma resolução igual a quatro vezes o número de trilhas (GORDON, 2000).

Os projetistas de sistemas controle, que utilizam esses dispositivos ficam sempre atentos as limitações práticas das interfaces que possuem para a leitura dos

encoders. Essas limitações são dadas principalmente pelas altas frequências que um sinal de saída de um encoder pode alcançar, visto que essa frequência está diretamente ligada a rotação alcançada pelo atuador (motor elétrico, por exemplo, ao qual o encoder está acoplado).

O exemplo a seguir mostra um dos erros mais comuns na especificação dos componentes de um sistema de controle baseado em encoders (GORDON, 2000):

- Buscando uma resolução muito alta, um projetista pode especificar um encoder que produz 50000 ppr (pulsos / revolução);
- Supondo que o encoder estará ligado a um motor que imprime uma rotação ao eixo de 600 rpm. Utilizando-se de um cálculo simples ($resolução \times \frac{rpm}{60}$) verifica-se que essa especificação gera um sinal com frequência de 0.5 MHz;
- Se o contador utilizado pelo projetista tem uma faixa máxima de utilização especificada de até 20 kHz, o que implica que não conseguirá contar com precisão os pulsos.

A FIGURA 20 mostra os canais A e B de um encoder incremental e as maneiras de se efetuar a contagem, visando obter três tipos de resolução.

FIGURA 20 – Canais A e B e os tipos de contagem: 1X, 2X e 4X (GORDON, 2000)

2.4.2.4 Problemas de Ruído

Outro ponto importante a ser verificado no projeto e especificação de sistemas que utilizam encoders, é o cuidado com o sinal digital de saída (canais A, B e Z): sua transmissão e recepção. Os ambientes industriais são extremamente contaminados com ruídos devido a interferências eletromagnéticas. A transmissão diferencial ($A, \bar{A}, B, \bar{B}, Z, \bar{Z}$) do sinal faz com que esse ruído seja transmitido em ambos os fios de um condutor do tipo par trançado (um com o sinal normal e outro com sinal invertido). Na recepção do sinal diferencial deve existir um dispositivo eletrônico comparador que rejeite esse ruído, permitindo assim, caminhar com esse sinal através de grandes distâncias nesses ambientes “magneticamente poluídos”. Também na captação do sinal deve-se instalar um circuito de alta impedância, com o propósito de evitar fuga de corrente do sinal do encoder, evitando assim erros de contagem (ORLOSKY & AVOLIO, 1997).

2.4.2.5 Características Mecânicas dos Encoders

Os encoders industriais são vendidos em uma variedade de tamanhos padrão: 20, 25 e 35 polegadas ou 40, 58 e 90 mm, por exemplo. Vários pacotes comerciais de encoders se ajustam aos vários tipos de montagens e configurações existentes. A escolha do pacote correto depende fundamentalmente de como o encoder será montado. Pode-se ter montagens “*in-line*”, com o encoder fixado diretamente ao eixo ou “*offset*”, pela utilização de engrenagens ou sistemas de correia dentada. De qualquer maneira, a montagem correta deve permitir que erros de desbalanceamento não sejam transmitidos para o encoder, para que não haja desgaste prematuro dos mancais de rolamento do mesmo.

Vibração e “*shock*” são fatores adicionais a serem levados em consideração. Algumas especificações típicas para encoders industriais são (ORLOSKY & AVOLIO, 1997):

- 50 g para 11msec (“*shock*”);
- 20 g de 2 até 2000Hz (Vibração)

2.4.2.6 Fatores Ambientais

As instalações industriais são freqüentemente expostas a uma grande variedade de fatores ambientais severos. Os encoders são projetados para suportar tais ambientes e o fabricante pode ajudar muito na definição das melhores características construtivas desse, para um determinado ambiente. A normalização existente de acordo com NEMA e IEC é aplicada nos mais diferentes tipos de encoders: NEMA Class Type 1 (proteção contra poeira e toque); NEMA Class Type 13 (proteção contra óleo), etc. Em todos esses casos o usuário necessita saber o grau de proteção que ele necessita (ORLOSKY & AVOLIO, 1997).

Os limites de temperatura também são fatores ambientais considerados na especificação de encoders. Diferentes custos são associados especificações para trabalhar em ambientes que variam de -40°C até 100°C ou mais simples como de 0°C até 70°C . Algumas aplicações necessitam de operações em ambientes explosivos (pintura por robôs, mineração, petróleo, etc.). Encoders para esse tipo especial de aplicação estão disponíveis e são certificados por agências americanas e europeias (ORLOSKY & AVOLIO, 1997).

2.4.2.7 Utilização e Performance

ORLOSKY & AVOLIO (1997) explicam que uma tendência dominante nos últimos anos é a proliferação de componentes eletrônicos de controle de baixo custo, permitindo que vários segmentos da indústria façam automação com economia. Isso tem difundido a utilização dos encoders. Além disso, a utilização de circuitos integrados e pequenos encoders com microprocessadores embutidos (“on-board”) é extremamente nova e crescente, e vários segmentos industriais estão investindo no aumento da performance desses dispositivos, com o intuito de obter maior confiabilidade no controle de processos com altas resoluções, altas temperaturas e altas velocidades.

2.5. Utilização de Sistemas Baseados em Emissão Acústica para o Monitoramento do Processo de Retificação

Segundo POLLOCK (1989), Emissões Acústicas são ondas de tensão produzidas por movimentos súbitos em materiais tensionados. Essas ondas de tensão são irradiadas para dentro da estrutura (material) e, quando a tensão no material é elevada, várias dessas emissões são geradas, podendo ser observadas dentro de uma larga amplitude e de uma faixa de frequências que pode variar de 15KHz até 1200KHz durante a deformação do material (BLUM & DORNFELD, 1990).

Os reflexos e a dispersão das ondas de emissão acústica durante sua propagação no material levam a uma direção de propagação sem privilégios, ou seja, não existe uma direção específica de propagação da onda. Com isso, o nível da amplitude do sinal de EA é independente da orientação do transdutor (BLUM & DORNFELD, 1990).

As fontes de Emissão Acústica mais clássicas são a formação e a propagação de trincas e a deformação plástica do material. A FIGURA 21 mostra o processo de geração e detecção de EA.

FIGURA 21 – Princípio Básico do Método de Emissão Acústica (POLLOCK, 1989)

O movimento súbito na fonte produz uma onda de tensão, que irradia ao longo da estrutura excitando um transdutor piezoelétrico extremamente sensível (que converte o deslocamento gerado em tensão elétrica). Como a tensão no material é crescente, muitas emissões são geradas. Os sinais captados por um ou mais sensores são então amplificados e medidos para produzir dados, que são posteriormente visualizados e interpretados.

Segundo KONIG & KLUMPEN (1993) vários fenômenos físicos podem ser utilizados para monitorar o processo de retificação, porém, a Emissão Acústica (EA) é um meio particularmente adequado para o monitoramento da retificação e da dressagem, principalmente no ambiente hostil do chão de fábrica (altas temperaturas, altos volumes de fluido refrigerante, desgaste do abrasivo, formação de cavaco, etc.).

Segundo GOMES (1997) a EA é altamente sensível em operações com baixa taxa de remoção de material, não apresenta variações devido à temperatura (*"temperature drift"*) como a medição de força e o crescimento do nível do sinal em resposta a uma excitação, e é muito rápido se comparado com outras variáveis, como por exemplo variações da corrente do motor ou medição de força. A hipótese básica para utilização de EA com o propósito de otimizar e controlar o processo de retificação é que ela contém informações de interesse sobre o micro-fenômeno mecânico desse processo: formação de cavaco, desgaste do rebolo e dressagem.

DORNFELD & CAI (1984) são os pesquisadores pioneiros na utilização da análise do sinal de EA para realizar o monitoramento do processo de retificação, visando a automação do mesmo e a investigação dos fenômenos ocorridos. Nesse trabalho o sinal de EA, gerado durante uma operação de retificação plana, foi utilizado para medir o empastamento do rebolo, o momento do contato peça / rebolo na aproximação e a perda de contato peça / rebolo no final do centelhamento (também chamado de *spark out*, é a fase de alívio das deformações elásticas do sistema máquina / peça / ferramenta (rebolo) provocadas pelas forças de retificação).

Segundo DORNFELD (1992) as altas velocidades relativas entre o rebolo e a 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 da sua baixa remoção de material.

Os fenômenos relacionados com a formação do cavaco na retificação podem ser subdivididos em duas fases: Inicialmente ocorre somente um escorregamento do grão abrasivo sobre o material. Esta fase é chamada de elástica. Na segunda fase começam a ocorrer 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 acompanhados por fenômenos relacionados ao rebolo: desgaste do grão abrasivo e fratura da liga. A intensidade destes fenômenos é diretamente proporcional ao sinal de EA mensurável.

A FIGURA 22 mostra as principais fontes de EA na retificação.

FIGURA 22 – Principais Fontes de EA na Retificação de Metais – V_s (Rebolo) e V_w (Peça) (KONIG & MEYEN, 1990)

Segundo KONIG & 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 dos 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 de dressagem.

