Campus de São Carlos

**AVALIAÇÃO PRÁTICA DE
MONITORAMENTO POR EMISSÃO
ACÚSTICA DO DESGASTE DE FERRAMENTA
EM PROCESSOS DE TORNEAMENTO**

MICHEL ZAMBON ALVES

Orientador: Prof. Tit. 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 / 09 / 01

Ass.: Guilherme

***AVALIAÇÃO PRÁTICA DE MONITORAMENTO POR
EMIÇÃO ACÚSTICA DO DESGASTE DE
FERRAMENTA EM PROCESSOS DE TORNEAMENTO***

Michel Zambon Alves

DEDALUS - Acervo - EESC

31100036787

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

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

São Carlos

2001

Class. TESE
Cott. 0275
Tombo T0236/01

Serviço de Pós-Graduação EESCUSP

EXEMPLAR REVISADO

at 1206771

A474a Alves, Michel Zambon
Avaliação prática de monitoramento por emissão acústica do desgaste de ferramenta em processos de torneamento / Michel Zambon Alves. -- São Carlos, 2001.

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

Área: Engenharia Mecânica.

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

1. Monitoramento de desgaste de ferramenta.
2. Torneamento. 3. Emissão acústica. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **MICHEL ZAMBON ALVES**

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

APROVADO

Prof. Dr. **ANSELMO EDUARDO DINIZ**
(Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP)

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

À minha esposa,
pelo exemplo de ser humano e
pelos incontáveis momentos de
felicidade.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. João Fernando G. de Oliveira, pela oportunidade propiciada.

Ao técnico Ronaldo do NUMA, pelo apoio e colaboração na realização dos ensaios.

À Eaton Ltda. – Divisão Transmissões, pela disponibilização de recursos para que este trabalho se tornasse possível.

Ao Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho, pelas orientações técnicas.

À Seco Tools Indústria e Comércio Ltda., pelo auxílio técnico.

Aos colegas de trabalho da Eaton Ltda. que estiveram envolvidos neste trabalho.

Aos meus pais, que tanto se dedicaram para que fosse possível a conquista deste objetivo.

À minha família, pelo amor e apoio.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS.....	ii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	iii
LISTA DE SÍMBOLOS	iv
RESUMO	1
ABSTRACT.....	2
1 INTRODUÇÃO	3
2 MÉTODOS DE MONITORAMENTO DE PROCESSOS DE USINAGEM ..	6
2.1 Métodos de Monitoramento Direto	6
2.1.1 Medidas ópticas.....	6
2.1.2 Análise de partículas	7
2.1.3 Radioatividade.....	8
2.1.4 Variações dimensionais da peça	8
2.1.5 Sondas de Detecção de Toque.....	9
2.2 Métodos de Monitoramento Indireto	12
2.2.1 Forças de corte.....	12
2.2.2 Parâmetros elétricos do motor	13
2.2.3 Medição de rugosidade.....	14
2.2.4 Emissão acústica.....	14
2.2.5 Combinação de parâmetros.....	14
2.3 Métodos de Monitoramento Computacionais	16
2.3.1 Reconhecimento de padrões	16
2.3.2 Sistemas Fuzzy	18
2.3.3 Árvores de Decisão	21
2.3.4 Sistemas Especialistas.....	22
2.3.5 Redes Neurais	23
3 FERRAMENTA DE METAL DURO, AVARIAS E DESGASTES.....	26
3.1 A Ferramenta de Metal Duro	26
3.2 Avarias da Ferramenta de Corte	29
3.2.1 Quebras.....	30
3.2.2 Trincas devido a variações de temperatura.....	30

3.2.3 Sulcos distribuídos em forma de pente	31
3.2.4 Deformação plástica da aresta de corte	32
3.2.5 Lascamento	33
3.3 Desgastes da Ferramenta de Corte	33
3.3.1 Desgaste de cratera.....	33
3.3.2 Desgaste de flanco.....	34
3.4 Mecanismos de Desgaste das Ferramentas de Metal Duro.....	35
3.4.1 Aresta postiça de corte	35
3.4.2 Abrasão mecânica.....	37
3.4.3 Difusão intermetálica	38
3.4.4 Adesão	39
3.4.5 Oxidação	40
3.5 Desgaste em Ferramentas Revestidas	41
3.6 Vida da Ferramenta	41
3.6.1 Critérios de fim de vida para ferramentas de metal duro	43
4 EMISSÃO ACÚSTICA NO PROCESSO DE TORNEAMENTO	45
4.1 Definição e Características do Sinal de EA	45
4.2 Sensor de EA	47
4.3 Ruído	49
4.4 Fontes de AE no Torneamento	50
4.5 Usinagem Ortogonal e o Sinal de EA	51
4.6 Modelamento Matemático	51
4.7 Instrumentação e Tratamento do Sinal de EA.....	58
4.7.1 Voltagem RMS	59
4.7.2 Técnicas de contagem.....	60
4.7.3 Espectro de frequência	61
4.8 Influência dos Parâmetros de Usinagem na EA – Considerações Práticas ..	62
4.8.1 Velocidade de corte.....	62
4.8.2 Avanço e profundidade de usinagem.....	63
4.8.3 Ângulo de saída da ferramenta.....	65
4.8.4 Material da peça	66
4.8.5 Fluido de corte	66

4.9 Influência do Desgaste de Flanco na EA	67
4.10 Influência do Desgaste de Cratera na EA.....	68
4.11 Influência dos Desgastes de Flanco e Cratera Combinados na EA	69
4.12 O Sinal de EA com Ferramentas Revestidas	69
5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	73
5.1 Introdução	73
5.2 Condições Experimentais.....	74
5.3 Correlação entre Sinal de EA e Trajetória da Ferramenta	79
5.4 Análise dos Dados.....	79
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	83
6.1 Correlação entre Sinal de EA e Trajetória da Ferramenta	83
6.2 Análise Qualitativa da Evolução da EA com o Desgaste	83
6.3 Determinação das Regiões de Análise.....	85
6.4 Evolução da EA com o Desgaste no Desbaste.....	87
6.5 Evolução da EA com o Desgaste no Acabamento	90
6.6 Influência do Sistema de Fixação.....	94
7 CONCLUSÕES.....	96

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1. Mapeamento 3D de ferramenta - KASASHIMA & RYABOV (1996).....	7
FIGURA 2.2. “Setup” automático de peça - RENISHAW (1998).....	10
FIGURA 2.3. Inspeção dimensional - RENISHAW (1998).....	10
FIGURA 2.4. “Presetting” de fresa - RENISHAW (1998).....	10
FIGURA 2.5. “Presetting” de broca - RENISHAW (1998).....	10
FIGURA 2.6. Adaptação de suporte para medição de força de corte - SANTOCHI et al. (1996)	13
FIGURA 2.7. Representação típica do reconhecimento de padrões aplicado a um espaço bidimensional - DU et al. (1995)	17
FIGURA 2.8. Comparação entre classificação Fuzzy e binária e exemplo de determinação de grau de incerteza	18
FIGURA 2.9. Processo de inferência Fuzzy.....	19
FIGURA 2.10 Processo de defuzzificação.....	20
FIGURA 2.11. Exemplo de árvore de decisão.....	21
FIGURA 2.12. Representação de rede neural com três neurônios	24
FIGURA 3.1 Processo de fabricação de pastilha de metal duro – SECO(2000)	27
FIGURA 3.2. Dureza, tenacidade e temperatura máxima de corte de materiais para construção de ferramentas de corte – MARCONDES (1990).....	28
FIGURA 3.3. Ruptura de ponta de ferramenta de metal duro – SECO (2000).....	30
FIGURA 3.4. Trincas térmicas em ferramenta de metal duro – SECO (2000)	31
FIGURA 3.5. Sulcos distribuídos em forma de pente - FERRARESI (1977).....	31
FIGURA 3.6. Deformação plástica em ferramenta de metal duro - SECO (2000).....	32
FIGURA 3.7. Lascamento em ferramenta de metal duro - SECO (2000).....	33
FIGURA 3.8. Desgaste da ferramenta de metal duro e seus parâmetros de medição segundo COOK (1973)	34
FIGURA 3.9. Variação do desgaste da superfície de folga em função da velocidade de corte – FERRARESI (1977)	36
FIGURA 3.10. Forma característica de uma APC - FERRARESI (1977)	37
FIGURA 3.11. Variação de concentrações dos elementos que tomam parte da difusão entre ferramenta de metal duro e o aço.....	38
FIGURA 3.12. Zonas de oxidação de uma ferramenta de metal duro – FERRARESI (1977)	40

FIGURA 4.1. Onda primitiva de EA – POLLOCK (1987).....	46
FIGURA 4.2. Diferentes possibilidades de caminhos até o sensor para ondas geradas por um evento – POLLOCK (1987)	47
FIGURA 4.3. Construção típica de sensor piezoelétrico – POLLOCK (1987)	48
FIGURA 4.4. Fontes de EA no torneamento – TETI & DORNFELD (1989)	51
FIGURA 4.5. Plotagem dos termos 1 e 2 da eq. (4.9), variando-se α de -15° a 45° para $C_2 = 0,25$; $C_3 = 1,0$ e $\mu = 0,8$	56
FIGURA 4.6. Domínio do tempo e da frequência de um sinal contínuo de EA	59
FIGURA 4.7. Resposta de um transdutor a um pulso de EA – TETI & DORNFELD (1989)	61
FIGURA 4.8. Sinal de EA em função da v_c (Metal duro P20, material usinado aço SAE 1045, $f = 0,23$ mm/volta, $a_p = 0,5$ mm) – INASAKI & YONETSU * apud PIGARI (1981).....	62
FIGURA 4.9. O sinal de EA, na usinagem do aço SAE 1018 com ferramenta de metal duro, em função de: (a)da profundidade de usinagem, (b)do avanço - LAN & DORNFELD (1986).....	63
FIGURA 4.10. O sinal de EA, na usinagem de alumínio com ferramenta diamantada, em função de: (a)da profundidade de usinagem ($v_c = 1200$ m/min), (b) do avanço ($a_p = 0,01$ mm) - PAN & DORNFELD* apud PIGARI (1995)	64
FIGURA 4.11. O sinal de EA em função do ângulo de saída da ferramenta, para o corte ortogonal do aço SAE 1018 usando ferramenta de aço rápido - Lan & Dornfeld (1986)	65
FIGURA 4.12. O sinal de EA em função da dureza (Brinell) do materia da peça (aço SAE 1045) - LAN & DORNFELD (1986).....	66
FIGURA 4.13. Efeito da aplicação de fluido (CCl_4) no sinal de EA, para o aço SAE 4340 com ferramenta de metal duro - NAERHEIM & LAN* apud PIGARI (1995).....	67
FIGURA 4.14. O sinal de EA em função do tempo de corte para diferentes condições da ferramenta - NAERHEIM & LAN* apud PIGARI (1995).....	68
FIGURA 4.15. Sinal de EA (V_{RMS}) para três estágios diferentes de desgaste de cratera: $C_p = 6$; 20 e 38 μm - MORIWAKI & TOBITO (1990)	70
FIGURA 5.1. Forjado (faceado e centrado) obtido por processo de forjamento a frio.....	74
FIGURA 5.2. Eixo principal após primeira operação de torneamento.....	74
FIGURA 5.3. Sistema utilizado na aquisição do sinal de EA gerado no torneamento	76
FIGURA 5.4. Fixação da peça no torno	77
FIGURA 5.5. Geometrias de suporte utilizadas (VALENITE, 1992)	78
FIGURA 5.6. Camadas de $Ti(C,N) + Al_2O_3 + TiN$ e substrato sinterizado de WC	

em inserto da classe TP200 (SECO,2000)	78
FIGURA 5.7. Eixo “Z” e respectiva referência para programa de usinagem e regiões de análise.....	80
FIGURA 5.8. Exemplo de uma possível referência na determinação do erro de “offset”	81
FIGURA 6.1. Trecho da usinagem de desbaste e respectivo sinal de EA.....	83
FIGURA 6.2. EA no desbaste – ferramenta nova, com 40, 80 e 140 peças usinadas	84
FIGURA 6.3. EA no acabamento – ferramenta nova, com 40, 80 e 140 peças usinadas.....	85
FIGURA 6.4. Regiões de análise na operação de desbaste	86
FIGURA 6.5. Regiões de análise na operação de acabamento	86
FIGURA 6.6. EA no desbaste – usinagem completa (inserto novo)	87
FIGURA 6.7. Evolução dos desgastes de flanco (V_B) e cratera (CI) no desbaste	88
FIGURA 6.8. Evolução da EA no desbaste em nove diferentes regiões da peça onde a trajetória da ferramenta é linear – valor médio do sinal em cada intervalo.....	88
FIGURA 6.9. Evolução da EA no desbaste em nove diferentes regiões da peça onde a trajetória da ferramenta é linear – valor máximo do sinal em cada intervalo.....	89
FIGURA 6.10. Evolução da EA no desbaste em nove diferentes regiões da peça onde a trajetória da ferramenta é linear – valor mínimo do sinal em cada intervalo	89
FIGURA 6.11. Adesão de material da peça em inserto com 120 peças usinadas	90
FIGURA 6.12. Evolução do desgaste para ferramenta de desbaste: (1) 80 peças usinadas e desgaste de cratera acentuado; (2) 120 peças usinadas e adesão de material da peça; (3) 140 peças usinadas e material aderido parcialmente removido.....	90
FIGURA 6.13. Acabamento - usinagem completa (inserto novo).....	91
FIGURA 6.14. Evolução dos desgastes de flanco (V_B) e cratera (CI) no acabamento.....	92
FIGURA 6.15. Evolução da EA no acabamento em cinco diferentes regiões da peça onde a trajetória da ferramenta é linear - valor médio do sinal em cada intervalo	92
FIGURA 6.16. Evolução da EA no acabamento em cinco diferentes regiões da peça onde a trajetória da ferramenta é linear - valor máximo do sinal em cada intervalo	93
FIGURA 6.17. Evolução da EA no acabamento em cinco diferentes regiões da peça onde a trajetória da ferramenta é linear - valor mínimo do sinal em cada intervalo	93
FIGURA 6.18. Desgaste de cratera em ferramenta de acabamento com 140 peças Usinadas	93
FIGURA 6.19. Influência da pressão no contra ponto no sinal de EA em cinco diferentes regiões da peça onde a trajetória da ferramenta é linear (acabamento) - valor médio do sinal em cada intervalo.....	94

FIGURA 6.20. Influência da pressão no contra ponto no sinal de EA em cinco diferentes regiões da peça onde a trajetória da ferramenta é linear (acabamento) - valor máximo do sinal em cada intervalo.....	95
FIGURA 6.21. Influência da pressão no contra ponto no sinal de EA em cinco diferentes regiões da peça onde a trajetória da ferramenta é linear (acabamento) - valor mínimo do sinal em cada intervalo.....	95

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1. Resumo dos principais métodos de monitoramento direto e sondas de detecção de toque.....	11
TABELA 2.2. Resumo dos principais métodos de monitoramento indireto	15
TABELA 4.1. Resumo das principais fontes de ruído e os respectivos métodos de solução mais comumente empregados.....	50
TABELA 4.2. Resumo da influência dos principais fenômenos presentes na usinagem na EA	71
TABELA 5.1. - Insertos e suportes utilizados.....	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD – analógico - digital

AISI – American International Supply, Inc.

APC – aresta postiça de corte

AQ15 – algoritmo de ótimos locais para árvores de decisões

CNC – comando numérico computadorizado

CVD – chemical vapour deposition

EA – emissão acústica

ID3 – Iterating Dichotomizer Three

ISO – International Standards Organisation

NUMA – Núcleo de Manufatura Avançada

PVD – physical vapor deposition

RMS – root mean square

SAE – Society of Automotive Engineering

LISTA DE SÍMBOLOS

A,B,C,D – constantes experimentais dependentes do material da peça, ferramenta e condições de usinagem

Al_2O_3 – óxido de alumínio

a_p – profundidade de corte

C_F – constante de proporcionalidade influenciada pela geometria da peça e ganho de instrumentação

CCl_4 – tetracloreto de carbono

Co – cobalto

C_1 – constante de proporcionalidade influenciada pela geometria da peça, ganho de instrumentação e atenuação do sinal na ferramenta de corte e entre sistema de fixação da ferramenta e ponto de fixação do transdutor

C_2 , C_3 e C_4 – fatores de atenuação do sinal

C_{p1} , C_{p2} e C_{p3} – constantes de proporcionalidade

C_p – profundidade da cratera

Cl – largura da cratera

d – espessura do cavaco

$d\epsilon_{ij}$ – incremento de deformação plástica

d_v – elemento de volume

dW – incremento de trabalho

ΔE – energia dissipada

E – potência

Fe – ferro

$\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ – carboneto misto de ferro e tungstênio

$(\text{FeW})_6\text{C}$ – carboneto misto de ferro e tungstênio

$(\text{FeW})_{23}\text{C}_6$ – carboneto misto de ferro e tungstênio

f – função não linear

f – avanço

f_l – frequência linear

f'' – frequência aparente do sinal

HV – dureza vickers

k – função qualquer

k – constante experimental dependente do material da peça, ferramenta e condições de usinagem

k_a – constante de amortecimento

l – comprimento do contato entre cavaco e superfície de saída da ferramenta

l_1 – comprimento da aresta da ferramenta até o final da zona de escorregamento na superfície de saída

l_f – comprimento da intersecção entre superfície de folga da ferramenta e a peça medido paralelamente à direção de corte

m – constante relacionada ao tipo de material usinado

n – rotação

N – contagem total

N – taxa de contagem

ΔT – período de tempo

t – tempo

t' – instante no qual o último pico atinge o limite V_S

t_c – tempo de corte

T – vida da ferramenta

TaC – carboneto de tântalo

(Ti,Al)N – nitreto de titânio e alumínio

TiC – carboneto de titânio

Ti(C,N) – carbonitreto de titânio

TiN – nitreto de titânio

U_c – velocidade do cavaco

v – volume de material sendo deformado

V – voltagem do sinal

V_o – voltagem inicial do sinal

V_S – voltagem limite de controle

V_B – desgaste de flanco

v_c – velocidade de corte

$V(t)$ – função sinal

V_{RMS} – tensão RMS

x – variável de entrada do sistema

$X1$ – corrente no motor

$X2$ – força de corte

x_j – entradas de um neurônio

WC – carboneto de tungstênio

w – frequência angular

w_{ij} – pesos representando a força da conexão a outros neurônios

W – taxa de energia

W_1 – taxa de trabalho na zona primária

W_{2d} – taxa de trabalho na zona de deslizamento

W_{2a} – taxa de adesão da zona secundária

y_i – saídas do neurônio

θ_i – limite

η – constante de aprendizado

δ_j – fator dependente do erro

ξ – grau de incerteza

ε – taxa de deformação

σ – tensão

γ_o – ângulo de saída

ϕ – ângulo de cisalhamento

τ – tensão de cisalhamento média

λ – constante experimental dependente do material da peça, ferramenta e condições de usinagem

RESUMO

ALVES, M. Z.; OLIVEIRA, J. F. G. (2001). *Avaliação prática de monitoramento por emissão acústica do desgaste de ferramenta em processos de torneamento*. São Carlos, 2001. 97p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A viabilização do conceito de manufatura enxuta depende da redução da necessidade de intervenções do operador no processo. Na usinagem dos metais, uma das principais situações onde esta intervenção se faz necessária é a determinação da condição de fim de vida das ferramentas de corte, a qual é muitas vezes subjetiva e não pode ser prevista com segurança. Sendo a emissão acústica (EA) um sinal gerado pelos principais fenômenos envolvidos na usinagem, um sistema de monitoramento de desgaste de ferramentas baseado neste tipo de sinal foi avaliado em operação de torneamento de eixo de saída de transmissão mecânica caracterizado por geometria complexa. Verificou-se que há uma relação entre a trajetória da ferramenta e a “assinatura” do processo (tensão RMS plotada contra o tempo). Além disso, há uma forte correlação entre os desgastes de flanco e cratera da ferramenta e a EA, mas a combinação destes mais a adesão de material da peça à ferramenta determinaram pequena diferença de amplitude do sinal entre os estágios iniciais e finais de vida das ferramentas. Além disso, a influência do sistema de fixação na EA mostrou-se diversas vezes maior que a influência do desgaste. Portanto, um sistema de monitoramento de desgaste baseado apenas em emissão acústica não seria adequado para a situação estudada.

