

**ULISSES BORGES SOUTO**

**MONITORAMENTO DO DESGASTE DE  
FERRAMENTA NO PROCESSO DE FRESAMENTO  
VIA EMISSÃO ACÚSTICA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2007

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**ULISSES BORGES SOUTO**

**MONITORAMENTO DO DESGASTE DE FERRAMENTA  
NO PROCESSO DE FRESAMENTO VIA EMISSÃO  
ACÚSTICA**

**Tese** apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva

**UBERLÂNDIA – MG**

**2007**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

S728m Souto, Ulisses Borges, 1966-  
Monitoramento do desgaste de ferramenta no processo de fresamento  
via emissão acústica / Ulisses Borges Souto. - 2007 .  
168 f. : il.

Orientador: Márcio Bacci da Silva.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.  
Inclui bibliografia.

1. Fresagem (Trabalhos em metal) - Teses. I. Silva, Márcio Bacci da.  
II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621.914

Aos meus pais, Maria do Rosário e Jarbas,  
Ao meu filho, Gabriel,  
Aos meus irmãos, Homero, Myriam,  
Mara, Mônica e Maria Isabel.  
À todos os meus sobrinhos,  
E também aos demais familiares e amigos,  
que de forma direta ou indireta possibilitaram  
a conclusão deste trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

- Ao Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva pela confiança, incentivo, orientação e paciência ao longo deste trabalho.
- Aos Profs. Dr. Álisson Rocha Machado e Dr. Helder Barbieri pelo apoio e incentivo durante a realização do trabalho.
- A todos os colegas do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU): Anderson Clayton Alves de Melo, Alexandre Martins Reis, Rhander Vianna, Rosemar Batista da Silva, Luiz Carlos da Silva, Paulo Rosa Mota, Ildeu Siqueira, Vinicius Torres Lima, André Luis Beloni dos Santos, Éder Silva Costa, Nélis Evangelista.
- À doutoranda Tatiana Meola e ao Prof. Dr. Marcus Antônio Viana Duarte pelo apoio decisivo durante a tese.
- Ao aluno de iniciação científica Rodrigo Henriques Lopes da Silva e aos alunos da iniciação científica da engenharia elétrica Fúlvio Queiroz Barbosa e Artur Carrijo, pelo apoio durante a realização dos ensaios.
- Ao técnico do LEPU Reginaldo Ferreira de Souza, aos técnicos da Oficina Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica e a todos os funcionários da UFU que de alguma forma apoiaram a execução deste trabalho.
- À Faculdade de Engenharia Mecânica, à Coordenação do Curso de Pós-Graduação e também à Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade e pela infra-estrutura fundamentais à realização deste trabalho.
- Aos Professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, pelos conhecimentos transmitidos.
- À FAPEMIG, ao IFM e a CAPES pelo apoio financeiro. Ao CNPq pelo apoio financeiro e a bolsa de doutorado.
- E a todos que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho.

Souto, U. B., 2006, "Monitoramento do Desgaste de Ferramenta no Processo de Fresamento via Emissão Acústica", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

### Resumo

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de técnicas para a aplicação da emissão acústica no monitoramento de desgaste de insertos de metal duro no fresamento frontal. Neste trabalho foi utilizado um equipamento da Sensis (DM 42) para aquisição do sinal de emissão acústica durante o fresamento frontal de um aço microligado perlítico de forja (Din 38MnS6). Foi utilizada uma fresa com especificação R245 125Q40-12M, de 125 mm de diâmetro e com possibilidade de montagem de até oito insertos. Os insertos utilizados são de metal duro R245-12 T3 M-PM 4030 revestidos com TiN. A fresa e os insertos foram fabricados pela Sandvik Coromant. Os testes foram divididos em duas partes. A primeira consistiu no monitoramento do desgaste e também de alguns fenômenos que ocorrem na usinagem através da construção de um mapa de intensidade luminosa. Nestes testes foram utilizados um, dois, quatro e oito insertos simultaneamente. Nesta etapa foi empregado o sinal RMS da emissão acústica. Na segunda etapa dos ensaios utilizou-se o sinal bruto de emissão acústica. Foram estimados parâmetros estatísticos destes sinais e destes foram escolhidos os que melhor se relacionavam com o fenômeno estudado. Este procedimento foi realizado através da ferramenta estatística *boxplot*. Finalmente, os parâmetros escolhidos foram usados para treinar e validar uma Rede Neural Probabilística, que teve a função de reconhecer e classificar os estágios de desgaste da ferramenta. Os índices de acerto nas classificações da rede indicam que a emissão acústica apresenta bons resultados no reconhecimento de níveis de desgaste das ferramentas na operação de fresamento.

---

**Palavras-chave:** Fresamento, desgaste, monitoramento, emissão acústica, redes neurais.

Souto, U. B., 2006, "Tool Wear Monitoring in the Milling Process by Acoustic Emission", Ph.D Tesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, MG.

### **Abstract**

The main goal of this work is the development of techniques for application of acoustic emission signal in tool wear monitoring in face milling operation. In this work a Sensis (DM 42) equipment for acquisition of the acoustic emission signal was used during the milling of a high strength low alloy steel (Din 38MnS6). A milling cutter with 125 mm diameter for eight inserts with specification R245 125Q40-12M was used. The ISO specification of the inserts were SEMN 12 04 AZ TiN coated. The tests were divided into two parts. In the first part, wear and some other machining phenomena were monitored through the construction of a luminous intensity map. For these tests it was used one, two, four or eight inserts simultaneously. In this stage the acoustic emission signal was evaluated using the RMS values. In the second part of this work the acoustic emission raw signal was used. Amongst the statistical parameters that correlate to tool wear extracted from the raw signal, the best fit ones were selected to train and validate a Probabilistic Neural Network. The results of the PNN indicate that the acoustic emission signal can be used to recognition of tool wear levels in the milling process.

---

**Keywords:** Milling, tool wear, tool wear monitoring, acoustic emission, neural networks.

## Lista de Símbolos

A/D = Conversor analógico/digital.

AC = Corrente alternada.

$a_e$  = Penetração de trabalho.

$Al_2O_3$  = Óxido de alumínio.

$a_p$  = Profundidade ou largura de corte.

APC = Aresta postiça de corte.

CBN = Nitreto cúbico de boro.

CNC = Comando numérico computadorizado.

D = Diâmetro.

DC = Corrente contínua.

Din 38MnS6 = Aço microligado perlítico de forja otimizado.

E = Sinal de erro.

EA = Emissão acústica.

$EA_{RMS}$  = Filtro RMS aplicado ao sinal de emissão acústica.

f = Avanço por rotação.

$f_c$  = Avanço de corte.

fdp = Função densidade de probabilidade.

FEM = Método de elementos finitos.

FFT = Transformada rápida de Fourier.

$f_i$  = Freqüência qualquer que compõe o espectro.

$f_k(X)$  = Densidade de membros da classe k ao redor de uma amostra desconhecida.

$f_m$  = Freqüência média.

FRF = Função de resposta em freqüência.

$F_x$  ou  $F_f$  = Força de avanço.

$F_y$  ou  $F_r$  = Força radial.

$F_z$  ou  $F_t$  = Força principal.

h = Espessura máxima do cavaco.

$h_i$  = Espessura de corte em um plano determinado de corte.

$h_m$  = Espessura média do cavaco.

k = Condutividade térmica do material.

K = curtose.

k = Neurônio da camada intermediária.

KT = Profundidade da cratera.

$L_c$  = Percurso de corte.

LDV = *Laser Doppler velocimetry*.

$L_f$  = Percurso de avanço.

LEPU = Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem.

$L_e$  = Percurso efetivo.

m = Neurônio da camada de saída.

$M_2$  = Momento de segunda ordem.

$M_3$  = Momento de terceira ordem.

$M_4$  = Momento de quarta ordem.

MEV = Microscópio eletrônico de varredura.

MgO = Óxido de manganês.

MLP = Redes *perceptron* multi-camadas.

$Mo_2C$  = Carboneto de molibdênio.

n = Número de rotações por segundo.

$n_1$  e  $n_2$  = Números de dados dos grupos 1 e 2 respectivamente.

NUMA = Núcleo de Manufatura Avançada.

OFHC = Liga de cobre.

PCBN = Nitreto cúbico de boro policristalino.

PCD = Diamante sintético policristalino.

PNN = Rede neural probabilística.

PVD = Deposição física por vapor.

$\dot{q}$  = Taxa de geração de calor.

$r_k$  = Coeficiente de correlação.

RLS = *Recursive least square filter*.

RMS = *Root mean square*.

RNA = Redes neurais artificiais.

S = Skewness.

$S_i$  = Energia do sinal de emissão acústica em uma frequência i.

$Si_3N_4$  = Nitreto de silício.

$s_1^2$  e  $s_2^2$  = Estimativa das variâncias dos grupos 1 e 2 respectivamente.

$t_\alpha$  = Distribuição t de Student.

TaC = Carboneto de tântalo.

TiC = Carboneto de titânio.

TiN = Nitreto de Titânio.

TiNAL = Nitreto de titânio alumínio.

$t_m$  = Valores reais desejados.

$t_o$  = Distribuição normal.

$u_m$  = Respostas estimados por uma rede.

$VB_B$  = Desgaste de flanco médio.

$VB_{Bmáx}$  = Desgaste de flanco máximo.

$VB_N$  = Desgaste de entalhe.

$V_c$  = Velocidade de corte.

$V_e$  = Velocidade efetiva de corte.

$V_f$  = Velocidade de avanço.

$V_{RMS}$  = Filtro RMS aplicado ao sinal de voltagem.

$\bar{x}$  e  $\bar{y}$  = Estimativas das médias dos grupos 1 e 2 respectivamente.

$W(d)$  = Função de ponderação ou função Kernel.

WC = Carboneto de tungstênio.

$Y_2O_3$  = Óxido de ítrio.

Z = Número de dentes da fresa.

$\Delta T$  = Diferença de temperatura.

$\nabla^2 T$  = Laplaciano de temperatura.

### **Símbolos Gregos**

$\alpha$  = Fator de amortecimento.

$\alpha_t$  = Nível de confiança.

$\chi_r$  = Ângulo de posição.

$\delta_m$  e  $\delta_k$  = Erros das camadas.

$\phi$  = Ângulo do plano de cisalhamento.

$\gamma_f$  = Ângulo de saída radial.

$\gamma_o$  = Ângulo de saída.

$\gamma_p$  = Ângulo de saída axial.

$\eta$  = Ângulo de direção efetiva de corte.

$\eta$  = Taxa de aprendizagem.

$\varphi$  = Ângulo de direção de avanço.

$\lambda_s$  = Ângulo de inclinação.

$\rho C$  = Parte constante da equação da energia.

$\sigma$  = Parâmetro de escala que define a curva sino centrada em cada membro da coleção de dados.

$\tau_k$  = Resistência ao cisalhamento dinâmico.

$\frac{\partial T}{\partial t}$  = Variação de temperatura no tempo.

# SUMÁRIO

	<b>Página</b>
<b>CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>01</b>
<b>CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>05</b>
<b>2.1 Processo de Fresamento.....</b>	<b>05</b>
<b>2.1.1 Introdução.....</b>	<b>05</b>
<b>2.1.2 Definições e nomenclatura.....</b>	<b>06</b>
<b>2.1.3 Tipos de fresamento.....</b>	<b>09</b>
<b>2.1.4 Nomenclatura e relação geométrica entre a ferramenta e a peça.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1.5 Fresamento com movimento concordante e discordante.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.6 Efeitos do número de dentes da fresa.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.7 Efeitos do posicionamento da fresa sobre a mesa.....</b>	<b>19</b>
<b>2.1.8 Materiais para ferramentas de corte no fresamento.....</b>	<b>23</b>
<b>2.2 Avarias, Desgaste e Mecanismos de Desgaste de Ferramentas no Fresamento.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.1 Desgaste de ferramenta.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.2 Avarias na ferramenta no processo de fresamento.....</b>	<b>33</b>
<b>2.2.3 Vida da ferramenta e critérios de final de vida.....</b>	<b>39</b>
<b>2.3 Monitoramento do Processo de Usinagem.....</b>	<b>41</b>
<b>2.3.1 Monitoramento da usinagem através da temperatura.....</b>	<b>46</b>
<b>2.3.2 Monitoramento da usinagem através de sinais de força.....</b>	<b>49</b>
<b>2.3.3 Monitoramento da usinagem através da vibração.....</b>	<b>51</b>
<b>2.3.5 Monitoramento da usinagem através dos parâmetros elétricos do motor.....</b>	<b>53</b>

<b>2.4 Emissão Acústica.....</b>	<b>55</b>
<b>2.4.1 Monitoramento da usinagem através da emissão acústica.....</b>	<b>60</b>
<b>2.4.2 Considerações a respeito de sensores de emissão acústica.....</b>	<b>67</b>
<b>2.4.3 Considerações sobre o ruído no sinal de emissão acústica.....</b>	<b>68</b>
<b>2.5 Redes Neurais Artificiais (RNA).....</b>	<b>69</b>
<b>2.5.1 Considerações sobre uma rede biológica.....</b>	<b>70</b>
<b>2.5.2 Modelo genérico de um neurônio artificial.....</b>	<b>71</b>
<b>2.5.3 Funções de ativação.....</b>	<b>72</b>
<b>2.5.4 Arquitetura das redes Neurais.....</b>	<b>75</b>
<b>2.5.5 Procedimento de aprendizado de uma rede neural.....</b>	<b>76</b>
<b>2.5.6 Método <i>Backpropagation</i>.....</b>	<b>78</b>
<b>2.5.7 Rede Neural Probabilística (PNN).....</b>	<b>80</b>
<b>CAPÍTULO III – METODOLOGIA.....</b>	<b>87</b>
<b>3.1 Testes com o Sinal RMS de Emissão Acústica.....</b>	<b>87</b>
<b>3.1.1 Materiais dos corpos de prova.....</b>	<b>88</b>
<b>3.1.2 Condições de corte e especificações da ferramenta.....</b>	<b>90</b>
<b>3.1.3 Aquisição dos sinais de emissão acústica.....</b>	<b>93</b>
<b>3.2 Testes com o Sinal Bruto de Emissão Acústica.....</b>	<b>96</b>
<b>3.2.1 Condições de corte, especificações da ferramenta e estágios de desgaste.....</b>	<b>97</b>
<b>3.2.2 Processamento do sinal.....</b>	<b>98</b>
<b>3.2.3 Análise de sensibilidade dos parâmetros estimados.....</b>	<b>102</b>
<b>3.2.4 Aplicação de inteligência artificial (RNA).....</b>	<b>106</b>
<b>3.2.5 Saída da rede.....</b>	<b>106</b>
<b>CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>107</b>
<b>4.1 Resultados Obtidos nos Testes com o Sinal <math>EA_{RMS}</math>.....</b>	<b>107</b>
<b>4.1.1 Fresamento com quatro insertos.....</b>	<b>107</b>
<b>4.1.2 Fresamento com oito insertos.....</b>	<b>108</b>
<b>4.1.3 Fresamento com dois insertos e mudança de direção de avanço.....</b>	<b>109</b>

4.1.4 Reprodução do fresamento de um bloco de motor.....	110
4.1.5 Reprodução do lascamento de uma aresta de corte.....	111
4.2 Resultados dos Testes com o Sinal Bruto de Emissão Acústica.....	111
4.2.1 Determinação de possíveis parâmetros do sinal de EA indicativos do desgaste de $VB_{Bmáx}$ .....	112
4.2.2 Avaliação da influência da variação da distância da região de corte para o sensor no sinal de EA.....	117
4.2.3 Análise de sensibilidade dos parâmetros estimados.....	120
4.2.4 Saída da rede (classificação do sinal de entrada).....	130
<b>CAPÍTULO V – CONCLUSÕES.....</b>	<b>143</b>
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	145
<b>CAPÍTULO VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>147</b>
<b>ANEXO – Estudo da Relação Entre o Sinal de Emissão Acústica e a Rugosidade no Torneamento.....</b>	<b>157</b>

# Capítulo I

## Introdução

A pesquisa em usinagem tem importância fundamental frente aos demais processos de fabricação, pois este processo, que tem suas raízes na revolução industrial, continua expandindo suas fronteiras em resposta à crescente demanda de uma enorme gama de indústrias contemporâneas. A importância econômica da usinagem para a fabricação não pode ser subestimada: “Hoje, nos países industrializados, os custos que representam a parcela da usinagem no valor final de um produto manufaturado representam mais de 15 %” (Trent; Wright, 2000). Desta maneira, qualquer aumento de produtividade nesta área certamente causará um significativo impacto econômico.

Dentro deste contexto, o processo de fresamento, dentre todos os processos de usinagem empregados atualmente, apresenta-se como um dos mais importantes da indústria, tanto pela sua enorme versatilidade de aplicação como também por sua grande capacidade de remoção de cavaco.

O processo de fresamento caracteriza-se por ser um corte interrompido. Durante uma volta completa da ferramenta, esta passará por momentos em que estará cortando material da peça (ciclo ativo) e o restante da volta estará em vazio (ciclo inativo). Esta característica do corte interrompido faz com que a ferramenta esteja submetida, durante cada rotação, a elevadas variações térmicas e de tensões mecânicas que promoverão o aparecimento de avarias e desgaste da ferramenta. Portanto, o desgaste e eventuais falhas das ferramentas são fenômenos inevitáveis.

O problema principal quando o responsável pela observação do estado da ferramenta é o operador é que ele não é capaz de identificar o momento exato em que se deve realizar a troca da ferramenta, levando-se em conta a qualidade da peça que está sendo produzida e o limite de aproveitamento da vida da ferramenta. Além disto, a introdução de controles automatizados nas máquinas-ferramenta tornou o monitoramento visual extremamente difícil, além da impossibilidade física de se observar a região de corte, mesmo quando se fala em prevenção contra falhas repentinas e inesperadas da ferramenta (Dolinsk; Kopac, 1999).

O melhor momento da troca da ferramenta, para que não haja prejuízo da produtividade das indústrias, deve ser determinado em tempo real (*on-line*). Existem vários campos de pesquisa para o monitoramento em tempo real do desgaste, que vão desde a vibração, temperatura, forças de corte, emissão acústica, rugosidade, parâmetros elétricos do motor e até emissão sonora (Matsumoto e Diniz, 1997). Porém, a emissão acústica (EA) surge como uma área relativamente nova e promissora neste campo de pesquisa. Isto em função do alto número de fenômenos de usinagem que emitem este sinal, de sua rapidez de resposta, baixa interferência de ruídos, baixa intrusividade, facilidade de operação de seus equipamentos e custo relativamente baixo.

Segundo Dolinsek e Kopac (1999), emissão acústica em usinagem se refere à propagação de ondas elásticas acima de 20 kHz, geradas na região do corte. A EA é originada da liberação de ondas vibracionais na estrutura cristalina dos materiais devido a um rearranjo interno em sua estrutura. Dois tipos de sinais são associados à EA: o sinal contínuo, devido às deformações plásticas em materiais dúteis e o sinal de pico, oriundos da propagação de trincas e impactos do cavaco (Blum e Inasaki, 1990).

Para o emprego da emissão acústica no monitoramento do desgaste, é fundamental aliar este sinal com uma técnica que seja capaz de extrair informações que se relacionam com o fenômeno de desgaste para apresentar uma definição da sua condição. Existem algumas técnicas para este procedimento, sendo a utilização da inteligência artificial uma das principais. Uma Rede Neural Artificial possui grande capacidade de reconhecimento e classificação de padrões de conjuntos de dados. Como o sinal de EA é composto de informações de várias fontes (Li, 2002), torna-se praticamente indispensável o emprego de uma rede para o reconhecimento de padrões associados especificamente ao fenômeno estudado.

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de técnicas para a aplicação da emissão acústica no monitoramento de desgaste de flanco máximo de insertos de metal duro no fresamento frontal. Neste trabalho procurou-se empregar metodologias que forneçam resultados confiáveis, abrangentes e que possam ser aplicados, com acréscimo de devidas adaptações, em um monitoramento em tempo real. Toda a metodologia e meios empregados são de relativa simplicidade para compreensão e operação além de baixo valor de aquisição.

O sinal de emissão acústica contém informações sobre vários fenômenos que ocorrem durante a usinagem. Se for bem explorado, é possível observar, com maior ou menor grau de dificuldade, detalhes como: desgaste, falhas catastróficas na aresta de corte, rugosidade, formação de rebarbas e até problemas de batimento. Como o objetivo central do trabalho está direcionado para a evolução do desgaste da aresta principal de corte, empregou-se para avaliação deste fenômeno o sinal bruto da EA. Este tipo de sinal, apesar de exigir maiores

esforços computacionais, é mais indicado para buscar informações confiáveis deste fenômeno. Os outros fenômenos também foram observados e retratados. Porém, estes só foram observados e analisados quando se utilizou o filtro RMS no sinal de EA. O sinal  $EA_{RMS}$  foi reproduzido, a cada volta da fresa, em um mapa de intensidade luminosa. Através deste mapa foi possível visualizar com boa clareza estes fenômenos.

Os resultados deste trabalho indicam que a emissão acústica é um bom parâmetro para observação de alguns dos principais fenômenos da usinagem. O sinal  $EA_{RMS}$  revelou interessantes aspectos que acontecem durante o corte e que podem ser aplicado como uma ferramenta útil no seu controle. O sinal bruto da EA, empregado no acompanhamento do desgaste de flanco, também apresentou resultados bastante confiáveis e promissores.

A seguir, tem início a apresentação do trabalho com o Capítulo II (Revisão Bibliográfica). O capítulo é dividido em tópicos relacionados com o tema deste trabalho. Inicialmente, é apresentada a operação de fresamento. Logo após, uma revisão de alguns dos principais parâmetros empregados em monitoramento da usinagem. Depois, a emissão acústica e o seu emprego no monitoramento. Finalizando, são apresentadas as redes neurais artificiais e suas aplicações na usinagem.

A metodologia empregada neste trabalho é apresentada detalhadamente no Capítulo III. Este capítulo também é dividido em dois tópicos. No primeiro, é descrito como foram realizados os ensaios em que se utilizou o sinal  $EA_{RMS}$ . No segundo, é descrita a metodologia empregada na observação do desgaste através do sinal bruto de EA.