2.5.1 Processamento do Sinal de EA

Em todo processo de monitoramento, dependendo do tipo de sensor, da sua fixação e da sua localização na máquina, o sinal gerado pode conter ruídos, que são sinais indesejáveis produzidos por outros elementos do monitoramento ou características do processo ou da máquina. Estes ruídos podem ser minimizados (a um nível aceitável) através do tratamento do sinal. As principais formas de tratamento de sinal são, segundo FELIPE JUNIOR (1996):

- Filtragem: consiste em extrair a característica física do sinal que mais é relacionada ao fenômeno, através da utilização de filtros de frequência;
- Retificação: transformação do sinal alternado com zero centrado para sinal contínuo com mínimo valor zero;
- RMS (*“root mean square”*): faz a retificação do sinal e calcula a sua média quadrática em intervalos de tempo determinados. A média RMS é muito utilizada nos sinais de Emissão Acústica.
- FFT: Transformada rápida de Fourier: apresenta o conteúdo de frequência do sinal, para se fazer uma análise de qual seria o campo de frequência onde ocorre o fenômeno que se deseja monitorar;
- Média e Desvio Padrão: Utilizados para determinar o valor médio e a dispersão de um sinal medido, respectivamente. Essas características podem ser resumidas pelos momentos da distribuição, ou derivadas. Uma distribuição é considerada completamente especificada desde que todos os seus momentos sejam conhecidos. Entretanto, muitas distribuições podem ser adequadamente descritas pelos quatro primeiros momentos. O primeiro momento é sempre zero. O segundo momento da média é uma medida de dispersão e é chamado variância, e a raiz quadrada da variância é o desvio-padrão;
- Derivação: utilizada para detectar variações dinâmicas no sinal;
- Skewness: o terceiro momento da média está relacionado com a assimetria de uma distribuição;
- Kurtosis: o quarto momento da média é relacionado à forma da área da distribuição, que pode ser achatada ou alongada em relação a uma distribuição normal.

KLUFT (1994) descreve um sistema de processamento de sinal utilizado num pré amplificador de EA fabricado pela empresa PROMETEC. A FIGURA 23 apresenta um esquema do sistema.

FIGURA 23 – Processamento de Sinal em um Amplificador de EA, KLUFT (1994)

Inicialmente o sinal proveniente do sensor de EA é amplificado em um amplificador ajustável. Depois, o sinal passa por um filtro passa-banda para eliminar a interferência de acionamentos de avanço, caixas de redução, mancais e outros componentes, garantindo assim uma relação sinal-ruído ótima. A partir desse ponto, somente o sinal referente a usinagem continua no sistema.

O sinal de EA já filtrado é então demodulado por meio de um retificador e depois passa por um filtro passa-baixa. O nível de saída resultante é indicativo do estado do processo. Um sinal condicionado desta maneira, pode ser transmitido sem interferência por distâncias que podem alcançar dezenas de metros no sistema de controle, uma vez que não contém altas frequências como no sinal bruto de EA.

O tratamento de sinal de EA como descrito, oferece um meio altamente sensível de monitorar processos de retificação, como a cilíndrica externa, a *centerless*, a de superfície e a dressagem com ferramenta fix (GOMES, 1997).

A FIGURA 24 mostra o sinal de EA bruto e o seu valor RMS:

FIGURA 24 – Sinal bruto de EA (“raw signal”) e valor RMS (“root mean square”) (FELIPE JUNIOR, 1996)

2.5.2 A Utilização de EA para a Detecção de Contato Rebolo / Peça

Segundo OLIVEIRA *et. al.* (1991) a minimização do tempo de corte no ar durante a aproximação do rebolo até tocar na peça em um processo de retificação, pode ser alcançada através da técnica de EA, que pode atuar como um eliminador de folga entre o rebolo e a peça. Durante o ciclo de retificação em mergulho de uma peça, o rebolo segue uma trajetória predefinida.

A FIGURA 25 mostra essa trajetória.

FIGURA 25 – Ciclo de Retificação em Mergulho (KLUFT, 1994)

O rebolo aproxima-se da peça com velocidade alta até uma distância segura, maior que o máximo sobremetal existente, deixando uma folga de segurança.

A partir desse ponto, o rebolo passa a se mover com velocidades de corte de desbaste e depois de acabamento (mais lentas) até atingir o diâmetro final. Antes de tocar a peça e começar a usiná-la, o rebolo faz uma retificação em vazio, chamada também de corte em vazio ou corte no ar.

Devido as variações dimensionais permitidas pela tolerância dos processos anteriores, a retificação considera, quase sempre, a peça maior do que ela é. Se uma determinada peça estiver com o sobremetal próximo do valor mínimo e este tiver uma tolerância muito aberta, o corte em vazio compreende um tempo significativo, durante o qual a peça e o rebolo não se tocam.

INASAKI (1985) afirma que em uma máquina equipada com um sistema detecção de contato rebolo/peça, que apresente um alto nível de confiabilidade, pode-se aumentar a velocidade de avanço do rebolo contra a peça, reduzindo-se consideravelmente o tempo gasto sem usinagem durante o processo.

Os “eliminadores de folga” estão sendo desenvolvidos para este propósito e um dos métodos mais aplicados é o da detecção do crescimento da potência de

retificação. Entretanto, esse método apresenta um nível de confiabilidade que pode ser aquém do necessário.

A FIGURA 26 mostra uma comparação realizada por INASAKI (1985) entre o comportamento dos níveis dos sinais de EA e de potência, no momento do contato entre o rebolo e a peça.

FIGURA 26 – Detecção de Contato Rebolo / Peça com Sensores de EA e de Potência (INASAKI, 1985)

Analisando a FIGURA 26 verifica-se que o contato rebolo/peça é detectado mais rapidamente pelo monitor de EA do que pelo monitor de potência elétrica.

Isto ocorre porque o monitoramento por EA é capaz de detectar o contato das arestas de corte com a peça, enquanto que o monitoramento por potência elétrica recebe um sinal atrasado, pelo amortecimento imposto pela inércia das massas em movimento, como por exemplo: rebolo, flange, polias, eixo do motor, etc. (GOMES, 1997).

DORNFELD & CAI (1984) realizaram uma pesquisa onde medem a variação do nível do sinal de EA durante a aproximação rebolo/peça em uma máquina retificadora plana.

A FIGURA 27 mostra a variação do sinal de EA com o valor da distância rebolo/peça (H).

FIGURA 27 – Variação do nível do sinal de EA com a distância H (DORNFELD & CAI, 1984)

Nessa pesquisa são identificadas três regiões distintas:

- Na primeira não há variações significativas do nível do sinal de EA ($H > 22,9 \mu\text{m}$);
- Na Segunda região, a mudança do nível do sinal é crescente, a partir do nível de “ruído” do sistema, pois há a interação entre o rebolo e o fluido de corte ($H \approx 5,1 \mu\text{m}$);
- Na terceira região, inicialmente ocorre a interação rebolo/fluido de corte/peça e, logo em seguida, o contato rebolo/peça. Nesta região H vai de $5,1 \mu\text{m}$ a zero, ou seja, ocorre o toque do rebolo na superfície da peça.

No caso da detecção de contato, o valor RMS do sinal de EA apresenta uma grande diferença entre o nível anterior e o nível posterior à ocorrência do evento. Logo, as desvantagens do sinal de EA, como por exemplo saturação ou variações do

nível do sinal (devido às configurações máquina/peça/rebolo) não interferem significativamente na detecção do contato (GOMES, 1997).

A utilização de Sistemas de Monitoramento baseados no sinal de Emissão Acústica na retificação tem crescido nos últimos anos.

Porém, muitos desses sistemas, criados nos últimos cinco anos, ainda apresentam características não funcionais no ambiente industrial, apesar do considerável esforço feito em pesquisas.

A FIGURA 28 mostra um diagrama com a posição industrial e a posição da pesquisa científica em relação a alguns problemas relevantes associados as várias operações de retificação.

O diagrama da figura também aponta os sensores/quantidades e suas possíveis aplicações, para uma determinada solução.

FIGURA 28 - Problemas Relevantes em Retificação para Monitoramento (FELIPE JUNIOR, 1996)

Duas características principais podem ser identificadas no diagrama da FIGURA 24: o montante de problemas industriais em retificação ainda não resolvidos e o potencial uso de EA para resolver tais problemas.

A maioria dos sistemas baseados em EA disponíveis no mercado, utilizam um *threshold* dinâmico ou estático a ser comparado com um valor RMS de EA dada uma determinada configuração de filtros e ganhos. Assim, o nível RMS do sinal de EA é a principal característica a ser utilizada em qualquer estratégia de controle/monitoramento nesses equipamentos. As principais limitações na análise do sinal de EA são as mudanças imprevisíveis na linearidade e na amplitude desse ao longo do tempo.

2.6. A Retificação Inteligente

A retificação é um processo de acabamento e normalmente é a última operação de usinagem executada em uma peça, fornecendo a qualidade superficial e a dimensão final, que é um dos pontos de partida para a programação de uma máquina retificadora.

A dimensão final da peça tem um valor nominal e uma tolerância, entretanto, na programação de uma retificadora CNC convencional, apenas um único valor pode ser fornecido à máquina. Segundo FELIPE JUNIOR (1996), deve-se partir de dois limites para determinar e utilizar um único valor na retificadora. Essa dimensão única, utilizada na programação, é definida como a dimensão final de retificação (Df).

Os valores USL e LSL representam, respectivamente ao limites máximo e mínimo na folha de processo, no desenho que é enviado para o programador da retificadora. A determinação de Df não obedece nenhum critério bem definido, porém, um valor muito utilizado por programadores é o valor da dimensão média

$$\frac{(USL + LSL)}{2}.$$

Outras vezes o valor de Df é aproximado do valor LSL , para que um eventual desgaste radial do rebolo permita que a peça continue sendo produzida dentro da faixa de tolerâncias.