Palavras-chave: monitoramento de desgaste de ferramenta; torneamento; emissão acústica.

ABSTRACT

ALVES, M. Z.; OLIVEIRA, J. F. G. (2001). *Practical evaluation of an acoustic emission tool wear monitoring system in turning operation*. São Carlos, 2001. p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The Lean Manufacturing concept depends on the reduction of the necessity of interventions in the process by the operators. In metal machining, one situation where these interventions are necessary is the determination of tool life, which is subjective. Besides that, the tool life prediction is not reliable.

Acoustic emission signals are generated by many activities involved in machining. Therefore an acoustic emission based tool wear monitoring system was evaluated in a turning operation of a mechanical transmission main shaft characterised by complex geometry. It was found that there is a relationship between the tool track and the AE “signature” of the process (RMS voltage plotted versus time). Furthermore, there is a strong correlation between crater and flank tool wear and the AE signal, but the combination of them plus adhesion phenomena determine low amplitudes between initial and final stages of the tool life. Besides that, the influence of the fixture system was found to be several times higher than the influence of the wear. Therefore, a tool wear monitoring system based on acoustic emission only would not be adequate for this application.

Key words: tool wear monitoring; turning; acoustic emission.

1 INTRODUÇÃO

A viabilização do conceito de manufatura enxuta, especialmente quando se considera alto volume de produção, depende da redução da necessidade de intervenções do operador no processo para que este possa trabalhar de forma multifuncional - operação de diversas máquinas. Em processos de usinagem, destacam-se duas situações nas quais a intervenção do operador ocorre de maneira sistemática: 1) verificação dimensional da peça e, se necessário, correção da posição da ferramenta de corte; 2) determinação do momento de troca da ferramenta.

Em máquinas ferramentas com comando numérico computadorizado (CNC) já é possível a implementação de sistemas automáticos de medição confiáveis que realimentam o CNC com o erro dimensional obtido (diferença entre o valor medido na peça e o valor especificado), possibilitando que se corrija automaticamente a posição relativa da ferramenta.

Com relação à deterioração das ferramentas de corte, RYABOV et al. (1996) afirmam que na usinagem este é um dos fenômenos que geram mudanças imprevisíveis nas condições de manufatura e que a priori não pode ser modelado. Por estas características, a deterioração das ferramentas de corte seria um enorme obstáculo à automação inteligente. Na tentativa de romper este obstáculo, diversos trabalhos têm sido realizados com o objetivo de desenvolver sistemas de monitoramento que consigam prever o fim de vida da ferramenta sem o auxílio do homem, mas poucos deles abordam situações práticas (não laboratoriais) de usinagem. Além disso, na maioria deles, os procedimentos experimentais são realizados sob condições ideais ou simplificadas, principalmente com relação à geometria da peça.

Assim, este trabalho pretende verificar a possibilidade de se avaliar em processo o desgaste de ferramentas numa situação real de usinagem de peça de geometria complexa - eixo de saída de transmissão automotiva. A operação escolhida para o monitoramento foi a primeira operação de torneamento após o faceamento e

centragem, a qual emprega duas ferramentas: uma de desbaste e outra de acabamento. Em produções seriadas, o torneamento é uma das operações que mais necessita de intervenções do operador.

DIEI & DORNFELD (1987) afirmam que a metodologia de monitoramento por emissão acústica (EA) é atrativa porque o sinal (onda de tensão) é gerado pelos principais mecanismos envolvidos na usinagem dos metais: deformação plástica, atrito, fratura de cavacos e ferramenta. Portanto, este foi o método escolhido para verificação indireta do desgaste das ferramentas.

A aplicação em questão não pretende ser flexível, uma vez que a célula, na qual se procede a operação em estudo, é dedicada à usinagem de uma família de peças com geometrias idênticas no torneamento. Portanto, um possível método de monitoramento do desgaste das ferramentas seria:

- 1) Estabelecer valores de referência para o sinal de EA para ferramentas em condição de fim de vida.

- 2) Verificar se existe tendência de aumento ou atenuação do sinal da situação inicial de usinagem para aquela na qual a ferramenta está na condição de fim de vida. Existindo tendências definidas, é possível definir se a referência estabelecida no item 1 é limite superior ou inferior de controle para o sinal de EA.

- 3) Deve-se verificar também se a tendência observada é função do desgaste, ou seja, se há correlação entre estas grandezas. Além disso, a influência de fatores externos como, por exemplo, pressão no contra-ponto deve ser testada.

Objetivando-se, então, testar a viabilidade de aplicação da técnica de EA no monitoramento do desgaste de ferramentas no torneamento de eixos de transmissão em um ambiente industrial, este trabalho foi estruturado em sete capítulos.

Os capítulos 2, 3 e 4 são o resultado de pesquisa bibliográfica feita sobre os principais assuntos relacionados aos procedimentos experimentais. São de extrema importância como embasamento teórico e atualização sobre demais trabalhos realizados na área de monitoramento de processos de usinagem.

No capítulo 2, discute-se sobre os principais métodos de monitoramento dos processos de usinagem, ressaltando-se aspectos positivos e negativos de cada um deles.

No capítulo 3, são descritas as principais avarias e desgastes de uma ferramenta de metal duro, bem como os mecanismos que procuram explicar o seu surgimento.

O quarto capítulo trata de maneira conceitual a emissão acústica e sua relação com a operação de torneamento.

Discorre-se em seguida, no capítulo 5, sobre como foi implementado o procedimento experimental e os métodos utilizados na análise dos dados obtidos.

Finalmente, nos capítulos 6 e 7, são apresentados os resultados, discussões, conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

2 MÉTODOS DE MONITORAMENTO DE PROCESSOS DE USINAGEM

Os métodos de monitoramento de processos de usinagem são normalmente divididos em dois grandes grupos:

- 1) Monitoramento direto é aquele onde a grandeza estudada é medida diretamente.
- 2) Monitoramento indireto é aquele no qual um outro parâmetro é medido e relacionado com o parâmetro estudado.

2.1 *Métodos de Monitoramento Direto*

Nos métodos diretos, a medição do parâmetro estudado é geralmente realizada após terminado o ciclo de usinagem. As principais técnicas de monitoramento direto de processos de usinagem serão citadas a seguir.

2.1.1 Medidas ópticas

Segundo DAN & MATHEW (1990), uma região desgastada da ferramenta apresenta maior refletividade quando comparada a uma região não desgastada. Assim, medindo-se a refletividade de uma região, é possível quantificar seu desgaste.

RYABOV et al. (1996) realizaram o mapeamento tridimensional de uma fresa com auxílio de um sensor de deslocamento laser, com a ferramenta girando presa ao próprio eixo da máquina. Esta técnica permitiria a identificação de lascamentos na ferramenta (Figura 2.1), bem como a medição do desgaste de flanco com erro máximo de 40 μm .

A desvantagem deste método é que a presença de cavacos e fluido de corte, exige a utilização de pré-processamento para eliminar a influência destes no sinal, o que pode demandar alta carga computacional e até mesmo inviabilizar o monitoramento. A formação de aresta postiça de corte ou a adesão de material sobre a região desgastada da ferramenta também podem gerar informações inconsistentes sobre o desgaste da ferramenta.

FIGURA 2.1. Mapeamento 3D de ferramenta - RYABOV et al. (1996)

2.1.2 Análise de partículas

Segundo UEHARA (1973), uma parte das partículas desgastadas da ferramenta é carregada pelo cavaco no torneamento. É possível separá-las do cavaco através de imersão em soluções e filtragem para análise química e assim quantificar o desgaste.

A desvantagem deste método é que procedimento de separação é lento, pouco prático, necessita de instalações laboratoriais adequadas e é pouco preciso.

2.1.3 Radioatividade

COOK & SUBRAMANIAN (1978) afirmam que a radioatividade pode ser usada para medir a perda volumétrica de material da ferramenta. Este método consiste em ativar a ferramenta com nêutrons na região a ser desgastada e, à medida que o desgaste cresce, mede-se a queda de radioatividade da ferramenta.

A desvantagem deste método é que o procedimento de preparação das ferramentas é lento e necessita de instalações laboratoriais adequadas, as quais também são necessárias para a medição da radioatividade da ferramenta.

2.1.4 Variações dimensionais da peça

O desgaste da ferramenta geralmente provoca uma alteração dimensional na peça usinada. No torneamento, por exemplo, a tendência é de aumento do diâmetro com o desgaste. A desvantagem de se medir o desgaste da ferramenta pela variação dimensional da peça é que há outros fatores que influenciam esta variação como: temperatura, condições de fixação da peça, vibrações e variações inerentes à máquina (erros de posicionamento, folgas, atritos, desgastes). Nem sempre é possível separar a influência de todos estes fatores.

Diversos fabricantes dispõem de sistemas de medição automáticos da peça (Marposs, Infas) que, conjuntamente com o comando numérico computadorizado da máquina, constituem um sistema retroalimentado capaz de manter as dimensões da peça dentro de um intervalo de controle através de correções na posição da ferramenta proporcionais ao erro entre o valor medido na peça e o valor especificado para a dimensão. Estes sistemas indiretamente compensam o desgaste da ferramenta, mas são incapazes de indicar se a ferramenta já se encontra em fim de vida, ou seja, a intervenção do operador ainda se faz necessária. Além disso, eles têm a desvantagem de geralmente serem dedicados e de alto custo.

2.1.5 Sondas de detecção de toque

As sondas de detecção de toque merecem destaque pela sua confiabilidade e amplo emprego na implementação de métodos de monitoramento direto. Sua invenção data do início da década de 70. Embora seu potencial de aplicação em máquinas ferramentas tenha sido prontamente reconhecido, ele não ocorreu antes dos meados dos anos 80 quando se desenvolveram máquinas com controles mais sofisticados e então o uso de sondas foi adotado pelos maiores fabricantes de máquinas ferramentas do mundo.

Uma aplicação particularmente interessante é o “presetting” de ferramentas, ou a determinação automática das dimensões da ferramenta (Figuras 2.4 e 2.5). As sondas para este tipo de aplicação são facilmente instaladas em centros de usinagem ou tornos CNC e permitem operação automática com os seguintes benefícios:

- 1) Detecção de quebra de ferramenta em ciclo (entre operações);
- 2) Redução do tempo de máquina parada e refugos devido a colisões que ocorram em função de erros durante entrada manual de dados relativos à geometria da ferramenta ou em função de quebra de ferramentas;
- 3) Redução de manutenções corretivas;
- 4) Eliminação da necessidade de “presetting” manual de ferramentas;
- 5) Redução de tempo de “setup” (tempo de preparação) de ferramentas.

Outras aplicações (Figuras 2.2 e 2.3) incluem: “setup” automático de peças (determinação de referência para usinagem na peça) e inspeção dimensional em ciclo.

FIGURA 2.2. "Setup" automático de peça - RENISHAW (1998)

FIGURA 2.3. Inspeção dimensional - RENISHAW (1998)

FIGURA 2.4. "Presetting" de fresa - RENISHAW (1998)

FIGURA 2.5. "Presetting" de broca - RENISHAW (1998)

A principal desvantagem deste método é aumento do tempo de ciclo completo da operação, uma vez que a medição da peça ou ferramenta não pode ser realizada durante a usinagem. Esta redução de tempo pode ser minimizada realizando-se medições amostrais a intervalos definidos segundo critérios que atendam às necessidades do processo.

Um resumo dos métodos de monitoramento direto com seus principais pontos positivos e negativos e aplicações mais comuns é mostrado na Tabela 2.1.

TABELA 2.1. Resumo dos principais métodos de monitoramento direto e sondas de detecção de toque

Método	Pontos positivos	Pontos negativos	Aplicações mais comuns
<u>Medidas ópticas</u> (sensor de deslocamento laser e medição de refletividade).	• Possibilitam o mapeamento tridimensional da ferramenta.	• Fatores complicadores: ▪ aresta postiza; ▪ cavacos; ▪ fluido de corte.	• Torneamento; • Fresamento.
<u>Análise de partículas</u> (separação de partículas de desgaste no cavaco ou fluido de corte).	• Aplicabilidade.	• Procedimento de separação lento e pouco prático; • Medição laboratorial; • Pouca precisão.	• Universal.
<u>Análise de radioatividade</u> (medição de perda de radioatividade da ferramenta)	• Aplicabilidade.	• Preparação das ferramentas (ativação com nêutrons); • Medição laboratorial.	• Universal.
<u>Variações dimensionais da peça</u>	• Simplicidade - Sistemas disponíveis comercialmente	• Suscetível à influência de outros fatores: ▪ temperatura; ▪ vibrações; ▪ sistema de fixação. • Sistemas dedicados, de alto custo.	• Torneamento; • Fresamento; • Furação.
<u>Sondas de detecção de toque</u> (medição de peça ou ferramenta)	• “Presseting” automático; • Detecção de quebras; • Referência de usinagem automática.	• Aumento de tempo de ciclo.	• Fresamento; • Furação; • Torneamento.

2.2 Métodos de Monitoramento Indireto

Em geral, nos métodos de monitoramento indireto, a medição do parâmetro estudado é realizada durante o funcionamento normal da máquina, sem a necessidade de interrupção da usinagem.

Segundo PIGARI (1995), a dificuldade existente no monitoramento indireto está em conhecer o relacionamento do parâmetro medido com o parâmetro estudado e também eliminar as interferências de ruídos do sistema no sinal medido.

As principais técnicas de monitoramento indireto de processos de usinagem serão citadas a seguir.

2.2.1 Forças de corte

A força de usinagem se altera com o desgaste da ferramenta e principalmente com a sua quebra ou lascamento. Ela pode ser representada por três componentes: força principal de corte (componente na direção da velocidade de corte), força de avanço (componente na direção do avanço) e força passiva (também conhecida por força de profundidade). Alguns trabalhos mostraram que as forças de avanço e passiva são mais influenciadas pelo desgaste da ferramenta que a força principal de corte: TAKEYAMA et al. (1970), JETLY (1984).

SANTOCHI et al. (1997) observaram uma variação de 12% da força de corte entre as condições de ferramenta nova e com desgaste de flanco (V_B) igual a 0,23 mm em operação de torneamento (condições de usinagem constantes, aço AISI 1015, ferramenta SNMG 150608 com cobertura de TiN e TiC); também observaram um aumento de 11% da força de corte, variando-se a profundidade de corte entre 0,50 mm e 0,55 mm.

A dependência dos parâmetros de usinagem é um empecilho à implementação deste método em sistemas reais de usinagem. Nestes casos, ou a análise é limitada a situações onde as condições de usinagem são constantes, ou

técnicas adequadas são utilizadas para compensar a influência destas variáveis no sinal.

A adaptação de suportes de ferramentas para instrumentação pode ser feita como na ilustrado na Figura 2.6.

FIGURA 2.6. Adaptação de suporte para medição de força de corte - SANTOCHI et al. (1997)

LAN & DORNFELD (1984) afirmam que, no monitoramento de fratura da ferramenta, as forças de corte apresentam grande sensibilidade.

2.2.2 Parâmetros elétricos do motor

DAN & MATHEW (1990) afirmam que, durante o processo de corte, a potência consumida pelo motor principal da máquina aumenta com o desgaste da ferramenta.

MANNAN & BROMS (1989) mostraram que a quebra da ferramenta pode ser monitorada com sucesso pelos parâmetros elétricos do motor principal. O monitoramento do desgaste mostrou-se mais sensível quando se avaliou a variação da corrente do servo motor de avanço.

A desvantagem de se utilizar este método de monitoramento para avaliar o desgaste de ferramentas é que a influência de outros fatores como microestrutura e

dureza do material e quantidade de sobremetal (comumente bastante variáveis) pode ser mais relevante que a influência do desgaste.

2.2.3 Medição de rugosidade

Segundo PIGARI (1995), a rugosidade da peça usinada sofre alteração ao longo da vida da ferramenta de corte, principalmente, quando um mecanismo de danificação da aresta de corte acontece, um lascamento por exemplo. Assim é possível monitorar a vida da ferramenta através da verificação da rugosidade das peças usinadas.

A desvantagem do método de monitoramento através da medição de rugosidade é que outros fatores, além do desgaste de ferramenta, podem influenciar o desgaste da ferramenta como: rigidez do sistema de fixação e suporte da ferramenta, vibrações, condição de lubrificação e refrigeração, variações na composição do material e microestrutura da peça.

2.2.4 Emissão acústica

O monitoramento usando a emissão acústica é o método selecionado para elaboração deste trabalho. Portanto, será discutido mais extensamente a seguir.

2.2.5 Combinação de parâmetros

Uma abordagem que tem se tornado comum entre vários pesquisadores – NOVAK & WIKLUND (1996), SHINNO et al. (1996), JAMMU et al. (1993), CHRYSSOLOURIS et al. (1992) – é a de multi-sensores, ou seja, a combinação de

dois ou mais métodos de monitoramento, visando maior flexibilidade e confiabilidade.

Além de extrair informações adicionais sobre o sistema, o inter-relacionamento das variáveis, o método torna-se mais tolerante a falhas. Pode-se, por exemplo, tolerar a falha de um dos sensores, ou mesmo criar-se rotinas de checagem de um sensor pelo outro.

Com relação à flexibilidade, sua obtenção geralmente recai na utilização de métodos computacionais, dos quais os principais serão descritos a seguir devido ao seu uso crescente.

Um resumo dos métodos de monitoramento indireto com seus principais pontos positivos e negativos e aplicações mais comuns é mostrado na Tabela 2.2.

TABELA 2.2. Resumo dos principais métodos de monitoramento indireto

Método	Pontos positivos	Pontos negativos	Aplicações mais comuns
<u>Forças de corte</u> (aumento das forças de avanço e passiva com o desgaste)	Sensibilidade à quebra de ferramentas.	Dependência dos parâmetros de usinagem.	- Torneamento. - Furação
<u>Parâmetros elétricos do motor</u> (Potência consumida e corrente no motor aumentam com o desgaste)	- Sensibilidade à quebra de ferramentas; - Simplicidade de medição;	Dependência dos parâmetros de usinagem.	- Torneamento; - Furação.
<u>Medição de rugosidade</u> (desgaste e danos à aresta causam pior acabamento superficial da peça usinada)	Boa representatividade do desgaste em operações de acabamento.	- Influência de outros fatores: - vibrações; - fluido de corte; - material da peça.	Torneamento (acabamento).
<u>Emissão acústica</u> (gerada pelos principais mecanismos envolvidos na usinagem dos metais)	- Baixa intrusividade; - Sensibilidade à quebra de ferramentas.	- Dependência de parâmetros de usinagem; - Influência de outros fatores: - vibrações; - fixação da peça; - ruídos.	- Retificação; - Torneamento.

2.3 *Métodos de Monitoramento Computacionais*

Os métodos de monitoramento computacionais são aplicações especiais dos métodos de monitoramento diretos e indiretos. Diferem dos demais pelo pós-processamento dos dados adquiridos, no qual técnicas de inteligência artificial são geralmente utilizadas para extração de características mais apuradas do fenômeno em estudo.

A maior desvantagem dos métodos de monitoramento computacionais é a maior complexidade de implementação. Além disso, por maior que seja sua capacidade de adaptação a situações inusitadas, ainda há uma grande dependência com relação aos padrões utilizados no treinamento ou base de conhecimentos empregada. Maiores detalhes serão discutidos a seguir.

2.3.1 Reconhecimento de padrões

Segundo DU et al. (1995), os métodos de reconhecimento de padrões podem ser divididos em dois grupos: métodos estatísticos (também chamados métodos de reconhecimento de padrões não determinísticos) e métodos de distribuição livre (também chamados métodos de reconhecimento de padrões determinísticos).

Métodos estatísticos de reconhecimento de padrões têm seu desempenho dependente da distribuição de probabilidade do processo (probabilidade de uma determinada amostra pertencer a determinada condição do processo). Tem sido mostrado que, se as distribuições de probabilidade são Gaussianas ou aproximadamente Gaussianas, a classificação é otimizada. Contudo, no monitoramento de processos de usinagem, as distribuições de probabilidade são geralmente desconhecidas e podem não se aproximar de distribuições Gaussianas. Portanto, os métodos determinísticos são preferidos na maioria das vezes.