O Capítulo IV traz as discussões relativas aos resultados obtidos. Como consequência do capítulo anterior, este capítulo separa a avaliação dos dois tópicos descritos.

O Capítulo V apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Finalmente, o Capítulo VI apresenta as Referências Bibliográficas.



## Capítulo II

### Revisão Bibliográfica

#### 2.1 Processo de Fresamento

##### 2.1.1 Introdução

Dentre os processos convencionais de usinagem existentes atualmente, o fresamento apresenta-se como dos mais importantes. Sua importância se deve principalmente pela boa versatilidade na manufatura de peças, alta taxa de remoção de material e também pela característica do cavaco produzido, que é relativamente curto, o que não compromete a qualidade da superfície gerada.

Uma das principais vantagens do processo de fresamento, segundo Diniz et al. (2001), é que esta operação é a mais versátil na geração de superfícies planas não de revolução. Sua versatilidade é possível devido principalmente a grande variedade de geometrias que suas ferramentas podem apresentar, tornando possível, por consequência, a geração de um número igualmente vasto de superfícies.

O fresamento pode ser definido como um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies quaisquer, onde o material é removido pela rotação de ferramentas multicortantes denominadas fresas, sendo que cada dente remove uma pequena quantidade de material em cada revolução (Ferraresi, 1977). A rotação da ferramenta, aliada com o deslocamento da peça ou da própria ferramenta, compõem os principais movimentos do fresamento.

Alguns pré-requisitos devem ser levados em consideração para a utilização deste processo, dentre estes, um é fundamental: o fresamento requer uma máquina-ferramenta que apresente alta rigidez, pois durante o processo de corte há uma grande flutuação das cargas mecânicas (característica do corte interrompido). Esta variação de cargas que ocorre durante o corte se deve ao impacto de cada uma de suas arestas ao entrar em contato com o material e durante o período em que estas estiverem cortando. Este período é denominado fase ativa. Assim que a ferramenta sai do material, há uma queda brusca da carga a que a ferramenta está submetida. Esta fase é denominada inativa e não há remoção de material.

Estas grandes variações de cargas mecânicas que ocorrem nas fases (ativa e inativa) propiciam o aparecimento de elevados ciclos térmicos de aquecimento e resfriamento. Durante

o corte, a ferramenta fica submetida a elevadas temperaturas, que são rapidamente atingidas. Mas, durante a fase inativa, a ferramenta também é submetida a um rápido resfriamento. Este agressivo ciclo térmico pode gerar na ferramenta trincas perpendiculares à aresta de corte, fragilizando-a diante das intensas solicitações mecânicas sofridas durante o corte.

### 2.1.2 Definições e Nomenclatura

Para uma melhor compreensão do fresamento, algumas definições sobre parâmetros de corte (ABNT NBR 6162/1989 – Movimentos e Relações Geométricas na Usinagem dos Metais – Terminologia), ângulos (ABNT NBR 6163/1980 – Conceitos da Técnica de Usinagem – Geometria da Cunha Cortante – Terminologia) e maneiras como esta operação pode ser executada (Figs. 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4) são apresentadas:

#### Parâmetros de corte

. Penetração de Trabalho ( $a_e$ ): é a penetração da ferramenta em relação à peça, medida no plano de trabalho e numa direção perpendicular à direção de avanço.

. Profundidade ou largura de corte ( $a_p$ ): é a profundidade ou largura de penetração da ferramenta, medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho.

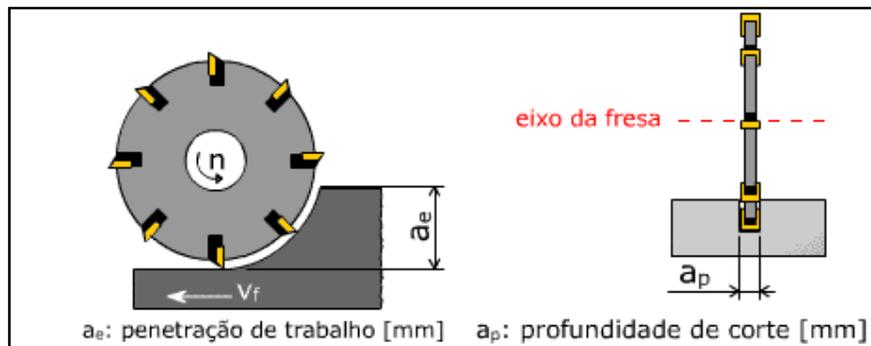


Figura 2.1 – Alguns dos parâmetros de corte aplicados na operação de fresamento tangencial (CIMM, 2006).

. Velocidade de Corte ( $V_c$ ): é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta de corte da ferramenta, segundo a direção e sentido de corte. A Equação (2.1) expressa como é realizado o cálculo da velocidade de corte.

$$V_c = \frac{\pi D n}{1000} \quad (\text{m/min}) \quad (2.1)$$

onde:

$D$  = diâmetro da peça ou da ferramenta (mm).

$n$  = número de rotações por minuto.

. Velocidade de Avanço ( $V_f$ ): é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta de corte da ferramenta segundo direção e sentido de avanço. A Equação (2.2) expressa como é realizado o cálculo da velocidade de avanço.

$$V_f = f.n \quad (\text{mm/min}) \quad (2.2)$$

onde

$f$  = avanço (mm/rotação)

. Velocidade Efetiva de Corte ( $V_e$ ): é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo direção e sentido efetivo do corte. A Equação (2.3) expressa como é realizado o cálculo da velocidade efetiva de corte.

$$\overline{V_e} = \overline{V_c} + \overline{V_f} \quad (2.3)$$

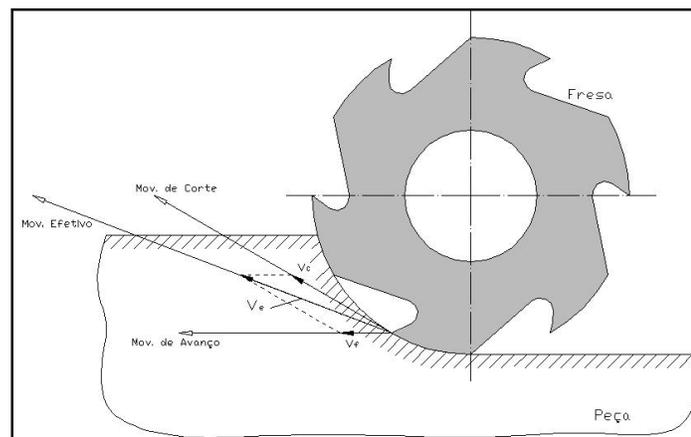


Figura 2.2 – Direção dos movimentos de corte, avanço e efetivo em uma operação de fresamento discordante.

. Avanço por Rotação ( $f$ ): é o percurso de avanço em cada volta da fresa. A Equação (2.4) expressa como é realizado o cálculo do avanço por rotação.

$$f = \frac{V_f}{n} \quad (\text{mm/rot}) \quad (2.4)$$

. Avanço por Dente ( $f_z$ ): é o percurso de avanço de cada dente da fresa, medido na direção de avanço da ferramenta, e corresponde à geração de duas superfícies consecutivas em usinagem. A Equação (2.5) expressa como é realizado o cálculo do avanço por dente.

$$f_z = \frac{f}{Z} = \frac{V_f}{Z.n} \quad (\text{mm/dente}) \quad (2.5)$$

onde:

$Z$  = número de dentes da fresa.

. Avanço de Corte ( $f_c$ ): é a distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem medida na direção perpendicular à direção de corte no plano de trabalho.

. Avanço Efetivo de Corte ( $f_e$ ): é a distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem medidas na direção perpendicular à direção efetiva de corte no plano de trabalho.

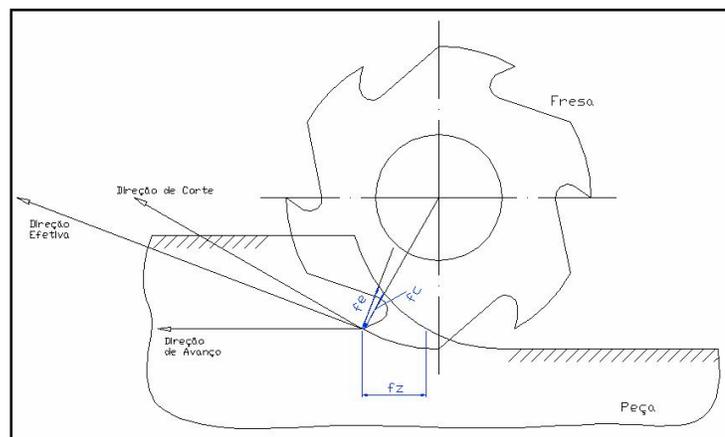


Figura 2.3 – Avanço por dente  $f_z$ , avanço de corte  $f_c$  e avanço efetivo  $f_e$  em uma operação de fresamento concordante.

. Espessura de corte em um plano determinado do corte ( $h_i$ ): é a espessura calculada da seção transversal de corte a ser retirada no instante  $i$  de corte, medida normalmente à superfície em usinagem principal e segundo a direção perpendicular à direção de corte.

. Percurso de Corte ( $L_c$ ): é a distância percorrida sobre a peça pelo ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção de corte.

. Percurso de Avanço ( $L_f$ ): é a distância percorrida pela ferramenta, segundo a direção de avanço.

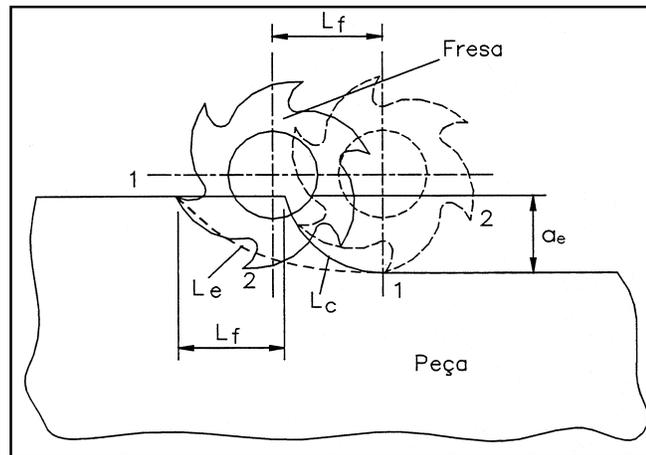


Figura 2.4 – Percurso de corte  $L_c$ , percurso de avanço  $L_f$  e percurso efetivo  $L_e$  para uma operação de fresamento discordante (ABNT NBR 6162/1989).

### 2.1.3 Tipos de fresamento

Existem três métodos principais de fresamento: frontal, tangencial e de topo (Metal's Handbook, 1989). Cada método de fresamento é determinado em função do tipo de fresa utilizada e da disposição do eixo de rotação da ferramenta em relação à superfície que está sendo fresada.

O fresamento tangencial é um processo de geração de superfície onde o corte é feito por uma ferramenta cujos dentes estão dispostos na sua periferia, conforme Fig. 2.5, e que tem o eixo de rotação paralelo à superfície fresada.

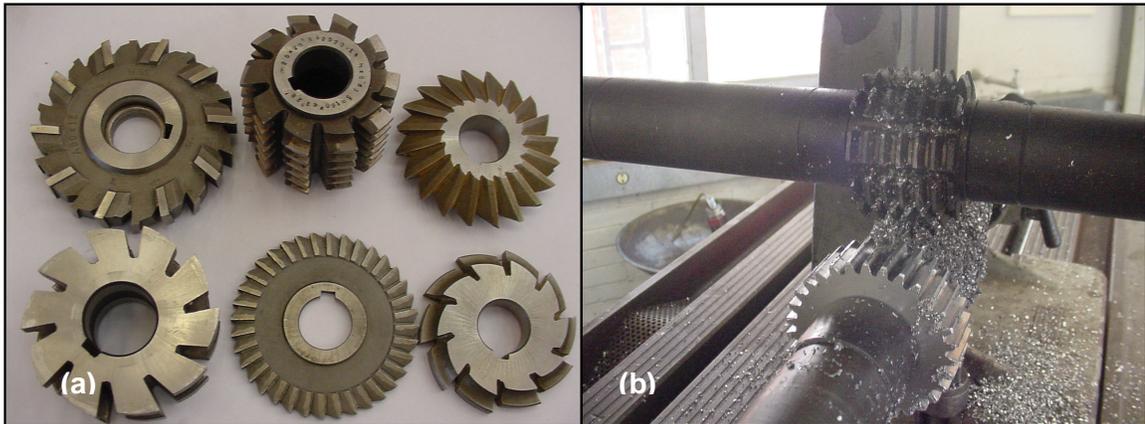


Figura 2.5 – Representação de fresamento tangencial. (a) Alguns exemplos de fresas tangenciais ou de disco; (b) Modelo de fresa caracol utilizada na fabricação de uma engrenagem de dentes retos.

As ferramentas para o fresamento tangencial são normalmente utilizadas em máquinas fresadoras universais e montadas em um trecho intermediário do eixo árvore da máquina.

O fresamento tangencial pode ser utilizado para remoção de material de superfícies planas além de confeccionar rasgos de chaveta, rasgos profundos, superfícies com dois ou mais planos e superfícies de formas complexas.

O fresamento frontal é uma operação para usinagem de superfícies planas, onde a fresa apresenta dentes na sua superfície frontal e cujo eixo é perpendicular à superfície que está sendo gerada. A Figura 2.6 mostra uma representação de uma fresa frontal.



Figura 2.6 – Representação de um fresamento frontal.

Ao contrário do que normalmente ocorre no fresamento tangencial, o frontal é profundo radialmente e estreito axialmente. Apesar disto, o fresamento frontal apresenta uma melhor relação de remoção de material por potência consumida por ter um maior número de dentes engajados no corte simultaneamente.

O fresamento frontal apresenta outras vantagens sobre o tangencial, tais como:

- Maior rigidez da fresa por esta ter menor comprimento em balanço e por estar presa diretamente ao eixo árvore da máquina, podendo assim usinar uma área maior;
- As forças de corte são uniformemente distribuídas.

Algumas das desvantagens do fresamento frontal que podem ser destacados são o uso restrito a superfícies planas e também o aumento dos esforços na direção do avanço à medida que aumenta o número de dentes simultaneamente no corte.

Uma ferramenta típica para o fresamento de topo apresenta arestas de corte tanto na face frontal como na sua face periférica. É considerada como uma combinação do fresamento frontal e tangencial e é diferenciado mais pelo tipo de aplicação que pela definição. A Figura 2.7 mostra uma representação de uma fresa de topo ou mista.



Figura 2.7 – Representação de um fresamento de topo ou misto.

É um processo desaconselhável para operações de corte mais severas, pois a relação comprimento-diâmetro da ferramenta é relativamente elevada, gerando deflexão na fresa.

As fresas de topo são ferramentas muito versáteis e de grande aplicabilidade, sendo utilizadas na confecção de cavidades como bordas, ranhuras, relevos, fresamento lateral etc.

#### 2.1.4 Nomenclatura e relação geométrica entre a ferramenta e a peça

A eficiência do corte no fresamento está diretamente ligada a uma boa escolha nas relações angulares entre ferramenta e a peça a ser usinada. Portanto, para que se consiga esta eficiência é preciso ter conhecimento de conceitos básicos sobre ângulos e geometria de uma ferramenta.

Torna-se também necessário a distinção destes ângulos quando se toma como referência apenas a ferramenta (ângulos da ferramenta) ou quando se toma como referência a ferramenta em operação (ângulos efetivos ou de trabalho).

Os principais ângulos que influenciam no corte, segundo Metal's Handbook (1989) são:

##### Ângulos Auxiliares

. Ângulo da Direção de Avanço ( $\varphi$ ): é o ângulo entre a direção de avanço e a direção de corte e no fresamento, este ângulo varia durante o corte.

. Ângulo de Direção Efetiva de Corte ( $\eta$ ): é o ângulo da direção efetiva de corte e a direção de corte. A Equação (2.6) expressa como é realizado o cálculo do ângulo de direção efetiva de corte.

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{V_f \operatorname{sen} \varphi}{V_f \cos \varphi + V_c} = \frac{\operatorname{sen} \varphi}{\cos \varphi + \frac{V_c}{V_f}} \quad (2.6)$$

##### Ângulos da Ferramenta

. Ângulo de Saída ( $\gamma_0$ ): é o ângulo entre a superfície de saída e o plano de referência da ferramenta, medido no plano ortogonal da ferramenta.

. Ângulo de Inclinação ( $\lambda_s$ ): é o ângulo entre a aresta de corte e o plano de referência da ferramenta, medido no plano de corte da ferramenta.

. Ângulo de Posição ( $\chi_r$ ): é o ângulo entre o plano de corte da ferramenta e o plano de trabalho, medido no plano de referência da ferramenta.

A Figura 2.8 mostra uma representação esquemática dos três ângulos citados anteriormente com uma pastilha para fresamento.

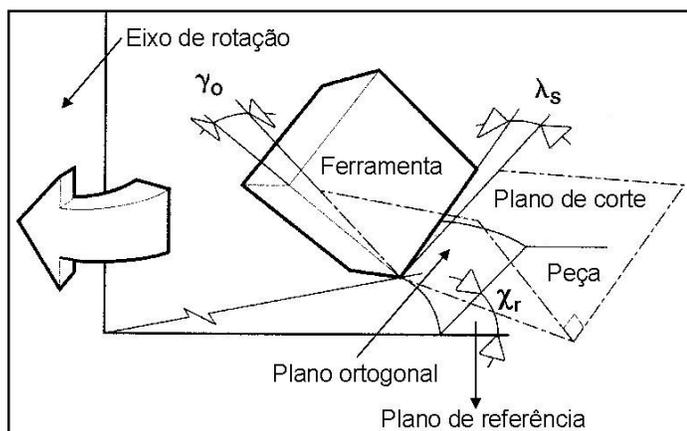


Figura 2.8 – Representação esquemática do ângulo de inclinação  $\lambda_s$ , do ângulo de posição  $\chi_r$  e do ângulo de saída  $\gamma_o$  (Modern Metal Cutting, 1994).

. Ângulo de Saída Radial ( $\gamma_f$ ): é o ângulo entre o plano de referência da ferramenta e sua superfície de saída medido no plano de trabalho.

. Ângulo de Saída Axial ( $\gamma_p$ ): é o ângulo entre o plano de referência da ferramenta e sua superfície de saída medido no plano dorsal.

A Figura 2.9 mostra uma representação esquemática do ângulo de saída axial e do ângulo de saída radial.

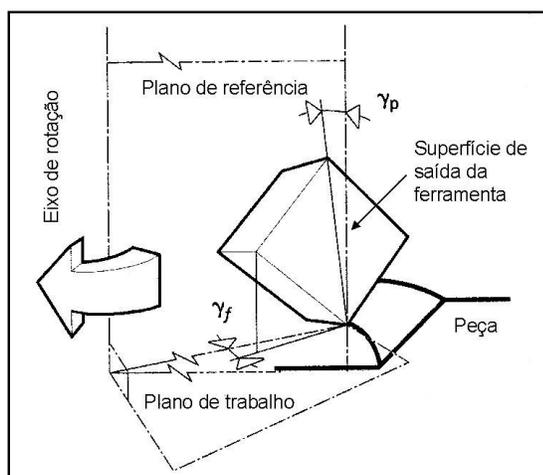


Figura 2.9 – Representação esquemática do ângulo de saída radial  $\gamma_f$  e do ângulo de saída axial  $\gamma_p$  (Modern Metal Cutting, 1994).

O ângulo considerado mais importante em uma operação de fresamento é o ângulo de saída efetivo  $\gamma$ . Este ângulo afeta diretamente o ângulo de cisalhamento durante o processo de formação do cavaco, tem grande influência sobre a força de corte, a potência e as temperaturas geradas na zona de corte. Normalmente, quanto mais positivo for este ângulo, menores as forças atuantes na ferramenta e a potência requerida para o corte, não esquecendo que o aumento ilimitado deste ângulo afeta diretamente na resistência mecânica da ferramenta. Valores positivos altos são indicados para matérias mais dúcteis.

Outro ângulo de grande importância é o de inclinação  $\lambda_s$ , que determina a direção de escoamento do cavaco da região do corte. No fresamento frontal, a adoção de ângulos de inclinação positivos direcionam o cavaco para fora da ferramenta, enquanto que os negativos os direcionam para o centro.

O ângulo de posição  $\chi_r$  influencia principalmente na espessura do cavaco, na direção das forças de corte, adequação da entrada da ferramenta no corte e também na potência consumida. Com relação à potência, à medida que  $\chi_r$  diminui, a largura de corte  $b$  aumenta e a espessura de corte  $h$  diminui. Portanto, ocorrerá uma maior pressão específica de corte, já que a força de corte necessária para o cisalhamento do material é então distribuída sobre uma seção transversal mais fina. Em operações de corte mais sensíveis ao aparecimento de vibrações, um maior equilíbrio das forças axiais e radiais é indicado e é conseguido com ângulos de posição variando entre  $45^\circ$  e  $60^\circ$ .

Em algumas aplicações mais específicas, como usinar rebaixos com paredes em esquadro ou livre de componentes axiais de força, ângulos de posição de  $90^\circ$  são aplicados. Mas esta situação é bastante limitada, pois gera altos níveis de vibração, favorecem a quebra da ponta da ferramenta além de dificultar a saída dos cavacos.

O ângulo de saída radial  $\gamma_r$  afeta principalmente a eficiência e quantidade de cavaco e também a vida da ferramenta. Ângulos de saída radiais para materiais com menor tenacidade costumam variar de zero para valores negativos enquanto para materiais dúcteis costumam ser positivos.

O ângulo de saída axial  $\gamma_p$  afeta principalmente a resistência das arestas de corte da ferramenta além de atuar também na facilitação do escoamento do cavaco e nas forças de corte.

As ferramentas, ou o processo de fresamento, podem ser classificados também de acordo com os ângulos de saída radial e axial. Nas fresas com geometria de inserto duplo-negativo, os ângulos de saída radial e axial da fresa são negativos, como é mostrado na Fig. 2.10a. Estas ferramentas podem ser usadas dos dois lados, o que significa uma boa economia e também arestas mais reforçadas. É uma geometria adequada para condições de corte mais

severas, em que se usina materiais de elevada dureza e fortes impactos de entrada, além desta geometria ser indicada para usinagem de ferro fundido.