O que ocorre normalmente é que, apesar do valor de Df ser definido durante a fase de programação da máquina existe, no procedimento de setup, uma correção feita pelo operador, que é baseada na sua experiência e no desenho de fabricação da peça (com suas dimensões). Com essa correção, qualquer valor de Df programado pode ser modificado no setup. Tal mudança não é normalmente informada ao programador e isso faz com que ele tenha a sensação de que seu critério é sempre ideal, o que muitas vezes não é verdade. Esse procedimento torna bastante difícil a automação do processo.

FELIPE JUNIOR (1996) considera necessário garantir que os valores e critérios determinados pelos programadores sejam realmente corretos e não necessitem de ajustes do operador. Para isso, são propostas funções inteligentes para a máquina retificadora, através da utilização de técnicas de monitoramento.

A Retificação Inteligente (RI) é portanto definida, como a retificação com alto nível de informação, que faz uso de diversos sistemas de monitoramento, para controlar o processo de forma automática, tomando decisões baseadas nas informações monitoradas e com mínima interferência do operador.

Para implementar a R.I. é preciso ter conhecimento das características e grandezas do processo, das qualidades desejadas na peça e das técnicas disponíveis de monitoramento, bem como suas capacidades e limitações.

Dentre as funções de R.I já implementadas de maneira prática, destacam-se: a detecção de contato ("*gap less*"), detecção de falhas na peça, calibração da posição do rebolo, dressagem inteligente, sistema anti-colisão e decisão de dressagem.

2.6.1 Sistema de Detecção de contato

O sistema de detecção de contato ("*gap less*") é utilizado para diminuir o tempo de ciclo de operação da retificação.

No esquema mostrado na FIGURA 29 o rebolo avança com velocidade de acionamento rápido até um ponto próximo da peça (1). A partir daí passa a se mover com uma velocidade menor até que o contato seja detectado em (2). A velocidade é então alterada novamente (para velocidade de corte) e o rebolo retifica a peça até a dimensão final Df em (3).

FIGURA 29 – Diagrama Esquemático do Ciclo de Detecção de Contato (FELIPE JUNIOR, 1996)

Além de detectar a peça indicando onde começar a retificação, a detecção de contato pode também detectar erros de fixação (batimento) ou a ausência da peça. O sistema de detecção de contato pode ser uma ferramenta útil não só para reduzir o tempo de retificação em peças com maior dispersão dimensional, como também para fornecer elementos para uma decisão sobre qual a melhor estratégia de retificação para cada peça.

É importante determinar na detecção de contato qual deve ser a posição do rebolo, na qual a detecção é ativada, ou seja, a posição (1). Este valor deve ser o mais próximo possível da peça, pois a partir deste ponto a velocidade de avanço do rebolo é reduzida. Esta dimensão é chamada então de dimensão mínima de contato D_{cmin} . Deve ser também estabelecida uma posição final (4), no qual o sistema conclui que não há peça fixada ou a peça está abaixo das dimensões mínimas necessárias para realizar a retificação.

Para determinar do valor D_{cmin} é necessário primeiro conhecer algumas características do processo de fabricação da peça: quais os desvios de forma ocorridos na operação anterior, qual o sobremetal necessário para a retificação e qual a dimensão final a ser obtida. Cada uma destas grandezas tem suas tolerâncias, o que permite a obtenção de valores máximos e mínimos de sobremetal. A eq. 2 define o valor mínimo da dimensão final da peça D_{fmin} em função do LSL e a eq. 3 define o valor mínimo de contato D_{cmin} (FELIPE JUNIOR, 1996):

$$S_{min} = \text{máx.} [\textcircled{\circ}, \bigcirc, \bigcirc, \nearrow] + R_{\text{máx}}(ant.) + R_{\text{máx}}(at.) + (gap) + K \quad (2)$$

Onde:

$\textcircled{\circ}$ $\bigcirc$ $\bigcirc$ $\nearrow$ são os possíveis erros de orientação, forma e batimento da operação anterior;

$R_{\text{máx}}(ant.)$ é a rugosidade máxima da operação anterior;

$R_{\text{máx}}(at.)$ é a rugosidade máxima da operação atual;

gap é a dimensão da marca deixada pela detecção de contato;

$K = f(\text{rigidez, taxa de remoção, agressividade do rebolo})$ pode ser estimado em função do erro de forma permitido para a peça:

- $K = 0.01$ a 0.05 mm para acabamento em máquinas rígidas com baixa remoção de material e materiais fáceis de usinar;
- $K = 0.05$ a 0.1 mm para acabamento em máquinas pouco rígidas com maior remoção de material e materiais fáceis de retificar;
- $K = 0.1$ a 0.2 mm para acabamento em materiais difíceis de retificar.

O valor mínimo de contato é dado por:

$$D_{cmin} = D_{fmin} + S_{min} \quad (3)$$

A velocidade do rebolo durante a detecção de contato deve ser determinada de acordo com o valor do gap desejado ou permitido pelo processo. Uma recomendação

prática seria permitir um valor *gap* máximo de 1/3 do sobremetal da peça. O limite para o sinal de EA no contato deve ser mínimo.

2.6.2 Sistema para Detecção de Falhas

Uma vez iniciada a retificação, o contato rebolo/peça deve tornar-se cada vez mais contínuo, conforme o rebolo retira da peça imperfeições e desvios, e deixa sua superfície circular:

- No instante 1, é feito o primeiro contato do rebolo com a peça e a retificação começa a remover o material;
- No instante 2 há 5 pontos de contato;
- No instante 3 há contato quase completo, mas ainda restam 3 falhas em regiões onde o rebolo não toca na peça;
- No instante 4 há apenas uma falha e no instante 5 a peça está totalmente limpa, pronta para começar o centelhamento.

A FIGURA 30 mostra uma peça com perfil irregular e a evolução da retificação em cinco instantes.

FIGURA 30 – Remoção de Material na Retificação (FELIPE JUNIOR, 1996)

Ao atingir o centelhamento, a peça deve estar totalmente circular e sem falhas. Nesse momento, o sinal de EA gerado pelo contato rebolo/peça tem que ser contínuo, indicando que a superfície da peça foi totalmente retificada. Qualquer variação nesse sinal pode indicar que a peça ainda apresenta falhas.

As oscilações do sinal de EA podem ainda ser causadas por desbalanceamentos do rebolo que geram variações na profundidade de corte. Neste caso o sistema indica a necessidade de balanceamento ou iniciar o balanceamento automático se a máquina o possuir.

Para realizar a detecção de falhas de sobremetal é preciso estabelecer uma janela de tempo na qual o sinal de EA é monitorado. Isto pode ser feito através da utilização de temporizadores juntamente com o sistema de monitoramento. A janela deve começar após o início da fase de centelhamento e deve ter duração suficiente para que a peça dê mais uma volta completa, terminando ainda na fase de centelhamento. Os temporizadores têm que ser acionados juntamente com o início do ciclo de retificação, para que a janela se inicie sempre no mesmo ponto do tempo (FELIPE JUNIOR, 1996).

Na FIGURA 30 se a fase de centelhamento começa, por exemplo, no instante 4, uma falha é detectada. Nesse caso a peça pode ser rejeitada e separada, podendo depois ser retrabalhada se existir sobremetal suficiente.

Para que o sistema de detecção de falhas funcione adequadamente, é necessário que seja feita a regulação da constante de tempo do sistema de monitoramento de acordo com a falha que se deseja detectar. Essa constante de tempo é definida por capacitores em sistemas de monitoramento analógico e indica ao sistema quanto tempo ele deve utilizar para o cálculo do valor médio do sinal de EA.

Supondo que na retificação de uma determinada peça deseja-se detectar falhas a partir de um tamanho mínimo, conhecendo a rotação da peça e o seu diâmetro pode-se determinar qual a duração do contato da falha com o rebolo em cada volta. A constante de tempo deve ser então menor que esta duração, caso contrário a falha pode coincidir entre dois pontos registrados e não ser detectada. A constante de tempo Ct pode ser calculada a partir da rotação da peça n [rpm], do seu diâmetro ϕ [mm] e da dimensão mínima da falha que se deseja detectar df [mm] (FELIPE JUNIOR, 1996):

$$Ct < \frac{60.df}{n.\pi.\phi}$$

Para se detectar uma falha de 0,5 mm em uma peça de 50 mm de diâmetro, girando a 140 rpm, a duração do contato entre o rebolo e a falha é de 0,00136 s e, portanto, a constante de tempo deve ser menor que este valor.

Deve-se ressaltar que se a constante de tempo for demasiadamente pequena, isto implicará em um sinal com variação bastante alta. Isso se dá porque essa constante atua como uma espécie de filtro em sistemas analógicos, eliminando parte do sinal, deixando apenas o suficiente para realizar o monitoramento do fenômeno que se deseja monitorar ou controlar.

2.6.3 Sistema para Calibração da Posição do Rebolo

A calibração do rebolo pode ser utilizada para atualizar a sua posição, compensando os desgastes radiais ou as deformações térmicas da máquina retificadora, que provocam erros na dimensão final da peça (Df).

Um sistema de calibração foi desenvolvido pelo Engenheiro João Jorge em sua dissertação de mestrado (GOMES, 1997). Tal sistema faz a calibração da posição do rebolo através de uma operação de detecção de contato desse, com um diamante de calibração, distante do centro da peça de uma posição conhecida.