Os métodos determinísticos baseiam-se na similaridade de uma determinada amostra a padrões que descrevem as condições do processo. Há várias maneiras de

definir padrões e similaridades. Disto resultam vários métodos determinísticos de reconhecimento de padrões como, por exemplo, o algoritmo de Mahalanobis, algoritmo de separação linear (também chamado de algoritmo da média K) e o algoritmo de Fisher.

Em geral, o reconhecimento de padrões pode ser visto como uma decomposição do espaço amostral em regiões de interesse ou de controle (Figura 2.7). A eficácia do reconhecimento de padrões não depende somente do algoritmo utilizado, mas também da distribuição das amostras de aprendizado e da definição das condições do processo nas quais se deseja dividir o espaço amostral.

FIGURA 2.7. Representação típica do reconhecimento de padrões aplicado a um espaço bidimensional - DU et al. (1995)

Se os padrões não forem representativos do processo, pode-se incorrer em erros.

2.3.2 Sistemas Fuzzy

Os sistemas Fuzzy foram inicialmente introduzidos em 1965 por Lotfi Zadeh. Nesta abordagem, incertezas são descritas através de funções de pertinência e seus respectivos graus de incerteza ou graus de pertinência.

Sendo x uma variável de entrada do sistema (sinal de um sensor, por exemplo) o grau de incerteza $\xi(x)$ é tal que: $0 \leq \xi \leq 1$, enquanto “0” significa certamente não e “1” significa certamente sim. A Figura 2.8 ilustra o conceito de uma classificação fuzzy comparada com uma classificação binária. Uma confusão que geralmente ocorre é entre os significados de grau de pertinência e probabilidade. O grau de pertinência representa a imprecisão de determinado evento, enquanto probabilidade descreve sua frequência de ocorrência.

FIGURA 2.8. Comparação entre classificação Fuzzy e binária e exemplo de determinação de grau de incerteza

Geralmente é possível estabelecer uma base de conhecimentos que descreva o fenômeno em estudo estruturada na forma de sentenças como:

Se corrente no motor é ALTA E força de corte é ALTA então desgaste é ALTO.

A primeira parte desta sentença Fuzzy “Se corrente do motor é ALTA E força de corte é ALTA” pode ser avaliada, baseando-se nos dados da Figura 2.8, como: $\min(0,75; 0,25) = 0,25$; onde 0,75 é igual ao grau de incerteza da função de pertinência ALTA da variável corrente do motor quando esta assume o valor de 5,5 A e 0,25 é igual ao grau de incerteza da função de pertinência ALTA da variável força de corte quando esta assume o valor de 400 kgf. A seguir, o resultado desta operação é “transferido” para a função de pertinência “ALTO” da variável de saída “desgaste” num processo conhecido como inferência (Figura 2.9).

FIGURA 2.9. Processo de inferência Fuzzy

As inferências das diversas sentenças Fuzzy possíveis são então combinadas através de união ou soma. Geometricamente, a união é representada pela sobreposição das áreas obtidas em cada inferência, sendo denominada de conjunto Fuzzy.

Métodos conhecidos como métodos de defuzzificação são então aplicados para transformar uma grandeza Fuzzy (conjunto Fuzzy) num valor numérico representativo do estado da variável de saída em função das entradas do sistema. O método do centróide (Figura 2.10) pode ser visualizado como o centro de gravidade do conjunto Fuzzy ao longo do eixo das abscissas. Pelo valor do centróide ilustrado na Figura 2.10, por exemplo, conclui-se que a ferramenta está com um desgaste médio-baixo.

FIGURA 2.10. Processo de defuzzificação

Baseado em sistemas fuzzy, um grande número de métodos de classificação tem sido desenvolvido: RUSPINI* apud DU et al.(1995), mas apenas alguns têm sido utilizados em monitoramento de processos de usinagem: LI & WU** apud DU et al.(1995), WANG et al.*** apud DU et al.(1995), DU et al. (1992). Para o tratamento de incertezas inerentes ao processo de usinagem dos metais, DU et al. (1995) afirmam que os sistemas fuzzy oferecem a vantagem de prover meios sistemáticos para descrever a situação da ferramenta e várias características do processo.

A desvantagem dos sistemas fuzzy é que seu sucesso depende do conhecimento prévio do fenômeno (mesmo que empiricamente), necessário para elaboração da base de conhecimento e das sentenças fuzzy. Além disso, a escolha da melhor função de pertinência e seu ajuste pode ser extremamente difícil.

*RUSPINI, E. (1981). Numerical methods for fuzzy clustering. *Inf. Sci.*, v.6, p.273-284.

**LI, P.G.; WU, S.M. (1987). Monitoring of drill wear states using fuzzy pattern recognition technique. *ASME Journal of Engineering for Industry*, v.110, n.2, p.297-300.

***WANG, M.; ZHU, J.Y.; ZHANG, Y.Z. (1985). Fuzzy pattern recognition of the metal cutting states. *Annals of the CIRP*, v.34, n.1.

2.3.3 Árvores de Decisão

A Figura 2.11 ilustra uma aplicação simples de árvores de decisão no monitoramento de desgaste de ferramentas, tendo como variáveis de entrada força de corte e corrente no motor.

O processo de construir árvores de decisão é chamado aprendizado ou treinamento. Há dois tipos de treinamento: aprendizado por instruções e aprendizado por amostras. DU et al. (1995) afirmam que, no o monitoramento de processos de usinagem, as instruções para tomada de decisões são geralmente incompletas, imprecisas e subjetivas. Por outro lado, amostras podem ser obtidas através de experimentos sistemáticos. Em função disto, o aprendizado com amostras é comumente preferido.

FIGURA 2.11. Exemplo de árvore de decisão

A idéia básica de aprender com amostras é o particionamento. Um particionamento trivial é usar cada amostra como um nó na árvore de decisão (uma regra de classificação). Isto resultaria numa árvore grande, mas que dificilmente pode lidar com variações em novas amostras. Uma melhor maneira é agrupar as amostras similares para formar o nó da árvore. Obviamente, uma árvore de decisão ótima poderia ser encontrada, mas isto requer uma alta carga computacional. Então, diversos algoritmos foram desenvolvidos para encontrar ótimos locais para árvores de decisão. Entre estes algoritmos, os mais difundidos são o ID3 (Iterating Dichotomizer Three) e o AQ15. Em ambas as árvores de decisão são construídas

através do particionamento de amostras de treinamento. Como resultado, sintomas irrelevantes nas amostras de aprendizagem podem ser mal identificados e usados como regras de classificação. Para minimizar o efeito de sintomas irrelevantes, árvores de decisão precisam de “podas”. Um grande número de algoritmos de poda de árvores de decisão tem sido desenvolvido como os pesquisados por QUINLAN* apud DU et al. (1995) e DU** apud DU et al. (1995).

É de se esperar que ocorram classificações incorretas principalmente quando se está próximo dos limites das regras de classificação. Para se minimizar este efeito árvores de decisão fuzzy, desenvolvidas por LI et al. (1992), podem ser usadas.

Algumas desvantagens das árvores de decisão são: carga computacional elevada e necessidade de algoritmos complementares: “podas”; ou combinados: árvores de decisão Fuzzy e de probabilidades para evitar classificações incorretas.

2.3.4 Sistemas Especialistas

Uma das primeiras aplicações com sucesso de sistemas especialistas, MYCIN, foi desenvolvida em meados dos anos 70 por SHORTLIFFE*** apud DU et al. (1995). Na área de manufatura, vários sistemas têm sido desenvolvidos, como o sistema especialista para planejamento de usinagem, HICLASS, de LIU**** apud DU et al. (1995) e o sistema de diagnóstico de falhas mecânicas, FAXS, de FREED & WRIGHT***** apud DU et al. (1995).

*QUINLAN, J.R. (1987). Simplifying decision trees. *Int. J. Man-Machine Studies*, v.27, p.221-234.

**DU, R. (1989). *Methods for intelligent on-line monitoring and diagnosis of manufacturing process*. Michigan. Teses Ph.D. - University of Michigan.

***SHORTLIFFE, E.H. (1976). *Computer-based medical consultation, MYCIN*. Amsterdam, Elsevier Scientific Pub. Co.

****LIU, D. (1986). A case study of the HICLASS^{TM} software system: a manufacturing expert system. *Knowledge-based Expert Systems for Manufacturing*, v.24, p.12-25.

*****FREED, D.; WRIGHT, D. (1986). FAXS, An expert system for the analysis of mechanical failures. *ASME Proceedings on Computers in Engineering*.

Em geral, um sistema especialista é composto de três partes: um módulo de inferência, uma interface homem-máquina e uma base de conhecimento. O maior esforço em se desenvolver um sistema especialista está na criação da base de conhecimento a partir da qual respostas para novas situações serão inferidas. Em muitas aplicações (por exemplo diagnóstico médico) a base de conhecimento pode ser estabelecida através de entrevistas sistemáticas e análises estatísticas. Para o monitoramento de processos de manufatura, os métodos de árvores de decisão são recomendados combinados com outras informações, incluindo regras empíricas e semi-empíricas, modelos teóricos, simulações computacionais e testes experimentais.

Os sistemas especialistas geralmente são utilizados como ferramentas auxiliares para o operador, ou seja, as aplicações mais comuns em usinagem são não automatizadas.

2.3.5 Redes Neurais

Segundo DU et al. (1995), ao contrário de sistemas especialistas, que processam seqüencialmente informações, redes neurais as processam em paralelo. Uma rede neural pode ser formada por várias camadas, sendo cada camada constituída por um determinado número de neurônios. Os neurônios são definidos por suas conexões. Por exemplo, o neurônio de McCulloch-Pitts é definido como:

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{se } \sum w_{ij} x_j \geq 0 \\ 0, & \text{senão} \end{cases} \quad (2.1)$$

Onde x_j são as entradas do neurônio; y_i são as saídas do neurônio e w_{ij} são os pesos representando a força da conexão a outros neurônios. Um modelo generalizado é o neurônio de Hopfield:

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{se } f(\sum w_{ij} x_j - \theta_i) \geq 0 \\ 0, & \text{senão} \end{cases} \quad (2.2)$$

Onde θ_i é um limite e f é uma função não linear.

Os neurônios são arranjados de acordo com uma estrutura predefinida, como mostrado na Figura 2.12. A estrutura é definida pelo número de camadas e pelo número neurônios em cada camada. Em geral não há uma regra para a determinação da estrutura de uma rede neural.

FIGURA 2.12. Representação de rede neural com três neurônios

A fase de aprendizado envolve a determinação dos pesos das conexões (w_{ji}). Vários algoritmos de aprendizado têm sido desenvolvidos. Entre eles o “back-propagation” talvez seja o mais difundido. Para um neurônio de Hopfield, quando uma amostra, é apresentada com uma saída conhecida (condição de processo), a fase de aprendizado é ativada e o peso, w_{ij} , é atualizado:

$$w_{ij} = \eta \delta_j y_i \quad (2.3)$$

Onde η é uma constante de aprendizado e δ_j é um fator dependente do erro entre a resposta esperada e a resposta obtida pela rede neural.

O sucesso de uma rede neural é extremamente dependente da fase de treinamento, ou seja, depende da escolha de amostras de treinamento representativas do processo, bem como da quantidade de interações utilizadas. Uma quantidade muito grande de interações geraria um erro na saída muito pequeno para dados de entrada semelhantes às amostras de treinamento e resultados pouco confiáveis para dados de entrada não semelhantes às amostras de treinamento. Por outro lado, um

número menor de interações restringe menos a capacidade da rede de lidar com situações inusitadas, mas em geral aumenta o erro da variável de saída.

Aplicações para o monitoramento de processos de usinagem têm sido reportadas por RANGWALA & DORNFELD (1990).

3 FERRAMENTA DE METAL DURO, AVARIAS E DESGASTES

3.1 *A Ferramenta de Metal Duro*

O metal duro é um sub-produto da metalurgia do pó. Basicamente, é um composto constituído por carbeto de tungstênio (WC) e cobalto (Co). O WC proporciona a resistência ao desgaste, por ser uma substância de elevada dureza, e o Co é responsável pela tenacidade. A adição de outros tipos de carbetos (carbeto de titânio, TiC, carbeto de tântalo, TaC) tende a melhorar as propriedades gerais dos compostos. Recentemente, a utilização de TiC e TaC tornou-se bastante difundida.

Depois que os carbetos e o cobalto tenham sido misturados, moídos e posteriormente secados em “spray-dryer”, resultando em um pó bem fino, este é prensado, formando as pastilhas que são então chamadas de briquetes. O briquete é muito frágil e tão quebradiço quanto um pedaço de giz. Logo em seguida, os briquetes são mantidos a elevada temperatura (1400° a 1600° C) e pressão num processo conhecido como sinterização. O material resultante deste processo é o metal duro. Depois do processo de sinterização, certos tipos de pastilhas são retificados com rebolos de carbureto de silício ou rebolos diamantados. Atualmente, devido à alta precisão alcançada na prensagem direta de perfis acabados, há a possibilidade de minimização ou mesmo eliminação completa das operações de retificação de acabamento de pastilhas. A Figura 3.1 ilustra de maneira simplificada o processo de fabricação de uma pastilha de metal duro.

O equilíbrio das características de dureza e tenacidade presente nas ferramentas de metal-duro mais a resistência a altas temperaturas e baixo custo (Figura 3.2) lhes confere uma grande gama de aplicações na usinagem.

FIGURA 3.1. Processo de fabricação de pastilha de metal duro – SECO (2000)

FIGURA 3.2. Dureza, tenacidade e temperatura máxima de corte de materiais para construção de ferramentas de corte – MARCONDES (1990)

No final da década de 60 (cerca de 40 anos após o surgimento do metal duro à base de WC), começam a surgir as ferramentas de metal duro revestidas. De acordo com SECO technical guide (2000), os processos de cobertura das pastilhas de metal duro, sempre resultam em maior resistência ao desgaste, que o composto original. As modernas classe de metal duro, apresentam normalmente uma fina camada de cobertura (5 a 10- μ m) produzida pelos processos de deposição química de vapor (CVD - Chemical Vapour Deposition) e deposição física de vapor (PVD - Physical Vapour Deposition).

No processo de CVD a cobertura é formada por uma reação química de uma mistura de gases na superfície da peça a ser revestida. Para isto, são necessárias temperaturas de 700 ° a 900° C. De acordo com SECO technical guide (2000), a técnica de cobertura CVD produz camadas finas e aderentes, de TiC, TiN e Al₂O₃ com uma elevada resistência ao desgaste. A desvantagem deste método é a utilização

de elevadas temperaturas, fato que geralmente provoca a redução da tenacidade do composto. Por outro lado, o CVD propicia uma boa uniformidade da espessura do revestimento e ainda a aplicação em componentes com geometrias complexas, furos e tubos. As coberturas do tipo CVD são recomendadas para operações com elevadas taxas de avanço e velocidades de corte de moderadas a altas.

O PVD é um processo no qual um componente metálico em estado sólido, por exemplo o titânio, substitui o meio gasoso da reação do CVD. Algumas técnicas são utilizadas para transformação deste material sólido para a condição de vapor, sendo a mais utilizada a Deposição Iônica (Ion Plating), onde o material de revestimento é evaporado por uma descarga aquecida a baixa pressão e ionizado parcialmente por colisões. A ferramenta é mantida a uma alta voltagem (corrente contínua) de maneira a atrair os íons e propiciar a adesão. De acordo com SECO technical guide (2000), a técnica de cobertura PVD utiliza baixas temperaturas e raramente causa perdas na tenacidade. O processo PVD, permite a deposição de camadas de TiN, Ti(C,N) e (Ti,Al)N. A principal desvantagem do processo está relacionada à espessura da camada depositada, que por motivos de aderência deve ser menor que a obtida pelo processo de CVD. Por outro lado, camadas mais finas são mais adequadas para o revestimento de ferramentas de precisão e para ferramentas de corte para operações de usinagem interrompida, onde a tenacidade deve ser maior. As coberturas do tipo PVD são recomendadas para operações com baixas taxas de avanço e velocidades de corte de moderadas a baixas.

3.2   *Avarias da Ferramenta de Corte*

FERRARESI (1977) considera como avarias da ferramenta as quebras, trincas, sulcos distribuídos em forma de pente e as deformações plásticas, que ocorrem no gume cortante durante a usinagem.

3.2.1 Quebras

FERRARESI (1977) afirma que a ruptura da ponta ou aresta cortante da ferramenta (Figura 3.3) é originada pela ação de grandes forças de usinagem nos seguintes casos: ângulo de ponta ou ângulo de cunha pequeno, material de corte quebradiço, corte interrompido, parada instantânea do movimento de corte sem a retirada prévia da ferramenta da peça. Ferramentas de material cerâmico e de carbonetos duros são mais sensíveis às bruscas solicitações locais e, portanto a pequenas quebras da aresta cortante.

A quebra da ferramenta é um acontecimento muito danoso, pois normalmente causa a perda da peça usinada, podendo também danificar o porta-ferramentas e a máquina-ferramenta. Além disso, quando considera-se altos volumes de produção e o emprego de processos automatizados – uma quantidade expressiva de refugos pode ser gerada porque nem sempre a avaria é prontamente detectada. Muitos dos refugos gerados podem ainda seguir o fluxo normal do processo, causando danos a operações posteriores de usinagem, montagem ou mesmo falhas no produto final.

FIGURA 3.3. Ruptura de ponta de ferramenta de metal duro – SECO (2000)

3.2.2 Trincas devido a variações de temperatura

Segundo FERRARESI (1997), o calor gerado no processo de corte é em parte dissipado pela ferramenta. A região da ferramenta na qual a temperatura é mais alta é a que está em contato com o cavaco. Nas zonas mais distantes, a temperatura é

bastante inferior. Em consequência disto, a ferramenta se dilata e se deforma desigualmente, causando concentrações de tensões e trincas (Figura 3.4).

FIGURA 3.4. Trincas térmicas em ferramenta de metal duro – SECO (2000)

3.2.3 Sulcos distribuídos em forma de pente

FERRARESI (1977) afirma que os sulcos distribuídos em forma de pente (Figura 3.5) aparecem no corte interrompido, na usinagem com avanço variável e no acesso irregular do fluido de corte. Tais ocorrências provocam uma variação na temperatura de corte.

FIGURA 3.5. Sulcos distribuídos em forma de pente - FERRARESI (1977)

Durante a usinagem a camada superficial (interface de contato cavaco-

ferramenta), a uma temperatura bastante alta, se dilata. As camadas subseqüentes, a temperaturas inferiores, terão uma dilatação bem menor. Desta forma, origina-se na camada superficial tensões de compressão. Em consequência disto, haverá, a determinada distância da superfície de contato, tensões de tração. Ocorrendo, num instante seguinte, o resfriamento da superfície de contato (devido, por exemplo, ao intervalo de ação do dente cortante de uma fresa), essa camada estará submetida à tração, enquanto que as camadas subseqüentes passarão a ser solicitadas à compressão. Esta variação de tensões repete-se com a variação de temperatura proveniente do corte interrompido ou do acesso irregular do refrigerante de corte.

Após um determinado número de variações de solicitações na ferramenta, aparecem trincas superficiais. Estas trincas, sob a ação da peça e do cavaco em movimento, originam pequenos sulcos.

A vibração da ferramenta também contribui para o aumento do número de sulcos.

3.2.4 Deformação plástica da aresta de corte

A pressão aplicada à ponta da ferramenta somada à alta temperatura, pode gerar uma deformação plástica na aresta de corte (Figura 3.6). Tal deformação provoca deficiência do controle de cavacos e deterioração do acabamento superficial da peça. Se for permitido o crescimento desta deformação até valores altos, pode haver quebra da aresta de corte. Isto pode ser evitado pelo emprego de uma ferramenta com maior dureza a quente e maior resistência à deformação plástica.

FIGURA 3.6. Deformação plástica em ferramenta de metal duro - SECO (2000)

3.2.5 Lascamento

PIGARI (1995) ainda distingue o lascamento como um tipo de avaria da ferramenta, no qual partículas relativamente grandes da ferramenta são retiradas de uma só vez (Figura 3.7). Acontece principalmente em ferramentas com material frágil ou quando a aresta de corte é pouco reforçada. Provoca a deterioração do acabamento superficial da peça e pode levar à quebra da ferramenta. O corte interrompido favorece este tipo de avaria.