Este tipo de geometria pode criar problemas na eliminação de cavacos, principalmente na usinagem de matérias que geram cavacos longos, além de elevar os esforços de corte devido a grande deformação causada nos cavacos.

Nas fresas com geometria duplo-positiva, mostrada na Fig. 2.10b, os ângulos de saída radiais e axiais da fresa são positivos. Estas ferramentas são menos econômicas pois suas pastilhas só podem ser usadas de um lado. Os esforços de corte são menores pois os cavacos estão submetidos a menores deformações além de terem menor contato com a superfície de saída da ferramenta. São indicados para usinar materiais que os esforços de corte são fortemente influenciados pelo ângulo de saída (não ferrosos, aços inoxidáveis e aços de baixo carbono), quando se emprega fresadoras de baixa potência e também quando a máquina e/ou peça tem pouca rigidez (Sandvik, 1989).

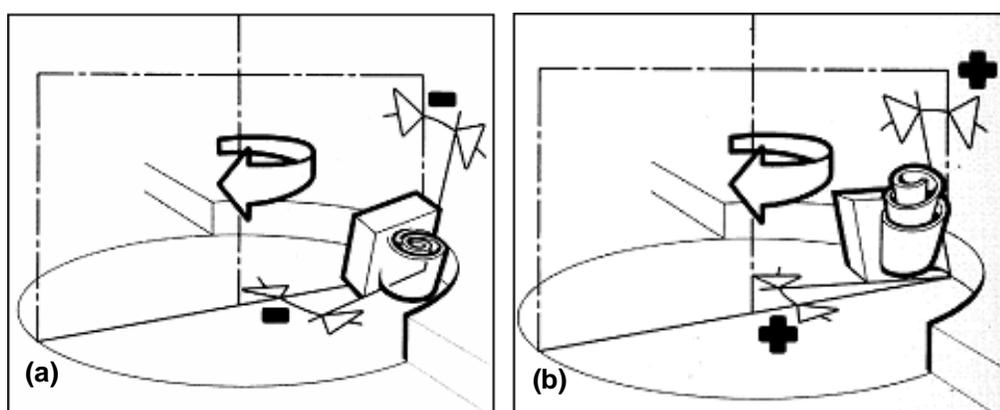


Figura 2.10 – a) Representação esquemática de uma pastilha de fresamento em um corte com geometria duplo-negativo; b) Representação esquemática de uma pastilha de fresamento em um corte com geometria duplo-positivo (Modern Metal Cutting, 1994).

Finalmente, as fresas com geometria positiva-negativa, mostrada na Fig. 2.11, o ângulo de saída radial é negativo e o ângulo de saída axial é positivo. Comparativamente, este tipo de geometria consome mais potência da máquina do que as fresas duplo-positivas e menos que as duplo-negativas. É indicada para o desbaste pesado, pois este tipo de geometria gera cavacos helicoidais que se levantam dos bolsões de armazenamento, além de conseguir altas taxas de remoção de material, altos avanços por dente e grandes profundidades de corte.

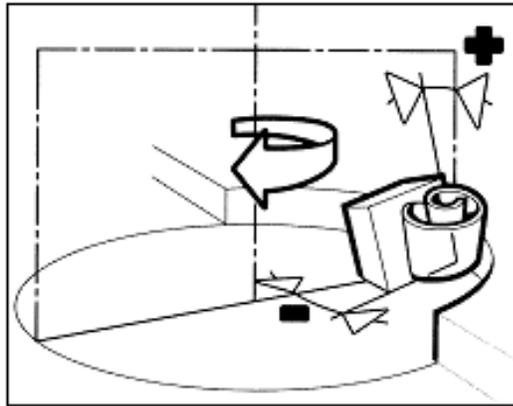


Figura 2.11 - Representação esquemática de uma pastilha de fresamento em um corte com geometria duplo positiva-negativa (Modern Metal Cutting, 1994).

#### 2.1.5 Fresamento com movimento concordante e discordante

No fresamento, a relação entre o sentido de rotação da ferramenta e o avanço da peça também é de grande importância. De acordo com o sentido de rotação da ferramenta e o avanço da peça, distingui-se entre o fresamento concordante e o fresamento discordante. No fresamento discordante o avanço e o movimento de corte têm sentidos contrários, ao passo que no fresamento concordante eles apresentam o mesmo sentido, conforme ilustrado na Fig. 2.12. Porém, de acordo com posição da fresa em relação à peça, um processo de fresamento pode apresentar uma parte concordante e outra discordante.

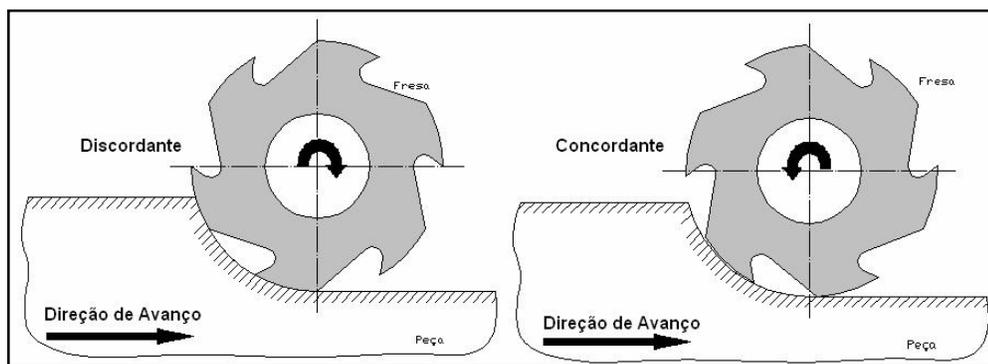


Figura 2.12 – Representação de uma operação de fresamento concordante e de uma de fresamento discordante.

No fresamento concordante puro, a aresta deixa a peça com uma espessura de usinagem igual a zero ( $h=0$ ). No fresamento discordante puro, a aresta de corte entra na peça

com a espessura de usinagem igual a zero, o que pode gerar esmagamento do material da peça e aumentando, portanto, a taxa de desgaste da ferramenta. O fresamento concordante é vantajoso sobre o discordante na maioria das situações, especialmente por que:

- . As fresas podem ter maiores ângulos de saída, fazendo com que a potência requerida seja menor;
- . O acabamento superficial é melhorado pois há uma menor possibilidade dos cavacos serem arrastados, o que danificaria a superfície usinada além de acabar com a tendência de escorregamento quando do início da formação do cavaco;
- . Os cavacos são jogados para parte de trás da ferramenta.

O fresamento discordante pode ser vantajoso nas seguintes situações (Metal's Handbook, 1989):

- . Se há folgas no mecanismo de avanço;
- . No fresamento de superfícies em que profundidade de corte varia excessivamente;
- . No fresamento de peças fundidas ou forjadas de superfícies muito rugosas, que contém carepa ou areia.

Pode haver situações no fresamento frontal em que o eixo de avanço da fresa está posicionado de maneira simétrica em relação à peça, como mostrado na Fig. 2.13. Quando isto ocorre, parte do fresamento será concordante e parte será discordante.

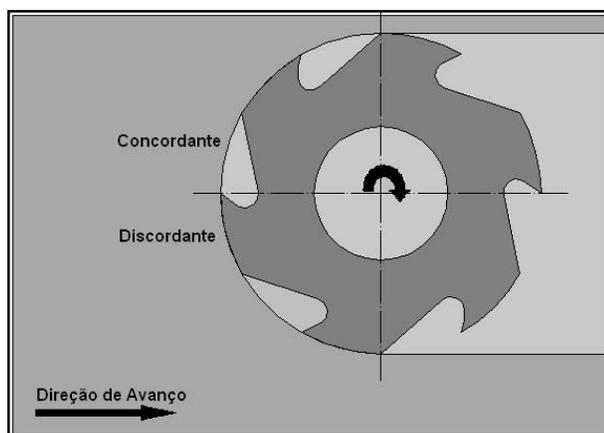


Figura 2.13 – Ocorrência de corte concordante e discordante simultaneamente em uma operação de fresamento frontal simétrico em relação à peça.

A formação do cavaco no fresamento segue os mesmos princípios básicos dos outros processos de usinagem. No entanto, o fresamento é uma operação em que o corte é

interrompido, a fresa normalmente passa a maior parte do tempo no ciclo inativo, sem usinar o material. Esta característica faz com que surjam conseqüências na qualidade da superfície gerada e também na vida da ferramenta.

A seguir, são mostradas algumas considerações sobre os efeitos de certas escolhas no fresamento.

### 2.1.6 Efeitos do número de dentes da fresa

Normalmente, ao se escolher uma fresa mais indicada para uma determinada operação, alguns aspectos devem ser levados em consideração. Entre eles, o número de dentes que esta possui é de vital importância, como mostrado na Fig. 2.14. Um número excessivo de dentes (passo fino) pode causar problemas como o excesso de cavacos na região de corte e também elevar o consumo de energia. Já um número insuficiente de dentes (passo grande) pode causar problemas com o acabamento da superfície usinada, peças fora de dimensão requerida e também desgaste excessivo das arestas de corte.

Para se escolher uma fresa com número ideal de dentes deve-se levar em consideração as características do material a ser usinado. Para materiais frágeis, por exemplo, o mais indicado é um maior número de dentes, pois seus cavacos são menores causando menos interferência com a qualidade da superfície gerada.

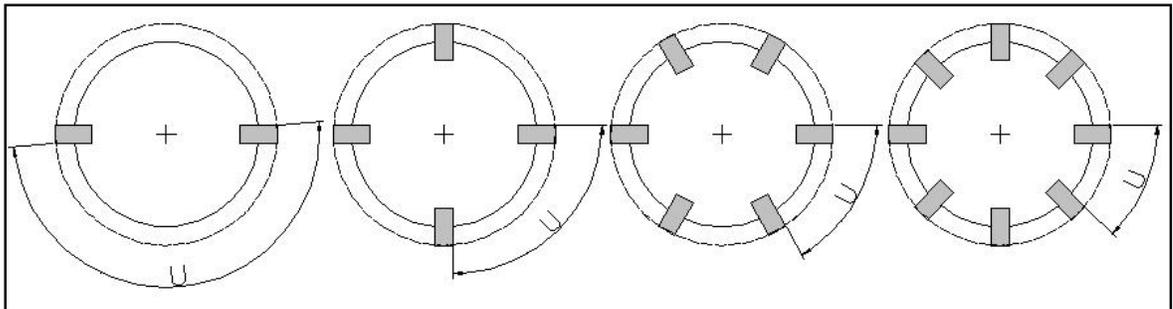


Figura 2.14 – Representação de fresas com vários números de dentes e passos ( $u$ ).

Em certas situações em que há limitação da potência e das velocidades disponíveis na máquina-ferramenta, o número de dentes também é um fator que deve ser considerado. Neste caso, o mais indicado é fazer um estudo prévio para adequar o número de dentes. Normalmente, no fresamento frontal, em que o comprimento de contato entre a ferramenta e a peça é longo, pode-se usar um número menor de dentes em casos onde a máquina-ferramenta dispõe de pouca potência.

Existem ferramentas cujas pastilhas não estão distribuídas uniformemente ao longo do perímetro da fresa. Estas ferramentas, mostradas na Fig. 2.15, são chamadas de ferramentas de passo diferencial e tem a função de evitar vibrações devido a problemas de ressonância, mesmo em condições de corte favoráveis, modificando a freqüência de entrada das arestas no corte.

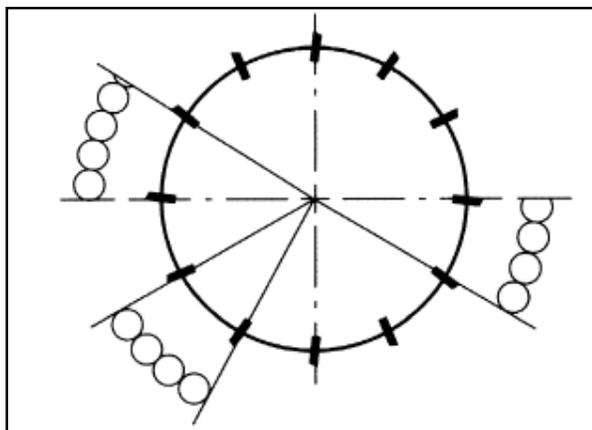


Figura 2.15 – Representação de uma fresa com o passo diferencial (Sandvik, 1989).

#### 2.1.7 Efeitos do posicionamento da fresa sobre a peça

O correto posicionamento relativo entre fresa e peça tem grande influência no resultado final da usinagem. Portanto, alguns parâmetros devem ser observados para garantir um contato favorável entre a aresta de corte e a peça a ser usinada.

A pastilha, ao entrar no corte, fica sujeita a impactos de maior ou menor magnitude. Para que esta entrada aconteça em condições mais favoráveis, um correto posicionamento relativo entre a ferramenta e a peça deve ser levado em consideração.

Quando o centro da fresa está posicionado dentro da peça, conforme Fig. 2.16b, o contato inicial é mais distante da aresta de corte, melhorando o suporte mecânico. O ângulo de entrada é negativo e o corte inicia mais favoravelmente. Quando o centro da fresa fica posicionado fora da peça de trabalho, mostrado na Fig. 2.16a, o contato é mais desfavorável entre a aresta e o material do que quando o centro da fresa fica posicionado sobre a peça. Considerando o caso do faceamento com o centro da fresa fora da peça, a ferramenta está mais susceptível à quebra, pois o ângulo de entrada é positivo.

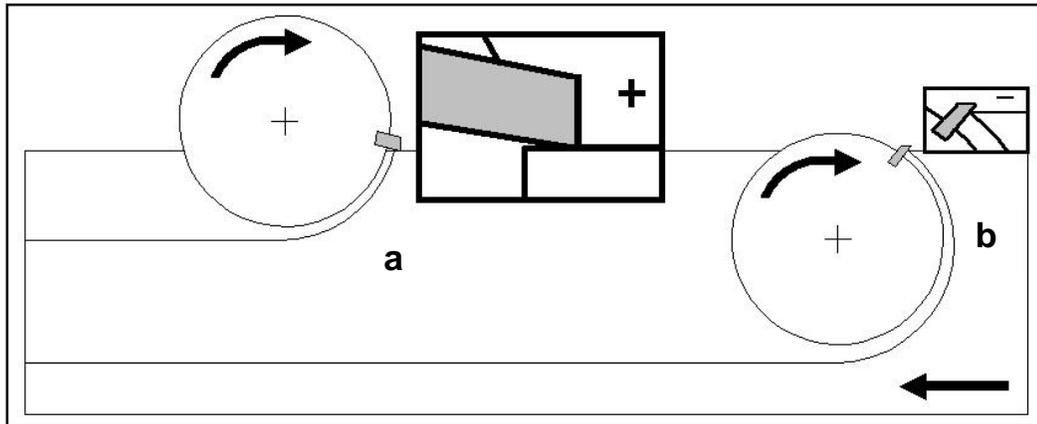


Figura 2.16 – Influência do posicionamento relativo ferramenta-peça na entrada da ferramenta no corte.

Durante a saída da ferramenta, a situação mais desfavorável é quando a pastilha sai do corte, se afastando da peça. No caso das pastilhas de metal duro, que foram feitas para resistir a tensões de compressão que ocorrem durante o corte, estarão submetidas a tensões de tração durante a saída. Isto poderá acarretar avarias nas arestas de corte.

Os ângulos negativo e positivo de saída do dente da peça, mostrados nas Fig. 2.17a e 2.17c, são os mais favoráveis, enquanto que a posição de saída do dente paralela à superfície da peça, visto na Fig. 2.17b e também no detalhe da Fig. 2.18, é o mais desfavorável, pois o ângulo de saída é zero, impondo tensões na aresta de corte e portanto diminuindo o tempo de vida da ferramenta (Sandvik, 1994).

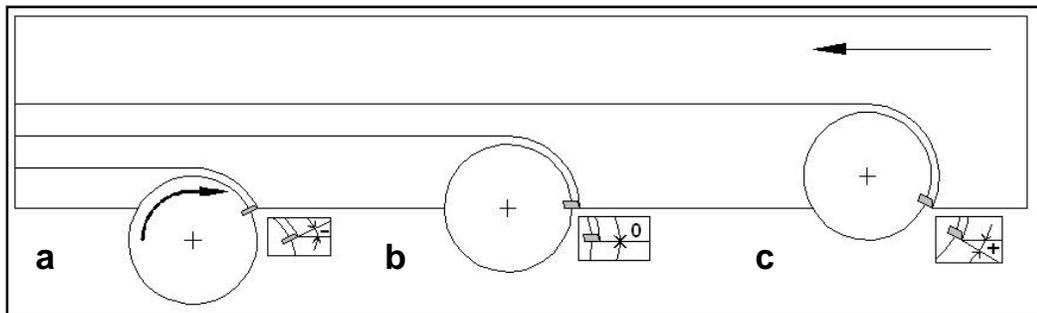


Figura 2.17 – Características da saída da ferramenta do corte conforme o posicionamento entre ferramenta-peça.

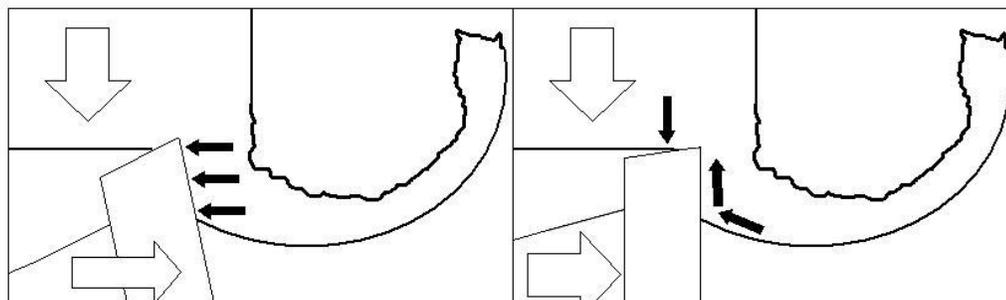


Figura 2.18 – Detalhe das tensões ocorridas na saída da ferramenta com ângulo zero em relação à peça.

A quantidade de arestas no corte também depende da posição da fresa. Se a fresa tiver um diâmetro muito maior que a largura da peça, pode ser vantajoso usar a disposição lateral para ter mais arestas no corte simultaneamente e, portanto, menores espessuras de cavaco, maior estabilidade no processo e conseqüentemente maior vida da ferramenta.

De acordo com a posição da peça, as resultantes da força radial de corte podem ter diversas direções. O posicionamento da fresa com o seu centro alinhado com a linha de centro da peça, como na Fig. 2.19a, pode ser vantajoso em certas situações, como a que a fixação da peça ou a máquina-ferramenta não apresentam rigidez suficiente e a fresa apresenta mais de um dente no corte simultaneamente. Caso não haja mais de um dente no corte simultaneamente, podem ocorrer vibrações devido ao desbalanceamento. Para esta situação, é indicado que se use o centro da fresa deslocado da linha de centro da peça, conforme Fig. 2.19b.

O controle da espessura do cavaco em operações de fresamento é um fator de extrema relevância quando se quer evitar sobrecargas, controlar a potência e volume de material removido, além de melhorar a performance da pastilha em termos de vida.

Estimar a espessura de um cavaco em um processo de fresamento não é uma tarefa simples. No fresamento, há um grande número de variáveis envolvidas, além do fato da espessura não ser constante ao longo do comprimento do cavaco.

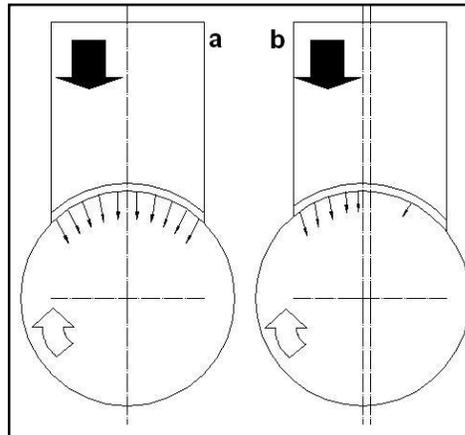


Figura 2.19 – Representação das forças resultantes com o centro da fresa alinhado com o centro da peça (a) e o centro da fresa fora da linha de centro da peça.

No fresamento é costume adotar uma espessura média do cavaco ( $hm$ ), Fig. 2.20, que é definida através de uma relação entre a penetração de trabalho  $a_e$  e o diâmetro da fresa que forma o arco “alfa” gerado pela ferramenta na peça.

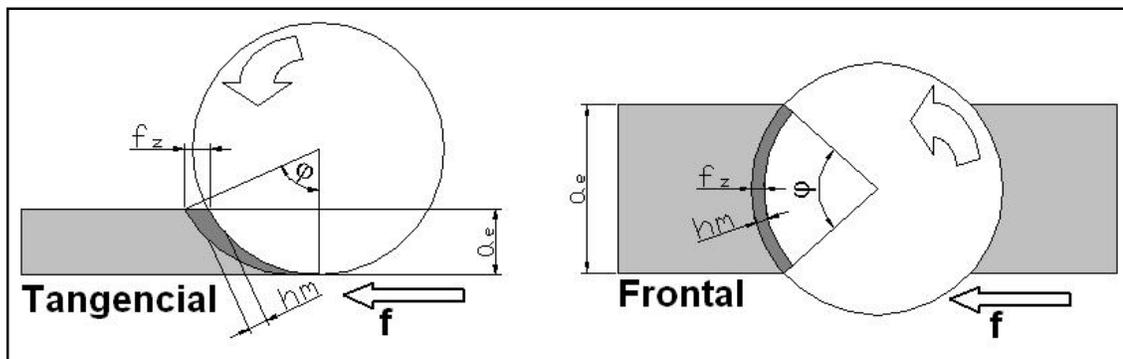


Figura 2.20 – Espessura média ( $hm$ ) em função do posicionamento entre a ferramenta e a peça.