Os diamantes utilizados na calibração não devem ser os mesmos utilizados para a dressagem, pois eles necessitam sofrer desgaste muito pequeno, afim de manter sua posição conhecida por mais tempo. Além disso, devem apresentar maior área de contato, para minimizar as marcas feitas no rebolo durante o processo (FELIPE JUNIOR, 1996).

A detecção do contato é realizada por um monitor de EA capaz de se comunicar com o CNC da máquina, que por sua vez é programado para receber entradas externas em forma de pulsos (que representam o exato instante da detecção).

A FIGURA 31 mostra a configuração do sistema:

FIGURA 31 – Sistema de Calibração da Posição do Rebolo (GOMES, 1997)

A rotina de calibração é descrita a seguir:

1. Na primeira etapa é executada uma aproximação rápida do rebolo, até próximo do topo do diamante de calibração;
2. Na segunda etapa é utilizada uma velocidade intermediária para avançar até alguns décimos de milímetro de distância do diamante. Esta é uma etapa de segurança contra colisões;
3. Na terceira etapa o avanço contra o diamante é lento, visando a operação de detecção de contato por EA;
4. A quarta etapa começa quando o monitor de EA detecta o contato e ordena ao CNC que recue o rebolo rapidamente alguns décimos de milímetro;
5. Na quinta etapa, após recuar, o CNC atualiza a posição do rebolo com a posição do topo do diamante mais a distância recuada.

2.6.4 Sistema de Dressagem Inteligente

Quando as peças retificadas começam a apresentar algum problema no acabamento superficial ou erros de forma ou tolerância, normalmente a dressagem é

realizada para corrigir o rebolo, devolvendo-lhe o perfil original e restabelecendo suas características de afiação.

Para garantir que uma operação de dressagem seja bem feita, geralmente são feitos diversos passes em seqüência, o que provoca um desgaste desnecessário do rebolo e do dressador. Além disso, se o rebolo apresentar desgaste radial acentuado, os primeiros passes de dressagem são efetuados em vazio, pois normalmente a dressagem é feita através de um programa CNC que compensa o valor dressado nas coordenadas do rebolo e mantém as coordenadas do dressador. Assim, na próxima dressagem, o rebolo se desloca para a posição da dressagem anterior, o que significa tempo de ciclo perdido.

Segundo FELIPE JUNIOR (1996), a dressagem inteligente visa amenizar estes problemas, através da detecção da posição do rebolo e do monitoramento da operação. Através da calibração da posição do rebolo, vista anteriormente, pode-se eliminar a dressagem em vazio. Pelo conhecimento do processo, pode-se determinar a região do rebolo que menos se desgastou (caso o desgaste não tenha sido uniforme, como no caso da retificação de acentos de rolamento de pequena largura) e depois utiliza-la para fazer a detecção de contato. Uma vez determinada a posição do rebolo, a dressagem tem início e é monitorada através de EA, para garantir um perfeito restabelecimento do perfil. O nível de EA deve permanecer acima de um limite preestabelecido, durante toda a dressagem. A dressagem é feita em duas etapas:

- Na primeira, é utilizada alta profundidade de dressagem a_d (da ordem de 50 μm) e máxima velocidade, com $u_d=1$, ou seja, o passo de dressagem s_d (quanto o dressador anda por revolução do rebolo) é igual a largura de contato do dressador b_d . Este procedimento é repetido automaticamente diversas vezes, dentro de um limite máximo (utilizado para que não ocorra a dressagem contínua do rebolo), até que o sistema de monitoramento indique que a dressagem não apresenta falhas;
- Após corrigido o perfil, um último passe de dressagem de acabamento é realizado, com profundidade a_d e grau de recobrimento u_d de acordo com as necessidades do processo as qualidades que se deseja obter na peça.

A FIGURA 32 mostra os passes de dressagem seguidos, que são efetuados até a obtenção da correção do perfil do rebolo.

FIGURA 32 – Dressagem para Eliminação de Falhas (FELIPE JUNIOR, 1996)

2.6.5 Sistema para Detecção de Colisão

Durante a movimentação de posicionamento do rebolo, normalmente realizado em velocidades elevadas, nenhum sinal de retificação deve ser registrado. Assim, qualquer sinal gerado pelo rebolo durante estes movimentos deve ser considerado anormal, indicando que o rebolo entrou em contato com alguma parte da máquina ou da peça de maneira não esperada. Um sistema de monitoramento por EA pode ser ajustado para verificar possíveis sinais durante essas movimentações.

Se algum sinal for detectado, o sistema emite um aviso de colisão ao CNC da máquina, que desligará o rebolo e afastará o cabeçote, prevenindo assim, possíveis acidentes. Este sistema foi implementado em uma máquina retificadora a comando numérico ZEMA, modelo G800, cuja função de avanço rápido é G00. A lógica programada no CNC, que monitora continuamente o sinal de EA, é mostrada na FIGURA 33.

FIGURA 33 – Lógica Programada para o Sistema Anti-Colisão

3. Desenvolvimento Experimental

3.1. Introdução

O objetivo da parte experimental é testar o desempenho do sistema de medição em processo. Com este sistema pretende-se medir a dimensão e o batimento de fixação das peças. O resultado dessa medição pode ser utilizado para se corrigir a operação de usinagem anterior, avaliar sua capacidade ou ainda avaliar o volume de material retirado para obtenção dos parâmetros de dressagem do processo de retificação (relação G e peças por dressagem).

O experimento consiste na usinagem de peças através de uma operação de retificação cilíndrica de mergulho variando-se os diâmetros num determinado intervalo, definido pelos valores padronizados para assentos de rolamentos. Com isso, pode-se levantar dados suficientes para avaliação do sistema de acordo com os métodos de avaliação de instrumentos de medição.

Os principais objetivos dos ensaios realizados são:

- Analisar o comportamento do sistema de medição;
- Avaliar a repetibilidade do sistema;
- Avaliar o desvio sistemático do sistema;
- Apresentar uma metodologia para aplicação do sistema em sistemas produtivos.

3.2. Banco de Ensaios

A máquina utilizada nos ensaios foi uma retificadora cilíndrica externa CNC da marca ZEMA, modelo G800. A FIGURA 34 mostra um esquema tridimensional da máquina.

FIGURA 34 – Máquina Retificadora ZEMA G800

Três programas CNC foram utilizados: um para dressagem, que era feita em cada intervalo de troca de peças, um para calibração e outro, para retificação do colo central de um eixo, em dez diferentes posições ao longo do seu comprimento. O rebolo utilizado foi o AA80G6V (utilizado na maioria das aplicações industriais para aço).

3.3. Hardware para Aquisição dos Sinais

A FIGURA 35 mostra o esquema de montagem da bancada de ensaios.

FIGURA 35 – Esquema da Bancada de Ensaios

Cinco sinais principais são utilizados no sistema proposto: o sinal com o valor RMS de EA, os sinais dos canais A e B do encoder do carro transversal e os sinais de 5V emitidos pelos comparadores 1 e 2 (cujo período pode ser configurado). Para captar e tratar o sinal de EA foi utilizado um aparelho produzido pela empresa SENSIS, modelo DM42. Este aparelho utiliza um microprocessador digital para realizar as funções de filtragem e amplificação do sinal, com dois canais de entrada e dois canais de saída (um com o valor RMS do sinal e outro com o valor bruto “RAW”). O aparelho também possui uma interface CNC que possui saídas de comparadores lógicos. Esses comparadores lógicos são utilizados como sinal de trigger para o software de aquisição. O sinal do encoder é captado diretamente da entrada do Controlador Lógico Programável (CLP). Para isso, um chip de rede foi utilizado por dois motivos:

- Pela necessidade de não haver fuga de corrente na entrada do CLP (prejudicial ao correto funcionamento da máquina), o que exigiu um chip com alta impedância de entrada;
- Pela necessidade de se transmitir o sinal dos canais A e B do encoder de maneira diferencial, devido a problemas de interferência eletromagnética comum no ambiente industrial. O chip utilizado foi um MAXIM – MAX487, que transmite um sinal de maneira diferencial por um cabo UTP.

Após transmitir o sinal do encoder via rede ele deve ser decodificado, o que é feito pelo mesmo chip transmissor. Os sinais provenientes dos canais A e B, decodificados, são então direcionados para um chip de tratamento. Esse chip é da marca HP (modelo HCTL-2020) e tem por finalidade converter os sinais dos canais A e B em um sinal de contagem (que permite que a resolução seja multiplicada por 4) e um sinal de sentido de rotação (up / down). O sinal devidamente tratado é então introduzido no acessório auxiliar da placa de aquisição.

O sinal de EA proveniente do sensor (fixado no contraponto direito da peça) é amplificado e filtrado no aparelho DM42. O acessório da placa de aquisição recebe então três sinais provenientes desse aparelho:

- Um sinal RMS de EA;

- Um sinal de 5 V proveniente do comparador 1 na interface CNC;
- Um sinal de 5 V proveniente do comparador 2 na interface CNC;

A FIGURA 36 mostra a Foto da montagem da placa de circuito impresso utilizada no sistema de transmissão diferencial, colocada na entrada do controlador CLP, no painel da máquina.

FIGURA 36 – Montagem da Placa de Circuito Impresso no Painel da Máquina, para Transmissão dos Sinais do Encoder

A Figura 37 mostra a Foto da placa de circuito impresso utilizada na recepção (decodificação) do sinal pela rede de transmissão RS-485.

FIGURA 37 – Placa de Circuito Impresso para Recepção do Sinal

A FIGURA 38 mostra a Foto das placas de circuito impresso de recepção e tratamento dos sinais do encoder (canais A e B).