FIGURA 3.7. Lascamento em ferramenta de metal duro - SECO (2000)

3.3 *Desgastes da Ferramenta de Corte*

De acordo com FERRARESI (1977), durante a usinagem, o desgaste ocorre nas superfícies de saída e folga da ferramenta. Para facilitar o estudo da usinagem, os desgastes das ferramentas costumam ser classificados em desgaste de cratera e desgaste de flanco.

3.3.1 Desgaste de cratera

Denomina-se desgaste de cratera aquele ocorrido na superfície de saída da ferramenta em função do atrito entre cavaco e ferramenta. As principais variáveis de medição deste tipo de desgaste (Figura 3.8) são:

- 1) C_p - profundidade da cratera;
- 2) Cl - largura da cratera.

A medição de profundidade da cratera, C_p , é feita geralmente por perfilômetros registradores especiais. A medição da largura da cratera, Cl , pode ser feita com uma lupa graduada em décimos de milímetro com aumento de oito vezes ou com microscópio de oficina, no caso de necessidade de maior precisão.

Um desgaste elevado da superfície de saída da ferramenta pode enfraquecer a aresta de corte ou mesmo determinar sua quebra.

FIGURA 3.8. Desgaste da ferramenta de metal duro e seus parâmetros de medição segundo COOK (1973)

3.3.2 Desgaste de flanco

Denomina-se desgaste de flanco ou frontal aquele ocorrido na superfície de folga da ferramenta em função do atrito entre peça e ferramenta. V_B é a principal variável de medição deste tipo de desgaste (Figura 3.8).

A medição do desgaste de flanco, V_B , pode ser feita com uma lupa graduada em décimos de milímetro com aumento de oito vezes ou com microscópio de oficina, no caso de necessidade de maior precisão.

O desgaste de flanco, por contribuir com o aumento do atrito entre peça e ferramenta, é altamente prejudicial ao acabamento da superfície usinada. O aumento do atrito reflete-se também em aumento da força de corte, vibrações e maior dificuldade na manutenção de tolerâncias de fabricação.

3.4 Mecanismos de Desgaste das Ferramentas de Metal Duro

Segundo FERRARESI (1977), o desgaste de uma ferramenta de metal duro é o resultado da ação de vários fenômenos distintos, denominados componentes do desgaste. Dependendo da natureza do material usinado e das condições de usinagem, predominará uma ou outra das componentes do desgaste. A seguir, os principais mecanismos de desgaste citados por este autor.

3.4.1 Aresta postiça de corte

A aresta postiça de corte (APC) é constituída de partículas do material usinado que se acumulam na superfície de saída da ferramenta. A APC altera as relações geométricas da formação do cavaco, desempenhando a função de aresta cortante (Figura 3.10). Isto só é possível graças ao forte encruamento das partículas do material que a constituem.

A Figura 3.9 representa diversos valores de desgaste de flanco, obtidos para uma situação particular de usinagem, medidos após um intervalo de tempo constante para diferentes velocidades de corte. O pico observado entre as velocidades de 10 e 30 m/min está relacionado à formação da APC. Enquanto que, nas baixas velocidades de corte, as arestas postiças são estáveis, nas velocidades de corte maiores, desaparecem e aparecem periodicamente. A APC que se destaca nestes casos remove também pequeno volume de material da ferramenta, de maneira a aumentar o desgaste na superfície de folga. A superfície de saída, pelo contrário é protegida pela APC, reduzindo-se, portanto, o desgaste de cratera. A transição entre

as situações de estabilidade e instabilidade da APC se dá na velocidade correspondente ao máximo desgaste de flanco.

Notou-se que o mecanismo de formação e desaparecimento da APC está intimamente relacionado à temperatura de corte. Ocorre uma diminuição da dureza da APC quando se atinge a temperatura de recristalização do material fortemente encruado em função da mudança em sua estrutura cristalina. A APC é então esmagada e arrastada pelo cavaco.

Evidentemente relacionada à temperatura de corte, a condição de usinagem que exerce maior influência nas dimensões da APC é a velocidade de corte. Nota-se que, acima de uma determinada velocidade de corte, a aresta postiça deixa de existir. Esta velocidade de corte será chamada velocidade crítica. Com relação ao avanço, seu aumento implica numa redução da velocidade crítica. A profundidade de corte exerce uma influência análoga sobre a velocidade crítica, no entanto, esta influência é muito menos acentuada.

FIGURA 3.9. Variação do desgaste da superfície de folga em função da velocidade de corte – FERRARESI (1977)

FIGURA 3.10. Forma característica de uma APC - FERRARESI (1977)

3.4.2 Abrasão mecânica

A aspereza das superfícies em contato não só aumenta a resistência ao deslizamento, como também origina um desgaste de natureza mecânica. Este tipo de desgaste depende principalmente da relação das durezas da ferramenta e do material da peça em determinadas condições de usinagem, da quantidade e da distribuição das microimpurezas duras do material usinado, do seu estado de encruamento e outros.

Segundo PIGARI (1995), tanto o desgaste de flanco como o de cratera podem ser gerados pela abrasão, porém ela é mais significativa no desgaste de flanco, já que a superfície de folga atrita com um elemento rígido que é a peça, enquanto que a superfície de saída atrita com um elemento flexível que é o cavaco. Um aumento do teor de carbono no aço da peça usinada faz aumentar o desgaste por abrasão, devido ao aumento da dureza da peça e da formação de carbonetos que são pontos duros e muito abrasivos.

Em geral a abrasão é o mecanismo predominante somente quando a temperatura de corte é relativamente baixa.

3.4.3 Difusão intermetálica

FERRARESI (1977) afirma que as condições físicas que reinam nas zonas de contato entre o material usinado e a ferramenta são altamente favoráveis ao aparecimento de reações de difusão. Estudos qualitativos revelaram que ocorrem as seguintes reações de difusão entre o aço e o metal duro, com temperaturas variando de 1200° a 1500°C:

- 1) Difusão do ferro na fase de cobalto do metal duro;
- 2) Difusão do cobalto no aço, havendo formação de uma camada maciça de cristais mistos;
- 3) Dissolução do carboneto de tungstênio com conseqüente formação de carbonetos mistos e duplos do tipo $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$, $(\text{FeW})_6\text{C}$, $(\text{FeW})_{23}\text{C}_6$. O carbono liberado é dissolvido e difunde em direção ao aço.

Ocorrem reações de difusão entre o aço e o metal duro a temperaturas inferiores à do ponto eutético (1150° C) devido à solubilidade entre o cobalto e o aço.

A Figura 3.11 representa a variação de concentrações dos elementos que tomam parte da difusão entre ferramenta de metal duro e o aço para uma temperatura de aproximadamente 900° C.

FIGURA 3.11. Variação de concentrações dos elementos que tomam parte da difusão entre ferramenta de metal duro e o aço – FERRARESI (1977)

As reações de difusão podem afetar os mecanismos de desgaste das seguintes maneiras:

- 1) Desgaste progressivo devido à transferência do material da ferramenta ao cavaco;
- 2) Desgaste da ferramenta devido ao enfraquecimento da estrutura do metal duro, seguido de uma abrasão mecânica. As reações que enfraquecem a estrutura do metal duro são: difusão do ferro no cobalto, dissolução dos carbetos de tungstênio, formação de carbetos mistos com libertação de carbono.

A velocidade de difusão (quantidade de compostos formados na unidade de tempo) aumenta exponencialmente com a temperatura. Além da temperatura, as velocidades de difusão também são influenciadas pelo teor de carbono do aço e principalmente pela resistência que os carbetos de metal duro opõem à reação com o ferro. Esta resistência é elevada no caso dos carbetos $TaC + TiC$ e é menor no caso de carbetos de tungstênio (WC).

A condutividade térmica dos metais duros à base de WC (prefixo K da classificação ISO) é maior que a condutividade térmica dos metais duros à base de $WC + TaC + TiC$ (prefixo P da classificação ISO), o que contribuirá também para o desgaste maior dos primeiros, pois a profundidade da zona de difusão será maior.

PIGARI (1995) afirma que atualmente a velocidade de corte atingida nos processos de usinagem é muito alta o que faz com que a temperatura na região de corte seja muito elevada. A temperatura na superfície de saída pode atingir $1200^{\circ}C$ de maneira a favorecer a formação de uma camada viscosa, chamada de zona de fluxo entre cavaco e ferramenta, permitindo facilmente a migração de átomos de uma parte para outra. Por isso a difusão seria um mecanismo muito importante na formação do desgaste de cratera.

3.4.4 Adesão

PIGARI (1995) afirma que durante o contato dinâmico entre peça e ferramenta ou entre cavaco e ferramenta, devido à elevação da temperatura, ocorre

um fenômeno parecido com a “soldagem” entre as duas partes. As partículas formadas nesse meio se rompem e são levadas com a peça ou cavaco de tempo em tempo. A análise dessas partículas apresenta material tanto da peça quanto da ferramenta. Este é o mecanismo de adesão.

Para temperaturas de corte altas, o mecanismo de desgaste de flanco predominante é a adesão. Na superfície de folga a temperatura é menor (em torno de 800°C), mas suficiente para a existência de significativo desgaste por adesão.

3.4.5 Oxidação

Segundo FERRARESI (1977), mesmo em condições normais de usinagem, o aquecimento da ferramenta provoca a formação de uma película de óxido nas superfícies próximas à aresta de corte (Figura 3.12).

O oxigênio forma um óxido complexo de W-Co-Fe, cujo volume molar é maior que o da estrutura primitiva do metal duro, havendo a formação de pequenas protuberâncias. A oxidação das ferramentas freqüentemente é a responsável pela deterioração da aresta lateral de corte, fazendo com que piore rapidamente o acabamento superficial das peças usinadas e, portanto, a vida das ferramentas. A oxidação dos metais duros se inicia com temperaturas de 700° a 800°C, sendo mais acentuada nas ferramentas de classe K (à base de WC e Co) que nas de classe P (à base de WC + TiC + TaC e Co).

FIGURA 3.12. Zonas de oxidação em ferramenta de metal duro - FERRARESI (1977)

3.5 *Desgaste em Ferramentas Revestidas*

PIGARI (1995) afirma que, tendo em vista os mecanismos de desgaste, pode-se considerar que as camadas de cobertura devem preencher alguns requisitos para o aumento da vida das ferramentas, onde os mais importantes são: estabilidade química quando em contato com o material da peça, redução do atrito entre peça e ferramenta, resistência à abrasão, resistência aos ciclos térmicos e suficiente capacidade de adesão ao material base. Atualmente, os revestimentos mais utilizados são:

1) Carboneto de Titânio (TiC): é sempre a primeira camada depositada sobre o metal duro devido à sua grande capacidade de adesão ao substrato; apresenta grande dureza o que confere à ferramenta resistência à abrasão e, portanto, resistência ao desgaste de flanco;

2) Óxido de Alumínio (Al_2O_3) ou alumina: apesar de não aderir bem ao metal duro, apresenta grande dureza e alta estabilidade química a alta temperatura, dificultando a difusão. Por ser um material cerâmico refratário, impede que grande quantidade de calor atinja o interior do substrato, diminuindo sua resistência. A oxidação e adesão também são reduzidas com a utilização desta cobertura;

3) Nitreto de Titânio (TiN): é geralmente a camada mais externa dada a sua alta capacidade de diminuição do atrito. Esta característica confere à ferramenta maior resistência à difusão e, portanto, ao desgaste de cratera em função diminuição da temperatura na superfície de saída com a diminuição do atrito.

Há também, com o uso de ferramentas revestidas, uma redução das forças de corte, vibrações e melhor acabamento superficial da peça usinada.

3.6 *Vida da Ferramenta*

FERRARESI (1977) define que vida de ferramenta é o tempo que a mesma

trabalha efetivamente (deduzido os tempos passivos), até perder a sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. A perda da capacidade de corte é avaliada geralmente através de um determinado grau de desgaste das superfícies de folga e de saída, exceto em certos casos de usinagem com pastilhas de cerâmica, onde a capacidade de corte é limitada pelo aparecimento de quebras na aresta cortante que ocorrem antes que os desgastes citados atinjam valores acentuados.

A vida da ferramenta foi descrita deterministicamente pela primeira vez por Taylor em 1907:

$$T = k.v_c^{-\lambda} \quad (3.1)$$

Onde:

T = vida da ferramenta [min];

v_c = velocidade de corte [m/min];

k, λ = constantes experimentais dependentes do material da peça, ferramenta e condições de usinagem.

Posteriormente, alguns pesquisadores apresentaram a forma expandida da equação de Taylor:

$$T = A.v_c^{-B}.f^{-C}.a_p^{-D} \quad (3.2)$$

Onde:

f = avanço [mm/volta];

n = rotação [rpm];

a_p = profundidade de corte [mm];

A, B, C, D = constantes experimentais dependentes do material da peça, ferramenta e condições de usinagem.

As equações para cálculo da vida de ferramentas são bastante específicas e de aplicação em situações bem definidas. Na prática, as constantes experimentais disponíveis na literatura não abrangem todas as situações possíveis de usinagem. Assim, o cálculo da vida de ferramentas baseado nestas equações incorre geralmente

em aproximações.

Estudo realizado por SCHAUMANN* apud FERRARESI (1977) - no qual se observou que, para materiais com mesma especificação, mas de siderúrgicas e corridas diferentes, em idênticas condições de usinagem, a vida da ferramenta de metal duro variou de 49% a 459 % - reforça a idéia de que a previsão da vida da ferramenta é extremamente difícil.

3.6.1 Critérios de fim de vida para ferramentas de metal duro

Segundo FERRARESI (1977), um dos primeiros critérios empregados na determinação da vida da ferramenta foi o desgaste V_B . Acredita-se que a razão do emprego de tal critério foi a facilidade de medida deste desgaste. Na usinagem de desbaste de muitos materiais, a quebra da aresta de corte da ferramenta de metal duro se dá para um desgaste V_B da ordem de 0,8 a 1,5 mm. Na operação de acabamento, muito antes do desgaste da ferramenta atingir valores que possam originar a quebra da aresta de corte, a mesma deve ser substituída em virtude de não mais satisfazer as exigências impostas pelas tolerâncias das dimensões e acabamento superficial da peça. O valor do desgaste V_B , neste caso, não deve superar valores 0,1 a 0,2 mm, para uma tolerância na qualidade IT7, e 0,2 a 0,3 mm para uma tolerância na qualidade IT8 da série ISO de tolerâncias – ABNT (1962).

Um critério baseado no desgaste C_p também seria possível, porém em muitos casos não há praticamente formação de cratera na superfície de saída. Para termos de desgastes apreciáveis, o ensaio deste tipo de desgaste deveria ser muito longo, tornando-se bastante oneroso.

*SCHAUMANN, R. (1956). Streuwertuntersuchungen der zerspanbarkeit von stahlwerkstoffen. *Der Maschinenmarkt*, n.43, p.1-16, Maio. apud FERRARESI, D. (1977). *Fundamentos da usinagem dos metais*. São Paulo, Edgard Blücher.

FERRARESI (1977) também observou que o mesmo material da peça, causando o mesmo desgaste V_B , pode gastar a superfície de saída da ferramenta de modo diferente, quando submetido a tratamentos térmicos diferentes. Portanto, na determinação da vida da ferramenta deveriam ser utilizados de um modo geral os dois desgastes: V_B e C_p . Um critério baseado na medição direta destas características seria inviável em ambientes industriais com alto volume de produção por ser dificilmente realizada sem que se retire a ferramenta da máquina, o que geraria perdas com o longo tempo necessário para a medição e ajuste da posição da ferramenta quando esta for fixada novamente.

PIGARI (1995) tece algumas considerações práticas sobre critérios de fim de vida de ferramentas, reforçando o conceito de que a decisão pela troca da ferramenta é extremamente subjetiva e dependente do operador:

- 1) Em operações de desbaste, onde se tolera altos valores de desgaste, o operador por temer a quebra da ferramenta e suas conseqüências danosas, costuma trocar a ferramenta bem antes de seu fim de vida;
- 2) Em operações de acabamento, quando o desgaste determina variações dimensionais da peça fora de seus limites especificados, não é necessário se trocar a ferramenta imediatamente, pois ainda se pode corrigir sua posição e continuar o corte, principalmente se a usinagem estiver sendo realizada em máquina CNC. No entanto, quando o parâmetro a ser observado é a rugosidade da peça, a dificuldade é maior. Normalmente o operador não conta com um rugosímetro ao lado da máquina e a comparação da rugosidade da peça usinada com uma peça padrão é um procedimento muito impreciso e subjetivo.
- 3) Quando o critério estabelecido é um número de peças a usinar, este valor é bastante conservador para evitar o refúgio de peças.

4 EMISSÃO ACÚSTICA NO PROCESSO DE TORNEAMENTO

4.1 *Definição e Características do Sinal de EA*

A emissão acústica é uma onda de tensão elástica transiente que se propaga nos materiais com a mesma velocidade de uma onda acústica (velocidade do som).

Segundo PIGARI (1995), a faixa de frequência de um sinal de emissão acústica é muito alta, de 50 kHz a 1000 kHz aproximadamente. Isto está bem acima da frequência de vibrações mecânicas ou outros ruídos que estão envolvidos em um ambiente de manufatura.

Segundo POLLOCK (1989), os equipamentos de emissão acústica são altamente sensíveis a qualquer tipo de movimento e suas frequências de operação (tipicamente entre 20 e 1200 kHz); podem detectar não somente crescimento de trincas na deformação de materiais mas também processos como atrito, impacto, fluxo, solidificação e transformação de fases. As técnicas de EA também seriam úteis para:

- 1) Detecção de toque e desgaste de ferramenta durante usinagem;
- 2) Monitoramento em processo de soldagem;
- 3) Detecção de desgaste e perda de lubrificação em equipamentos rotativos, mancais e estudos de tribologia;
- 4) Detecção de peças ou partículas soltas;
- 5) Detecção de vazamentos, cavitação e fluxo;
- 6) Monitoramento de reações químicas, incluindo processos de corrosão e transformações de fase.

A onda de EA primitiva gerada na fonte é ilustrada na Figura 4.1. Ela é basicamente uma função degrau correspondente ao processo de geração do sinal. A largura e amplitude do pulso estão relacionados à dinâmica do processo.

FIGURA 4.1. Onda primitiva de EA – POLLOCK (1989)

Segundo POLLOCK (1989), a onda primitiva irradia a partir da fonte em todas as direções, mas geralmente possui uma direção preferencial na qual se concentra grande parte da energia do sinal. No caso de trincas, por exemplo, a maior parte da energia é direcionada a 90° e 270° da superfície onde ocorre o fenômeno.

A forma da onda primitiva é profundamente mudada durante sua propagação pelo meio e o sinal captado pelo sensor é geralmente bem diferente do pulso original. Isto não chega a ser um impedimento às aplicações de EA, uma vez que a maioria dos pesquisadores está interessada no fenômeno e não na emissão acústica gerada. Mesmo havendo atenuações ou distorções no sinal, ainda é possível estabelecer relações com o processo em estudo.

Um sinal de EA é composto de diversos componentes que atingem o sensor através de diversos caminhos. A Figura 4.2 ilustra este princípio, mas mostra apenas alguns dos indefinidos caminhos através dos quais ondas geradas pelo mesmo evento podem atingir o sensor. Tipicamente o maior pico no sinal captado pelo sensor é produzido não pela primeira componente que o atinge, mas pela interferência construtiva de diversas componentes posteriores. Ondas geradas por um único pulso excitam repetidamente o sensor até decaírem. Este processo de decaimento demora cerca de $100\mu\text{s}$ num material não metálico altamente amortecido ou dezenas de mili segundos num material metálico pouco amortecido - tempo muito maior do que o evento gerador do sinal, que geralmente decai em micro segundos ou menos. Isto explica a existência de um grande número de harmônicas no sinal de emissão acústica.

FIGURA 4.2. Diferentes possibilidades de caminhos até o sensor para as ondas geradas por um evento – POLLOCK (1989)

Segundo TETI & DORNFELD (1989), o sinal de EA é, no caso de emissões contínuas, essencialmente um sinal aleatório caracterizado por uma faixa de frequência pequena por causa do efeito de filtragem e ressonância impostos pelo transdutor.

DIEI & DORNFELD (1987) afirmam que a metodologia de emissão acústica aplicada a processos de usinagem é atrativa porque o sinal (onda de tensão elástica transiente) é gerado pelos principais mecanismos envolvidos na usinagem de metais como, por exemplo, deformação plástica, atrito de contato, quebra de cavacos ou mesmo quebra da ferramenta.