Já a máxima espessura ( $h$ ), que é a representação da espessura do cavaco não deformado, é mostrada na Fig. 2.21. Esta espessura tem seu valor definido pela distância entre dois passos consecutivos da ferramenta de corte e é importante para estimar a força máxima que irá atuar durante o corte sobre a ferramenta.

A espessura do cavaco pode ser influenciada principalmente pelo diâmetro da fresa, seu posicionamento e também pelo ângulo de entrada das pastilhas na peça. No caso em que o eixo de avanço não intercepta a penetração de trabalho  $a_e$ , a espessura do cavaco assume

valores menores que o valor do avanço por dente  $f_z$ . Portanto, uma penetração de trabalho menor gera uma espessura de cavaco menor.

Na situação em que o eixo de avanço da fresa trabalha dentro da região da penetração de trabalho, a espessura máxima do cavaco será igual ao avanço por dente da ferramenta. Portanto, quanto maior o  $a_e$ , mais espessos serão os cavacos formados, até o limite em que o eixo de avanço coincida com a superfície lateral da peça.

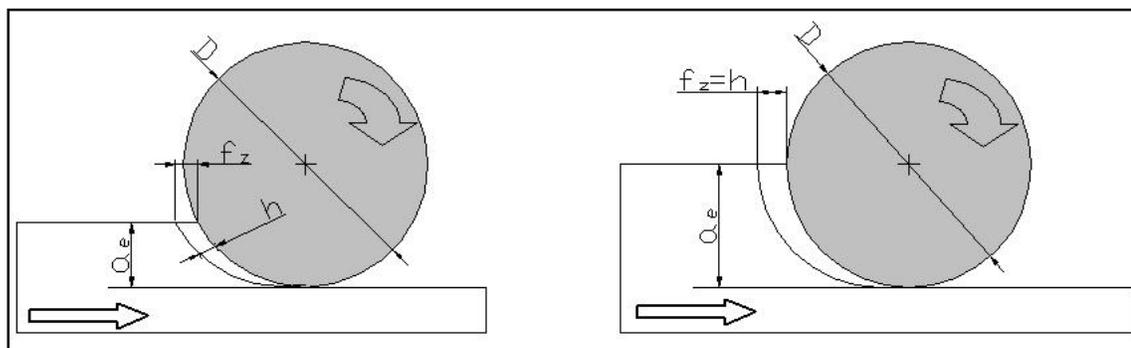


Figura 2.21 – Espessura máxima ( $h$ ) em função do posicionamento entre a ferramenta e a peça.

### 2.1.8 Materiais para ferramentas de corte no fresamento

A seleção do material da ferramenta de usinagem deve levar em consideração vários fatores, tais como o material da peça, os parâmetros de corte, o processo de usinagem e também a geometria da ferramenta.

O surgimento nas últimas décadas de novos materiais e ligas estruturais com elevada dureza utilizadas para fabricação de ferramentas contribuiu para o aprimoramento dos processos de usinagem. Porém, as operações de corte interrompido (como é o caso do fresamento) e também a usinagem de materiais frágeis, requerem ferramentas com tenacidade adequada para suportarem os impactos mecânicos e variações de temperatura que estão submetidas.

Existe um número grande de materiais para ferramentas de fresamento. Não se pode esperar que qualquer um destes materiais forneça todas as qualidades que se espera de uma ferramenta. Quando se escolhe um aspecto mais relevante nas propriedades de um material para fresas, outros podem estar sendo sacrificados. Dureza e tenacidade são propriedades normalmente opostas, o que implica que se uma dessas propriedades tem valor elevado, a outra estará sendo prejudicada. Portanto, encontrar um meio termo entre estas propriedades em uma ferramenta é normalmente um desafio para os fabricantes e uma necessidade para a indústria. Atualmente existem no mercado ferramentas que conseguem conciliar alta dureza e

boa tenacidade, através de um rígido controle do processo de fabricação, novas composições químicas, grãos mais finos, tratamentos térmicos e aplicação de revestimentos, o que lhe conferem um grande campo de aplicação.

Desta forma, alguns materiais de ferramentas têm aplicação mais difundida no fresamento. Dentre estes, pode-se citar o aço-rápido, o metal duro, materiais cerâmicos, CBN (PCBN) e o diamante.

O aço-rápido tem aplicação mais difundida em fresas com diâmetros pequenos cujas velocidades de corte são relativamente pequenas. Nesta categoria de materiais pode-se encontrar também as fresas de aço-rápido revestidas, cuja aplicação está voltada para situações que necessitem de maior resistência ao desgaste e também as dimensões e condições de corte não justifiquem o emprego de materiais mais duros. O revestimento normalmente empregado nestas ferramentas é o TiN (nitreto de titânio). Ele é aplicado através do processo PVD (*physical vapour deposition*), que tem temperaturas de deposição em torno de 450° a 500° C, o que não prejudica tratamentos térmicos que a ferramenta foi submetida previamente.

O metal duro é um material sinterizado constituído de partículas finas de materiais duros como o WC (carboneto de tungstênio) e de um ou mais materiais aglomerantes (ferro, níquel e principalmente o cobalto). Esta combinação faz com que estas ferramentas conciliem uma boa tenacidade e dureza. Na constituição destas ferramentas também podem aparecer, porém em menores proporções, partículas duras como carboneto de titânio, carboneto de nióbio e carboneto de tântalo.

Os vários tipos de metal duro são classificados pela norma ISO em seis grupos (P, M, K, N, H, S), sendo as três últimas classes relativamente recentes em comparação às três primeiras. As classes também se subdividem em números: a classe P varia de P01 até P50; a classe M varia de M01 até M40; a classe K varia de K01 até K40. Quanto maior o número da classificação, maior é a tenacidade e menor a dureza e a resistência ao desgaste.

O grupo P é o grupo que apresenta maior teor de carbonetos (TiC, TaC) na composição química, conferindo-lhes alta dureza e resistência ao desgaste abrasivo. É indicado para usinar materiais dúteis (como o aço e o alumínio), que produzem cavacos contínuos e apresentam uma área de contato grande entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta, resultando em temperaturas elevadas e grandes taxas de desgaste. O grupo M é um grupo intermediário nos teores de carbonetos na sua composição química. Isto faz com que tenha propriedades intermediárias entre os grupos P e K. Tem aplicações variadas na usinagem. O grupo K é um grupo que só possui carboneto de tungstênio como constituinte de elevada dureza. Esta característica faz com que este grupo possua elevada tenacidade. É indicado para usinagem de materiais frágeis (ferro fundido), que produzem cavacos curtos, apresentam pouco contato com

a superfície de saída, evitando problemas de difusão e conseqüentemente reduzindo o desgaste de cratera.

Quanto às classes mais recentes, a N é empregada na usinagem de não ferrosos como ligas de alumínio e o cobre e ligas de cobre, a classe S na usinagem de superligas resistentes ao calor (à base de ferro ou níquel, cobalto, titânio) e a classe H na usinagem de aços endurecidos, extra duros e ferros fundidos coquilhados.

Ao se empregar proporções maiores de carbonetos, consegue-se maior resistência ao desgaste, porém compromete a tenacidade da ferramenta, aumentando a fragilidade da aresta. Quando se aumenta a proporção do cobalto, consegue-se aumentar a tenacidade, o que faz aumentar a resistência da ferramenta a choques térmicos e mecânicos, comuns ao fresamento, porém piora propriedades como a resistência ao desgaste e as deformações plásticas na aresta (Sandvik, 1999).

O tamanho do grão empregado na composição do metal duro é outro aspecto relevante na seleção da ferramenta. Normalmente, quando se empregam grãos menores consegue-se maior resistência ao desgaste, reduzindo a abrasão e a adesão, melhorando-se a tenacidade reduzindo a tendência ao lascamento e a fadiga (Sandvik, 1999).

Praticamente todas as ferramentas de metal duro atualmente são revestidas. O revestimento tem a função de aumentar a resistência ao desgaste da ferramenta, aumentar dureza, diminuir afinidade química com o material da peça e reduzir atrito nas superfícies da ferramenta em contato com o cavaco e a peça. Os materiais mais comumente aplicados como revestimentos são: TiN (nitreto de titânio), TiAlN (nitreto de titânio alumínio), TiC (carboneto de titânio) e o  $Al_2O_3$  (óxido de alumínio).

O TiN diminui os níveis de atrito com o cavaco, tem baixos níveis de afinidade química e também possui boa dureza. Normalmente é empregada como a última camada quando se utiliza revestimento com várias camadas.

O  $Al_2O_3$ , também um material cerâmico, garante boas propriedades térmicas, como estabilidade em altas temperaturas além de resistência química e a oxidação. Nos revestimentos multi-camadas, normalmente é usado como camada intermediária.

As principais características do TiC são elevada dureza e boa adesividade com materiais dos substratos de ferramentas. Por isso é indicado como camada superior ou como a primeira camada, que está em contato com o substrato.

Normalmente, as ferramentas apresentam uma seqüência de deposição, a partir do substrato, constituído de TiC,  $Al_2O_3$  e por último, o TiN. Porém, hoje em dia é possível encontrar ferramentas com número muito maior de camadas, com estes e outros materiais e espessuras da ordem de poucos nanômetros.

Os materiais cerâmicos têm citações de seu uso desde o princípio do século XX, porém demorou a se inserir competitivamente no mercado devido a sua grande fragilidade. Atualmente, com o aparecimento de cerâmicas à base de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , a alumina), à base de nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), além de cerâmicas reforçadas com whiskers, suas aplicações se multiplicaram, sendo empregadas até em operações que exigem boa tenacidade, como o fresamento em ferro fundido (Machado; da Silva, 2004).

Normalmente, as cerâmicas têm a seguinte classificação:

- À base de óxido de alumínio: têm em sua composição química  $\text{ZrO}_2$ , TiN ou TiC (cerâmicas mistas ou pretas) e também a alumina reforçada com *whiskers*.
- À base de nitreto de silício: são cristais de  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , com uma fase intergranular de  $\text{SiO}_2$  que são sinterizados na presença da alumina (SIALON) e/ou óxido de ítrio ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) e óxido de manganês (MgO).

Existem também materiais que contêm uma fase cerâmica e uma fase metálica. Estes materiais são os *cermets* e seus componentes principais são o TiC, TiN e o  $\text{Mo}_2\text{C}$  (carboneto de molibidênio), além do elemento de ligação Ni. Estes materiais pertencem a um grupo intermediário entre as cerâmicas e o metal duro. Tem como principais propriedades a alta dureza a altas temperaturas e grande estabilidade química.

O diamante sintético policristalino (PCD) pertence a classe de materiais normalmente chamada de ultraduros. Este material é constituído de pequenas e finas partículas de diamante, de granulação definida para se obter o máximo de homogeneidade e densidade. A camada de PCD é produzida pela sinterização de partículas de diamante com cobalto num processo de alta pressão (6000 a 7000 MPa) e temperatura (1400° a 2000°C). Uma camada de aproximadamente 0,5 mm de espessura ou é aplicada diretamente sobre uma pastilha de metal duro ou então é ligada ao metal duro através de brasagem (Diniz; Marcondes; Coppini, 2001). Uma de suas principais aplicações é no fresamento de ligas de Al-Si.

Além do diamante, o nitreto cúbico de Boro (CBN e PCBN) também pertence à classe dos ultraduros. Tem uma estrutura hexagonal com um número aproximadamente igual de átomos de boro e nitrogênio arranjados alternadamente. São produzidos de maneira análoga ao PCD, onde uma camada de 0,5 mm de espessura de partículas de nitreto de boro cúbico é sinterizado na presença de uma fase ligante, efetivando simultaneamente a fixação em uma base de metal duro. Geralmente é indicado para se usinar em situações onde o PCD não pode ser utilizado.

## 2.2 Avarias, Desgaste e Mecanismos de Desgaste de Ferramentas no Fresamento

Nos processos de usinagem convencional existem duas causas principais para determinar a substituição de uma ferramenta de corte:

- a) A avaria, que acontece de maneira repentina e inesperada, é quando ocorre uma quebra, lascamento ou trinca. As avarias são mais comuns nos processos de corte interrompido, onde as ferramentas estão submetidas a exigências extremas, principalmente com relação a choques térmicos e mecânicos.
- b) quando ocorre o desgaste, que pode atingir níveis elevados e comprometer a qualidade do processo de usinagem. Pode ocorrer tanto no corte interrompido como no contínuo. Este desgaste ocorre de maneira progressiva, implicando na perda de material tanto da superfície de saída como da superfície de folga.

### 2.2.1 Desgaste de ferramenta

Uma ferramenta de corte, mesmo possuindo tenacidade suficiente para resistir as variações cíclicas de carregamento e temperatura que poderiam lhe impor uma avaria, não estará livre de uma perda progressiva de material. Esta perda progressiva ou desgaste fará com que a ferramenta aos poucos comprometa o processo. Portanto, sua reafiação ou substituição irá se tornar necessário.

Na literatura são encontrados nomenclaturas variadas e tratamentos diferentes para os mecanismos de desgaste de ferramentas, Trent e Wright (2000), por exemplo, definem seis mecanismos ou processos de desgaste: cisalhamento plástico a altas temperaturas, deformação sob tensões de compressão, desgaste por difusão, desgaste por aderência e arrastamento (*attrition*), desgaste abrasivo e desgaste de entalhe. Estes mecanismos podem ser esquematizados conforme mostrado na Fig. 2.22.

O mecanismo de deformação plástica superficial por cisalhamento ocorre devido às altas temperaturas desenvolvidas na ponta da ferramenta. Com o aumento da temperatura a resistência ao escoamento diminui, fazendo com que as tensões cisalhantes sejam suficientes para causar deformações plásticas. Estas deformações podem arrancar material da superfície da ferramenta e originar uma cratera, conforme o primeiro quadro da Fig. 2.22. Trent e Wright (2000) preferiram classificar este tipo de deformação como mecanismo, apesar de ser um processo de desgaste da ferramenta.

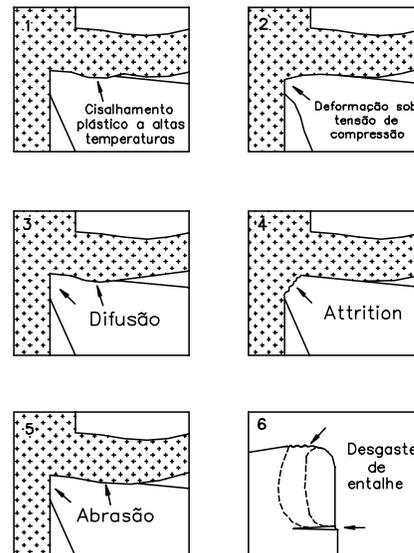


Figura 2.22 – Mecanismos e processos que podem promover o desgaste de uma ferramenta de corte (Trent; Wright, 2000).

A deformação da aresta de corte sob altas tensões de compressão é um mecanismo de desgaste que ocorre quando a ferramenta está submetida à altas velocidade de corte e avanço e também quando se usina materiais de elevada dureza. Este mecanismo é mais comum em ferramentas de aço-rápido e metal duro. Este também é mais um processo de desgaste do que propriamente um mecanismo.

O desgaste difusivo é um mecanismo que envolve transferência de átomos entre os materiais da ferramenta e da peça. Para que este processo ocorra, deve haver elevadas temperaturas na superfície de saída e também na superfície de folga. A existência de uma zona de aderência (ou de fluxo) na interface cavaco ferramenta é o que determina a existência também da difusão (Trent; Wright, 2000). Como na usinagem o tempo de contato entre a superfície de saída da ferramenta e o cavaco é muito curto, não haveria possibilidade de ocorrer difusão. Porém, a zona de aderência garante este contato mais prolongado, pois dentro dela há um gradiente de velocidades de fluxo do material do cavaco, que parte do zero na interface cavaco ferramenta. Um eventual problema de saturação poderia ocorrer na zona de aderência, obstruindo a difusão, se esta zona não fosse constantemente renovada durante o corte devido as altas taxas de deformação.

O mecanismo de desgaste por aderência e arrastamento (*attrition*) ocorre geralmente em baixas velocidades de corte ou em situações em que o fluxo de material sobre a superfície de saída se torna irregular. As situações que favorecem o aparecimento do *attrition* são quando

há a formação da aresta postiça de corte (APC), o corte interrompido, profundidade de corte variável, vibração no processo, dentre outros. Estas situações impõem fortes ligações na região de contato entre a ferramenta e o cavaco. Se a resistência local do material não for suficiente, fragmentos microscópicos da ferramenta serão arrancados e arrastados junto com o fluxo de material adjacente à interface, promovendo o desgaste. As superfícies desgastadas por *attrition* têm uma aparência rugosa se comparada com o desgaste por difusão, pois ela se processa em nível dos grãos.

O desgaste abrasivo é particularmente importante quando se usina materiais com elevadas concentrações de partículas de alta dureza relativa, que podem ser inclusões não metálicas tais como carbonetos, óxidos, nitretos e silicatos. Estas partículas, ao entrarem em contato com as superfícies da ferramenta durante a usinagem, retiram material por microsulcamento, microcorte e microlascamento. O desgaste abrasivo também pode ser provocado por partículas duras presentes na própria ferramenta. Estas partículas são fragmentos arrancados por *attrition* ou podem ser óxidos formados na região de escorregamento na interface cavaco-ferramenta. Quando o desgaste é provocado por partículas presentes no material da peça, é considerado abrasão a dois corpos. Quando o desgaste é proveniente de partículas que se fragmentaram da própria ferramenta, é considerado como abrasão a três corpos. Alguns aspectos como a concentração, dureza e tamanho das partículas tem significativa influência nos níveis de desgaste abrasivo.

Finalmente, apesar do desgaste de entalhe ser uma forma de desgaste, é considerado como um mecanismo devido à falta de unanimidade quanto a suas causas. Sua ocorrência se verifica principalmente na usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas (ligas de níquel, titânio, cobalto e aços inoxidáveis).

Algumas das prováveis causas do entalhe citadas por Shaw (1984) podem ser:

- . Presença de uma camada abrasiva de óxidos na superfície a ser usinada;
- . Concentrações de tensão;
- . Trincas térmicas devido a gradiente de temperaturas;
- . Presença de rebarbas na aresta da superfície a ser usinada;
- . Presença de material encruado na superfície previamente usinada;
- . Fluxo da aresta postiça de corte paralelo à aresta de corte;
- . Fadiga do material da ferramenta causada pela flutuação de força na superfície livre que acompanha os pequenos movimentos laterais da aresta do cavaco.

A Figura 2.23 apresenta as principais áreas de desgaste de uma ferramenta e mostra as três formas de desgaste:

- a - desgaste de cratera;
- b - desgaste de flanco;
- c - desgaste de entalhe.

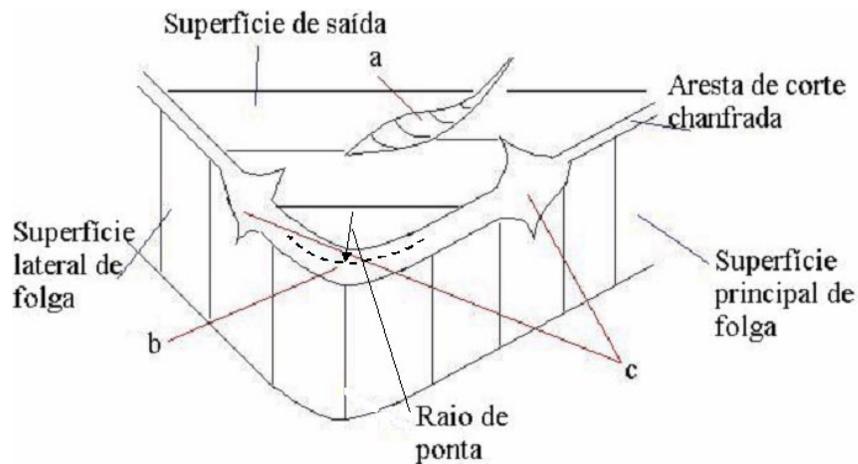


Figura 2.23 – Identificação das formas de desgaste em uma ferramenta de corte (Dearnley; Trent, 1982).

A Figura 2.24 apresenta exemplos de ferramentas desgastadas onde se pode identificar claramente as três formas básicas de desgaste definidas anteriormente. Na Figura 2.24a, a seta indica a área onde há a formação do desgaste de flanco. Normalmente, esta forma de desgaste é a principal na avaliação da vida de uma ferramenta de corte. No desgaste de flanco há uma perda do ângulo de folga, promovendo um aumento dos níveis de contato entre a ferramenta e a peça e conseqüentemente, crescimento nos níveis de atrito e todos os problemas por ele causados. Na Figura 2.24b, a seta indica a área onde há a formação do desgaste de cratera. Este tipo de desgaste está associado ao corte onde há formação de elevadas temperaturas na interface cavaco ferramenta, ocorrendo devido a uma combinação dos mecanismos de desgaste difusão e adesão (Aspinwall; Chen, 1978). Na Figura 2.24c, a seta indica a área onde há a formação do desgaste de entalhe. O desgaste de entalhe, como já comentado nos mecanismos de desgastes, ocorre principalmente na usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas. Normalmente ocorre na aresta principal de corte, mas também pode aparecer na aresta secundária de corte com dimensões mais reduzidas. Pode ocorrer tanto em ferramentas de metal duro como em ferramentas de material cerâmico, que

são as mais indicadas para a usinagem de ligas de níquel, sofrendo forte influência das condições de corte.