FIGURA 38 – Placas de Circuito Impresso que Fazem a Recepção e a Codificação dos Sinais do Encoder

Os sinais de contagem e o sinal up/down (sentido de rotação do encoder) vão para a placa de aquisição (através do acessório), que possui um contador digital e um canal de referência para realizar a contagem de crescente ou decrescente.

O comparador 1 é configurado para acionar o sinal de 5V quando o rebolo toca na peça: O aparelho de EA é configurado de maneira que o sinal proveniente do sensor tenha um alto valor de ganho de entrada, para que esse fique extremamente sensível ao contato, tendo uma característica de ganho quase vertical em relação a uma escala de tempo.

O comparador 2 é configurado para acionar o sinal de 5V quando os erros de forma da peça são corrigidos: Se a peça apresentar um erro de batimento (causado por problemas de fixação e/ou de circularidade), geralmente ela não toca o rebolo em toda a sua superfície. O sinal de EA então, de característica alternada, oscila a cada volta da peça, retornando ao valor zero nas posições onde o rebolo não toca na peça. Com o tempo, se o sobremetal for suficiente, a retificação consegue corrigir esses erros (isto é, a peça começa a tocar completamente no rebolo) até um valor tido como aceitável antes do período de “Spark Out”. Com isso a amplitude de oscilação do sinal é reduzida e seu valor mínimo se torna diferente de zero. Ao aumentar, este último passa pelo valor de “trigger” estabelecido pelo comparador 2. Quando o sinal

alternado tem um valor mínimo acima desse valor, um “timer” de tempo é ativado para que a peça complete uma rotação. Com o tempo do timer encerrado e o valor RMS acima do limite 2 durante todo o período, o comparador dispara um sinal de 5V na saída, informando que a peça foi corrigida e está dentro dos limites especificados. Este sinal é utilizado para armazenar a posição do rebolo nesse instante.

A FIGURA 39 mostra três sinais: o nível RMS de EA, a saída do comparador 1 e a saída do comparador 2.

FIGURA 39 – Sinal de EA (RMS) e das Saídas dos Comparadores 1 e 2

A linha vermelha (sinal do comparador 1) indica a posição onde o sistema detectou o primeiro contato do rebolo com a peça e a linha vermelha (sinal do comparador 2) indica o ponto a partir do qual a peça foi totalmente centrada.

3.4. Software Utilizado

O software utilizado neste experimento é chamado LabView®. Este consiste em um ambiente de trabalho gráfico, que permite a criação de instrumentos virtuais (VIs), os quais podem ser manipulados para implementar uma determinada lógica, necessária ao cumprimento dos requisitos da manipulação ou aquisição de sinais. Para isso, ele se comunica com uma placa de aquisição (de barramento PCI), ligada ao microcomputador, através de drivers próprios. A placa lhe fornece a todo o tempo quatro sinais (O trem de pulsos do Encoder, UP/DOWN, e os dois sinais dos comparadores), dos cinco utilizados na realização do experimento. A lógica da VI criada com a finalidade de implementar o sistema consiste em:

- Monitorar constantemente a posição X da superfície do rebolo, dada uma referência pré-estabelecida na máquina no início de ciclo de retificação;
- Quando o comparador 1 libera um sinal de 5V, este ativa um sinal digital de na placa de aquisição, que o software utiliza para determinar a variável P1, em que será armazenada a coordenada X da superfície do rebolo naquele instante;
- Quando o comparador 2 libera um sinal de 5V, este ativa um segundo sinal digital placa de aquisição, que o software utiliza para determinar a variável P2, em que será armazenada a coordenada X da superfície do rebolo naquele instante.

O software utiliza os valores armazenados nas variáveis P1 e P2, para calcular o diâmetro e o erro de fixação da peça (cuja parcela de excentricidade é sempre mais significativa do que a de circularidade), de acordo com as equações 3 e 4 abaixo:

$$\phi = \frac{(P1 + (P2 - a_p))}{2} \quad (3)$$

$$Batimento_de_Fixação = \frac{(P1 - (P2 - a_p))}{2} \quad (4)$$

Por essas fórmulas, o diâmetro é sempre calculado como um valor médio que leva em consideração o erro de excentricidade e circularidade da peça. O valor de a_p

representa o avanço do rebolo em uma volta completa da peça. Ele deve ser considerado na medição P2, uma vez que o sistema de monitoramento só vai enviar o sinal após o tempo correspondente a uma volta completa da peça.

Após feitos os cálculos, o software gera um arquivo texto (padrão ASCII) com os valores de diâmetro e excentricidade em sequência, para cada peça usinada, que pode ser lido por um software de supervisão e controle.

4. Procedimentos Experimentais

4.1. Introdução

Os testes experimentais tiveram por objetivo avaliar o desvio sistemático e o desvio aleatório que o sistema de medição proposto apresenta, em relação ao valor de referência (o diâmetro da peça), definido previamente por um instrumento de medição de boa acuracidade (um micrômetro).

A idéia principal dos testes, ao fazer a avaliação do sistema, é verificar se sua utilização é viável para as aplicações industriais. Nessas aplicações, a medição do diâmetro da peça, pelo sistema, deve ser realizada com um desvio total menor que os valores determinados pelos limites de tolerância das peças de entrada na máquina. Ou seja, as tolerâncias definidas para o processo imediatamente anterior.

A FIGURA 40 ilustra valores típicos de sobremetal e tolerâncias utilizadas na retificação de precisão. É importante ressaltar que se a máquina tem condições de trabalhar peças na faixa de 0,008 mm, ela terá perfeitas condições de medir as peças que estão dentro da tolerância de 0,05 mm com precisão suficiente.

A FIGURA 40 - Valores Típicos de Sobremetal na Retificação e no Torneamento

4.2. Calibração

Os testes de medição de diâmetro tiveram por objetivo a verificação do método proposto, no que se refere ao desempenho do conjunto que engloba o sistema de detecção de contato por EA e a leitura do encoder nesse instante. Neste teste não se desejou verificar os erros provenientes das deformações estruturais de origem térmica ou mecânica da máquina, bem como outras fontes de erro, como a fixação da peça. Por estes motivos, estes testes exigiram que as peças fossem retificadas antes do experimento.

Os passos seguidos nos testes, portanto, foram estabelecidos para cumprir os objetivos propostos e são descritos abaixo:

1. 6 corpos de prova de material ABNT 8620, com dureza de 109 HRB foram torneados para a realização dos testes. A FIGURA 41 mostra um desenho esquemático do corpo de prova:

FIGURA 41 – Desenho do Eixo Utilizado

2. Os seis corpos de prova tinham diferentes diâmetros D (mostrados na tabela do desenho), de acordo com o especificado para assentos de rolamentos, pois esperava-se um desempenho semelhante por parte do sistema em diferentes posições de posicionamento do rebolo;

3. Os corpos de prova, depois de torneados com uma ferramenta de acabamento, passaram para a operação de retificação com o intuito de que seus erros de fixação fossem minimizados, para que estes não influenciassem significativamente no valor do diâmetro da peça. A máquina foi ajustada também, para que os erros de paralelismo da peça fossem minimizados ao longo do comprimento do colo central;
4. Depois de retificados, os diâmetros dos corpos de prova foram medidos com o auxílio de micrômetros e o batimento com auxílio de um relógio comparador, com resolução compatível;
5. A máquina foi ligada sempre com 12 horas de antecedência em relação aos testes, para que sua estrutura alcançasse estabilidade térmica;
6. Antes do corpo de prova passar pelo programa CNC de calibração, o rebolo era dressado e a nova coordenada atualizada, como num procedimento padrão de setup utilizado nos vários ambientes industriais;
7. Os ajustes de calibração (ajustes de coordenadas G10) foram feitos na máquina, para que a posição do rebolo no final do ciclo, indicada pelo CNC (e também pelo sistema de medição), estivesse correta em relação ao diâmetro medido pelo micrômetro.

A FIGURA 42 mostra o ciclo de retificação no programa de calibração:

FIGURA 42 – Ciclo de Retificação no Programa de Calibração

4.3. Ensaio para Medição Dimensional

O programa CNC utilizado no teste de repetibilidade do sistema (para medição dimensional) fez com que o rebolo tocasse na peça 10 vezes ao longo da superfície do colo central, já retificada.

O início do ciclo de retificação se dava na posição X200 do cabeçote porta rebolo. O ciclo consistiu em aproximar o rebolo com velocidade alta (comando G00 da máquina) até uma posição de segurança (0,1 mm acima do diâmetro medido). Depois a velocidade de avanço foi diminuída para 0,3 mm/min (F30). Quando o rebolo encontra a peça, o sistema marca o valor da coordenada e a armazena na variável P1. A profundidade de corte foi especificada em 0,05 mm, com o objetivo de não desgastar o pequeno trecho de 4,2 mm do lado esquerdo do rebolo, que tocava na peça.

Pelo fato de a peça já estar retificada, com seus erros de forma minimizados, o ponto P2 era armazenado pelo sistema, imediatamente depois do contato, após uma rotação da peça (estratégia definida através de configurações no aparelho DM42). No final do ciclo, o cabeçote voltava para a posição em que a superfície do rebolo se localizava em X200 e reiniciava o processo, mudando apenas a coordenada Z do cabeçote. Assim, sucessivamente, foram feitas 10 medidas em cada peça. A FIGURA 43 mostra o ciclo de retificação no programa de testes.