4.2 Sensor de EA

O sensor ou transdutor de EA é um dispositivo que gera um sinal elétrico quando estimulado por uma onda de emissão acústica. Ele pode ser baseado em capacitividade, interferometria ou piezoeletricidade. Este último tipo de sensor é o mais comum, sendo também utilizado na parte experimental deste trabalho.

Segundo POLLOCK (1989), os sensores ressonantes (piezoelétricos) não são os que apresentam maior fidelidade com relação à resposta em frequência, mas são empregados na maioria dos experimentos em EA pela sua maior sensibilidade, bem como menor custo.

O elemento chave num sensor de EA do tipo ressonante é o cristal piezoelétrico. Estes cristais têm a propriedade de se polarizarem quando submetidos a um estado de tensão, ou seja, cria-se uma concentração de cargas negativas e

positivas em extremidades opostas do cristal e portanto uma diferença de potencial elétrico entre estas regiões. Esta diferença de potencial elétrico, ou voltagem, é o sinal de saída do sensor.

Um sensor piezoelétrico de EA é composto basicamente de um disco circular de um cristal piezoelétrico que é colocado em uma fina base de epoxi (Figura 4.3). O diâmetro e espessura afetam a sensibilidade e a frequência característica do sensor. Segundo IWATA et al. (1977), quanto mais espesso é o cristal, geralmente maior é sua sensibilidade, mas a frequência de ressonância, ou seja, sua faixa sensível de frequência torna-se menor. Também a frequência de ressonância diminui com o aumento do diâmetro.

FIGURA 4.3. Construção típica de sensor piezoelétrico – POLLOCK (1989)

De acordo com POLLOCK (1989), quando um sensor ressonante é excitado por um pulso, ele soa como um sino nas suas frequências naturais de oscilação. Existem sensores ressonantes em diversas frequências. Na prática, sensores ressonantes na faixa de 150 kHz são geralmente adequados para grande maioria dos experimentos em EA.

A preamplificação do sinal dos sensores geralmente é da ordem de 100 vezes (40 dB) e inclui um filtro passa alta ou passa banda para eliminar ruído mecânico e acústico que prevalece em frequências baixas. A baixas frequências, há problemas crescentes com ruídos mecânicos. A altas frequências, as ondas acústicas amortecem mais rapidamente e o campo de detecção do sensor será menor.

Com relação à sua localização, em operações de torneamento, o sensor é normalmente fixo no porta-ferramenta. IWATA et al. (1977) mostraram que a atenuação do sinal ao longo do porta-ferramenta é insignificante e então, o sensor pode ser colocado longe da região de corte. Em escala microscópica, as superfícies

do material e do sensor são rugosas e não estão intimamente em contato, havendo um espaço preenchido por ar entre eles, fazendo com que a tensão transmitida por unidade de área seja pequena. BEATTIE* apud PIGARI (1995) observou que se o espaço existente for preenchido por um fluido, a onda de tensão poderá ser transmitida de modo mais uniforme.

Nas aplicações industriais em geral, as características predominantes que um sensor deve apresentar para a sua utilização são a alta resistência ao meio agressivo de trabalho (resistência aos fluidos refrigerantes e temperatura de trabalho), resistência aos esforços presentes nas operações que estão monitorando, custo reduzido, fácil manuseio e baixa intrusividade ao processo monitorado.

4.3 Ruído

Ruído é uma designação genérica de sinais, gerados por um transdutor, provenientes de fontes diferentes daquela que se deseja investigar. Precauções contra ruídos são parte integrante da tecnologia de emissão acústica. Uma preocupação básica é a seleção do campo de frequência apropriado para o monitoramento. Segundo POLLOCK (1989), ruídos no sinal de EA são maiores a baixas frequências.

Fontes de ruído acústico incluem escoamento de fluidos; processos de atrito como, por exemplo, os que ocorrem em mancais e impactos. Fontes de ruídos elétricos e eletromagnéticos incluem circuitos de chaveamento de potência, frequências de rádio, ruído da rede elétrica.

*BEATTIE, R.J. (1983). Acoustic emission, principles and instrumentation. *Journal of Acoustic Emission*, v.2, p.95-128.

Problemas com ruídos podem ser resolvidos de diferentes maneiras (Tabela 4.1). POLLOCK (1989) afirma que uma possível abordagem seria criar uma barreira para o ruído acústico através da aplicação de materiais com propriedade de amortecimento em pontos estratégicos da estrutura. Problemas com ruído elétrico podem ainda ser, na sua maioria, eliminados através de aterramento adequado. Além disso, é possível que se elimine ruídos via hardware ou software.

TABELA 4.1. Resumo das principais fontes de ruído e os respectivos métodos de solução mais comumente empregados

Fonte de Ruído	Solução
<u>Ruído Acústico:</u> • escoamento de fluidos; • atrito em mancais; • impactos.	• Filtros passa-baixa; • Materiais com propriedade de amortecimento; • Eliminação via hardware ou software.
<u>Ruído Eletromagnético:</u> • circuitos de chaveamento de potência; • frequências de rádio; • ruído da rede elétrica.	• Aterramento; • Eliminação via hardware ou software.

4.4 Fontes de AE no Torneamento

Há, segundo TETI & DORNFELD (1989) três áreas de interesse no processo de usinagem com relação à geração de EA (Figura 4.4):

- a zona de deformação primária (zona de cisalhamento);
- zona de deformação secundária (interface cavaco ferramenta);
- zona de deformação terciária (interface peça e superfície de folga da ferramenta).

Uma quarta fonte de EA durante a usinagem de metais pode ainda ser citada:

- a quebra dos cavacos e seu impacto na ferramenta de corte ou na peça.

Contudo, o efeito do impacto dos cavacos pode ser minimizado em processos de usinagem contínuos através do controle e direcionamento do cavaco para fora da área de usinagem.

FIGURA 4.4. Fontes de EA no torneamento - TETI & DORNFELD (1989)

4.5 Usinagem Ortogonal e o Sinal de EA

A usinagem ortogonal tem sido largamente utilizada no estudo da emissão acústica em processos de usinagem em função de sua simplicidade. Trata-se de uma operação bidimensional, na qual o material é removido por uma aresta simples, a qual é paralela à superfície da peça e perpendicular à direção de corte. Numa configuração de corte ortogonal, o material à frente da ferramenta é cisalhado e o cavaco então formado move-se sobre a superfície de saída da ferramenta, sendo parcialmente deformado neste processo.

4.6 Modelamento Matemático

O primeiro modelo proposto para determinação da energia do sinal de EA num processo de usinagem ortogonal baseia-se na dependência de propriedades do material como tensão de cisalhamento, volume de material sofrendo deformação e taxa de deformação. Segundo TETI & DORNFELD (1989), a geração de EA é assumida como resultante principalmente da deformação plástica:

Para um elemento de volume, dv , sujeito a uma tensão σ_{ij} , o qual gera incrementos de deformação plástica, $d\varepsilon_{ij}$, o incremento de trabalho pode ser definido como:

$$dW = \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} dv \quad (4.1)$$

Se o material é submetido a uma tensão constante e taxa de deformação, $\dot{\varepsilon}$, a taxa de energia é definida como:

$$\dot{W} = \sigma \dot{\varepsilon} v, \quad (4.2)$$

onde v é o volume de material sendo deformado. $\dot{W}$ é a fonte de energia para a emissão acústica que é gerada por deformação plástica. A eq. (4.2) mostra que a taxa de energia de um sinal depende da taxa de deformação, da tensão aplicada e do volume de material envolvido no processo de deformação.

A contribuição das zonas primárias e secundárias de deformação na geração de emissão acústica em processos de usinagem é definida a seguir.

A taxa de trabalho na zona primária, $\dot{W}_1$ é definida como:

$$\dot{W}_1 = d a_p \tau \frac{\cos \alpha}{\sin \phi \cos(\phi - \gamma_o)} v_c, \quad (4.3)$$

onde:

d = espessura do cavaco;

a_p = profundidade de corte;

τ = tensão de cisalhamento média;

α = ângulo de cisalhamento;

γ_o = ângulo de saída;

v_c = velocidade de corte.

As eq. (4.4) e (4.5) fornecem as taxas de trabalho nas zona de deslizamento,

$\dot{W}_{2d}$, e de adesão da zona secundária, $\dot{W}_{2a}$.

$$\dot{W}_{2d} = \frac{1}{3} \tau d (l - l_1) U_c, \quad (4.4)$$

$$\dot{W}_{2a} = \tau d l_1 U_c, \quad (4.5)$$

onde:

l = comprimento do contato entre cavaco e superfície de saída da ferramenta;

l_1 = comprimento da aresta da ferramenta até o final da zona de escorregamento na superfície de saída;

U_c = velocidade do cavaco = $\sin \phi / \cos (\phi - \gamma_o) v_c$.

Das eq. (4.3), (4.4) e (4.5), obtém-se a relação entre emissão acústica e parâmetros do processo (a relação entre V_{RMS} e $\dot{W}$ está mais claramente definida nas eq. (4.10), (4.11) e (4.12)):

$$V_{RMS} = C_F \left\{ \tau d v_c \left[\frac{\cos \gamma_o}{\sin \phi \cos (\phi - \gamma_o)} a_p + \frac{1}{3} (1 + 2 l_1) \frac{\sin \phi}{\cos (\phi - \gamma_o)} \right] \right\}^{0.5} \quad (4.6),$$

onde:

C_F = constante de proporcionalidade influenciada pela geometria da ferramenta, ganho de instrumentação.

Um refinamento posterior foi proposto através da adição do termo $\tau d v_c l_f$ (onde l_f é o comprimento da intersecção entre superfície de folga da ferramenta e a peça medido paralelamente à direção de corte para levar em consideração a emissão acústica gerada pelo desgaste de flanco. Além disso, assumiu-se variável o expoente 0,5 na eq. (4.6). Assim, esta equação foi então reescrita como:

$$V_{RMS} = C_1 \left\{ \tau d v_c \left[C_2 \frac{\cos \gamma_o}{\sin \phi \cos(\phi - \gamma_o)} a_p + C_3 \frac{1}{3} (1 + 2 l_1) \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \gamma_o)} + C_4 l_f \right] \right\}^m, \quad (4.7)$$

onde:

C_1 = constante de proporcionalidade influenciada pela geometria da ferramenta, ganho de instrumentação e atenuação do sinal na ferramenta de corte e entre sistema de fixação da ferramenta e ponto de fixação do transdutor;

C_2, C_3, C_4 - fatores de atenuação do sinal correspondentes às perdas na transmissão do sinal entre região de cisalhamento e ferramenta; interface entre cavaco e ferramenta; região de desgaste de flanco e ferramenta, respectivamente - e m está relacionado ao tipo de material usinado.

A seguir, os fatores de atenuação foram quantificados experimentalmente durante testes de torneamento. A magnitude de C_2 está entre 1/4 e 1/5 enquanto C_3 e C_4 podem ser considerados como iguais a 1. Estas hipóteses são razoáveis uma vez que, para C_2 o contato entre zona primária de cisalhamento e a ferramenta é apenas uma pequena área, a aresta de corte, de maneira que uma atenuação significativa do sinal é esperada. A emissão acústica gerada nas interfaces cavaco-ferramenta e peça-superfície de folga e ocorre diretamente na superfície da ferramenta, resultando em pequena atenuação do sinal.

Segundo FERRARESI (1977), o ângulo de cisalhamento, ϕ , pode ser dado pela equação:

$$\phi \cong 45^\circ + \gamma_o - \frac{1}{2} \arctg \frac{\mu}{2} \quad (4.8)$$

onde:

μ = coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta.

O coeficiente de atrito, μ , depende dos seguintes fatores:

1) Material usinado e material da ferramenta;

- 2) Velocidade e temperatura de corte. O aumento da velocidade de corte, e conseqüentemente o aumento da temperatura de corte, provoca uma diminuição de μ ;
- 3) Avanço. O aumento do avanço, e o conseqüente aumento da pressão de contato do cavaco sobre a ferramenta, provoca uma diminuição do coeficiente de atrito;
- 4) Outros fatores como, por exemplo, o ângulo de saída da ferramenta, fluido de corte, acabamento superficial.

Das eq. 4.7 e 4.8, tem-se que:

$$V_{RMS} = C_1 \left\{ \tau d v_c \left[C_2 \frac{\cos \gamma_o}{\sin \left(45^\circ + \gamma_o - \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{\mu}{2} \right) \right) \cos \left(45^\circ - \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{\mu}{2} \right) \right)} a_p + \right. \right. \\ \left. \left. + C_3 \frac{1}{3} (1 + 2 l_f) \frac{\sin \left(45^\circ + \gamma_o - \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{\mu}{2} \right) \right)}{\cos \left(45^\circ - \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{\mu}{2} \right) \right)} + C_4 l_f \right] \right\}^m \quad (4.9)$$

A Figura 4.5 representa a plotagem dos termos:

$$C_2 \frac{\cos \gamma_o}{\sin \left(45^\circ + \gamma_o - \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{\mu}{2} \right) \right) \cos \left(45^\circ - \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{\mu}{2} \right) \right)}, \quad (\text{termo 1})$$

$$C_3 \frac{\sin \left(45^\circ + \gamma_o - \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{\mu}{2} \right) \right)}{\cos \left(45^\circ - \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{\mu}{2} \right) \right)} \quad (\text{termo 2})$$

da eq. (4.9) e a soma destes, variando-se γ_o de -15° a 45° para $C_2 = 0,25$; $C_3 = 1,0$. O coeficiente de atrito, μ , foi considerado constante e igual a 0,8 para

simplificar a avaliação da influência do ângulo de saída da ferramenta (γ_o) na tensão V_{RMS} , portanto a interdependência entre μ e γ_o está sendo desconsiderada nesta análise em particular.

FIGURA 4.5. Plotagem dos termos 1 e 2 da eq. (4.9), variando-se γ_o de -15° a 45° para $C_2 = 0,25$; $C_3 = 1,0$ e $\mu = 0,8$

Em função do modelamento matemático (observando-se que m é um número positivo) e da Figura 4.5, pode-se concluir que, para a situação específica analisada:

- 1) A intensidade do sinal de EA e a profundidade de corte, a_p , são diretamente proporcionais;
- 2) A intensidade do sinal de EA e a tensão de cisalhamento, τ , são diretamente proporcionais;
- 3) Com relação ao ângulo de saída da ferramenta, γ_o , observa-se pela Figura 4.5 que há na eq. (4.9) termos que contribuem de maneira oposta na evolução da EA com a variação de γ_o . (termo 1: inversamente proporcional

a γ_o ; termo 2: diretamente proporcional a γ_o). Para as condições particulares utilizadas na análise, o resultado final seria o de redução da intensidade de EA com o aumento de γ_o . Portanto, o desgaste de cratera, que age aumentando o valor do ângulo de saída, contribuiria para diminuir a intensidade da EA. Vale ressaltar que dependendo das condições de usinagem e principalmente das condições de atenuação do sinal entre região de cisalhamento e ferramenta e na interface cavaco-ferramenta, o comportamento da EA com a variação de γ_o poderia ser completamente diferente.

- 4) A intensidade do sinal de EA e velocidade de corte, v_c , são diretamente proporcionais;
- 5) A intensidade do sinal de EA e o comprimento de contato entre peça e superfície de folga da ferramenta, l_f , são diretamente proporcionais. Portanto, o desgaste de flanco, que age aumentando o valor de l_f , contribui para aumentar a intensidade do sinal de EA.

Muitas considerações têm limitado a acuracidade do modelo proposto em aplicações práticas de usinagem. Estas considerações incluem variações na microestrutura dos materiais usinados bem como dificuldades de se reproduzir na prática as mesmas condições de instrumentação e transmissão do sinal do arranjo experimental. TETI & DORNFELD (1989) afirmam que processos de usinagem tridimensionais por si só, em contraste à usinagem ortogonal, têm fontes adicionais de variação do sinal de EA devido à formação e escoamento do cavaco sobre a ferramenta e diferentes geometrias das ferramentas de corte. Assim, modelos relacionando o sinal de EA com parâmetros de usinagem têm tido sucesso limitado porque efeitos secundários, tais como atrito de contato entre cavaco e ferramenta ou quebra do cavaco durante a sua formação distorcem o sinal. À medida que as condições de usinagem se tornam “mais ideais” como, por exemplo, em usinagem de precisão com diamante, na qual a aresta de corte é bem definida e controlada e a interação entre ferramenta e cavaco ao longo da superfície de saída é mínima, as dependências previstas nestes modelos se mostram mais coerentes.

4.7 *Instrumentação e Tratamento do Sinal de EA*

De acordo com PIGARI (1995), o sinal gerado por um sensor de EA deve primeiramente ser amplificado de 40 a 60 dB (amplificação de 100 a 1000 vezes respectivamente). Se uma determinada faixa de frequência é de maior interesse na observação, deve-se usar um filtro de frequência passa-banda, o qual também pode ser utilizado para filtrar os sinais de baixa frequência como vibração mecânica e ruídos do meio ambiente. Dependendo do método de análise, utiliza-se um conversor RMS, um analisador de frequência, um contador de picos ou o sinal pode ser enviado diretamente a um conversor analógico-digital (AD) e então a um computador onde as amostras lidas poderão ser arquivadas ou plotadas com auxílio de software específico. Em geral, as placas AD não têm velocidade de amostragem suficiente para amostrarem sinais de alta frequência e nem o computador tem memória suficiente para armazenar dados que cubram uma parcela razoável do processo. Por isso, o conversor RMS é um instrumento bastante utilizado. Ele transforma o sinal de entrada, de altíssima frequência, em um sinal de saída que é proporcional à raiz quadrada da média do sinal de entrada, cuja frequência depende da constante de tempo (intervalo do sinal de entrada que será utilizado no cálculo do valor de um ponto do sinal de saída) usada no conversor.

TETI & DORNFELD (1989) observaram que, dentre alguns problemas apresentados pela técnica de emissão acústica, um dos maiores está representado pela análise e interpretação dos sinais emitidos devido à aleatoriedade da EA gerada no processo de corte. O sinal de EA seria não-periódico, conteria muitas frequências e não poderia ser explicitamente descrito por equações matemáticas, a não ser com grandes simplificações.

Com relação à análise do sinal de EA, esta pode ser feita no domínio do tempo ou no domínio da frequência. No domínio do tempo, os principais parâmetros utilizados são a voltagem RMS do sinal e técnicas de contagem. No domínio da frequência, a técnica utilizada para analisar o sinal é a construção do espectro de frequência. A Figura 4.6 ilustra o significado de espectro de frequência (domínio da frequência) e domínio do tempo.

FIGURA 4.6. Domínio do tempo e da frequência de um sinal contínuo de EA

4.7.1 Voltagem RMS

O valor RMS de um sinal pode ser quantitativamente expresso como:

$$V_{RMS} = \left(\frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} V^2(t) dt \right)^{1/2}, \quad (4.10)$$

onde $V(t)$ = função sinal e ΔT = período de tempo.

A energia dissipada em um intervalo de tempo ΔT , pode ser expressa:

$$\Delta E \propto V_{RMS}^2 \Delta T \quad (4.11)$$

e a potência:

$$\dot{E} = \frac{\Delta E}{\Delta T} \propto V_{RMS}^2 \quad (4.12)$$

4.7.2 Técnicas de contagem

Segundo TETI & DORNFELD (1989), se técnicas de análise de EA baseadas na contagem do sinal são usadas, a energia e a potência do sinal de EA podem ser correlacionadas com a contagem total, N , e a taxa de contagem, $\dot{N}$, onde:

$$\dot{N} = \frac{dN}{dt}. \quad (4.13)$$

Se um transdutor piezoelétrico de EA é perturbado por uma onda de tensão (sinal de EA) numa frequência diferente de sua frequência natural, ele oscila de acordo com uma curva senoidal amortecida. A voltagem do sinal após um tempo, t , do impulso inicial é dada por:

$$V = V_0 e^{-k_a t} \sin(\omega t), \quad (4.14)$$

onde V_0 é a voltagem inicial, k_a é a constante de amortecimento e ω é a frequência angular ($\omega = 2\pi f_l$, onde f_l é a frequência linear).

A Figura 4.7 mostra esquematicamente a resposta de um transdutor a um pulso de EA.