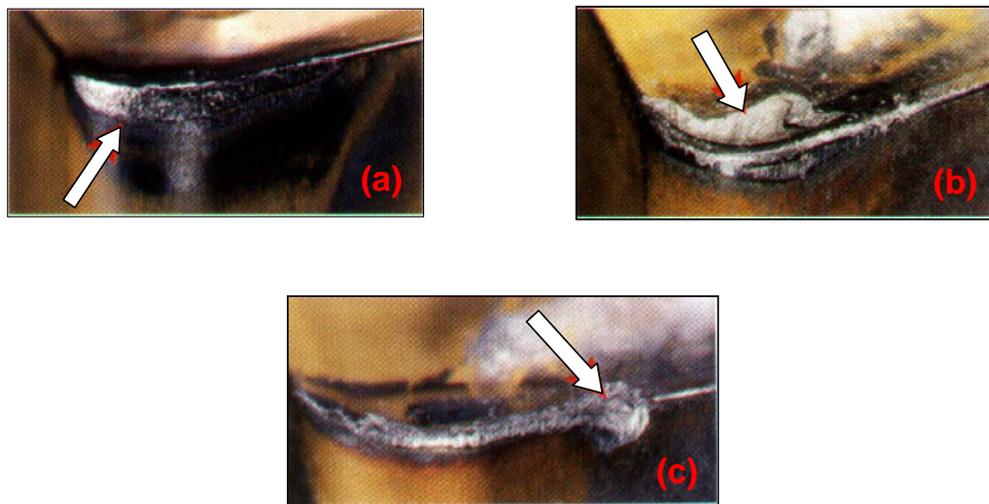


Figura 2.24 – Fotografias das três formas de desgaste. a) desgaste de flanco; b) desgaste de cratera; c) desgaste de entalhe, (Sandvik, 1999).

Ferramentas de metal duro revestidas são normalmente as ferramentas mais empregadas no fresamento frontal. Este tipo de ferramentas quando revestidas com TiC como última camada, são mais resistentes ao desgaste de flanco, pois são mais resistentes à abrasão. Se estas possuem o TiN como última camada, possuirão maior resistência ao desgaste de cratera pois possuem menores coeficientes de atrito, diminuindo assim os níveis de temperatura e dificultando a difusão (Chattopadhyay; Chattopadhyay, 1982).

Quando se avalia a vida de uma ferramenta, é necessário quantificar o nível de desgaste. Quando isto é possível deve-se seguir os parâmetros mostrados na Fig. 2.25 que são os principais utilizados para quantificar o desgaste de uma ferramenta de usinagem (Norma ISO 3685, 1977).

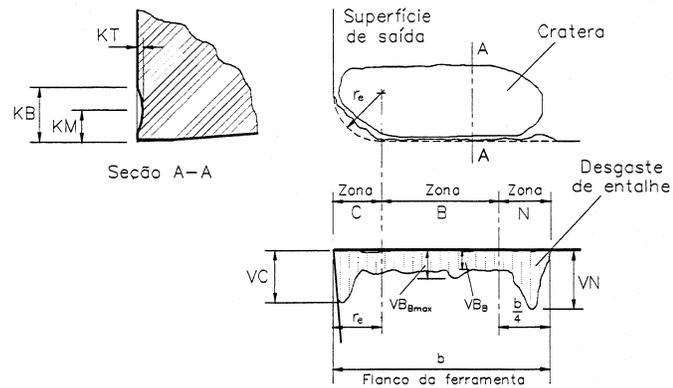


Figura 2.25 – Principais parâmetros utilizados para quantificar os três tipos de desgaste (Norma ISO 3685, 1997).

Onde:

$KT$  = Profundidade da cratera;

$VB_B$  = Desgaste de flanco médio;

$VB_{Bmáx}$  = Desgaste de flanco máximo;

$VB_N$  = Desgaste de entalhe.

A evolução do desgaste da ferramenta até atingir o final de vida segue, na maioria das vezes, um padrão de comportamento como o mostrado na Fig. 2.26. A figura apresenta três estágios claros no desenvolvimento do desgaste na ferramenta. Segundo Machado e da Silva (2004), no primeiro trecho (estágio I), a ferramenta apresenta um rápido crescimento do desgaste, que é o resultado de uma acomodação tribológica do sistema. No final deste estágio há uma inflexão da curva que mostra uma diminuição da taxa de desgaste. Esta inflexão que ocorre no primeiro estágio irá se refletir no segundo trecho (estágio II), em que há uma acomodação da evolução do desgaste, que cresce muito lentamente e a uma taxa praticamente constante. O último trecho (estágio III) começará quando no estágio anterior houver uma nova inflexão na curva, indicando que a taxa de desgaste está aumentando. Neste estágio, a ferramenta atinge rapidamente o seu final de vida. Se neste estágio a ferramenta não for reafiada ou substituída, poderá rapidamente falhar, pois sua geometria de corte está comprometida devido ao desgaste, o que acarreta grandes níveis de atrito, geração de calor e elevadas tensões.

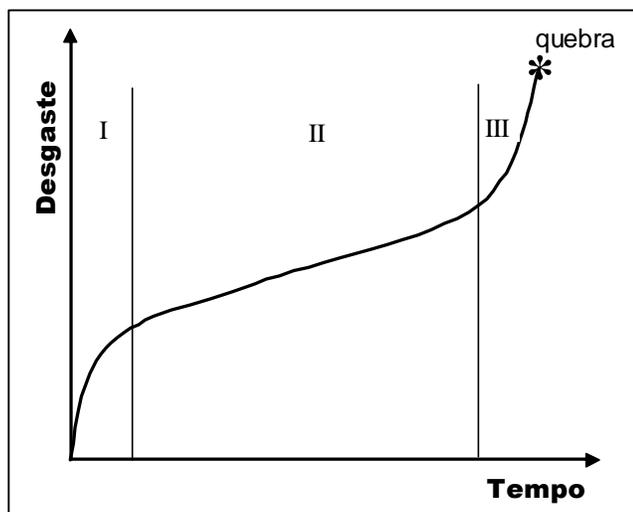


Figura 2.26 – Comportamento do desgaste de uma ferramenta ao longo de sua vida (Lenz et al, 1978; Ber, Kaldor, 1982; Harris et al, 2003).

### 2.2.2 Avarias na ferramenta no processo de fresamento

O fresamento é um processo de corte interrompido sujeito a um ciclo de elevadas variações térmicas e mecânicas, e por isto mais exposto a falhas como quebras, trincas e lascamento. As flutuações de temperatura podem provocar trincas nas ferramentas que são provocadas pelas variações de tensões devido as dilatações do material da ferramenta. Os choques mecânicos podem ocorrer tanto durante a entrada da ferramenta na peça, início do ciclo ativo, quanto na saída da peça, início do ciclo inativo. A seguir são apresentados alguns comentários a respeito destas avarias típicas do fresamento.

#### Avarias de Origem Térmica:

Durante o processo de fresamento, cada dente da ferramenta experimenta uma fase ativa e uma fase inativa. Durante a fase ativa, o dente estará efetivamente cortando, o que faz com que este seja submetido a uma grande geração de calor e, portanto, altas temperaturas. Durante a fase inativa, este dente estará em vazio, não cortando material, fazendo com que haja perda de calor para o ambiente rapidamente. Então, cada dente da fresa estará submetido a uma grande variação cíclica de temperatura durante o processo de corte interrompido.

A Figura 2.27 mostra como ocorre a variação cíclica da temperatura no fresamento. A curva **a** representa o ciclo de aquecimento de uma ferramenta durante o corte contínuo. A curva **b** representa o ciclo de resfriamento de uma ferramenta. Alguns autores como Bathia (1986), Wang (1969) e Palmi (1987) realizaram investigações que mostram como o ciclo de temperatura flutua ciclicamente no fresamento. Esta variação é indicada pela curva **c** da figura.

Esta variação cíclica da temperatura na aresta da ferramenta pode levar a uma modificação, também cíclica, na distribuição de tensões, o que pode ocasionar o surgimento de trincas de origem térmica.

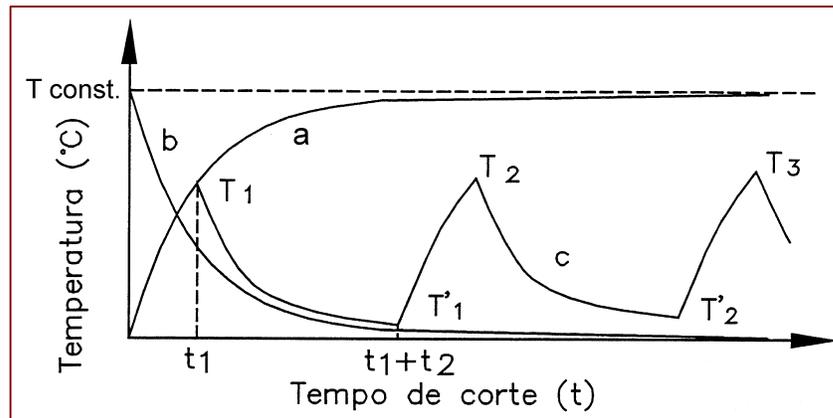


Figura 2.27 – Variação cíclica da temperatura de corte na operação de fresamento (Palmai, 1987).

Ferraresi (1977) explica este fenômeno da seguinte maneira: a Figura 2.28a apresenta a curva de distribuição da temperatura em relação à profundidade “x”, a partir do ponto de contato cavaco-ferramenta. A camada superficial, a uma temperatura bastante alta, se dilata. Porém, as camadas subseqüentes a temperaturas inferiores, terão uma dilatação bem menor. Como conseqüência, tais camadas impedirão o processamento de uma dilatação maior na camada superficial. Desta forma, origina-se na camada superficial tensões de compressão (Fig. 2.28b). Em conseqüência disto, haverá a determinada distância “x” da superfícies de contato, tensões de tração. Num instante de tempo seguinte, com a variação da temperatura de corte, isto é, com o resfriamento da camada de contato (devido ao tempo inativo), essa camada estará submetida à tração (processo inverso ao do tempo ativo), enquanto que as camadas subseqüentes passarão a ser solicitadas à compressão, e, em função do perfil da temperatura internamente, passa novamente à tensão de tração, à partir de uma determinada distância da superfície de saída. (figs. 2.28c e 2.28d).

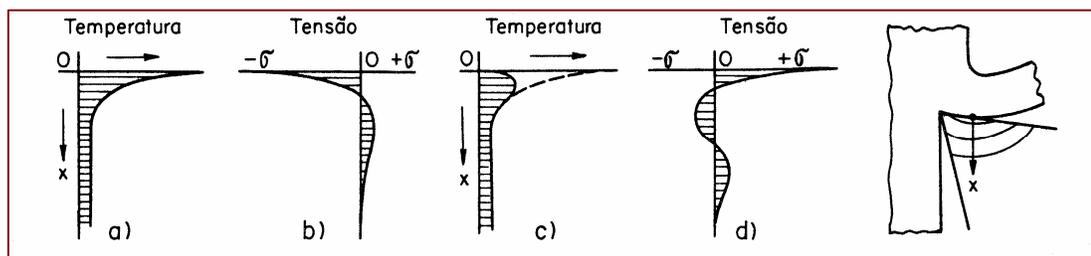


Figura 2.28 – Distribuição de temperatura e tensões em uma operação de fresamento com pastilha de metal duro (Ferraresi, 1987).

Em ferramentas de metal duro essas flutuações cíclicas favorecem o aparecimento de trincas de origem térmica. Essas trincas posteriormente, por um processo de erosão, se transformarão em sulcos, conhecidos como sulcos em forma de pente ou *combracks*, na literatura inglesa (Machado; da Silva, 2004).

De Melo (2001) pesquisou a formação das trincas de origem térmica no fresamento com insertos de metal duro. Segundo o autor, as duas fases que compõem a matriz do metal duro (uma cerâmica à base de carbonetos e uma metálica à base de cobalto) possuem coeficientes de expansão térmica bastante diferente, o que gera elevadas tensões na interface do grão de carboneto com a matriz metálica durante os ciclos de aquecimento e resfriamento. Esta diferença de expansão irá gerar um deslocamento nas interfaces provocando a nucleação de uma trinca. Porém, se a força de coesão é maior do que as tensões geradas e estas são suficientes para provocar deformação plástica na matriz metálica próximo à interface, poderá haver acúmulo de defeitos (acúmulo de discordâncias) nesta região a cada ciclo, até que este material deformado já não mais suporte às tensões geradas durante a usinagem e se rompa, provocando a nucleação de uma trinca, o que caracteriza um processo de fadiga. Este processo de fadiga, até se chegar à abertura da trinca, será mais rápido ou mais lento dependendo da diferença de temperatura a cada ciclo ( $\Delta T$ ).

Outro questionamento levantado por este autor é o motivo das trincas surgirem igualmente espaçadas ao longo da aresta. Sua explicação é a seguinte: “O surgimento da primeira trinca térmica se dará no local mais propício para este evento, ou seja, o que apresentar menor resistência mecânica às tensões geradas. O aparecimento de uma trinca térmica em um determinado local da aresta de corte da ferramenta funcionará como um aliviador de tensões nas regiões próximas a esta, restando, portanto, que outras trincas sejam formadas em regiões mais afastadas. Isto poderia explicar o fato das trincas térmicas aparecerem com um espaçamento aproximadamente constante sobre a aresta de corte das ferramentas. Estas trincas irão continuar aparecendo até uma quantidade limite capaz de aliviar

qualquer tensão gerada na superfície de saída, restando, desta forma, somente a evolução destas à sulcos provocados por ação de diversos mecanismos de desgaste”.

Na Figura 2.29, é mostrada uma imagem obtida a partir de microscópio eletrônico de varredura (MEV) da aresta de uma ferramenta de metal duro classe ISO P45 com a formação da trincas que precedem a formação dos sulcos.

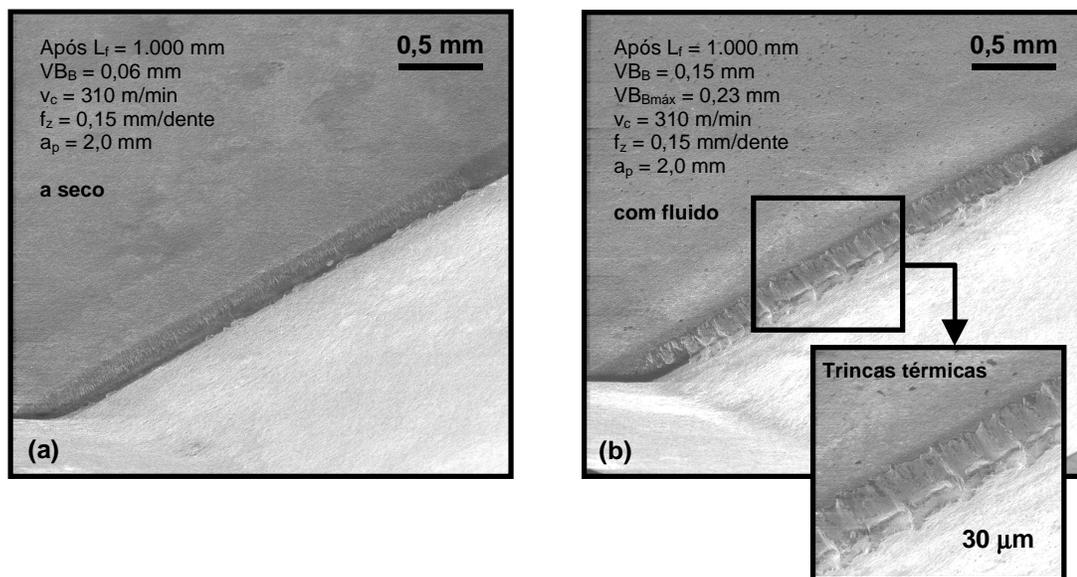


Figura 2.29 – Aresta de corte de uma ferramenta P45 ensaiada através de um percurso de avanço de 1.000 mm: (a) a seco; (b) com fluido de corte (de Melo, 2001).

Os sulcos aparecem perpendiculares à aresta de corte, desenvolvendo-se tanto na superfície de saída como na superfície de folga. Estes sulcos acabam fragilizando a aresta, facilitando o aparecimento de trincas de origem mecânica. As trincas de origem mecânica aparecem paralelas à aresta e a união destas duas formas de trincas promove a remoção de partes da aresta, prejudicando o bom andamento do processo e comprometendo a vida da ferramenta. A Figura 2.30 representa os sulcos em forma de pente.

Normalmente, o número de trincas se estabiliza pois o processo de fadiga é aliviado com o aparecimento das primeiras trincas. As cavidades das trincas absorvem o processo de dilatação e retração das superfícies da ferramenta, de tal forma que as tensões geradas não são suficientes para promover abertura de nova fissura (Ferraresi, 1977).

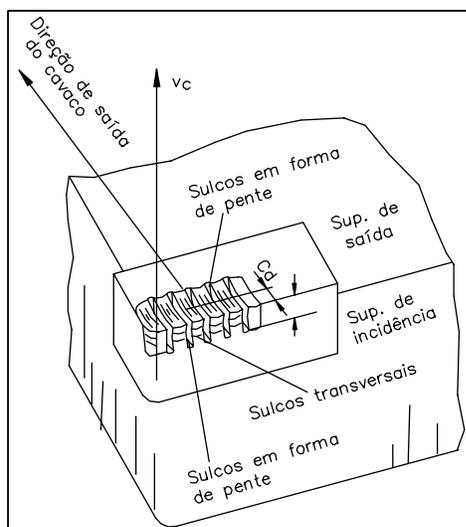


Figura 2.30 – Sulcos desenvolvidos na forma de pente (Ferraresi, 1977).

#### Avárias de origem mecânica:

As trincas de origem mecânica acontecem normalmente paralelas à aresta de corte, podendo aparecer tanto na superfície de saída como na superfície de folga. Elas ocorrem devido aos choques mecânicos tanto na entrada da ferramenta quanto na sua saída da peça. Estas trincas, aliadas às de origem térmica, podem resultar em lascamentos que comprometem a ferramenta.

A ferramenta, no corte interrompido, estará submetida a um ciclo de carregamento que varia dependendo da fase (ativa ou inativa) que esta se encontra. Durante a fase inativa, sobre a ferramenta não há nenhuma carga atuando. Porém, ao entrar na peça, um impacto irá ocorrer e a ferramenta estará submetida a um carregamento compressivo. O número de ciclos de carregamento que irá acontecer na ferramenta depende do número de rotações por minuto empregadas no corte.

Condições de corte mais severas favorecem o aparecimento de trincas de origem mecânica. Condições como maiores profundidades de corte, avanços e resistência da peça usinada aumentam o carregamento, acelerando o processo de fadiga e avaria da ferramenta de corte (Machado; da Silva, 2004).

Pekelharing (1978) foi um dos autores que mais investigou sobre problemas de lascamento excessivo de ferramentas de metal duro durante sua saída da peça no corte interrompido. Segundo este autor, quando a ferramenta se aproxima da saída da peça, promove uma rotação no plano de cisalhamento primário, tornando-o negativo, resultando na ocorrência do fenômeno, conhecido como “formação do pé” (*foot forming*), pela semelhança desse com um pé humano. A Figura 2.31 mostra a seqüência de formação desse fenômeno,

que é peculiar a determinadas geometrias de saída da peça. Observa-se que à medida que a ferramenta se aproxima da borda de saída da peça, o plano de cisalhamento, que inicialmente era positivo vai diminuindo, passando para valores negativos. Isto acontece porque ao se aproximar da borda de saída da peça, a ferramenta, com seu esforço de corte, não tem a restrição da resistência do material em condições normais. Devido à falta de apoio mecânico, a borda se deforma no sentido de cisalhamento negativo, até a ruptura, antes de atingir a borda, promovendo a formação do pé. Esta mudança do plano de cisalhamento primário, tornando-se negativo, gera uma variação das tensões compressivas para tensões trativas podendo resultar na quebra da cunha cortante. A separação desta forma de cavaco no exemplo da figura acontece quando ainda faltava 0,21mm para a ferramenta atingir a borda lateral da peça. Este problema pode ser solucionado se a ferramenta tiver tenacidade suficiente para resistir às inversões de tensão impostas à ponta da ferramenta.

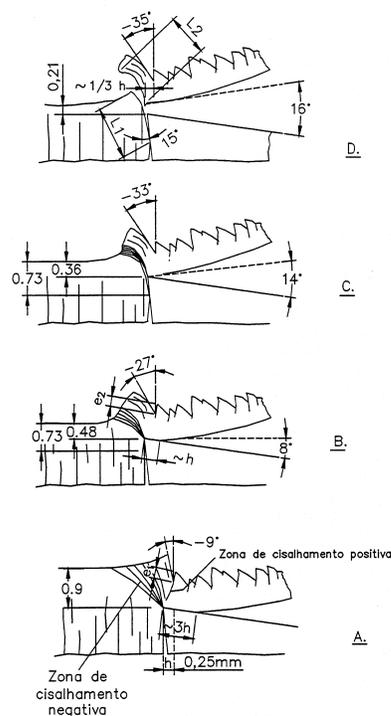


Figura 2.31 – Esquema representando a “formação do pé” (Pekelharing, 1978).

Ainda segundo Pekelharing (1978), em uma fresa com número par de dentes, este tipo de avaria irá ocorrer apenas naqueles que tem posição ímpar na fresa. Isto ocorre porque após a passagem do primeiro dente, a borda de saída da peça vai estar chanfrada, aliviando a saída e evitando este problema para o segundo dente. O dente seguinte já não encontrará esta

situação favorável e o ciclo então se repetirá. Quando a fresa possuir um número ímpar de dentes, após algumas rotações da ferramenta todos os dentes podem falhar.

### 2.2.3 – Vida da ferramenta e critérios de final de vida

Ferraresi (1977) define a vida de uma ferramenta como sendo o tempo em que a mesma efetivamente trabalha, sem perder sua capacidade de corte até que um critério de vida previamente estabelecido seja atingido.

Se o critério de final de vida for atingido e a ferramenta não for reafiada ou trocada, algumas das seguintes consequências podem ocorrer:

- . Acabamento superficial não satisfatório, o que é crítico em operações de acabamento;
- . Impossibilidade de atingir tolerâncias dimensionais requeridas em projeto;
- . Aumento excessivo nas forças de usinagem;
- . Elevadas temperaturas na região de corte;
- . Pode haver a quebra da aresta.

A norma ISO 8688-1 (1989), indicada para o fresamento frontal, recomenda alguns valores (pelo critério Normal) para estabelecer o final de vida de ferramentas independente de seu material:

- . Desgaste de flanco médio,  $VB_B = 0,35$  mm;
- . Desgaste de flanco máximo,  $VB_{Bmax} = 1,0$  mm;
- . Profundidade máxima da cratera,  $KT = 0,1$  mm;
- . Falha catastrófica.