FIGURA 43 – Ciclo de Retificação no Programa para Testes Dimensionais

4.4. Ensaio para Medição de Excentricidade

No ensaio de excentricidade, os corpos de prova (10 eixos de diâmetros iguais e material 8620) não foram previamente retificados. Depois do torneamento, eles foram colocadas na retificadora, onde um relógio comparador com base magnética foi utilizado para medir a excentricidade de fixação. O valor da profundidade de corte total escolhido para esses corpos de prova, foi sempre maior que o valor máximo da excentricidade encontrada. O rebolo foi dressado uma única vez, para que não houvesse um erro sistemático (profundidade de dressagem) associado a medição.

5. Resultados

5.1. Dados Obtidos Experimentalmente

Os resultados obtidos no testes experimentais de dimensão são mostrados na TABELA 1.

TABELA 1 – Valores Experimentais do Diâmetro de Seis Corpos de Prova

Peça	Ref.	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	Média	Desvio
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		Sist.
1	24,400	24,398	24,398	24,397	24,395	24,397	24,398	24,396	24,397	24,397	24,398	24,397	0,003
2	29,700	29,697	29,698	29,696	29,697	29,697	29,698	29,695	29,698	29,697	29,696	29,697	0,003
3	34,050	34,048	34,049	34,047	34,049	34,050	34,049	34,048	34,050	34,047	34,048	34,049	0,001
4	39,600	39,597	39,595	39,594	39,596	39,598	39,596	39,597	39,594	39,597	39,595	39,596	0,004
5	44,800	44,798	44,797	44,795	44,795	44,794	44,794	44,795	44,796	44,795	44,796	44,796	0,005
6	49,700	49,697	49,698	49,696	49,697	49,697	49,696	49,697	49,698	49,699	49,697	49,697	0,003

A coluna denominada Ref. mostra o valor do diâmetro do colo central do eixo a ser medido. Este valor se afasta dos valores provenientes do torneamento, pois o eixo foi previamente preparado (retificado para correção dos erros de fixação). Os valores M1 até M10 são os dez valores de diâmetro medidos pelo sistema (com o programa de teste), para cada corpo de prova. O valor médio calculado para esses dez valores é mostrado na coluna denominada Média. A coluna especificada Desvio Sist. mostra a diferença entre o valor de referência (obtidos com um micrômetro) e a média dos valores obtidos. A dispersão dos valores medidos ao redor da média representa o Desvio Aleatório. A FIGURA 44 mostra um gráfico com os valores de diâmetro, medidos no corpo de prova de 24,4 mm (valor de referência), e seus respectivos desvios.

É importante observar que os valores não mostram nenhum tipo de tendência.

As demais figuras mostram os gráficos para os eixos 2, 3, 4, 5 e 6.

FIGURA 44 – Valores Medidos, Média, Desvio Sistemático e Desvio Aleatório
(Eixo 1: $\phi_{Ref.} = 24,4$ mm).

FIGURA 45 – Valores Medidos, Média, Desvio Sistemático e Desvio Aleatório
(Eixo 2: $\phi_{Ref.} = 29,7$ mm).

FIGURA 46 – Valores Medidos, Média, Desvio Sistemático e Desvio Aleatório
(Eixo 3: $\phi_{Ref.} = 34,05$ mm).

FIGURA 47 – Valores Medidos, Média, Desvio Sistemático e Desvio Aleatório
(Eixo 4: $\phi_{Ref.} = 39,6$ mm).

FIGURA 48 – Valores Medidos, Média, Desvio Sistemático e Desvio Aleatório
(Eixo 5: $\phi_{Ref.} = 44,8$ mm).

FIGURA 49 – Valores Medidos, Média, Desvio Sistemático e Desvio Aleatório
(Eixo 6: $\phi_{Ref.} = 49,7$ mm).

5.2. Repetibilidade e Acuracidade do Sistema

A repetibilidade é uma propriedade de um instrumento de medida, diferentemente de incerteza ou erro, que são características da medida propriamente dita. Uma definição dada pela “*British Standard*” é: “repetibilidade é a habilidade de um instrumento de medida em dar respostas idênticas, para repetidas aplicações do mesmo valor, de uma determinada quantidade medida, sob condições estáveis de utilização”. Essa porém, é uma definição quantitativa de um instrumento de medição. Uma definição mais qualitativa é que repetibilidade é a faixa média de incertezas aleatórias de uma medida típica, feita por um instrumento de medição, operando em condições específicas.

A acuracidade de um instrumento é um parâmetro que verifica a habilidade desse, em dizer a verdade sobre um determinado valor medido. A boa repetibilidade não garante a boa acuracidade, entretanto, uma repetibilidade ruim é sinal de baixa acuracidade.

O cálculo da repetibilidade de um instrumento de medição pode ser feito a partir da obtenção de uma faixa de valores confiáveis, em que a dispersão da média se encontra. Neste trabalho o critério de cálculo utilizado na distribuição t de Student foi adotado, pois o número de amostras obtidos pelo experimento é pequeno ($n < 30$). Maiores detalhes podem ser encontrados no ANEXO.

A TABELA 2 mostra os valores de repetibilidade do sistema para os seis corpos de prova (S = Desvio Padrão e n = número de amostras).

TABELA 2 – Valores de Repetibilidade R_I do Sistema para os Seis Corpos de Prova

Peça	Valor de t	$S/n^{1/2}$	R_I (mm)
1	3,250	0,0003145	0,001022
2	3,250	0,0003145	0,001022
3	3,250	0,0003416	0,001110
4	3,250	0,0004333	0,001408
5	3,250	0,0004014	0,001305
6	3,250	0,0002906	0,000944

A TABELA 3 mostra os valores (já arredondados) de Repetibilidade e dos Desvios Sistemáticos obtidos para as 10 medições feitas nos 6 corpos de prova. Esses valores são úteis para se ter uma idéia da Acuracidade do Sistema.

A Acuracidade de um instrumento (ou Sistema de Medição) é um parâmetro que depende da precisão e do vício desse. A precisão é um parâmetro relacionado com a repetibilidade do sistema, já o vício, é um parâmetro quantificado pelo valor do desvio sistemático.

TABELA 3 – Repetibilidade R_I e Desvio Sistemático S_I dos Valores Obtidos

Peça	R_I	S_I
	(mm)	(mm)
1	0,001	0,003
2	0,001	0,003
3	0,001	0,001
4	0,001	0,004
5	0,001	0,005
6	0,001	0,003

5.3. Erros de Fixação

Os valores experimentais do erro de fixação obtidos para 10 peças aleatórias, vindas de uma operação de torneamento, são mostrados na TABELA 4.

TABELA 4 – Valores do Erro de Fixação para os Seis Corpos de Prova

Peça	Valor Referência	Valor do Erro	Diferença
	(μm)	(μm)	(μm)
1	190	177	13
2	193	182	11
3	215	185	20
4	188	175	13
5	197	182	15
6	180	170	10
7	176	163	13
8	193	178	15
9	178	169	9
10	134	120	14

6. Discussão dos Resultados

6.1. Testes Dimensionais

Os resultados experimentais obtidos no teste dimensional mostraram que o sistema tem acuracidade suficiente para medir peças dentro das tolerâncias especificadas. Ou seja, enquanto a máquina estiver retificando peças dentro da tolerância do processo, o sistema estará realizando a verificação dimensional e dos erros de fixação com uma repetibilidade alta e com um erro sistemático que pode ser compensado.

Existem três causas prováveis para o Erro Sistemático:

1. O tempo de resposta do sinal de EA;
2. O tempo de resposta do Sistema de Aquisição;
3. As deformações estruturais na retificadora;

Para o erro Aleatório, as principais e mais prováveis causas são:

1. Folgas no conjunto: fuso, porca e esferas;
2. Variação Elástica da Correia Dentada, que transmite o movimento do servo motor ao fuso de esferas;

O atraso na resposta do sinal de EA é considerada uma provável causa do erro sistemático. O aparelho DM42 foi configurado de maneira a lidar com um sinal saturado (alto ganho) na entrada, com um valor grande para filtro de frequência passa alta e uma constante de tempo baixa (1ms). Essas características fazem com que a resposta do sistema seja rápida em relação ao primeiro contato rebolo / peça. Porém, ainda assim tivemos um sinal de subida um pouco inclinado em relação a linha do tempo, o que indica que o sistema estava impondo um atraso a medição.

O atraso do microcomputador e do sistema de aquisição (considerando a rede RS485) é da ordem de unidades de milissegundos, pois o sistema utiliza, para o tratamento do sinal do Encoder, um hardware dedicado. O software somente tem as funções de captar, converter e armazenar os sinais provenientes do Encoder e do aparelho de EA.

As Folgas no Conjunto Fuso / Porca / Esferas podem interferir no erro aleatório, porém como as medidas são feitas com o cabeçote porta rebolo em movimento, essa interferência se dá apenas no início do movimento, indicando uma medida errada no Encoder, devido a um giro sem movimento linear das peças móveis.

Um outro fator que prejudica o sistema de medição foi a utilização de correia dentada borracha, utilizada para transmitir o movimento rotacional do motor para o fuso. Quando o sistema entra em movimento, inicialmente tentando vencer a inércia, as folgas no sistema fuso / porca/ esferas e a resistência propiciada pelo atrito, a correia tende a se deformar elasticamente sem promover nenhum deslocamento do cabeçote porta rebolos. Essa deformação elástica pode movimentar o Encoder e por isso, pode ser a causa mais provável do Erro Aleatório.