O número de contagens, N , para um simples evento é o número de vezes que o sinal ultrapassa um nível de voltagem V_s , no qual o limite de contagem foi definido, e é definido como:

$$N = f_l t' = \frac{\omega}{2\pi} t', \quad (4.15)$$

onde t' é o instante no qual o último pico atinge o limite V_s .

FIGURA 4.7. Resposta de um transdutor a um pulso de EA - TETI & DORNFELD (1989)

Segundo TETI & DORNFELD (1989), pode ser demonstrado que a contagem total, N , e a taxa de contagem se relacionam com a energia do sinal de EA como a seguir:

$$N = \frac{\omega}{2\pi k_a} \ln \frac{Cp_1 \sqrt{E}}{V_s}, \quad (4.16)$$

$$\dot{N} = f' e^{-\frac{V_s^2}{Cp_2 E^{Cp_3}}}, \quad (4.17)$$

onde f' é a frequência aparente do sinal de EA e Cp_1 , Cp_2 , Cp_3 , são constantes de proporcionalidade.

4.7.3 Espectro de frequência

Segundo PIGARI (1995), o espectro de frequência de um sinal é composto de um número muito grande de parâmetros (cada frequência tem sua própria amplitude) que ajuda na caracterização das fontes dos fenômenos e mostra a contribuição de cada componente da frequência na potência total, sendo que a faixa de frequência do sinal de EA que é sensível ao crescimento do desgaste da ferramenta é de 50 kHz a 250 kHz.

4.8 Influência dos Parâmetros de Usinagem na EA - Considerações Práticas

A seguir algumas avaliações práticas realizadas por alguns pesquisadores sobre a influência dos parâmetros de usinagem na EA.

4.8.1 Velocidade de corte

PIGARI (1995) afirma que a velocidade de corte tem se mostrado como o parâmetro que mais influencia a energia do sinal de EA. A Figura 4.8 ilustra o comportamento do sinal de EA (V_{RMS}) em função da velocidade de corte (v_c), na usinagem do aço SAE 1045 com ferramenta de metal duro.

FIGURA 4.8. Sinal de EA em função da v_c (Metal duro P20, material usinado aço SAE 1045, $f=0,23$ mm/volta, $a_p = 0,5$ mm) - INASAKI & YONETSU* apud PIGARI (1995)

*INASAKI, I.; YONETSU, S. (1981). In-process detection of cutting tool damage by acoustic emission measurement. *Proceedings of 22nd. MTDR Conference*, p.261-268.

4.8.2 Avanço e profundidade de usinagem

Enquanto o crescimento da velocidade de corte faz crescer a intensidade do sinal de EA (V_{RMS}), o mesmo nem sempre acontece com o avanço (f) e a profundidade de usinagem (a_p).

LAN & DONNFELD (1986) usinaram aço SAE 1018 com ferramentas de metal duro sem revestimento, a uma velocidade de corte de 90 m/min e verificaram que a variação do sinal não foi sensível à variação do avanço, nem da profundidade de usinagem. Os resultados estão mostrados na Figura 4.9a para profundidade de usinagem e Figura 4.9b para avanço.

No entanto, à medida que o processo de corte se aproxima do ideal (arestas bem afiadas, pouco atrito) o comportamento do sinal de EA com o avanço e a profundidade de usinagem torna-se semelhante ao da velocidade de corte. Isto foi verificado por PAN & DORNFELD* apud PIGARI (1995) usinando alumínio com ferramentas diamantadas. Os resultados estão mostrados na Figura 4.10a para profundidade de usinagem e Figura 4.10b para avanço.

FIGURA 4.9. O sinal de EA, na usinagem do aço SAE 1018 com ferramenta de metal duro, em função de:

- (a) da profundidade de usinagem,
- (b) do avanço - LAN & DORNFELD (1986)

*PAN, C.S.; DORNFELD, D.A. (1986). Modeling the diamond – turning process with acoustic emission for monitoring applications. *Proceedings 14th NAMRC*, p.257-265.

FIGURA 4.10. O sinal de EA, na usinagem de alumínio com ferramenta diamantada, em função de: (a) da profundidade de usinagem ($v_c = 1200$ m/min), (b) do avanço ($a_p = 0,01$ mm) - PAN & DORNFELD* apud FIGARI (1995)

Variações na velocidade de corte alteram a velocidade de cisalhamento, a velocidade do cavaco sobre a ferramenta e a velocidade da peça em relação à superfície de folga da ferramenta. Por outro lado, mudança no avanço e na profundidade de usinagem influenciam a dimensão da zona cisalhamento e a área de contato entre cavaco e ferramenta e peça e ferramenta. Assim, estas últimas mudanças influenciam as forças de corte antes de influenciarem as velocidades de cisalhamento e atrito. CHRYSSOLOURIS & DOMROESE** apud FIGARI (1995) afirmam que a fração da potência de corte dissipada como emissão acústica é maior se a potência cresce devido a um aumento da velocidade de corte do que devido a um aumento da força de corte.

*PAN, C.S.; DORNFELD, D.A. (1986). Modeling the diamond – turning process with acoustic emission for monitoring applications. *Proceedings 14th NAMRC*, p.257-265.

**CHRYSSOLOURIS, G.; DOMROESE, M. (1989). Some aspects of accoustic emission modelling for machining control. *Proceeding of 17th NAMRC*, p.228-234, may.

4.8.3 Ângulo de saída da ferramenta

LAN & DORNFELD (1986) afirmam que quando o ângulo de saída (γ_o) da ferramenta aumenta, a tensão gerada na zona de cisalhamento e a deformação do cavaco diminuem, o que faz diminuir a intensidade do sinal de EA. A Figura 4.11 mostra o resultado obtido por estes pesquisadores ao usinar aço SAE 1018 com ferramenta de aço rápido em corte ortogonal.

FIGURA 4.11. O sinal de EA em função do ângulo de saída da ferramenta, para o corte ortogonal do aço SAE 1018 usando ferramenta de aço rápido - LAN & DORNFELD (1986)

Ao contrário deste comportamento do sinal de EA em função do ângulo de saída, KANNATEY & DORNFELD (1981), também utilizando ferramenta de aço rápido, em processo de corte ortogonal, usinando aço SAE 1018 e alumínio 6061 - T6, obtiveram resultados onde a intensidade do sinal de EA cresce com o aumento do ângulo de saída para ângulos de saída maiores que 15°. Com o aumento do ângulo de saída, aumenta o comprimento do contato entre cavaco e ferramenta e o aumento da emissão acústica gerada devido ao atrito nesta zona é provavelmente, neste caso, maior que as quedas ocorridas nas zonas de cisalhamento e deformação do cavaco.

4.8.4 Material da peça

A sensibilidade do sinal de EA em relação à dureza do material da peça usinada foi testada por LAN & DORNFELD (1986). Estes pesquisadores realizaram tratamento térmico em peças de aço SAE 1045 obtendo quatro durezas: HB 250, 270, 297, 332.

Com o aumento da dureza do material da peça, aumentam-se os esforços e tensões nas regiões de corte, fazendo crescer a intensidade do sinal de EA (Figura 4.12).

FIGURA 4.12. O sinal de EA em função da dureza Brinell do material da peça (aço SAE 1045) - LAN & DORNFELD (1986)

4.8.5 Fluido de corte

NAERHEIM & LAN* apud PIGARI (1995) pesquisaram a influência do fluido de corte (CCl_4 - tetracloreto de carbono) no sinal de EA, usinando aço SAE 4340 com ferramentas de metal duro sem revestimento. Foi verificado uma redução de 9% no sinal de EA quando o fluido de corte é aplicado sobre o cavaco. Quando o fluido inunda toda a região de corte, a redução é de 19%, pois, além da redução propiciada na zona de cisalhamento, há redução do atrito entre cavaco e ferramenta.

*NAERHEIM, Y.; LAN, M.S. (1988). Acoustic emission reveals information about the metal cutting process and tool wear. *Proceedings of 16th NAMRC*, p.240-244, may.

Segundo PIGARI (1995), quando CCl_4 é aplicado sobre o cavaco, a deformação plástica é facilitada na zona de cisalhamento das camadas superficiais. Isto diminui o nível de tensão na zona de cisalhamento, diminuindo a intensidade da EA gerada no corte. A Figura 4.13 mostra a redução da intensidade da EA após aplicação do fluido de corte.

FIGURA 4.13. Efeito da aplicação de fluido (CCl_4) no sinal de EA, para o aço SAE 4340 com ferramenta de metal duro - NAERHEIM & LAN* apud PIGARI (1995)

4.9 Influência do Desgaste de Flanco na EA

NAERHEIM & LAN* apud PIGARI (1995) usinaram aço SAE 4340 com ferramentas de metal duro, ora revestindo a superfície de saída da ferramenta com TiC para evitar o desgaste de cratera, ora revestindo a superfície de folga para evitar o desgaste de flanco. Desta forma puderam verificar o comportamento do sinal de EA (V_{RMS}) em função de cada desgaste separadamente. Também utilizaram ferramentas totalmente revestidas e outras sem revestimento algum. Os resultados do trabalho estão mostrados na Figura 4.14.

NAERHEIM & LAN* apud PIGARI (1995) afirmam que à medida que cresce o desgaste de flanco, a área de contato entre peça e ferramenta aumenta, fazendo com que o atrito nesta região seja maior. Isto faz crescer o sinal de EA.

*NAERHEIM, Y.; LAN, M.S. (1988). Acoustic emission reveals information about the metal cutting process and tool wear. *Proceedings of 16th NAMRC*, p.240-244, may.

A Figura 4.14a mostra o comportamento ascendente do sinal de EA ao longo do tempo de corte, à medida que cresce o desgaste de flanco.

4.10 Influência do Desgaste de Cratera na EA

NAERHEIM & LAN* apud PIGARI (1995) afirmam que o crescimento do desgaste de cratera faz diminuir a intensidade do sinal de EA. Isto está mostrado na Figura 4.14b. O crescimento inicial mostrado nesta figura seria função do aumento do atrito propiciado por micro-cavacos deixados na superfície de saída da ferramenta pelo rebolo diamantado utilizado para limpar o revestimento de TiC desta superfície.

Com o desenvolvimento da cratera, muda o ângulo de saída efetivo, o que faz aumentar o ângulo de cisalhamento do cavaco. Isto diminui a tensão na zona de cisalhamento e então cai a intensidade de emissão acústica gerada.

FIGURA 4.14. O sinal de EA em função do tempo de corte para diferentes condições da ferramenta - NAERHEIM & LAN* apud PIGARI (1995)

Neste caso, Figura 4.14b, o ângulo de saída efetivo foi aumentado em 10° até o final do teste. Na superfície de saída, ocorre um aumento do comprimento de contato entre cavaco e ferramenta, que aumenta o atrito e, conseqüentemente, aumenta a geração de EA. No entanto, o crescimento deste contato é muito pequeno, na ordem de 2% nos experimentos NAERHEIM & LAN* apud PIGARI (1995) e assim não afeta significativamente o sinal de EA.

4.11 *Influência dos Desgastes de Flanco e Cratera Combinados na EA*

A Figura 4.14c mostra que quando se utilizou ferramenta revestida em todas as faces, com TiC, o sinal de emissão acústica cresceu, embora com uma inclinação pequena. Nesta ferramenta o desgaste de cratera não foi muito significativo.

Segundo NAERHEIM & LAN* apud PIGARI (1995), quando o corte foi realizado com uma ferramenta sem revestimento, um forte crescimento inicial da EA aconteceu devido ao desgaste de flanco (Figura 4.14d). À medida que a cratera se forma, o nível da EA tende a estabilizar-se e quando o desgaste de cratera é pronunciado, pode até cair.

4.12 *O Sinal de EA com Ferramentas Revestidas*

MORIWAKI & TOBITO (1990) realizaram um trabalho onde analisaram a influência do revestimento das ferramentas de metal duro no sinal de emissão acústica. O material usinado em processo de torneamento foi o aço SAE 1045 e as condições de corte foram: $v_c = 200$ m/min, $a_p = 2$ mm e $f = 0,38$ mm/volta. As ferramentas foram revestidas por três camadas: TiC, TiB₂ e Al₂O₃, do substrato para a superfície, totalizando uma espessura média de 8 μ m.

*NAERHEIM, Y.; LAN, M.S. (1988). Acoustic emission reveals information about the metal cutting process and tool wear. *Proceedings of 16th NAMRC*, p.240-244, may.

A Figura 4.15 mostra o comportamento do sinal de EA (V_{RMS}) para três estágios diferentes da vida da ferramenta: $C_p = 6$; 20 e 38 μm (desgaste de cratera).

a) 1:05 min depois de iniciado o corte
($C_p = 6 \mu\text{m}$)

b) 13:00 min depois de iniciado o corte
($C_p = 20 \mu\text{m}$)

c) 19:15 min depois de iniciado o corte
($C_p = 38 \mu\text{m}$)

FIGURA 4.15. Sinal de EA (V_{RMS}) para três estágios diferentes de desgaste de cratera: $C_p = 6$; 20 e 38 μm - MORIWAKI & TOBITO (1990)

Depois da realização de vários experimentos, retirando o revestimento da superfície de folga ou de saída, ou ainda, tornando a revestir uma ferramenta já desgastada, os autores elaboraram as seguintes observações:

- (1) O sinal de EA contém muitos sinais de pico quando a superfície de saída

da ferramenta está revestida com cerâmica (Al_2O_3).

- (2) O sinal de EA é basicamente do tipo contínuo quando o revestimento cerâmico, da superfície de saída, foi removido pelo desgaste de cratera.
- (3) O material da superfície de folga não afeta o tipo do sinal de EA (pico ou contínuo).
- (4) O sinal de EA obtido com ferramenta revestida muda de pico para contínuo à medida que o desgaste de cratera progride e o revestimento é removido.
- (5) A amplitude do sinal de EA torna-se grande, com grande variação quando a ferramenta está bastante desgastada e se aproxima do fim de vida.

A seguir a Tabela 4.2 resume a influência dos principais fenômenos presentes na usinagem na EA.

TABELA 4.2. Resumo da influência dos principais fenômenos presentes na usinagem na EA

Parâmetro	Mecanismos envolvidos	Efeito
Velocidade de corte.	Taxa de cisalhamento.	A EA é função linear crescente.
Avanço e profundidade de corte.	- Dimensão da zona de cisalhamento e área de contato; - Força de corte.	- Processo ideal: (usinagem de alumínio com ferramenta de diamante, por exemplo) com ferramentas de arestas bem definidas, pouco atrito: a EA é função linear crescente; - Processo não ideal: indiferente.
Ângulo de saída da ferramenta (γ_o).	- Redução da tensão de cisalhamento com aumento de γ_o; - Aumento da deformação do cavaco com redução de γ_o; - Aumento do comprimento de contato com aumento de γ_o.	Depende das condições de usinagem e principalmente das condições de atenuação do sinal entre região de cisalhamento e ferramenta e na interface cavaco-ferramenta.
Material da peça (dureza).	Tensão de cisalhamento.	A EA é função linear crescente.

Parâmetro	Mecanismos envolvidos	Efeito
<u>Fluido de corte</u> (CCl_4).	• Redução da tensão de cisalhamento; • Redução do atrito entre cavaco e ferramenta.	• Redução de 9 a 19% da intensidade da EA.
Desgaste de flanco	• Aumento da área de contato e atrito entre peça e ferramenta	• A EA é função linear crescente.
Desgaste de cratera	• Aumento do ângulo de saída efetivo; • Redução da tensão de cisalhamento.	• Idem ângulo de saída da ferramenta.

5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

5.1 Introdução

O objetivo desta parte do trabalho é avaliar experimentalmente o comportamento da EA no torneamento em diferentes condições de desgaste das ferramentas e também quantificar o quanto a influência deste fenômeno no sinal é relevante diante da influência de outros fatores envolvidos na usinagem. Verificando-se a existência de correlação entre EA e desgaste da ferramenta, tendências definidas do sinal com a evolução do desgaste e pequena influência de fatores secundários, seria possível se estabelecer um critério de fim de vida para a ferramenta baseado na EA gerada no processo e, portanto, a implementação de um monitoramento indireto desta característica.

A avaliação ocorreu, de maneira resumida, em duas etapas:

- 1) Obtenção de insertos com quantidades crescentes de peças usinadas por aresta (esta fase foi realizada em situação real de ambiente fabril);
- 2) Análise do comportamento da EA com o desgaste das ferramentas em laboratório com os insertos obtidos no item anterior.

A etapa em laboratório é necessária porque recursos materiais e humanos para coleta e análise dos dados não estavam disponíveis no ambiente fabril em questão e porque esta fase preliminar é muito intrusiva (exige diversas intervenções no processo), o que prejudicaria o ritmo normal de produção.

Para minimizar o número de novas variáveis nos testes em laboratório, buscou-se trabalhar com condições similares às do chão de fábrica, com relação a condições de fixação da peça, matéria prima (forjado), programa de usinagem e fixação das ferramentas.

O estudo será feito especificamente para um eixo principal (eixo de saída) de transmissões de veículos de passeio. Esta peça foi escolhida em função dos seguintes aspectos:

1) Forjado obtido por processo de forjamento a frio (Figura 5.1), processo este caracterizado por melhor acabamento superficial e tolerância dimensional.

FIGURA 5.1. Forjado (faceado e centrado) obtido por processo de forjamento a frio

2) Geometria complexa da peça a ser gerada na operação de torneamento (Figura 5.2). O torneamento completo desta peça é realizado em duas fixações. A usinagem que ocorre durante a primeira fixação é a mais complexa e, portanto, a que foi escolhida para ser analisada neste trabalho. Anteriormente a esta operação, as peças passam pelo processo de faceamento e centragem.

FIGURA 5.2. Eixo principal após primeira operação de torneamento

3) As ferramentas utilizadas na usinagem da primeira fixação são exatamente do tipo que se pretende analisar: desbaste (inserto ISO TNMG) e acabamento (inserto ISO DNMG).

5.2 Condições Experimentais

A aquisição dos insertos com graus crescentes de peças usinadas foi feita na unidade de Componentes para Automóveis da empresa Eaton Ltda. – Divisão Transmissões. Insertos novos, utilizados na primeira operação de torneamento do

eixo, tiveram suas arestas identificadas, de maneira a facilitar seu uso numa sequência pré-determinada. Assim, os operadores dos dois turnos de trabalho foram orientados a usinar, para cada aresta, uma quantidade crescente de peças de acordo com a sequência: 40, 80, 100, 120 e 140 peças. O limite de 140 peças usinadas foi escolhido um pouco acima da vida média das ferramentas utilizadas (ferramenta de desbaste: 100 peças; ferramenta de acabamento: 120 peças). O torno utilizado nesta operação é um CNC Mori Seiki modelo CL 25 com carregamento automático.

Em seguida ensaios para aquisição do sinal de EA foram realizados no Núcleo de Manufatura Avançada (NUMA) da Escola de Engenharia de São Carlos, utilizando-se um torno CNC Index modelo GU 600, sensor piezoelétrico de emissão acústica, um microcomputador padrão IBM-PC com placa de aquisição de dados modelo GPI-B, conversor RMS da marca Sensis modelo BM12 e micrômetro com resolução milesimal para medição de sobremetal usinado. As medições dos desgastes V_B e Cl dos insertos foram feitas com auxílio de microscópio de oficina nas dependências do laboratório de metalografia da Eaton.

O sensor foi preso internamente à torre porta-ferramentas do torno. Este local foi escolhido por ter se mostrado o mais sensível ao sinal gerado durante o torneamento, com pequeno nível de ruído. Quando se prendeu o sensor ao suporte do contra-ponto rotativo, também se observou uma boa sensibilidade, mas altos níveis de ruídos. A instalação do sensor obedeceu às orientações do Manual de Operação BM12 – Monitor de Emissão Acústica (Apêndice III).

O sinal de EA é transmitido através da ferramenta, suporte, torre porta-ferramenta até o sensor, onde é transformado num sinal elétrico. O sinal elétrico é então amplificado no conversor Sensis onde também o cálculo do valor RMS é realizado e disponibilizado na saída do aparelho. Em seguida, o sinal é digitalizado através de uma placa de aquisição instalada em um microcomputador. Neste, uma interface, desenvolvida utilizando-se o programa LabView (Apêndice I), possibilita a plotagem dos dados e seu armazenamento em meio eletrônico (Figura 5.3).