Outras formas de expressar o final de vida, que normalmente são de maior praticidade para a indústria, podem ser estabelecidos, porém normalmente contêm implícitos na sua determinação os critérios citados acima:

- . Tempo efetivo de trabalho;
- . Percurso de corte;
- . Percurso de avanço;
- . Volume de material removido;
- . Número de peças produzidas;
- . Rugosidade da superfície gerada;
- . Vibração do sistema máquina-ferramenta, ferramenta e peça.

O percurso de corte ( $L_c$ ) estabelecido através da vida da ferramenta ( $T$ ) em minutos pode ser expresso pela Eq. (2.7) (Diniz; Marcondes; Coppini, 2001):

$$L_C = V_C \cdot T / 1000 \quad (\text{km}) \quad (2.7)$$

onde:

$V_C$  = velocidade de corte.

O percurso de avanço ( $L_f$ ) para uma vida da ferramenta ( $T$ ) em minutos pode ser expresso pela Eq. (2.8) (Diniz; Marcondes; Coppini, 2001):

$$L_f = f \cdot n \cdot T \quad (2.8)$$

onde:

$n$  = número de rotações em rpm

$f$  = avanço em mm/rot.

### 2.3 Monitoramento do Processo de Usinagem

Uma maneira de se determinar o momento exato da troca de uma ferramenta de corte é adotar um critério de final de vida para esta, tais como a rugosidade da superfície usinada, valor máximo ou médio para o desgaste de flanco ( $VB_{Bmáx}$  e  $VB_B$ ), valor da profundidade ( $KT$ ) para o desgaste de cratera, nível de vibração do conjunto, potência consumida, distância percorrida pela ferramenta durante o corte, dentre outros. A medição da evolução da intensidade destes valores torna-se então necessária. Para a operação de fresamento, a média dos valores de vida de uma ferramenta apresenta uma grande dispersão, o que torna necessário a utilização de valores mais baixos para as médias. Isto faz com que muitas ferramentas não sejam totalmente aproveitadas, gerando prejuízos com excessivas trocas de ferramentas, além do aumento do tempo de máquina parada.

Por outro lado, se for necessário adotar o procedimento de parada da produção para retirada da ferramenta e/ou peça com o objetivo de medir o parâmetro adotado para acompanhar o desgaste, este pode ser demorado, dispendioso e de baixa produtividade. Além disto, estes métodos não são capazes de prever ou detectar instantaneamente quebra ou lascamento da aresta de corte que são, geralmente, processos catastróficos e repentinos, fazendo com que aumente o número de peças recusadas na produção.

O problema principal quando o responsável pela troca da ferramenta é o operador é que ele nem sempre é capaz de identificar o momento exato em que se deve realizar a troca da ferramenta, levando-se em conta a qualidade da peça que está sendo produzida e o limite de aproveitamento da vida da ferramenta. Além disto, a introdução de controles automatizados nas máquinas-ferramenta tornou o monitoramento perceptivo extremamente difícil, além da impossibilidade física de se observar a região de corte, mesmo quando se fala em prevenção contra falhas repentinas e inesperadas da ferramenta (Dolinsk; Kopac, 1999).

Tendo a automação e otimização dos processos de fabricação uma importante função na melhoria da produtividade, o monitoramento e sistemas de controle dos processos se tornaram essenciais para a fabricação. Além disso, é um importante requisito no desenvolvimento de procedimentos de usinagem completamente automatizados a instalação de adequados sistemas de monitoramento *on-line* (Dolinsk; Kopac, 1999).

Dentre as principais funções de um sistema de monitoramento e controle do processo estão: estabelecer a velocidade de corte e o avanço, aproximação, afastamento, posicionamento e controle do percurso da ferramenta de corte. A maioria destas funções citadas é possível de realizar com o atual estágio de desenvolvimento tecnológico das máquinas CNC. Porém, certas funções tais como a inspeção do estado da ferramenta e da

peça e também a determinação do momento de sua troca ainda continuam nas mãos do operador e dependem de sua experiência.

O monitoramento pode ser realizado através de uma medição direta. Como algumas grandezas que são medidas diretamente, podem-se citar: análise de partículas e radioatividade, medidas ópticas, resistência elétrica da junção peça/ferramenta, alterações dimensionais da peça, distância ferramenta-peça. Este método não apresenta interferência de outros parâmetros. A Tabela 2.1 apresenta os processos de monitoramento direto e suas principais características.

Tabela 2.1 – Processos de monitoramento direto (Dan; Mathew, 1990).

Método	Processo	Medida	Sensor
Direto	Óptico	Forma ou posição da ponta da ferramenta	Câmera de TV
	Análise de partículas e radioatividade	Tamanho de partículas ou radioatividade	Espectrofotômetro Medidores de radioatividade
	Resistência elétrica da junção peça/ferramenta	Variação da resistência da junção	Voltímetro
	Alterações dimensionais da peça	Dimensão da peça	Micrômetros e transdutores eletromagnéticos

Em alguns casos, porém, não é possível o monitoramento da grandeza diretamente, sendo necessário a medição indireta, onde um outro parâmetro é medido e relacionado com o parâmetro estudado para a tomada de decisão. Alguns exemplos de medições indiretas são: força de corte para relacionar com a potência de corte, som para relacionar com desgaste, vibração para relacionar com a rugosidade, temperatura de corte para relacionar com o desgaste da ferramenta e emissão acústica para relacionar com rugosidade ou desgaste. A principal dificuldade do método indireto de monitoramento é estabelecer uma relação entre o que está sendo medido e o sinal adquirido, além da eliminação da interferência dos ruídos que vem junto com o sinal. Rangwala e Dornfeld (1991) afirmam que a maioria dos métodos indiretos tem baixa sensibilidade aos efeitos micro-mecânicos da deformação e do processo de atrito que ocorrem na zona de cisalhamento.

As principais características desejáveis de um bom sistema de monitoramento são (Dornfeld, 1988):

- . Confiabilidade;
- . Baixo custo;
- . Simplicidade;
- . Suportar ambiente industrial;
- . Não ser influenciado por ruídos externos;
- . O parâmetro medido deve ser dependente somente do que se quer monitorar;
- . Baixo tempo de resposta;
- . Ser pouco intrusivo, o sensor não deve interferir na operação de usinagem.

Na tentativa de conseguir um completo domínio do processo de usinagem, estudos realizados por Tlustý e Andrews (1983) classificaram como prioridades na atuação dos sensores de monitoramento do estado da ferramenta os seguintes fatores:

- . Verificar geometria, qualidade, orientação e dimensões das peças, compensando efeitos produzidos pelo desgaste na ferramenta e deformações dimensionais de origem térmica, tanto na peça como na ferramenta;
- . Identificar a ferramenta e fixar os parâmetros, verificação do estado de desgaste e detecção da quebra da ferramenta e sua troca;
- . Monitorar o correto funcionamento de elementos da máquina-ferramenta, tais como rolamento, guias e acionamento de avanço.

Jetly (1984) acrescenta ainda algumas características que sensores dedicados ao monitoramento devem ter para que a sua tarefa seja bem sucedida:

- . Fornecer um sinal de baixo ruído e confiável;
- . Ser suficientemente sensíveis para que consigam acompanhar a evolução do desgaste;
- . Ser robustos, baratos e seguros para operarem em ambiente de chão de fábrica;
- . Fornecer um sinal que possa ser conectado ao sistema de controle da máquina-ferramenta;
- . Ter uma resposta rápida o suficiente para que o sistema de controle tome decisões antes que eventos como quebras ocorram;
- . Ser flexíveis o suficiente para que possam ser aplicados na maioria dos processos de usinagem.

A Tabela 2.2, criada por Dornfeld (1992), apresenta o nível de atividades de pesquisa em alguns dos métodos empregados no monitoramento em usinagem e seus fenômenos no início da década de noventa, tendo mudado muito pouco nos últimos anos.

Tabela 2.2 – Atividades de pesquisa em diversos métodos de monitoramento da usinagem (Dornfeld, 1992).

método \ aplicação	diagnósticos	força/torque	potência	trepidação (chatter)	acabamento superficial	formação do cavaco	desgaste da ferram.	fratura da ferramenta
emissão acústica								
força								
resistência elétrica								
potência								
corrente do motor								
vibração								
ultrasom								
temperatura								
visual/ótico								
acústica								



Du et al (1995) definiram uma clara distinção entre monitoramento e diagnósticos. Segundo estes autores, o monitoramento é a detecção de falhas enquanto que o diagnóstico é a sua localização. Ainda segundo estes autores, o monitoramento pode ser dividido em três partes principais: sensoriamento, processamento e tomada de decisão. Destas duas últimas partes do monitoramento, podem ser citados: reconhecimento de padrões, sistemas nebulosos ou “*Fuzzy*”, árvores de decisões ou redes neurais artificiais.

Os métodos de monitoramento podem ser divididos em duas categorias (Du et al., 1995):

1. Métodos de monitoramento baseados em modelos (que consideram o sinal como a saída de um sistema dinâmico na forma de uma série temporal). Este método apresenta a limitação de não identificar se uma mudança no sinal que vem do sensor é proveniente de alguma deterioração no processo (que é o esperado) ou se está relacionada a alguma mudança nas condições ou parâmetros de processo.
2. Métodos de monitoramento baseados em características apropriadas. Estas características podem ser representadas no domínio do tempo e/ou frequências (média, variância, simetria (skewness), achatamento (curtose), fator de crista e potência em uma banda específica de frequências). Este método é também subdividido em duas fases: aprendizado (treinamento) e classificação.

Segundo Dolinsk e Kopac (1999), os passos seguintes ao monitoramento frequentemente referem-se à aplicação de métodos de processamento de sinal e técnicas de inteligência artificial para facilitar na identificação de correlações entre os parâmetros de usinagem, os sinais adquiridos e os parâmetros pesquisados. Portanto, o sistema de monitoramento consiste na aquisição dos sinais dos parâmetros do processo, aplicar técnicas

de processamento destes sinais e aplicar um algoritmo que irá estimar as condições do processo, num processo similar ao mostrado na Fig. 2.32.



Figura 2.32 – Estrutura do sistema de processamento e tomada de decisão com relação ao estado de uma ferramenta (Dornfeld, 1990).

No projeto e construção de um sistema de monitoramento, a compreensão dos mecanismos de desgaste na ponta da ferramenta é um pré-requisito essencial para que se possa relacionar o fenômeno do desgaste com os sinais adquiridos. Vários esforços têm sido feitos no sentido de se desenvolver sistemas de aquisição realmente confiáveis, mas a ausência de sucesso pode-se dever à insuficiência de conhecimentos quanto aos mecanismos de desgaste nos novos materiais de ferramentas utilizados atualmente. Ferramentas de *cermet* e ferramentas que possuem revestimento com várias camadas, especialmente quando utilizadas em velocidades elevadas, não compartilham as mesmas explicações sobre os complexos processos de desgaste a qual estão submetidas ferramentas de materiais de emprego mais comum. Apesar de todas as instruções e experiências disponíveis, está óbvio que não se pode usar estas ferramentas com toda eficiência. Por isto, pesquisas no campo de desgaste de ferramentas ainda são de grande interesse (Dolinsk; Kopac, 1999).

Mesmo com muitas pesquisas sendo realizadas no sentido de desenvolver um sistema de monitoramento confiável, a utilização destes sistemas na indústria continua deficiente. Muitos fatores contribuem para isto, tais como a utilização de sistemas baseados em modelos matemáticos, que requerem enormes quantidades de dados empíricos (Dimla, 2000). Os sinais adquiridos geralmente são de natureza estocástica e não estacionário, difíceis de modelar. Esta natureza aleatória dos sinais pode ser atribuída à não-homogeneidade do material da peça, sensibilidade aos parâmetros de corte e a relação não linear destes parâmetros com o desgaste da ferramenta. Estes fatores podem levar a uma interpretação incorreta do processo, limitando a precisão e o controle da usinagem (Dimla, 2000).

A seguir será mostrado os principais métodos de monitoramentos indiretos aplicados à usinagem.

### 2.3.1 Monitoramento da usinagem através da temperatura

Grandes quantidades de calor são geradas na usinagem. A energia mecânica do processo é transformada em calor durante o corte através da deformação plástica no cavaco e o atrito entre a ferramenta e a peça. As altas temperaturas resultantes nas imediações da aresta de corte têm influência direta nas taxas e nos mecanismos de desgaste, no atrito entre o cavaco e a ferramenta e também entre a ferramenta e a superfície de folga (Dimla, 2000).

A Figura 2.33 mostra a distribuição das fontes de calor em um processo de usinagem ortogonal. O calor é gerado nas regiões de cisalhamento primário e secundário, resultado das intensas deformações plásticas que ali ocorrem. Outras fontes de calor são a interface ferramenta-peça e também na interface cavaco-ferramenta, gerados pelo intenso atrito.

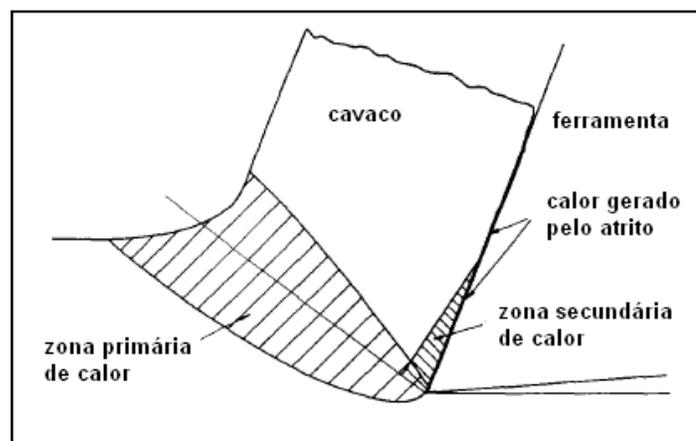


Figura 2.33 - Fontes de calor na usinagem (Tay, 1993).

A remoção do calor gerado é feita através do cavaco, da peça e da ferramenta. Como a distribuição de temperatura não é uniforme, não é fácil saber qual a quantidade exata de calor é passada à ferramenta. Porém, a quantidade de calor removida pelo cavaco do total gerado é considerada na literatura como cerca de 80 a 90%, o que implica que 10% ou até menos é absorvido ou dissipado pela ferramenta e a peça (Boothroyd, 1975). Se nenhum fluido refrigerante for empregado, a perda de calor para o ambiente é insignificante. Portanto, a medida da temperatura durante o corte é importante na investigação do comportamento da ferramenta, pois permite controlar os fatores que influenciam no seu uso, tais como vida e desgaste (de Carvalho, 2005).

Muitas técnicas experimentais tem sido aplicadas na medição de temperatura durante o corte. Entretanto, é difícil conseguir boa precisão. Mesmo quando se usina a velocidades convencionais, os gradientes de temperatura são extremamente altos, especialmente nas vizinhanças do plano de cisalhamento primário e na interface cavaco-ferramenta. Este aspecto

aliado ao fato que a espessura do cavaco é normalmente muito fina, torna a tarefa de medir com exatidão as distribuições de temperatura complicada. Qualquer tipo de interferência com o processo de usinagem tais como furos ou ranhuras no cavaco ou na ferramenta com a intenção de medir temperaturas provavelmente irá alterar a distribuição de temperaturas que seria obtida se não houvesse interferência. Conseqüentemente, métodos analíticos ou numéricos de solução vêm sendo empregados para calcular as temperaturas de usinagem.

Em pesquisas relativas à mecânica do processo de usinagem e ao desgaste de ferramenta, a compreensão dos fenômenos como a distribuição de temperaturas ao longo do plano e da interface cavaco-ferramenta é de fundamental importância. Tay (1993) cita alguns pesquisadores (Chao e Trigger, 1955; Balint e Brown, 1964; Usui et al, 1978) que afirmam que o início do desgaste de cratera na superfície de saída é altamente dependente da magnitude máxima e distribuição da temperatura nesta região.

A Eq. (2.9), que descreve a distribuição de temperatura na usinagem, é a equação da energia (Tay, 1993):

$$\rho C \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla T \right) - k \nabla^2 T - \dot{q} = 0 \quad (2.9)$$

onde:

$\rho C$  = constante;

$\frac{\partial T}{\partial t}$  = indica a variação da temperatura no tempo;

$\nabla T$  = gradiente da temperatura em x, y e z;

$k$  = condutividade térmica do material;

$\nabla^2 T$  = laplaciano da temperatura que indica a variação espacial da temperatura;

$\dot{q}$  = taxa de geração de calor.

Segundo o autor, quando o processo de usinagem estiver estabilizado, o termo transiente ( $\frac{\partial T}{\partial t}$ ), que indica a variação da temperatura no tempo, desaparece e o termo da condução permanece apenas na região da ferramenta. A taxa de geração de calor ( $\dot{q}$ ) existe apenas nas regiões de cisalhamento primária e secundária (Tay, 1993).

Algumas das técnicas para medição da temperatura da ferramenta na usinagem mais utilizadas atualmente são (Machado; da Silva, 2004):

. Método do termopar ferramenta-peça;

- . Medição direta com inserção de termopares na ferramenta de corte, logo abaixo da região de corte;
- . Medição de calor de radiação através de sensores infra-vermelho;
- . Medição utilizando vernizes termosensíveis;
- . Medição por técnicas metalográficas;
- . Medição utilizando pós químicos;
- . Medição utilizando o método do filme PVD.

Tay (1993) cita, avalia e compara vários métodos de calcular a temperatura de usinagem. A seguir, os métodos classificados por este autor:

- . Método da fonte de calor móvel;
- . Método das fontes de imagem;
- . Método das diferenças finitas;
- . Métodos semi-analíticos;
- . Método de elementos finitos (FEM).

Em seu trabalho, Tay conclui que, dos métodos por ele avaliados, o FEM (*finite element method*) e o das diferenças finitas como os que apresentam a melhor precisão para estimarem a temperatura. Segundo este autor, estes dois métodos levam em consideração vários aspectos importantes tais como: as complexas distribuições de velocidades e fontes de calor nas zonas primária e secundária, variações da tensão com a deformação, taxa de deformação e temperatura e as variações das propriedades do material com a temperatura. Entre os dois métodos selecionados, Tay diz que o método de elementos finitos apresenta uma vantagem em relação ao método das diferenças finitas devido a maior simplicidade na preparação dos dados e a menor exigência em termos de esforços computacionais. Além disso, métodos que utilizam elementos finitos se mostraram mais promissores com relação à utilização de um programa computacional que estime as temperaturas de usinagem a partir dos parâmetros de corte (tais como a velocidade de corte, avanço e ângulo de saída).

El-Wardany; Mohammed; Elbestawi (1996) realizaram uma investigação experimental e analítica de diferentes fatores que influenciam na distribuição de temperatura na superfície de saída de uma ferramenta cerâmica ( $Al_2O_3-TiC$ ) torneando materiais de difícil usinagem tais como o aço AISI 1552 e superligas a base de níquel (Inconel 718). As distribuições de temperatura foram estimadas através do método de elementos finitos. Segundo os autores, o aumento da velocidade, do avanço e da profundidade de corte aumentam as temperaturas na região da aresta de corte. Por outro lado, o aumento do raio de ponta e do ângulo de saída diminuem estas temperaturas, enquanto que o aumento da espessura do chanfro da aresta de

corte aumenta suavemente a temperatura. Os autores concluíram que, empregando a metodologia adotada, o método experimental e o analítico apresentaram resultados semelhantes, mostrando que ocorre uma rápida queda de temperatura dentro do inserto e que a maior parte do calor gerado durante o corte permanece nas vizinhanças da ponta da ferramenta. A Figura 2.34 mostra a distribuição de temperatura e isotermas do inserto, típico do material cerâmico, que apresenta baixa condutividade térmica.

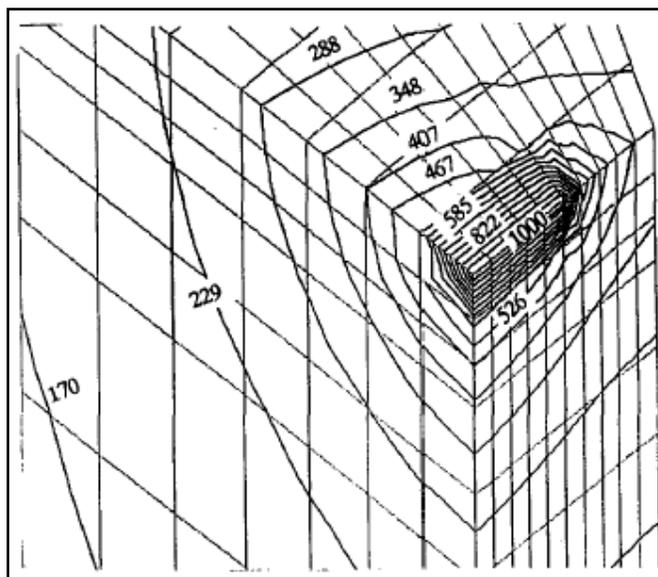


Figura 2.34 – Distribuição de temperatura e isotermas avaliadas por elementos finitos na ponta de um inserto de material cerâmico (El-Wardany; Mohammed; Elbestawi, 1996).

### 2.3.2 Monitoramento da usinagem através de sinais de força

A aplicação e interpretação desse parâmetro têm se concentrado no estudo da característica dinâmica do sinal da força de corte e na interpretação de sua relação com os níveis de desgaste. Este aspecto pode ser atribuído ao fato que o sinal de força é importante na avaliação das condições da ferramenta como resultado das variações dos níveis de atrito entre a superfície de folga e a peça (Dimla, 2000).

Considerações teóricas e pesquisas práticas indicam que os três componentes da força, mostradas na Fig. 2.35, respondem de maneira diferente para os diferentes tipos de desgaste que podem ocorrer em uma ferramenta. Por exemplo, a força de avanço ( $F_x$  ou  $F_f$ ), segundo Dimla (2000), é insensível ao desgaste de cratera enquanto que as forças de avanço e radial ( $F_y$  ou  $F_r$ ) devem ser mais influenciadas pelo desgaste de flanco da ferramenta que as forças principais ( $F_z$  ou  $F_t$ ).