O erro sistemático pode ser compensado para um determinado tipo (diâmetro) de peça a ser retificada, simplesmente somando-se a parcela sistemática aos valores obtidos pelo sistema. Com isso o “vício” total diminui, aumentando a acuracidade do sistema.

A Repetibilidade obtida experimentalmente mostrou que o sistema, mesmo apresentando erros de histerese, pode medir as peças torneadas com precisão suficiente.

6.2. Teste para Medir os Erros de Fixação

Segundo a TABELA 4, o sistema de medição mostra-se capaz de medir o batimento de fixação das peças, com acuracidade aceitável, para a maioria das aplicações industriais. Apesar das diferenças associadas ao valor medido pelo relógio comparador e pelo sistema, verifica-se que o valor do erro associado é pequeno. O erro de fixação pode ser grande (da ordem de 0,2 mm), o que implica que um erro de até 20 μ m no sistema de medição, se torna aceitável. A informação sobre os erros de fixação torna-se extremamente valiosa, quando se deseja avaliar as condições do processo e a variação do sobremetal. Mesmo com um erro dessa ordem, tal informação continua sendo útil para se promover ações no sentido de corrigir baixas no sistema de fixação.

Um dos motivos para que o sistema não medisse os erros de fixação com uma maior precisão foi a falta de calibração, para definir o melhor valor do ponto de atuação do comparador 2 do aparelho de EA, responsável por armazenar o valor da variável P2, utilizada no cálculo do erro de fixação.

7. Conclusões e Trabalhos Futuros

Foi possível desenvolver o sistema de medição utilizando Emissão Acústica.

A repetibilidade média obtida pelo método estatístico *t* de Student foi de 1 μm .

Foi possível obter o valor do batimento de fixação com um erro maior (por volta de 20 μm).

Com este sistema apresentando boa resposta, isto é, boa acuracidade e confiabilidade, pode-se utiliza-lo no ambiente industrial com as seguintes vantagens:

- Com este sistema pode-se definir a quantidade de sobremetal retirada pelo processo de retificação, o que pode ajudar na tomada de decisão sobre os intervalos de dressagem;
- Com os valores dimensionais medidos, pode-se ajustar os ciclos do próprio processo de retificação ou utilizar essa informação para corrigir um processo imediatamente anterior, como um tratamento térmico, uma operação de torneamento ou uma operação de retificação de desbaste;
- Quando a peça apresenta uma excentricidade muito grande, o rebolo pode ficar marcado, sem que o operador perceba, o que pode gerar marcas ou defeitos nas peças posteriores. Com um sistema dedicado, pode-se montar uma estratégia de medição que informe o operador da situação, alterando o processo anterior ou corrigindo os desvios do sistema de fixação da própria máquina;
- A excentricidade pode ser grande o suficiente para não permitir que as tolerâncias de circularidade da peça (devido a baixa quantidade de sobremetal) não sejam alcançadas.

Os trabalhos futuros incluem melhorias no sistema de medição do batimento, como:

- Estabelecimento de calibração de condição mínima de interação do rebolo com a peça, utilizando o reconhecimento de um critério mais preciso para a retificação do comparador 2;
- Avaliação da influência do desalinhamento do eixo das peças em relação ao centro de giro do porta peças, o que pode gerar contato parcial, dificultando a análise.

8. ANEXOS

8.1. Programas CNC Utilizados

Programa para Medição de Excentricidade

% 201 - Nome do Programa

N10 G94 - mm/min

N20 G00 X200. - Deslocamento para ponto de segurança e referência (Eixo X)

N30 Z-42. - Localização da Peça no Eixo Z

N40 X25.1 Aproximação Rápida

N50 M04 S150 - Rotação do Cabeçote Porta Peças

N60 M08 - Ligar Fluido

N70 G01 X24.8 F50 - Retificação da Peça

N80 G04 H30 Tempo de Spark Out

N90 G00 X200. - Volta para posição de Segurança

N100 M5 - Desliga Porta Peças

N110 M9 - Desliga Fluido Refrigerante

N120 M30 - Final do Programa

Programa para Medição de Peças

% 2001 - Nome do Programa

N10 G94 - mm/min

N15 P99=9

N20 G00 X200. - Deslocamento para ponto de segurança e referência (Eixo X)

N30 Z-92. - Localização da Peça no Eixo Z para tocar apenas 4,2 mm do colo retificado

N40 X25.1 Aproximação Rápida para Localizar a Peça

N50 M04 S150 - Rotação do Cabeçote Porta Peças

N60 M08 - Ligar Fluido

N70 G00 X25.1 - Localização da Peça (Início do Loop)

N80 G01 X24.950 F50 - Retificação da Peça

N90 G00 X200. - Recua para posição de segurança

N100 G01 K-4.2 - Valor Incremental do Eixo Z

N105 G04 H10 Tempo de Espera na Posição de Segurança

N110 P99=P99-1 P99#0 L70 - LOOP Lógico

N120 G00 X200. - Posição de Segurança

N130 M5 - Desliga Porta Peças

N140 M9 - Desliga Fluido Refrigerante

N150 M30 - Final do Programa

8.2. VI Utilizada no Software LabView®

Figura 50 – Tela Gráfica Do Software LabView®

Esta VI basicamente captura um trem de pulsos TTL e faz a contagem hexadecimal dos mesmos. A placa de aquisição utilizada tinha dois canais digitais para contagem de pulsos, com palavras de 16 bits.

Após entrar no loop (WHILE), o numero hexadecimal é convertido para decimal e depois para coordenadas da máquina, através de um ponto de referência e um delta de avanço (no nosso caso 1 μ m). Com os sinais provenientes dos contadores, faz-se a lógica necessária para o armazenamento dos dados em P1 e P2.

8.3. Distribuição *t* de Student e Teste de Normalidade

A eq. 5 mostra como o critério de Student pode ser aplicado para a obtenção de uma faixa de valores confiáveis para resultados aleatórios.

$$\bar{x} - (t_{\alpha/2} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}) \leq \mu \leq \bar{x} + (t_{\alpha/2} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}) \quad (5)$$

Onde:

α define o intervalo de confiança (geralmente 1% ou 5%);

ν define o número de graus de liberdade da distribuição ($\nu = n-1$)

t é um valor tabelado que depende de α e ν ;

S é o desvio padrão das amostras;

n é o número de amostras.

O desvio padrão da amostra para cada corpo de prova pode ser calculado segundo a eq. 6:

$$S = \left(\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{r=1}^n (x_r - \bar{x})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Onde:

x_r são os r valores medidos e $\bar{x}$ é o valor médio dessas medidas

Para utilizar a distribuição *t* de Student primeiramente deve-se verificar se a distribuição dos dados amostrados segue a Distribuição Normal.

O teste escolhido para a verificação dos dados estatísticos é chamado Teste de Anderson-Darling e foi realizado com a ajuda do software MINITAB®, próprio para aplicações estatísticas. Esse teste é utilizado para verificar se uma amostra de dados segue uma determinada distribuição e é uma modificação do teste de Kolmogorov-Smirnov.

O teste é baseado no critério de hipóteses: se a hipótese nula for verdadeira (H_0), então os dados seguem uma determinada distribuição. Se a hipótese nula for rejeitada (H_1), os dados não seguem a distribuição especificada (normal, lognormal, exponencial, logística, Weibull, etc.).

Segundo o critério de Anderson-Darling, escolhido para teste de normalidade, se o valor de p (parâmetro de saída do teste) for muito pequeno, isto implica que os dados fogem a uma distribuição normal. O termo pequeno pode ser interpretado, se esse valor de p for comparado com o valor de α adotado. Quando α é menor que p , a distribuição não é considerada normal para o intervalo de confiança considerado. Assim, os resultados obtidos pelo cálculo de Student não são considerados corretos.

A FIGURA 45 mostra um Gráfico de Probabilidade Normal, gerado pelo software MNITAB® quando o critério de normalidade é aplicado ao conjunto de 10 amostras.

FIGURA 50 – Gráfico Originado pelo Teste de Normalidade (MINITAB®)

Os dados das amostras dos seis eixos passaram nos testes de normalidade, o que implica que o critério de cálculo adotado, a partir da distribuição de Student, pode ser utilizado.

O valor da repetibilidade do sistema pode ser calculado a partir da eq. 7:

$$(t_{\alpha/2, \nu} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}) \quad (7)$$

O valor de α utilizado foi de 1%, para que um intervalo de confiança de 99%, fosse obtido, dada a baixa quantidade de amostras do experimento. Esse valor é utilizado em para a obtenção do valor de t (juntamente com ν) em tabelas estatísticas (de valores críticos da distribuição de Student).

9. Bibliografia

9.1. Bibliografia Citada

BICUDO, L.A.M.C. (1997) *Compensação de Erros Dimensionais para Retificadoras Cilíndricas Utilizando Redes Neurais*. São Carlos. 156p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BICUDO, L.A.M.C., SOKOLOWSKI, A., OLIVEIRA, J.F.G., DORNFELD, D. (1994) Compensation of Thermal Deformation on Cylindrical Grinding Machines Using Neural Networks. *Annals of the Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation*, p.877-884 Jul.

BIN, H.Z., YAMAZAKI, K., DEVRIES, M.F. (1984) Astochastic aproach to the measurement and analysis of leadscrew drive kinematic errors. *Transactions of the ASME – Journal of Engineering for Industry*, v.106, p.339-344, May apud PEREIRA, P.H. (1995) *Levantamento e Modelamento dos Erros Térmicos de uma Retificadora Cilíndrica CNC*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BLUM, T.; DORNFELD, D. A. (1990). Grinding Process Feedback Using Acoustic Emission. / Presented at the International Grinding Conference and Exposition, 4., Detroit.