FIGURA 5.3. Sistema utilizado na aquisição do sinal de EA gerado no torneamento

As condições de usinagem são comuns entre experimentos realizados em laboratório e no chão de fábrica:

1) Material da peça: QS 1916 (carbono: 0,15% a 0,20%; silício: 0,15% máximo; manganês: 1,10% a 1,30%; fósforo: 0,035% máximo; enxofre: 0,020% a 0,040%; cromo: 0,90% a 1,10%; níquel: 0,25% máximo; alumínio: 0,020% a 0,070%, cobre: 0,25% máximo; cálcio: permissível).

2) Fixação: placa auto-centrante de três castanhas à esquerda e ponto rotativo à direita (Figura 5.4);

3) Parâmetros de usinagem:

3.1) Desbaste:

Velocidade de corte: 300 m/min (constante);

Avanço: 1º passe: 0,33 mm/volta;

2º passe: 0,25 mm/volta;

Profundidade de corte: de 1,5 a 2,5 mm.

3.2) Acabamento:

Rotação: 2500 rpm (constante);

Avanço: 0,25 mm/volta.

Profundidade de corte: de 0,1 a 0,3 mm.

4) Insertos e suportes (Tabela 5.1).

TABELA 5.1. - Insertos e suportes utilizados

Desbaste	Suporte MTJNL 2525	Acabam.	Suporte PDJNL 2525
	- fixação por sistema 4 opções – ISO M (Figura 5.5) - inserto com geometria T - ângulo de posição: 93° - ângulo de folga: 0° - usinagem à esquerda - seção quadrada de 25x25 mm		- fixação por sistema de alavanca – ISO P (Figura 5.5) - inserto com geometria D - ângulo de posição: 93° - ângulo de folga: 0° - usinagem à esquerda - seção quadrada de 25x25 mm
	Inserto TNMG 160408-M5 - ângulo de folga: 0° - geometria triangular - quebra cavacos dos dois lados - comprimento da aresta: 16 mm - espessura 4,76 mm - raio de ponta 0,8 mm - classe TP 200 (Seco)		Inserto DNMG 110404-MF2 - ângulo de folga: 0° - ângulo de ponta de 55° - quebra cavacos dos dois lados - comprimento da aresta: 11 mm - espessura 4,76 mm - raio de ponta 0,4 mm - classe TP 200 (Seco)

FIGURA 5.4. Fixação da peça no torno

SISTEMA 4 OPÇÕES

Neg. - Pos.

Fixação do tipo M

SISTEMA ALAVANCA

Fixação do tipo P

FIGURA 5.5. Geometrias de suporte utilizadas (VALENITE, 1992)

Tanto o inserto de desbaste, quanto o de acabamento são da classe TP 200 (Seco) com cobertura do tipo CVD de $\text{Ti (C,N) + Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$ e substrato sinterizado de WC (Figura 5.6).

FIGURA 5.6. Camadas de $\text{Ti (C,N) + Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$ e substrato sinterizado de WC em inserto da classe TP 200 (SECO, 2000)

Os parâmetros utilizados na aquisição de dados foram os seguintes:

- 1) Constante de tempo para cálculo de valor RMS: 10 ms;
- 2) Taxa de aquisição: 500 pontos/s. Este valor foi escolhido de acordo com o Critério de Nyquist, segundo o qual uma a taxa de aquisição deve ser no mínimo duas vezes maior que a frequência do sinal analisado. Sendo a frequência na saída do conversor de RMS igual a 100 Hz (inverso da constante de tempo), escolheu-se uma taxa de aquisição cinco vezes maior;

- 3) Sensor piezoeletrico com banda sensível de 1 kHz a 800 kHz compatível com as frequências mais comuns de EA;
- 4) Filtro passa alta de 5 kHz;
- 5) Interface para aquisição de dados desenvolvida com auxílio do software LabView (Apêndice I).

5.3 Correlação entre Sinal de EA e Trajetória da Ferramenta

Após definição do arranjo experimental, o próximo passo na implementação de um sistema de monitoramento indireto é verificar se existe correlação entre o sinal gerado pelo transdutor escolhido e o fenômeno em estudo. Esta etapa é muito importante porque a existência de ruídos no sinal, bem como o ajuste incorreto de parâmetros da aquisição (ganho, constantes de integração, filtros) podem gerar informações falsas a respeito do fenômeno e, portanto, comprometer todo o experimento. Procedimentos simples, como verificar se há alteração da intensidade do sinal após início da usinagem, ou a presença de saturação são extremamente importantes. Se o sinal não se altera, o sensor pode não estar corretamente fixado, conexões elétricas podem estar com mal contato, ou o ganho pode estar muito pequeno; neste caso, poder-se-ia chegar à conclusão incorreta de que o processo não gera emissão acústica. Por outro lado, se há saturação do sinal (o sinal ultrapassa a tensão máxima de entrada da placa de aquisição), o sinal pode ter um comportamento constante não condizente com o fenômeno. Além disso, picos do sinal podem ser eliminados e importantes fenômenos relacionados a este tipo de comportamento teriam sua influência minimizada ou mesmo descartada.

5.4 Análise dos Dados

Para facilitar a análise, a usinagem foi dividida em três trechos denominados:

- 1) **Desbaste 1:** primeiro passe de desbaste, da coordenada ao longo do eixo da peça Z285.9 a Z214.05, utilizando-se a ferramenta de geometria TNMG;
- 2) **Desbaste 2:** segundo passe de desbaste, de Z285.9 a Z84, utilizando-se a ferramenta de geometria TNMG;
- 3) **Acabamento,** da coordenada Z288 a Z 88, utilizando-se a ferramenta de geometria DNMG.

O eixo “Z” e seu ponto zero de referência para o programa CNC são ilustrados na Figura 5.7.

FIGURA 5.7. Eixo “Z”, respectiva referência para programa de usinagem e regiões de análise

O primeiro passe de desbaste não foi considerado nesta análise por estar muito sujeito a variações devidas à excentricidade do furo de cento da peça. Portanto, daqui a diante, quando se fizer referência ao desbaste, deve-se considerar o trecho “desbaste 2”.

Para cada aresta – representativa de uma situação de desgaste – foi usinado um novo forjado e os valores da aquisição salvos no disco rígido do microcomputador. Previamente à aquisição dos dados, a cada nova aresta, uma peça foi torneada, sendo seus diâmetros medidos após desbaste e após acabamento para correção das dimensões finais e valor do sobremetal. A menor tolerância a ser mantida nas dimensões finais foi de 25 μm . O sobremetal mínimo a ser mantido para a operação de acabamento foi de 0,1 mm.

Os valores das aquisições foram, então, plotados consecutivamente (condições crescentes de desgaste) para desbaste e acabamento. Esta análise gráfica permite comparar de maneira qualitativa como evolui a EA com o desgaste. Deve-se observar se o sinal apresenta a mesma tendência com o desgaste em todas as regiões da peça, caso contrário, regiões de tendência definidas devem ser identificadas para que a elas seja limitada a análise.

Uma vez definidas estas regiões, uma análise mais minuciosa (quantitativa) deve ser feita. Não se utilizou na aquisição mecanismo de sincronização com a usinagem (o início da aquisição foi disparado manualmente). Há, portanto, uma defasagem do sinal entre os arquivos de dados. Através da interface criada no software LabView, foi possível determinar referências gráficas na plotagem do sinal e seus respectivos valores no eixo das abscissas – Figura 5.8 (o recurso de “zoom” disponível na interface desenvolvida em Lab View torna este método bastante preciso). Assim, o erro de “offset”, ou a defasagem entre os sinais é a diferença entre os valores obtidos para regiões equivalentes da usinagem (referências). Conhecidos os erros de “offset”, os arquivos de dados são lidos em planilha eletrônica, onde os valores médios, máximos e mínimos do sinal são calculados para os trechos de interesse (já compensados os erros de “offset”). Para minimizar ainda mais o erro na determinação do “offset”, os extremos dos intervalos escolhidos foram desconsiderados (10% do início e 10% do final do intervalo).

FIGURA 5.8. Exemplo de uma possível referência na determinação do erro de “offset”

O estabelecimento da correlação entre a EA e o desgaste das ferramentas, envolveu, além da plotagem dos valores calculados com os dados das aquisições, sua comparação com os respectivos valores das medições de desgaste de cratera e flanco.

Finalmente, quantificou-se o quanto a influência do desgaste dos insertos na EA é relevante diante da influência de outros fatores envolvidos na usinagem. Para este fim, escolheu-se variar a pressão no contra-ponto, simulando-se variações na pressão do sistema hidráulico e diferenças de setup comuns para esta característica. Três valores de pressão foram avaliados: 30 bar (condição normal de trabalho), 15 bar e 5 bar durante o torneamento de acabamento. Os parâmetros de usinagem e de aquisição dos sinais foram mantidos com relação aos experimentos anteriores.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 *Correlação entre Sinal de EA e Trajetória da Ferramenta*

A Figura 6.1 ilustra a correlação gráfica entre valores da aquisição plotados em voltagem RMS por tempo e a respectiva trajetória da ferramenta durante trecho da usinagem de desbaste. Não se observa saturação e também fica evidente que o sinal tem um comportamento linear quando a usinagem tem uma trajetória linear, ou seja, há correlação entre eles.

FIGURA 6.1. Trecho da usinagem de desbaste e respectivo sinal de EA

6.2 *Análise Qualitativa da Evolução da EA com o Desgaste*

Tanto no desbaste quanto no acabamento (Figuras 6.2 e 6.3) pôde-se observar que diferentes trechos da usinagem apresentam diferentes tendências com o desgaste (ora o sinal de EA permanece estável, ora cresce ou decresce, ora não apresenta tendência definida). Notadamente, nas regiões de trajetória não linear (caracterizadas

também pela presença de picos), não há uma tendência definida do sinal. Isto pode ser explicado pelo movimento de interpolação realizado pela ferramenta nestas regiões, causando um contato irregular desta com a peça. Além disso, há uma variação do ponto de contato da ferramenta, o que lhe confere diferentes características de desgaste ao longo do trecho usinado; cada característica de desgaste, por sua vez, contribui para diferentes tendências do sinal de EA. A influência da trajetória não linear da ferramenta na aleatoriedade do sinal será tão maior quanto menor for a acuracidade de posicionamento do torno.

A Figura 6.2 ilustra a plotagem consecutiva de quatro aquisições referentes ao valor RMS do sinal de EA gerado durante o segundo passe de desbaste para uma ferramenta nova, com 40, 80 e 140 peças usinadas respectivamente.

FIGURA 6.2. EA no desbaste - ferramenta nova, com 40, 80 e 140 peças usinadas

A Figura 6.3 ilustra a plotagem consecutiva de quatro aquisições referentes ao valor RMS do sinal de EA gerado durante o acabamento para uma ferramenta nova, com 40, 80 e 140 peças usinadas respectivamente.

FIGURA 6.3. EA no acabamento - ferramenta nova, com 40, 80, 140 peças usinadas

Enfim, através da análise qualitativa (gráfica) dos sinais de EA, observou-se que não há tendência definida nas regiões de trajetória não linear da ferramenta, mas pouco pode-se afirmar sobre as demais regiões.

Devido à grande densidade de pontos presente na plotagem consecutiva de quatro aquisições com graus crescentes de desgaste de ferramenta (Figuras 6.2 e 6.3) é difícil visualizar-se tendências ou mesmo identificar pontos correspondentes nas regiões não caracterizadas por picos. Uma análise qualitativa de tendências nestas regiões deveria comparar as aquisições individualmente e não plotadas consecutivamente no mesmo gráfico, método este que seria lento e impreciso. Assim, optou-se pela análise quantitativa do sinal nas regiões de trajetória linear da ferramenta. O primeiro passo neste sentido foi individualizar regiões de interesse ao longo da trajetória de desgaste e acabamento.

6.3 Determinação das Regiões de Análise nos Trechos de Trajetória Linear da Ferramenta

No desgaste foram escolhidas oito regiões e, no acabamento, cinco (Figuras 6.4 e 6.5) dentre alguns trechos do sinal onde a trajetória da ferramenta é linear.

FIGURA 6.4. Regiões de análise na operação de desbaste

FIGURA 6.5. Regiões de análise na operação de acabamento

6.4 Evolução da EA com o Desgaste no Desbaste

No desbaste, da condição inicial para a de maior desgaste da ferramenta, há uma variação média (média das variações das oito regiões de análise) de -4% (-0,21V), considerando-se os valores médios das aquisições (Figura 6.8), 6% (0,40V), considerando-se os valores máximos (Figura 6.9) e -3% (-0,12V), considerando-se os valores mínimos (Figura 6.10). Pôde-se verificar também que o desgaste de flanco cresceu de maneira aproximadamente linear desde 20 até 140 peças usinadas; já o desgaste de cratera se pronuncia de maneira acentuada a partir de 40 peças usinadas e cresce de maneira aproximadamente linear até o último ponto analisado (Figura 6.7). O comportamento do sinal de EA, observado na Figura 6.8, indica que inicialmente o desgaste de cratera prevalece sobre o de flanco, de maneira a determinar um decréscimo do sinal de EA; a seguir, inicia-se a adesão de material da peça na ferramenta que age de maneira a diminuir o ângulo de saída efetivo e, portanto, aumentar o sinal; com 140 peças usinadas, a adesão é parcialmente removida (devido ao atrito com a peça) e o sinal apresenta novamente um decréscimo. A adesão ocorreu principalmente no ponto onde houve o acentuado desgaste de cratera e portanto remoção da camada de cobertura (Figuras 6.11 e 6.12). A porosidade do substrato da ferramenta, a alta velocidade de corte utilizada e, portanto, altas temperaturas de corte e a afinidade química do tungstênio com o ferro propiciam este fenômeno.

FIGURA 6.6. EA no desbaste - usinagem completa (inserto novo)

FIGURA 6.7. Evolução dos desgastes de flanco (V_B) e cratera (CI) no desbaste

FIGURA 6.8. Evolução da EA no desbaste em oito diferentes regiões da peça onde a trajetória da ferramenta é linear - valor médio do sinal em cada intervalo

FIGURA 6.9. Evolução da EA no desbaste em oito diferentes regiões da peça onde a trajetória da ferramenta é linear - valor máximo do sinal em cada intervalo

FIGURA 6.10. Evolução da EA no desbaste em oito diferentes regiões da peça onde a trajetória da ferramenta é linear - valor mínimo do sinal em cada intervalo

FIGURA 6.11. Adesão de material da peça em inserto com 120 peças usinadas

FIGURA 6.12. Evolução do desgaste para ferramenta de desbaste:

- (1) 80 peças usinadas e desgaste de cratera acentuado;
- (2) 120 peças usinadas e adesão de material da peça;
- (3) 140 peças usinadas e material aderido parcialmente removido.

Nas Figuras 6.8, 6.9 e 6.10 ainda chama a atenção o fato das regiões 1 e 2 terem sinais de amplitude sempre inferior aos das demais regiões. Isto se explica pelo fato de estas regiões serem justamente aquelas nas quais houve um desbaste prévio (o qual não foi considerado nas análises) com conseqüente remoção da camada mais externa do forjado (mais dura e com impurezas) e redução da quantidade de sobremetal.

6.5 Evolução da EA com o Desgaste no Acabamento

Os valores absolutos (RMS) do sinal de EA no acabamento são aproximadamente seis vezes menores que no desbaste, o que provavelmente decorre do menor esforço de corte e quantidade material removida na operação de

acabamento. Além disso, a operação anterior de desbaste remove completamente a camada externa do forjado de maneira que o sobremetal remanescente apresenta menor dureza e menor tensão de cisalhamento.

No acabamento, da condição inicial para a de maior desgaste da ferramenta, há uma variação média (média das variações das cinco regiões de análise) do sinal de -20% (-0,13 V), considerando-se os valores médios das aquisições (Figura 6.15); -19% (-0,19 V), considerando-se os valores máximos (Figura 6.16) e -12% (-0,05 V), considerando-se os valores mínimos (Figura 6.17). Pôde-se verificar também que o desgaste de flanco cresceu de maneira aproximadamente linear desde 20 até 140 peças usinadas; já o desgaste de cratera só se pronuncia de maneira mais acentuada a partir de 100 peças usinadas (Figura 6.14). Isto explica o decréscimo do valor RMS do sinal observado na Figura 6.15. A Figura 6.18 mostra o desgaste de cratera no inserto de acabamento com 140 peças usinadas. A remoção da camada de cobertura observada na superfície de saída da ferramenta diminui sua resistência ao desgaste e portanto possibilita a formação do desgaste de cratera.

FIGURA 6.13. Acabamento - usinagem completa (inserto novo)

FIGURA 6.14. Evolução dos desgastes de flanco (V_B) e cratera (CI) no acabamento

FIGURA 6.15. Evolução da EA no acabamento em cinco diferentes regiões da peça onde a trajetória da ferramenta é linear - valor médio do sinal em cada intervalo.

FIGURA 6.16. Evolução da EA no acabamento em cinco diferentes regiões da peça onde a trajetória da ferramenta é linear - valor máximo do sinal em cada intervalo.

FIGURA 6.17. Evolução da EA no acabamento em cinco diferentes regiões da peça onde a trajetória da ferramenta é linear - valor mínimo do sinal em cada intervalo.

FIGURA 6.18. Desgaste de cratera em ferramenta de acabamento com 140 peças usinadas

6.6 Influência do Sistema de Fixação

Há um significativo aumento do valor RMS do sinal com a diminuição da pressão no contra-ponto. Da condição normal de trabalho para a de menor pressão, há uma variação média (média das variações das cinco regiões de análise) de 84% (1,01 V), considerando-se os valores médios das aquisições (Figura 6.19), 96% (1,89 V), considerando-se os valores máximos (Figura 6.20) e 88% (0,67 V), considerando-se os valores mínimos (Figura 6.21).

FIGURA 6.19. Influência da pressão no contra ponto no sinal de EA em cinco diferentes regiões da peça onde a trajetória da ferramenta é linear (acabamento) - valor médio do sinal em cada intervalo.

FIGURA 6.20. Influência da pressão no contra ponto no sinal de EA em cinco diferentes regiões da peça onde a trajetória da ferramenta é linear (acabamento) - valor máximo do sinal em cada intervalo.

FIGURA 6.21. Influência da pressão no contra ponto no sinal de EA em cinco diferentes regiões da peça onde a trajetória da ferramenta é linear (acabamento) - valor mínimo do sinal em cada intervalo.

7 Conclusões

O monitoramento indireto por EA do desgaste de ferramentas em processo de torneamento de peças de geometria complexa depende, primeiramente, da identificação de trechos no sinal que apresentem uma tendência definida do valor RMS da EA ao longo do desgaste da ferramenta. Estes trechos foram, para este trabalho, aqueles nos quais a trajetória da ferramenta é linear.

Há uma grande correlação entre o valor RMS do sinal de EA e a trajetória da ferramenta, sendo possível identificar, a partir do gráfico do valor RMS no tempo, quais as regiões que correspondem a trajetórias lineares ou não da ferramenta.

A influência dos desgastes de flanco e cratera também é relevante e bem definida, condizendo com os trabalhos já publicados sobre o assunto, ou seja, o desgaste de cratera, por aumentar o ângulo de saída efetivo da ferramenta, diminui a tensão na zona de cisalhamento e assim, reduz a intensidade de emissão acústica gerada; o desgaste de flanco, por aumentar a área de contato entre peça e ferramenta, fazendo com que o atrito nesta região seja maior, faz crescer o sinal de EA.

Observou-se que a adesão de material da peça à ferramenta contribui para um aumento na intensidade do sinal de EA, provavelmente pelo aumento do atrito entre cavaco e ferramenta e diminuição do ângulo de saída efetivo da ferramenta.

A combinação de todos estes fatores não favorece o estabelecimento de limites de controle para o monitoramento indireto do desgaste de ferramentas por EA. Nas duas situações estudadas (desbaste e acabamento), a somatória dos efeitos destes fatores contribuiu para amplitudes muito pequenas entre as condições iniciais e de fim de vida da ferramenta. Além disso, no acabamento, as pequenas amplitudes do sinal de EA também dificultam o monitoramento uma vez que este fica mais “vulnerável” a alarmes falsos devido a ruídos.

Outro fator extremamente desfavorável ao monitoramento proposto é a significativa influência das condições de fixação, como a pressão no contra-ponto, determinando variações no sinal de EA de amplitude diversas vezes maior do que as geradas pelos desgastes e pelo fenômeno de adesão.