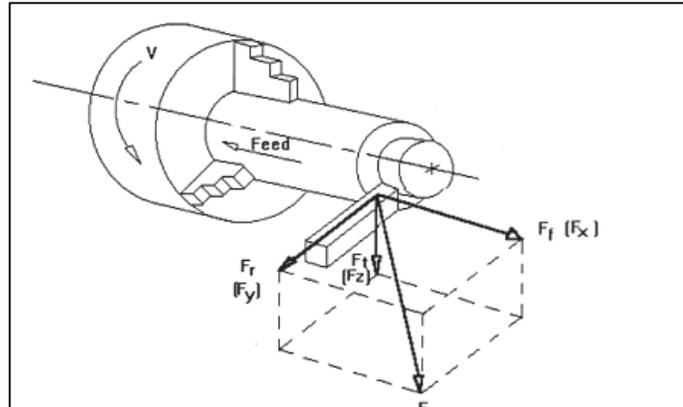


Figura 2.35 - Componentes da força em um ponto da ferramenta (Dimla, 2000).

Ravindra et al. (1993) desenvolveram um modelo matemático para estimar o desgaste em ensaios realizados no torneamento. Neste modelo, a progressão do desgaste foi estudada e foi realizado um modelamento das forças de corte através do método de múltipla regressão. Os resultados indicaram que o desgaste aumenta com o aumento da velocidade de corte e o aparecimento de inflexões na curva de desgaste mostram que há um predomínio de mecanismos termicamente ativados. O aumento nas componentes da força à medida que o desgaste aumenta ficou claro. Os gráficos de força-tempo e força-desgaste comportaram-se de maneira similar, evidenciando uma boa correlação entre o desgaste de flanco e as forças radiais.

As medições de forças durante a usinagem são realizadas através de uma plataforma dinamométrica. Dos Santos (1988), afirma que estas medições possibilitam a observação das componentes de corte com alta sensibilidade, além de mostrar de maneira clara a condição real da aresta cortante.

Ainda segundo dos Santos (1998), para se usar a plataforma dinamométrica, algumas restrições devem ser observadas:

- a) Custo relativamente elevado;
- b) A maneira com que se fixa o material sobre a plataforma deve ser cuidadosamente planejada, de modo que se evite indesejáveis interferências sobre o andamento normal do processo;
- c) A dimensão da plataforma é um fator limitante para as dimensões da peça que se usina, para o caso do fresamento;
- d) A distância do ponto de onde se está executando a usinagem até a superfície da plataforma, para o caso do fresamento, não podem superar a distância estabelecida pelo fabricante, o que limita o trabalho de usinagem de peças mais complexas.

Um dos maiores problemas na aplicação dos esforços de corte no monitoramento do desgaste consiste no fato que este parâmetro é extremamente sensível às condições de corte empregadas (Dimla, 2000). Qualquer mudança nos valores das condições de corte mudará também os valores das forças, tornando assim necessário uma recalibração do sistema de monitoramento.

Potência, forças de corte, corrente do motor e torque são todos métodos relacionados e dependentes uns com os outros. Isto quer dizer que a medição de apenas um destes parâmetros já é suficiente, sendo que a corrente do motor é o de mais fácil execução (Dimla, 2000).

### 2.3.3 Monitoramento da usinagem através da vibração

Vibração é definida como o movimento de um sistema dinâmico em torno de sua posição estática. Para que um sistema mecânico vibre é necessário, e suficiente, que o mesmo tenha capacidade de armazenar energia cinética (que tenha inércia), energia potencial elástica (que seja flexível) e uma excitação externa dependente do tempo. Conseqüentemente, na prática é muito difícil evitar a vibração. Geralmente ela ocorre por causa dos efeitos dinâmicos de tolerâncias de fabricação, folgas, contatos, o atrito entre peças de uma máquina e, principalmente, devido ao efeito de forças dinâmicas desequilibradas de componentes rotativos e alternativos de máquinas (Duarte, 2005).

Vibrações mecânicas resultam geralmente de movimentos ondulatórios periódicos. A natureza do sinal de vibração originado em processos de usinagem incorpora também aspectos de vibrações livres, forçadas e aleatórias.

Na usinagem, as vibrações são conseqüências das variações cíclicas nos componentes dinâmicos das forças de corte (Dimla, 2000). Normalmente, estas vibrações começam como pequenas trepidações (*chatter*), responsáveis pelo aspecto ondulado na superfície usinada e também por irregularidades na espessura do cavaco e, posteriormente, progride para a vibração propriamente dita.

Dimla (1998), em um trabalho de monitoramento do desgaste de uma ferramenta no torneamento, verificou que, no domínio do tempo, a amplitude dos sinais de vibração não era um bom indicador da evolução do desgaste, mas distinguiam claramente fraturas e lascamento. No domínio das frequências, as vibrações captadas na direção de corte (eixo z) se mostraram mais sensíveis às condições da ferramenta que os outros eixos, enquanto que o eixo x foi a que apresentou a pior correlação.

El-Wardany et al. (1996) investigaram o uso das características do sinal de vibração para monitorar o desgaste e a quebra de uma ferramenta de corte em operação de furação. Dentre os parâmetros que o autor empregou no domínio do tempo, a curtose dos valores

aumentou rapidamente com a quebra da ferramenta. No domínio das frequências, uma análise revelou formação de picos que indicam uma fratura na aresta da broca. O autor sugere que uma combinação das duas técnicas é possível para monitorar de modo consistente o processo de furação.

Dan e Mathew (1990) empregaram um método de modelagem discreto chamado "*Dependent System*" para correlacionar os sinais de vibração com o desgaste de uma ferramenta. A implementação deste método envolveu a seleção de alguma banda do sinal que fosse representativo do desgaste. Os resultados obtidos mostraram que uma variação na parcela da energia de vibração de uma banda de frequência foi consistentemente observada, independentemente da influência da variação dos parâmetros de corte no sinal. A aplicação de uma análise do espectro mostrou que há uma relação linear entre a velocidade de corte e o desgaste, revelando que o sinal de vibração foi sensível ao desgaste da ferramenta.

Pesquisas sobre o comportamento do sinal de vibração com relação ao estado de desgaste de uma ferramenta no corte interrompido foram realizadas por Rotberg et al. (1987). Os autores procuraram enfatizar a entrada e a saída da ferramenta no fresamento e também medições do desgaste de flanco e de cratera. Também separaram o desgaste da ferramenta em três fases (afiada, meia vida, desgastada) e estabeleceram uma descrição destas fases via espectro. Esta descrição, via meticuloso processamento do sinal adquirido, mostrou ser um bom indicador do estado da ferramenta durante sua vida.

Jiang et al. (1987) investigaram os efeitos das vibrações na direção de corte e de avanço no desgaste da ferramenta. Os autores empregaram condições fixas de corte, uma pastilha P10 com superfície de saída plana e passadas de 10 minutos, na qual a ferramenta sofria um desgaste progressivo até acontecer uma falha catastrófica. Após o processamento dos sinais adquiridos, um espectro de frequências foi construído. Neste, foram observados três bandas de frequências sensíveis à evolução do desgaste: acima de 110 Hz, entre 117 e 510 Hz e entre 510 e 1000 Hz. Eles concluíram, a partir de suas investigações experimentais, que a vibração foi sensível aos diferentes estados de desgaste ao longo da vida de uma ferramenta.

O comportamento estático do desgaste é governado pelas forças de corte e pelo torque no eixo-árvore e o comportamento dinâmico envolve vibração e certos aspectos dinâmicos das forças de corte (Dimla, 1998). Com isto, o autor afirma que a combinação entre sinais de vibração e das forças de corte é uma ferramenta útil no desenvolvimento de sistemas de monitoramento do estado da ferramenta mais consistentes.

Dos Santos (2001) realizou um trabalho em que usou alguns parâmetros de entrada (velocidade de corte, profundidade de corte, avanço, percurso de avanço, potência e a vibração adquirida em dois pontos da máquina-ferramenta) para realizar o treinamento de uma rede neural *feedforward* com um algoritmo de aprendizado *backpropagation*. O objetivo da pesquisa

foi monitorar o desgaste de flanco máximo e a rugosidade Ra. Em uma análise gráfica qualitativa, a vibração aparece com uma tendência de comportamento mais definida em relação ao desgaste da ferramenta do que com a rugosidade Ra. Porém, ao analisar a sensibilidade dos parâmetros de entrada da rede, verificou que o parâmetro vibração contribuiu para o aumento dos erros da rede quando esta estima o valor do desgaste. O autor explica que o aumento dos erros verificados ao se empregar o parâmetro vibração na estimação do desgaste se deve à elevada correlação desse parâmetro com as demais variáveis do processo, o que torna mais difícil o processo de treinamento da rede neural devido à redundância de informações.

No monitoramento da usinagem através do sinal de vibração, é também muito importante conhecer o comportamento dinâmico da máquina-ferramenta. Sousa (1993) realizou um mapeamento dos locais mais apropriados para o acoplamento dos acelerômetros em uma fresadora CNC Romi Interact 4 usada em seus experimentos. Para isto, ele determinou 80 possíveis locais de acoplamento do sensor na fresadora. A partir daí, foi realizado uma análise de sensibilidade utilizando-se Funções de Resposta em Frequência (FRF). Após esta análise, o autor verificou que muitos dos locais de acoplamento apresentavam características dinâmicas muito semelhantes, permitindo reduzir os possíveis pontos a vinte e nove, sendo a maioria próxima do mancal inferior do eixo porta fresa e na mesa de trabalho e um na própria peça a ser usinada.

#### 2.3.4 Monitoramento da usinagem através dos parâmetros elétricos do motor

É um método bastante simples, de baixo custo e não intrusivo, pois fica instalado perto do motor e longe da região de corte. Segundo Dan (1990), durante o processo de corte a potência consumida pelo motor principal da máquina aumenta com o desgaste da ferramenta de corte. Assim, quanto maior o desgaste da ferramenta, maior o esforço de corte e, conseqüentemente, maior a corrente necessária ao processo. Então, a vida da ferramenta pode ser monitorada através da análise do comportamento dos sinais elétricos do motor da máquina.

Medir os parâmetros elétricos do motor é medir indiretamente os esforços de corte (Ferraresi, 1977). Este fato se explica, pois o motor da máquina-ferramenta, para gerar a potência mecânica necessária para executar uma operação de usinagem, consome corrente elétrica em uma quantidade diretamente proporcional à potência e as forças de corte geradas.

O monitoramento através dos parâmetros elétricos do motor apresenta como principais vantagens (dos Santos, 1988):

- . É uma técnica pouco intrusiva;
- . Baixo custo, principalmente se comparado com outros sistemas de monitoramento;

- . Tecnologia e operação relativamente simples;
- . Fácil instalação, não necessitando nenhum projeto especial para sua adaptação;
- . Não requer muito espaço, podendo ser instalado no armário de alimentação da máquina;
- . Pode ser aplicado à maioria dos motores elétricos (AC e DC);
- . Pode realizar o monitoramento em processo (*on-line*);
- . É um bom sistema de monitoramento para operações de fresamento, pois os valores de potência são pouco sensíveis aos choques na entrada da ferramenta.

Como principais deficiências deste sistema pode-se destacar:

- . Baixa sensibilidade ao estado de desgaste da ferramenta, sendo pouco diferenciados os valores de potência entre uma ferramenta nova e uma já desgastada. Porém, quando a ferramenta apresenta elevados níveis de desgaste, este sistema de monitoramento é mais sensível (Braga, 1992).
- . Como nem toda potência elétrica consumida é transformada em potência mecânica (devido a perdas com atrito e com inércia do sistema), há uma perda de precisão no sistema de monitoramento.

Caldeirani Filho (1998) realizou um trabalho de monitoramento, através da aquisição do sinal de corrente elétrica e também de emissão acústica no processo de fresamento. Segundo o autor, a evolução do sinal de corrente elétrica apresentou um comportamento bastante similar à evolução do desgaste ao longo do percurso de avanço. O autor também sugere que a corrente elétrica do motor pode ser, aliada a outros sinais, um bom parâmetro de entrada de uma rede neural a fim de estabelecer o fim de vida da ferramenta.

Os sinais de corrente elétrica são captados pelo sensor de efeito *Hall*, que é instalado circulando um fio condutor de corrente próximo do motor, e transformados em tensão elétrica proporcional a ela para a entrada no conversor A/D – uma placa de expansão que tem por objetivo integrar o microcomputador com o meio externo. Neste caso, a placa tem a função de transformar os sinais analógicos em digitais para serem armazenados e analisados no microcomputador (Matsumoto; Diniz, 1997).

## 2.4 Emissão Acústica

Segundo Ravindra; Srinivasa; Krishnamurthy (1993), a emissão acústica (EA) pode ser definida como sendo ondas de tensão elástica resultante da rápida liberação de energia de uma ou mais fontes dentro de um material submetido a estímulo externo. Estas ondas vibracionais se devem a um rearranjo interno na estrutura cristalina dos metais e a frequência de propagação normalmente está acima de 20 kHz (Dolinsek; Kopac, 1999). Estas ondas de tensão produzem deslocamentos na superfície do material, podendo então ser detectadas por sensores piezelétricos que transformam estes deslocamentos em sinais elétricos.

Os sinais de emissão acústica classificam-se em dois tipos: o sinal contínuo e sinal de pico (transiente), conforme (Blum e Inasaki, 1990; Matsumoto e Diniz, 1997). O sinal de pico é caracterizado por um pico de grande amplitude e pequena duração, enquanto que o sinal contínuo tem amplitudes relativamente menores e maior duração. No caso da usinagem, o sinal contínuo normalmente está associado às deformações plásticas em materiais dúteis e o sinal de pico, oriundos da propagação de trincas e impactos do cavaco. A Figura 2.36 mostra um gráfico típico de emissão acústica para um processo de usinagem.

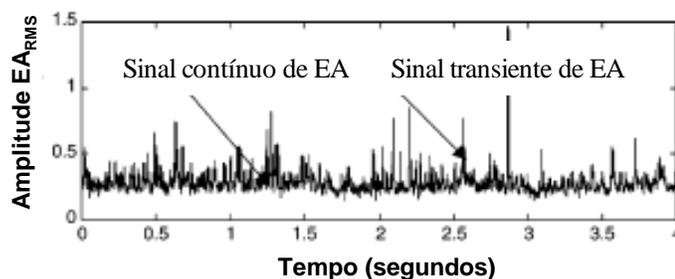


Figura 2.36 - Caracterização de um sinal de emissão acústica (Li, 2002).

Como consequência das faixas de frequência de EA, entre 50 a 1000 kHz aproximadamente, segundo definição de Liang e Dornfeld (1987), o sinal pode ser descontaminado de ruídos com uma certa facilidade através da utilização de um filtro passa-alta. Por outro lado, a alta frequência dificulta a amostragem e o armazenamento do sinal digitalizado durante o processo, pois em um pequeno intervalo de tempo uma quantidade muito grande de pontos deve ser adquirida para que a amostra do sinal seja confiável. Se, como exemplo, um sinal com frequência de 500 kHz for adquirido, ele tem que ser digitalizado com uma frequência de pelo menos 1000 kHz (1 MHz) para que o sinal amostrado seja representativo do sinal real. Isto significaria cerca de um milhão de pontos armazenados em 1 segundo de tempo de corte.

Os principais métodos para o processamento do sinal da EA no domínio do tempo são (Pigari, 1995):

a) Tensão RMS ( $V_{RMS}$ ): é a raiz quadrada da média do quadrado da tensão do sinal de EA. É um modo de avaliar a energia contida no sinal de EA. O valor RMS do sinal de EA pode ser expresso como mostrado na Eq. (2.10) (Teti; Dornfeld, 1989):

$$V_{RMS} = \left( \frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} V^2(t).dt \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.10)$$

onde:

$V(t)$  = função do sinal;

$\Delta T$  = constante de tempo

Asibu e Dornfeld (1981) propuseram, pela Eq. (2.11), um modelo que relaciona o valor do sinal RMS da emissão acústica e alguns parâmetros empregados na usinagem. Para isto, eles empregaram condições bem específicas, tais como o corte ortogonal e também criaram métodos para que as únicas fontes de EA fossem deformações plásticas na região de cisalhamento primária e secundária e o atrito entre a peça e a ferramenta na superfície de folga.

$$V_{RMS} = C \left[ \tau_k w V_c \left( \frac{\cos \gamma_o}{\sin \phi \cos(\phi - \gamma_o)} t_1 + \frac{1}{3} (l - l_1) \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \gamma_o)} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.11)$$

Onde:

$V_{RMS}$  = energia contida no sinal de EA;

$C$  = constante;

$\tau_k$  = resistência ao cisalhamento dinâmico do material trabalhado;

$w$  = espessura de corte;

$V_c$  = velocidade de corte;

$\gamma_o$  = ângulo de saída da ferramenta;

$\phi$  = ângulo do plano de cisalhamento;

$t_1$  = espessura do cavaco antes de ser deformado;

$l$  = comprimento total da região de contato entre o cavaco e a ferramenta;

$l_1$  = comprimento da região de aderência entre o cavaco e a ferramenta.

b) Número total de picos: é o número de vezes que o sinal ultrapassa um determinado valor pré-estabelecido de tensão (*threshold*) quando o contador trabalha continuamente, sem interrupções até o final da aquisição (Beattie, 1983).

c) Taxa do número de picos: é a contagem do número de vezes que o sinal ultrapassa um determinado *threshold* pré-estabelecido dentro de um certo intervalo de tempo, geralmente entre 0,1 segundo a uma hora (Beattie, 1983).

d) Taxa de cruzamento do zero: tem a mesma definição do item anterior, porém o valor do *threshold* estipulado é o zero.

e) Desvio padrão: mede a dispersão dos dados em relação à média.

f) *Skewness*: este parâmetro mede a simetria da função densidade de probabilidade em torno da média. Um *skewness* negativo indica que a maior parte dos pontos encontra-se à esquerda da média enquanto que um *skewness* positivo indica que a maior parte dos pontos encontra-se à direita. O *skewness* é definido como o momento normalizado de terceira ordem da distribuição da amplitude e seu cálculo é dado pela Eq. (2.12):

$$S = \frac{M_3}{(M_2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (2.12)$$

onde:

$M_2$  = momento de segunda ordem da distribuição;

$M_3$  = momento de terceira ordem da distribuição.

g) Curtose: este parâmetro mede a dispersão da função densidade de probabilidade. Um valor de curtose alto indica pequena dispersão dos pontos e um valor de curtose pequeno indica que os pontos estão mais espaçados. Curtose é definida como o momento normalizado de quarta ordem da distribuição de amplitude e seu cálculo é dado pela Eq. (2.13):

$$K = \frac{M_4}{(M_2)^2} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^2} \quad (2.13)$$

onde:

$M_4$  = momento de quarta ordem da distribuição.

h) Função autocorrelação: é a medida do nível de semelhança de um sinal com outro sinal defasado e de mesma forma de onda a fim de se identificar os componentes periódicos presentes no sinal. Esta função é usada, algumas vezes, para diferenciar uma informação desejada (som, imagem ou dados) de um ruído. A Equação 2.14 determina a correlação entre observações separadas por um atraso  $k$  e  $r_k$  é o coeficiente de auto-correlação destes sinais.

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^{N-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.14)$$

i) Análise da distribuição de amplitude: é a indicação do número de sinais cuja amplitude cai numa faixa pré-definida. Vários valores são escolhidos e o número de eventos que ocorre em cada intervalo padrão é identificado.

Um dos métodos para o processamento do sinal de EA fora do domínio do tempo é o espectro de freqüências, que é composto por um infinito número de parâmetros (cada freqüência possui sua própria amplitude), auxiliando na caracterização das fontes dos fenômenos. O procedimento matemático para o cálculo do espectro de freqüência é a transformada rápida de Fourier (FFT), comumente usada em processamento de sinal de EA (Naerheim; Lan, 1988).

A análise do espectro de freqüência pode ser muito útil no monitoramento do desgaste da ferramenta e da rugosidade da superfície usinada. Dolinsek e Kopac (1999) em seu trabalho, empregando um sensor *water-jet* de EA, parâmetros de corte para acabamento e ferramentas de *cermet* e metal duro revestidas com TiN, verificaram que a faixa de freqüência sensível ao desgaste da ferramenta estava entre 100 kHz e 610 kHz e também mostram, como ilustra a Fig. 2.37, as freqüências que foram sensíveis aos diferentes estados de desgaste das ferramentas.

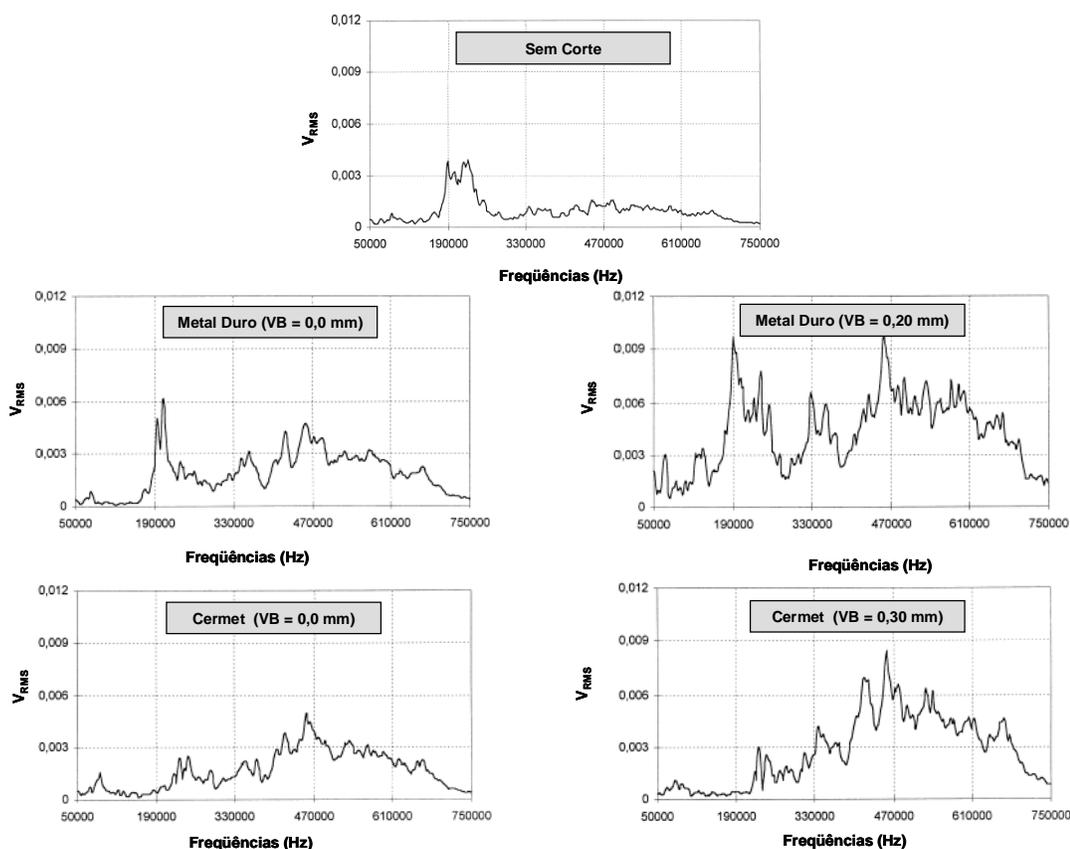


Figura 2.37 - Espectros de freqüência do sinal de EA para diferentes níveis de desgaste de flanco (Dolinsek; Kopac, 1999).