BRINKSMEIER, E., ÇINAR, M. (1995) Wear Progress of Vitrified Bonded CBN Whells. 1st International Machining and Grinding Conference (SME), Dearborn Michigan, U.S.A. *Technical Paper*, p.75-90, Sep. apud BICUDO, L.A.M.C. (1997) *Compensação de Erros Dimensionais para Retificadoras Cilíndricas Utilizando Redes Neurais*. São Carlos. 156p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

- BRYAN, J.B. (1979) The Abbè Principle Revisited: an Updated Interpretation. *Precision Engineering*, v.1, n.1, p.129-132, Jul.
- BRYAN, J.B. (1990) International Status of Thermal Error Research. *Annals of the CIRP*, v.39, n.2, p.645-656.
- BYRNE, G.; DORNFELD, D.; INASAKI, I.; KETTELER, G.; KONIG, W.; TETI, R. (1995) Tool Condition Monitoring (TCM) – the Status of Research and Industrial Application. *Annals of the CIRP*, v.44, p. 541-567.
- CARPINETTI, L.C.R. (2000) *Controle da Qualidade de Processo*. Segunda Edição. Julho. São Carlos. EESC.
- DI GIACOMO, B. (1986) Computer aided calibration and hybrid compensation of geometric errors in coordinate measuring machines. 418p. PhD Thesis – THE VICTORIA UNIVERSITY OF MANCHESTER apud SATO, D. P. V. (1998) *Uma contribuição ao modelo de sintetização de erros em máquinas ferramentas*. São Carlos. 198p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- DORNFELD, D.A.; CAI, H.C. (1984) An Investigation of Grinding and Wheel Loading Using Acoustic Emission. *Transactions of the ASME*, v.106, p.28-33, Feb.
- DORNFELD, D.A. (1992). Application of Acoustic Emission Techniques in Manufacturing. *NDT & E International*, v.25, n.6, p259-269.
- FELIPE JUNIOR, J. (1996) *Contribuição para Implementação de Funções de Retificação Inteligente (R.I.) Utilizando Técnicas de Monitoramento por Emissão Acústica*. 155p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

FRENCH, D.; HUMPHRIES, S.H. (1967) Compensation for the backlash and alignment errors in a numerically controlled machine tool by a digital computer programme. Proceedings of the 8th MTDR Conference, p.707-726 apud SATO, D. P. V. (1998) *Uma contribuição ao modelo de sintetização de erros em máquinas ferramentas*. São Carlos. 198p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

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

HASSUI, A.; DINIZ, A.E.; OLIVEIRA, J.F.G.; FELIPE, J.; GOMES, J.J.F. (1998). Experimental Evaluation on Grinding Wheel Wear Through Vibration and Acoustic Emission. *Wear*, v. 217, n. 1, p. 7-14, Apr.

GORDON, G.S. (2000) *Understanding Quadrature*
http://www.gpi-encoders.com/technical_articles.htm (10 Oct.)

HOCKEN, R.J. & MACHINE TOOL TASK FORCE. (1980) Machine Tool Accuracy. *Technology of Machine Tools*, v.5, Oct.

INASAKI, I. (1985) Monitoring of Dressing and Grinding Processes with Acoustic Emission Signals. *Annals of the CIRP*, v.34, n.1

JEMIELNIAK, K. (1999). Commercial tool condition monitoring systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 15, p. 711-721

KIRINDENA, V.S.B.; FERREIRA, P.M. a (1994) Kinematic Modeling of Quasistatic Errors of Three-Axis Machining Centers. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, v.34, n.1, p.85-100.

KIRINDENA, V.S.B.; FERREIRA, P.M. b (1994) Parameter Estimation and Model Verification of first Order Quasistatic Error Model for Three Axis Machining Centers. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, v.34, n.1 p.101-125.

KLUFT, W. (1994) A Monitoração dos Processo Reduz Custos e Desperdícios. *Máquinas e Metais*, v.10, p.60-80

KONIG, W.; KLUMPEN, T. (1993) Process Monitoring in Grinding, Dressing and Sharpening Processes. *Precision Engineering*. v.1/1 p.27-30.

KONIG, W.; MEYEN, H.P. (1990) AE in Grinding and Dressing: Accuracy and Process Reliability. In: 4TH INTERNATIONAL GRINDING CONFERENCE, Dearborn, Michigan, 1990. Annals. P.526/1-526/20.

KRENG, V.B.; LIU, C.R.; CHU, C.N. (1994) A kinematic model for machine tool accuracy characterization. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, n.9, p.79-86

KRISHNAMURTHY, R.; PUGAZHENDI, S. (1996). Sensor-fusion for identification of process performance in deep hole drilling. In: INTERNATIONAL MANUFACTURING ENGINEERING CONFERENCE, University of Connecticut, 1996. Proceedings, London, Freund. p. 454-456 apud MEIRELES, G.S.C. (2000) *Desenvolvimento de um Sistema de Aquisição de Dados em Operações de Usinagem Visando o Monitoramento de Linhas ou Células de Produção*. 108p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MACRO SENSORS CORPORATE (2001) *Linear and Rotatory Position Sensors* <http://www.macrosensors.com> (15 Jan.)

- MEIRELES, G.S.C. (2000) *Desenvolvimento de um Sistema de Aquisição de Dados em Operações de Usinagem Visando o Monitoramento de Linhas ou Células de Produção*. 108p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- OLIVEIRA, J.F.G.; PERES, A.E.; MENDIZABAL, R.A. (1991) Utilização de Técnicas Acústicas para o Monitoramento do Processo de Retificação. In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, São Paulo. Anais. São Paulo, p.353-356
- OLIVEIRA, J.F.G., DORNFELD, D.A. (1994) Dimensional Characterization of Grinding Wheel Surface Through Acoustic Emission. *Annals of the CIRP*, v.43, p.291-294
- ORLOSKY, S.; AVOLIO, G. (1997) Basic of Rotatory Optical Encoders. *Control Engineering*, Nov.
- PEREIRA, P.H. (1995) *Levantamento e Modelamento dos Erros Térmicos de uma Retificadora Cilíndrica CNC*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- PINOVAR, L.E. (1986) Improvement of Machining Accuracy on Multispindle Automatic Turning Machines. *Soviet Engineering Research*, v.6, n.9, p.68-69 apud PEREIRA, P.H. (1995) *Levantamento e Modelamento dos Erros Térmicos de uma Retificadora Cilíndrica CNC*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- POLLOCK, A. (1989) Acoustic Emission Inspection. *Metals Handbook, 9th Edition*, – *Nondestructive Evaluation and Quality Control*, American Society for Metals, v.17, p.278-294.

ROWE, W.B., ALLANSON, D.R., THOMAS, A. MORUZZI, J.L. (1992) Intelligent CNC Grinding – Problems of Accuracy Control. Liverpool John Moores University apud BICUDO, L.A.M.C. (1997) *Compensação de Erros Dimensionais para Retificadoras Cilíndricas Utilizando Redes Neurais*. São Carlos. 156p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SATO, D. P. V. (1998) *Uma Contribuição ao Modelo de Sintetização de Erros em Máquinas Ferramentas*. São Carlos. 198p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SENTE, P.; BUYSE, H. (1995) From Smart Sensors to Smart Actators: Application of Digital Encoders for Position and Speed Measurements in Numerical Control Systems. *Measurement*. v.15, p.25-32

SHEN, Y.L.; DUFFIE, N.A. (1991) Uncertainties in the acquisition and utilization of coordinates frames in manufacturing systems. *Annals of the CIRP*, v.40, n.1, p.527-530 apud SATO, D. P. V. (1998) *Uma Contribuição ao Modelo de Sintetização de Erros em Máquinas Ferramentas*. São Carlos. 198p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SHIRAISHI, M. (1989) Scope of In-Process Measurement, Monitoring and Control Techniques in Machining Processes – Part 2: In-Process Techniques for Workpieces. *Precision Engineering*, vol.11, n.1, P.49-59, Jan.

SLOCUM, H.A. (1992) *Precision Machine Design*. New Jersey, Prentice Hall

WECK, M., BIBRING, H. (1984) *Handbook of Machine Tools - Automation and Control*. v.3, New York, John Wiley & Sons

YANDAYAN T., BURDEKIN M. (1997) In Process Measurement and Control of workpiece Accuracy. *International Journal of Machine Tools Manufacturing*. v.37, n.10, p.1423-1439.

ZHZN-QIAN, L.; VENUVINOD, P. K.; OSTAFIEV, V.A. (1998) On-Machining Measurement of Workpieces With the Cutting Tool. *Integrated Manufacturing Systems*. v.3, n.9, p.168-172

9.2. Bibliografia Consultada

DEGARMO, E.P., BLACK, J.T., KOHSER, R.A. (1997) Materials and Process in Manufacturing. Prentice Hall (Eighth Edition)

DINIZ, A.E., MARCONDES, F.C., COPPINI, N.L. (1999) Tecnologia da Usinagem dos Materiais. MM Editora.. São Paulo

HAYWARD, A.T.J. (1992) Repeatability and Accuracy. ERA REPORT (92-0450). Reprinted Leatherhead, July, 63p.

SMITH, T.S. (1989) Advanced Machining – The Handbook of cutting Technology. IFS Publications, UK

VARIOUS AUTHORS (1986) Precision Engineering – The State of Art: The Mechanical Design of High Precision Machines. Crainfield Institute of Technology – Short Course