Assim, é possível afirmar que, apesar de a EA ser bastante sensível aos fenômenos envolvidos no processo de torneamento, o monitoramento apenas por emissão acústica do desgaste de ferramentas não é adequado à situação estudada. Além disso, a complexidade dos fenômenos que ocorrem simultaneamente durante a operação de torneamento sugere a necessidade de extração de características de desgaste mais apuradas a partir do sinal de EA. Isto poderia ser obtido através da utilização de técnicas de análise mais elaboradas como Inteligência Artificial ou Lógica Fuzzi. Outra proposta para continuidade deste trabalho seria a investigação da utilização de abordagem de múltiplos sensores ou da fusão de sinais de diferentes sensores na composição de um terceiro sinal.

Como forma de se buscar uma aplicação confiável de EA no monitoramento da usinagem de eixos de transmissão e também com a preocupação de que este trabalho resultasse em uma aplicação industrial, foi testada a técnica de EA na detecção da quebra de brocas no processo de centragem do mesmo eixo. O apêndice II mostra resumidamente este desenvolvimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHRYSSOLOURIS, G.; DOMROESE, M.; BEAULIEU, P. (1992). Sensor synthesis for control of manufacturing processes. *Journal of Engineering for Industry*, v.114, p.158-174, may.
- COOK, N.H. (1973). Tool wear and tool life. *Journal of Engineering for Industry*, p.931-938, nov.
- COOK, N.H.; SUBRAMANIAN, K. (1978). Micro-isotope tool wear sensor. *Annals of the CIRP*, v.27, p. 73-78.
- DAN, L.; MATHEW, J (1990). Tool wear and failure monitoring techniques for turning – a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v.30, p.579-598.
- DIEI, E.N.; DORNFELD, D.A. (1987). A model of tool fracture generated acoustic emission during machining. *Journal of Engineering for Industry*, v.109, p.227-233, aug.
- DU, R.; ELBESTAWI, M.A.; LI, S. (1992). Tool condition monitoring in turning using fuzzy set theory. *Int. Journal of Machine Tools and Manufacturing*, v.32, n.6, p.781-796.
- DU, R.; ELBESTAWI, M.A.; WU, S.M. (1995). Automated monitoring of manufacturing process; part 1: monitoring methods. *Journal of Engineering for Industry*, v.117, n.2, p.121-132, may.
- FERRARESI, D. (1977). *Fundamentos da usinagem dos metais*. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda.
- IWATA, K.; MORIWAKI, T.; TAKENAKA, N. (1977). An application of acoustic emission measurement to in-process sensing of tool wear. *Annals of the CIRP*, v.25, n.1, p. 21-26.
- JAMMU, V.B.; DANAI, K.; MALKIN, S. (1993). Unsupervised neural network for tools breakage detection in turning. *Annals of the CIRP*, v.42, n.1, p.67-70.
- JETLY, S. (1984). Measuring cutting tool wear on-line: some practical considerations. *Manufacturing Engineering*, p.55-60, jul.
- KANNATEY-ASIBU, Jr.,E.; DORNFELD, A.D. (1981). Quantitative relationships for acoustic emission from orthogonal metal cutting. *Journal of Engineering for Industry*, v.103, p. 330-340.
- LAN, M.S.; DORNFELD, D.A. (1984). In-Process Tool Fracture Detection. *Journal Engineering Materials Technology*, vol.106, n.2, p.111-118.
- LAN, M.S.; DORNFELD, D.A. (1986). Acoustic emission in machining – process analysis and control. *Advanced Manufacturing Process*, v.1, p.1-21.
- LI, S.; ELBASTAWI, M. A. (1992). A fuzzy logic approach for multi-sensor process monitoring in machining. *Sensor and Signal Processing for Manufacturing*, v.55, p.1-16.
- MANNAN, M.A.; BROMS, S. (1989). Monitoring and adaptive control of cutting process by means of motor power and current measurements. *Annals of the CIRP*, v.38, p.347-350.

- MARCONDES, F.C. (1990). *A história de metal duro*. Unida Artes Gráficas e Editora Ltda.
- MORIWAKI, T.; TOBITO, M. (1990). A new approach to automatic detection of life of coated tool based on acoustic emission measurement. *Journal of Engineering for Industry*, v.112, p.212-218.
- NOVACK, A.; WIKLUND, H. (1996). On-line prediction of tool life. *Annals of the CIRP*, v.45, n.1, p.93-96.
- PIGARI, A.C. (1995). *Monitoramento do desgaste da ferramenta no processo de torneamento usando emissão acústica*. Campinas. 130p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas.
- POLLOCK, A.A. (1989). Acoustic emission inspection. *Methods of Nondestructive Evaluation*, p.278-294.
- RANGWALA, S.S.; DORNFELD, D.A. (1990). Sensor integration using neural networks for intelligent tool condition monitoring. *Journal of Engineering for Industry*, v.112, n.3, p.219-228.
- RENISHAW (1998). *Probing systems for CNC machine tools: technical specification*. United Kingdom. / folder/
- RYABOV, O.; MORI, K.; KASASHIMA, N. (1996). An in - process direct monitoring method for milling tool failures using a laser sensor. *Annals of the CIRP*, v. 45, n.1, p.97-100.
- SANTOCHI, M.; DINI G.; TANTUSSI, G.; BEGHINI, M. (1997). A sensor-integrated tool for cutting force monitoring. *Annals of the CIRP*, v.46, n.1, p.49-52.
- SECO TOOLS INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. *Guia Técnica*. (CD ROM) *CD-ROM 2000*, 2000.
- SHINNO, H.; HASHIZUME, H. (1997). In-process monitoring method for machining environment based on simultaneous multiphenomena sensing. *Annals of the CIRP*, v.45, n.1, p.53-56.
- TAKEYAMA, H.; SEKIGUCHI, H.; TAKADA, K. (1970). One approach for optimising control in metal cutting. *Annals of the CIRP*, v.18, p.345-351.
- TETI, R.; DORNFELD, D. (1989). Modeling and experimental analysis of acoustic emission from metal cutting. *Journal of Engineering for Industry*, v.111, p.229-237, aug.
- UEHARA, K. (1973). New attempts for short time tool-life testing. *Annals of the CIRP*, v.22, p.23-24.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- BEATTIE, R.J. (1983). Acoustic emission, principles and instrumentation. *Journal of Acoustic Emission*, v.2, p.95-128.
- CHRYSSOLOURIS, G.; DOMROESE, M. (1989). Some aspects of acoustic emission modelling for machining control. *Proceeding of 17th NAMRC*, p.228-234, may.
- CHRYSSOLOURIS, G.; DOMROESE, M.; BEAULIEU, P. (1992). Sensor synthesis for control of manufacturing processes. *Journal of Engineering for Industry*, v.114, p.158-174, may.
- DU, R. (1989). *Methodos for intelligent on-line monitoring and diagnosis of manufacturing process*. Michigan. Tese Ph.D. - University of Michigan.
- FREED, D.; WRIGHT, D. (1986). FAXS, An expert system for the analysis of mechanical failures. *ASME Proceedings on Computers in Engineering*.
- INASAKI, I.; YONETSU, S. (1981). In-process detection of cutting tool damage by acoustic emission measurement. *Proceedings of 22nd. MTDR Conference*, p.261-268.
- LI, P.G.; WU, S.M. (1987). Monitoring of drill wear states using fuzzy pattern recognition technique. *ASME Journal of Engineering for Industry*, v.110, n.2, p.297-300.
- LIU, D. (1986). A case study of the HICLASS^{TM} software system: a manufacturing expert system. *Knowledge-based Expert Systems for Manufacturing*, v.24, p.12-25.
- NAERHEIM, Y.; LAN, M.S. (1988). Acoustic emission reveals information about the metal cutting process and toll wear. *Proceedings of 16th NAMRC*, p.240-244, may.
- PAN, C.S.; DORNFELD, D.A. (1986). Modeling the diamond – turning process with acoustic emission for monitoring applications. *Proceedings 14th NAMRC*, p.257-265.
- QUINLAN, J.R. (1987). Simplifying decision trees. *Int. J. Man-Machine Studies*, v.27, p.221-234.
- RUSPINI, E. (1981). Numerical methods for fuzzy clustering. *Inf. Sci.*, v.6, p.273-284.
- SHORTLIFFE, E.H. (1976). *Computer-based medical consultation*, MYCIN. Amsterdam, Elsevier Scientific Pub. Co.
- WANG, M.; ZHU, J.Y.; ZHANG, Y.Z. (1985). Fuzzy pattern recognition of the metal cutting states. *Annals of the CIRP*, v.34, n.1.

APÊNDICE I

INTERFACE LABVIEW PARA SINAL DE EA

Com o auxílio do software LabVIEW da empresa National Instruments foi desenvolvida uma interface específica com o objetivo de tornar possível a aquisição “on line”, leitura a partir de arquivo, visualização e arquivamento do sinal de emissão acústica em meio eletrônico.

FIGURA I.1. Interface LabVIEW desenvolvida para sinal de EA

Inicialmente deve-se configurar os números do canal e dispositivo adequados à configuração de hardware (placa conversora analógico-digital) que está sendo utilizada. A taxa de aquisição deve ser pelo menos duas vezes maior do que o inverso da constante de tempo utilizada no cálculo do valor RMS do sinal, de acordo com o Critério de Nyquist.

A opção “Origem dos Dados” permite a escolha entre se fazer a aquisição e visualização “On Line” do sinal de saída do conversor A/D ou a partir de dados previamente armazenados em arquivos do tipo “txt”. Estando a chave “Origem dos dados” na posição “On Line” e a opção “Salvar Dados” selecionada, os dados da aquisição serão arquivados em formato “txt” no caminho indicado na respectiva caixa de texto. A opção “Inverter Dados” permite a inversão de sinal dos dados de entrada.

A Figura I.1 ilustra a interface desenvolvida e as opções de configuração disponíveis. O gráfico à direita permite a visualização do sinal de EA, sendo que o eixo das ordenadas indica a tensão RMS em volts e o eixo das abscissas o número da amostra.

Há ainda um importante recurso de “zoom” que permite a visualização de intervalos definidos pelo usuário tanto no eixo das abscissas, quanto no eixo das ordenadas. Este recurso foi extremamente útil na sincronização manual dos sinais das diversas aquisições realizadas (maiores detalhes no capítulo 5, item 5.4).

APÊNDICE II

APLICAÇÃO DO MONITORAMENTO POR EMISSÃO ACÚSTICA NA DETECÇÃO DE QUEBRA DE BROCA EM OPERAÇÃO DE CENTRAGEM

Paralelamente à investigação sobre o monitoramento do desgaste de ferramentas na operação de torneamento (tema principal desta dissertação de mestrado), também foi avaliado o monitoramento por emissão acústica da quebra de brocas em operação de centragem de eixos.

A operação de centragem geralmente é a primeira operação no processo de fabricação de eixos a partir de forjados. Os forjados em questão têm mesma geometria, material e processo de fabricação dos forjados utilizados na operação de torneamento cujos desgastes das ferramentas foram avaliados (maiores detalhes podem ser encontrados no capítulo 5, itens 5.1 e 5.2).

A máquina utilizada nesta operação é uma faceadora e centradora Promecor com carga e descarga automática. Assim, a quebra de uma broca implica no refugo de uma quantidade de peças igual ao número de posições disponíveis na esteira de saída, supondo-se que o operador não detecte a falha antes disto (o que geralmente acontece devido ao fato de ele atuar em mais de uma máquina). O refugo da peça acontece porque a broca, ao perder sua aresta cortante, atrita com a superfície do forjado sem remover material, gerando altas temperaturas. A seguir, o fluido de corte abaixa a temperatura bruscamente de maneira a promover um endurecimento localizado (algo semelhante a uma têmpera). Esta superfície endurecida causaria a quebra de outras brocas no caso de uma tentativa de retrabalho da mesma, sendo portanto refugada.

POLLOCK (1989) afirma que uma considerável quantidade de energia elástica é liberada na forma de emissão acústica no caso de trincas e fraturas. Na

prática, isto significa que, durante a quebra de uma ferramenta, um pico bem definido e de grande amplitude (comparativamente ao sinal gerado durante condições normais de usinagem) será observado no sinal de emissão acústica. Isto é extremamente favorável ao estabelecimento de um sistema de monitoramento de quebras baseado em EA porque um limite superior de controle pode ser estabelecido, acima do qual se caracterizaria uma situação de quebra.

No experimento, as seguintes condições foram utilizadas:

- 1) Rotação da broca: 1150 rpm;
- 2) Avanço da broca: 0,11 mm/volta;
- 3) Broca de aço rápido: SandVik Titex K1114*4;
- 4) Máquina: faceadora e centradora Promecor;
- 5) Filtro passa alta de 150 kHz;
- 6) Constante de tempo para cálculo do valor RMS: 10 ms;
- 7) Taxa de aquisição: 500 pontos/s;
- 8) Sensor piezoelétrico com banda sensível de 1kHz a 800kHz preso ao sistema de fixação da peça;
- 9) Interface para aquisição de dados de acordo com Apêndice I;
- 10) Geometria do furo de centro conforme ilustrado na Figura II.1.

FIGURA II.1. Geometria do furo de centro

A Figura II.2 destaca, num trecho de aquisição do sinal de EA, o instante no qual ocorreu a quebra da broca. Pode-se observar que a amplitude da emissão acústica gerada durante a usinagem normal é praticamente desprezível com relação à amplitude do pico que ocorre na quebra. Isto minimiza a chance de falsos alarmes em função de ruídos, por exemplo, uma vez que também a amplitude dos ruídos é geralmente muito baixa e ocorre numa faixa de frequência bem menor que a da quebra.

FIGURA II.2. Sinal de EA durante usinagem normal e quebra da broca em operação de centragem

Nesta situação específica, foi possível implementar um sistema de monitoramento em ambiente fabril, o qual está atualmente em funcionamento na unidade de Componentes para Automóveis da empresa Eaton Ltda – Divisão Transmissões.

APÊNDICE III

MANUAL DE OPERAÇÃO BM12 MONITOR DE EMISSÃO ACÚSTICA - SENSIS

Descrição do Painel Frontal

FIGURA III.1. Painel frontal do monitor de EA BM12.

- 1 – *Select*: seleciona entre o modo de operação e o modo de ajuste dos “Thresholds” dos canais 1 e 2;
- 2 – *LED Channel 1*: indica que o aparelho está no modo de ajuste do nível de “Threshold 1”;
- 3 – *LED Channel 2*: indica que o aparelho está no modo de ajuste do nível de “Threshold 2”;
- 4 – *LED Operation*: indica que o aparelho está no modo de ajuste do nível de operação normal;
- 5 – *Channel 1 Threshold*: potenciômetro para ajuste do “Threshold 1”;
- 6 – *Channel 2 Threshold*: potenciômetro para ajuste do “Threshold 2”;

- 7 – *Gain*: potenciômetro para ajuste do ganho do sinal de EA;
- 8 – *Barra de LED's*: indica o nível do sinal de emissão acústica (no modo “Operation”) e mostra o nível do “Threshold” (nos modos “Channel 1” ou “Channel 2”);
- 9 – *LED Trigger 1*: indica que o nível de EA ultrapassou o valor ajustado no “Threshold 1”;
- 10 – *LED Trigger 2*: indica que o nível de EA ultrapassou o valor ajustado no “Threshold 2”;

Descrição do Painel Traseiro

FIGURA III.2. Painel traseiro do monitor de EA BM12.

- 1 – *Transducer*: entrada do transdutor;
- 2 – *Analog Output*: saída analógica;
- 3 – Chave Seletora 110/220 v;
- 4 – *On/Off*: chave liga/desliga;
- 5 e 6 – *Gnd e Out*:saída lógica do canal 1 (0-24v);
- 7 – *NC*: normalmente fechado (canal 1);
- 8 – *C*: comum (canal 1);
- 9 – *NO*: normalmente aberto (canal 1);
- 10 e 11 - *Gnd e Out*:saída lógica do canal 2 (0-24v);
- 12 – *NC*: normalmente fechado (canal 2);

- 13 – C: comum (canal 2);
- 14 – NO: normalmente aberto (canal 2);
- 15 – Fuse: fusível de proteção (2A);
- 16 – AC Power: entrada para cabo de força AC.

Procedimentos de Instalação

Ligação do monitor de EA

O monitor de EA BM-12 possui duas voltagens de trabalho (110 e 220 volts). Para a mudança na tensão de trabalho deve-se utilizar a chave [3], mostrada na Figura III.2. O pino central do conector de força deve ser ligado ao mesmo terra da máquina onde será instalado o transdutor. Após a instalação do cabo de força o transdutor deve ser conectado à entrada [1] (Figura III.2). Somente depois de se ter conectado o transdutor pode-se ligar a unidade de leitura (chave [4] na Figura III.2).

Instalação do transdutor

O transdutor deve ser instalado em uma superfície usinada com acabamento superficial equivalente a um fresamento fino (planicidade de 0,02 mm com rugosidade $R_a < 10$ microns). Este acabamento é necessário para que haja uma boa transmissão do sinal. A fixação do transdutor pode ser feita com auxílio de parafusos. Para isso deve-se furar a superfície de fixação e fazer rosca correspondente ao parafuso a ser utilizado. Antes de se instalar o transdutor, deve-se untar generosamente a superfície com óleo de alta viscosidade. O óleo funciona como um acoplador acústico entre o transdutor e a estrutura da máquina.

O transdutor de emissão acústica pode ser instalado em diversas posições na estrutura da máquina, dependendo do uso do instrumento. Sugere-se que seja feita uma pesquisa tocando o transdutor em diversas posições da máquina em busca de

maior intensidade do sinal. Isso pode ser feito com o aparelho ligado como se fosse um “estetoscópio”. Lembrar de procurar sempre superfícies com bom acabamento e de untar com óleo em cada posição testada.

De maneira geral, sugere-se que o transdutor esteja o mais próximo possível da fonte de geração do sinal acústico de interesse.

Ajuste de sensibilidade

Após a instalação do transdutor deve-se ajustar a sensibilidade da unidade de leitura. O ajuste é feito pelo potenciômetro [7] mostrado na Figura III.1. Para ajustar deve-se antes pressionar o botão “select” (item [1] da Figura III.1) até que a luz verde correspondente ‘a posição “Operation” esteja acesa. O ajuste deve ser feito durante a execução do ciclo que deseja monitorar (dressagem, retificação, etc.) repetindo-se o ciclo e ajustando o ganho até que se tenha um bom nível de sinal (por volta do led 14). Durante a operação do aparelho o nível de sinal pode variar em função do tipo de material e ferramenta que se está utilizando. Neste caso o nível de sensibilidade deve ser reajustado sempre que necessário. Caso o sinal esteja oscilando muito, pode-se fazer um ajuste de amortecimento da leitura internamente em função da aplicação. Para isso peça instruções à assistência técnica da SENSIS.

Ajuste do nível de comparação

A unidade de leitura do BM-12 é dotada de seis comparadores que verificam se o sinal está acima ou abaixo de um nível de comparação pré-ajustado. Assim é possível identificar se algum fenômeno de contato está ou não ocorrendo. Cada vez que o sinal excede o nível de comparação pré-ajustado, um sinal é enviado para o conector traseiro mostrado na Figura III.2. Esta saída pode ser utilizada para informar a máquina ou o operador sobre o estado da grandeza que está sendo

monitorada. Pode-se ligar estas saídas ao controle da máquina ou a um sistema de alarme ou separador de peças, dependendo da aplicação.

Para se ajustar o nível de comparação deve-se pressionar o botão "select" até que o led indicador do canal número 1 ou 2 acenda (*led's* 2 e 3 da Figura III.1). Caso esteja-se ajustando o canal número 1 deve-se mover o potenciômetro correspondente (potenciômetro 5 na Figura III.1). O ajuste do nível de comparação deve ser escolhido em função da sensibilidade que se deseja para o fenômeno que se está monitorando.

Ligação das saídas

As saídas da unidade de medição fornecem múltiplas opções de ligação com a máquina. No caso de se desejar fazer medições em intervalos de tempo específicos, janelas de tempo podem ser utilizadas com o auxílio de temporizadores externos. As saídas de relê podem ser modificadas internamente para se fecharem cada vez que o nível de EA ficar abaixo do nível de referência.