Rangwala e Dornfeld (1991-parte 2), empregando torneamento com corte ortogonal, mostraram que a análise do espectro de freqüência aponta um direcionamento do conteúdo (informações contidas no sinal de EA) para as altas freqüências quando as velocidades de corte são aumentadas. Porém, a partir de um certo valor limite de velocidade de corte, há uma mudança da direção da energia do sinal para as baixas freqüências devido ao efeito do amolecimento do material causado pelo aumento das temperaturas na região de corte. O efeito do avanço sobre a freqüência média ( $f_m$ ), causando uma diminuição de seus valores, só foi percebido a maiores velocidades. A freqüência média, que divide o espectro em duas partes iguais, é calculada conforme Eq. (2.15). O aumento do comprimento de contato entre a ferramenta e o cavaco causou um aumento da freqüência média e foi atribuído ao aumento da região de escorregamento na interface cavaco ferramenta.

$$f_m = \frac{\sum_{i=1}^n S_i f_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (2.15)$$

Onde:

$S_i$  = energia do sinal de EA a uma freqüência  $i$ ;

$f_i$  = freqüência qualquer que compõe o espectro;

$n$  = número de freqüências em que o espectro é construído.

#### 2.4.1 Monitoramento da usinagem através da emissão acústica

As principais fontes de emissão acústica na usinagem, mostradas na Fig. 2.38, são: o atrito cavaco-ferramenta, o atrito ferramenta-peça, a deformação da peça e a deformação e quebra do cavaco. Como o desgaste da ferramenta influencia todas estas fontes, seu aumento pode ser medido indiretamente pela medição de EA (Dornfeld, 1988).

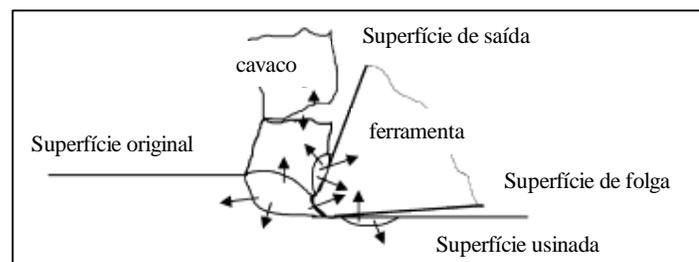


Figura 2.38 - Fontes de emissão acústica durante a usinagem (Li, 2002).

Segundo Lee et al. (2005), em usinagem de precisão, a EA pode ser atribuída a várias fontes na interface cavaco-ferramenta, como mostrado na Fig. 2.39. Segundo os autores, as fontes de EA, para a usinagem tradicional, são tipicamente geradas na zona de cisalhamento primária (região de cisalhamento situada imediatamente à frente da aresta de corte), na zona de cisalhamento secundária (região de contato entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta) e na região situada entre a superfície de usinagem e a superfície de folga da ferramenta. Para uma escala de espessura de corte da ordem de dezenas de micrômetros ou mais, grande parte do sinal é devido ao atrito e a fricção que ocorrem na zona de cisalhamento secundária e na região de contato da superfície de folga com a superfície em usinagem. Para uma usinagem de ultraprecisão, estes autores acreditam que a maior parte da geração de sinal de EA é originada através da interação da ponta da ferramenta com aspectos microestruturais

da peça, tais como vazios, inclusões, contornos de grão e deslocamentos de aglomerações de discordâncias na zona de cisalhamento primária.

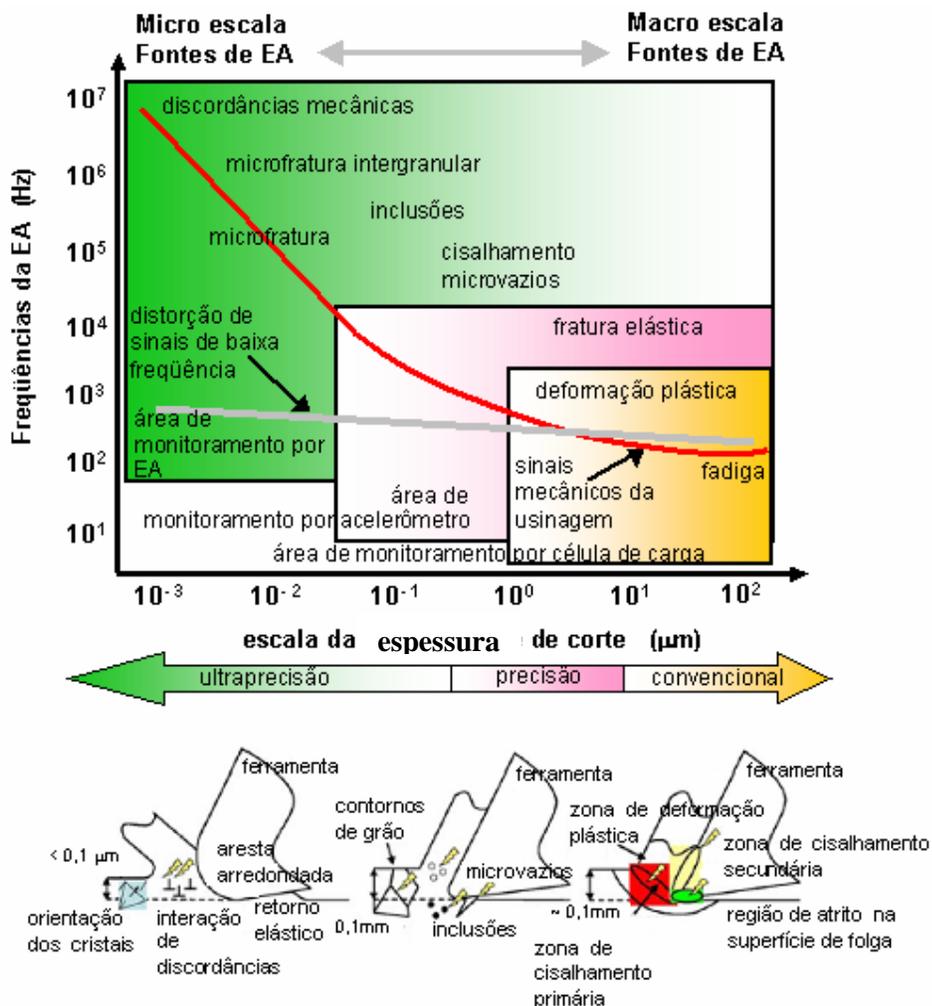


Fig.2.39 – Fontes de emissão acústica para algumas escalas de espessura de corte (Lee et al., 2005).

Para representar experimentalmente as aplicações da EA, estes últimos autores realizaram um trabalho de torneamento de precisão em que usinaram uma peça de cobre OFHC policristalino que tem grãos com média de  $250 \mu\text{m}$  de diâmetro. Em um mapa polar de intensidade luminosa montado com o sinal de EA, viu-se a boa correlação que este tem com a micrografia desta superfície após o ataque, como pode ser visto na Fig. 2.40. Com isto, eles concluíram que a técnica do mapa polar de EA além de servir como um sensor de contato da ferramenta, fornece meios de detecção de pontos ou áreas defeituosas na peça.

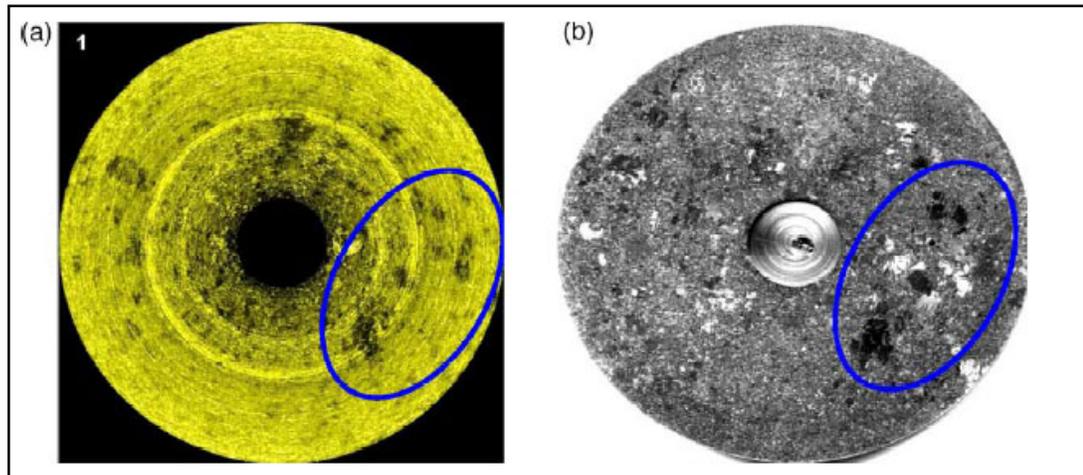


Figura 2.40 – (a) Mapa polar do sinal de  $EA_{RMS}$  para uma peça de cobre OFHC policristalino usinada pelo processo de torneamento de precisão. (b) Micrografia da mesma peça quimicamente atacada (Lee et al., 2005).

A emissão acústica tem sido usada para atingir vários objetivos em processos de usinagem. É usada no estudo dos fundamentos do processo de usinagem, como por exemplo, os mecanismos de formação do cavaco e também na investigação de alguns fenômenos de geração de energia no corte (cisalhamento e deformação plástica do cavaco além dos atritos contra as superfícies de folga e saída da ferramenta). Outra área onde a emissão acústica tem sido intensivamente investigada é no monitoramento *on-line* do desgaste da ferramenta e na detecção de fratura, tanto no torneamento como no fresamento. Na retificação, a EA é usada na operação de *spark-out*, vida do rebôlo, dressamento, controle de avanço e detecção do contato (Diniz, 1992).

No torneamento de acabamento, o aumento da rugosidade superficial pode ser também causado pelo aumento do desgaste da ferramenta. Como o desgaste tem sido objeto de estudo através de EA, esta também pode ser útil no monitoramento da rugosidade. A Figura 2.41 mostra a faixa de frequências (200 a 300 kHz) que foi mais sensível à evolução do desgaste e ao aumento da rugosidade (Diniz; Liu; Dornfeld, 1992).

No monitoramento do desgaste da ferramenta, a EA vem sendo bastante utilizada devido a importantes vantagens como (Dornfeld, 1988):

- . Custo relativamente baixo;
- . Dimensões reduzidas do sensor, o que o torna de fácil instalação e pouco intrusivo;
- . Faixas de frequência de aproximadamente 50 a 1000 kHz, um nível muito acima de vibrações mecânicas ou outros ruídos que estão envolvidos em um ambiente de manufatura.

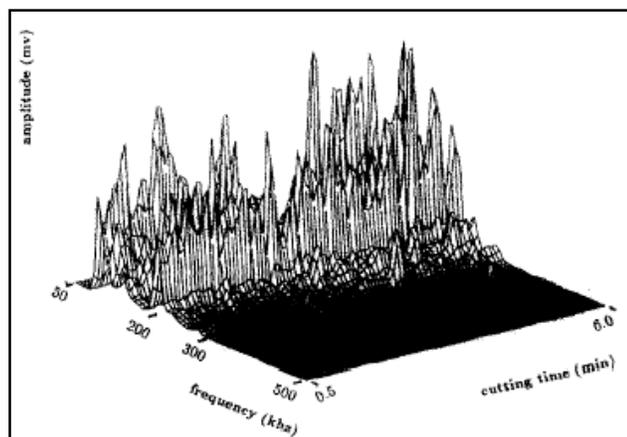


Figura 2.41 - Evolução do sinal de EA no tempo e na freqüência (Diniz, 1992).

Entretanto, o monitoramento da evolução do desgaste apresenta certas dificuldades, como a combinação do desgaste de flanco com o desgaste de cratera. É consenso o fato que o crescimento do desgaste de flanco implica no crescimento dos níveis do sinal de EA, devido ao aumento do contato entre a superfície de folga e a peça, resultando em um aumento do atrito nesta região. Mas também é consenso que, como o desgaste de cratera gera um aumento no ângulo de saída da ferramenta, facilitando assim o corte, este tipo de desgaste produz uma diminuição nos níveis do sinal de EA.

No fresamento, os sinais de pico são normalmente observados quando ocorrem a quebra do cavaco, quebra ou lascamento da ferramenta e na entrada e saída do ciclo ativo da ferramenta, enquanto os sinais contínuos decorrem da deformação plástica do material da peça e do cavaco. Portanto, fatores como a quebra e o lascamento da ferramenta e a quebra do cavaco são facilmente identificáveis, como citado anteriormente, pela presença repentina de picos de EA, seguidos de mudanças na intensidade do sinal (Lan; Dornfeld, 1984). Por outro lado, o desgaste da ferramenta é mais difícil de detectar devido à baixa intensidade do sinal, a presença de fontes de ruídos e sua dependência com os parâmetros de corte (Ravindra et al., 1997).

No brochamento, Axinte et al. (2004) mostram que um aumento na magnitude por volta de 110 kHz pode ser notado e isto pode ser creditado ao aumento das deformações plásticas associadas à formação do cavaco quando mais de um dente está cortando a peça simultaneamente.

Baseado nesta informação, uma análise do espectro de freqüências foi feita para o último dente da brocha, quando este é o único a tocar na peça. Como este dente tem a função de alisar a superfície, a baixa magnitude do sinal de EA a 110 kHz sugere que este dente

realmente apenas toca a superfície e não há nenhum corte. Conseqüentemente, nenhum pico de sinal é detectado nem na entrada nem na saída deste dente.

Em uma região onde dois ou três dentes estão cortando simultaneamente, o sensor de EA pode adquirir eventos específicos gerados pelo contato destes com a peça. Porém, é difícil identificar de qual dente este evento advém. Por isto, qualquer pico de sinal que aparecer nesta região durante o corte pode não ter a origem facilmente identificável.

Na brocha, mesmo tendo todos os dentes a mesma preparação, algumas diferenças podem ser notadas entre o espectro dos picos de sinal gerados na entrada e na saída do corte de cada dente. Este fato deve ocorrer, segundo os autores, devido a uma combinação de fatores: diferentes carregamentos por dente, diferentes níveis de desgaste e também pequenas diferenças na preparação das arestas. Análise de freqüência dos picos de sinal de EA associados à entrada/saída do dente na peça mostram diferentes comportamentos, especialmente quando se empregam ferramentas desgastadas.

Caldeirani Filho (1998) monitorou o fresamento através do sinal de  $EA_{RMS}$  e corrente elétrica do motor. Ao comparar os dois sinais com a evolução do desgaste da ferramenta, da maneira como estes sinais foram processados no trabalho, este concluiu que o sinal de corrente é o que acompanha melhor a evolução do desgaste. Segundo o autor, o sinal de EA é influenciado não só pela evolução do desgaste, mas também por outros fenômenos que acontecem durante o corte, fazendo com que a EA não acompanhe o crescimento do desgaste. Somente quando o valor do desgaste já é alto e a ferramenta já está bem próxima do final de vida (quando o critério de fim de vida permita que o desgaste atinja valores elevados) é que o sinal de emissão acústica apresenta alguma variação, diminuindo a possibilidade de tomada de decisão quanto à substituição da ferramenta.

A maioria das pesquisas realizadas adquirindo-se sinal de emissão acústica utiliza filtro RMS devido à sua relativa facilidade de processamento. Porém, este método de aquisição implica na perda de valiosas informações do sinal de EA. Além disso, os sinais adquiridos pelo sensor de EA são freqüentemente distorcidos por ecos, ressonâncias e por um acoplamento inadequado. Nestes casos, normalmente se usam ferramentas de deconvolução para predizer o sinal real emitido pelo processo (Webster et al., 1994).

Segundo Webster et al. (1994), o filtro RMS é aplicado como um filtro contínuo em várias janelas ao longo de todo o sinal bruto, portanto, ele não representa apenas um único valor médio do conjunto.

Oliveira e Dornfeld (2001) realizaram pesquisas com o sinal  $EA_{RMS}$  na retificação. Os autores usaram o sinal para criar um mapa de intensidade luminosa que se revelou muito útil na avaliação de alguns aspectos da retificação. Com o mapa eles conseguiram reproduzir e avaliar o dressamento, a topografia do rebôlo e o próprio processo de retificação.

A média de energia do sinal RMS da emissão acústica tem mostrado boa sensibilidade à velocidade de corte, dureza do material da peça e a lubrificação, mas é altamente afetado pela profundidade de corte e avanço no torneamento. Resultados similares podem ser tirados do fresamento, mas algumas considerações especiais devem ser feitas (Diei, 1984):

- . A natureza descontínua do corte introduz duas fontes adicionais de EA, uma na entrada e outra na saída da ferramenta da peça. O nível dos sinais nestas regiões é maior, o que resulta em picos do sinal de  $EA_{RMS}$ ;
- . A espessura do cavaco varia durante cada ciclo, gerando uma variação nas forças e nas condições de contato na superfície de saída;
- . Na saída da ferramenta, cavacos eventualmente podem aderir na ferramenta e são levados para a próxima entrada, causando um congestionamento de cavaco. Isto introduz variações aleatórias no nível e características do sinal gerado;
- . Em uma ferramenta multicortante, mais de uma aresta pode estar cortando ao mesmo tempo, implicando em altos níveis e mistura de sinais das arestas.

Webster et al. (1994) sugerem que, durante a retificação, o sinal de EA adquirido pode ser bem diferente daquele que acontece na região de corte. Razões para este fato incluem ecos, ressonâncias do sensor e também devido ao tipo de filtro passabanda aplicado, que podem alterar as características das ondas de deformação que propagam da zona de corte para o sensor. Este problema pode ser amenizado, segundo os autores, usando-se um filtro adaptivo. Este filtro é chamado RLS (*Recursive Least Square Filter*), no qual é implementado como um equalizador adaptivo. Um benefício significativo do filtro RLS é que pode ser usado para separar sinais de curta duração das distorções listadas acima.

O filtro adaptivo RLS trabalha o sinal de forma a produzir um sinal onde os impulsos não têm grande comprimento e, também, as propriedades tonais do sistema (por exemplo, o conjunto peça-sensor), através do qual o sinal propaga, sejam equalizadas. Então, o filtro RLS é implementado como um equalizador adaptivo e também como um inibidor de ecos.

Um filtro adaptivo RLS opera da seguinte forma (Webster et al., 1994):

- . Um sinal aleatório momentâneo (impulsivo) percorre a peça até a região de contato;
- . Este sinal torna-se distorcido ao passar para o sensor, através do sensor e pelo filtro passabanda;
- . A saída é armazenada em um sistema de aquisição de dados;
- . O sinal medido é constituído por uma parte tonal e outra estocástica;
- . A necessidade é separar a parte tonal (proveniente do sistema de aquisição) da parte estocástica (proveniente da usinagem);
- . São escolhidos então adequados comprimento de usinagem e fator de esquecimento;

- . Cada interação do filtro com os valores do sinal medido são usados para otimizar a predição de seu valor futuro (pelo método dos mínimos quadrados);
- . O sinal predito é subtraído do sinal medido levando a predição da seqüência de erro;
- . Os parâmetros do filtro são atualizados a fim de minimizar a seqüência do erro.

O sinal predito obtido do sinal bruto de EA combina bem com o sinal medido, indicando que o sistema de medição causa uma certa alteração no sinal originário do processo. Dados que contenham eventos tais como uma formação de trinca na superfície são evidenciados pelo filtro RLS. Sendo assim, este filtro é especialmente eficaz em detectar eventos transientes. Os autores deste trabalho acreditam que estes picos de liberação de energia, detectados apenas pelo filtro RLS, são resultantes da liberação de energia de deformação oriundas da trinca.

Neste mesmo trabalho, os autores também afirmam que um sistema de aquisição de sinais via EA com um filtro curtose é mais fácil de ser acomodado em uma máquina de produção que uma célula de carga usada para medições de carga. O sistema de aquisição de EA é também mais indicado que o sistema de aquisição de potência na retificação, pois sua resposta aos eventos ocorridos no processo de corte é muito mais rápida.

Resultados experimentais mostrados por Kannatey-Asibu e Dornfeld (1986) indicam que o aumento do desgaste da ferramenta resulta em um aumento do parâmetro *skewness* e uma diminuição do parâmetro curtose.

Blum e Inasaki (1990) procuraram relacionar, em seu trabalho realizado no corte ortogonal, a emissão acústica e parâmetros de corte para tentar identificar a proporção de cada fonte de EA originadas nas zonas de cisalhamento primário e secundário. Para isto, foi realizada também a aquisição da força, na qual foram relacionadas com a taxa de consumo de energia durante o corte nas zonas de cisalhamento já citadas. Através destas taxas de consumo de energia, foram realizadas comparações com o sinal de EA. O parâmetro usado para tratar o sinal de EA foi o *EA-mode*, que retira os valores intermitentes da aquisição, sobrando apenas o sinal contínuo. Os resultados mostraram boa correlação do sinal de EA com a energia consumida quando se varia a velocidade de corte, mas o mesmo não se verificou quando foi variado o avanço, o ângulo de saída da ferramenta e a profundidade de corte. Quando o sinal de EA é comparado com o desgaste de flanco, a EA mostrou uma relação melhor que as energias consumidas. Segundo estes autores, o nível de crescimento do sinal de EA é tão intenso que permite concluir que o desgaste de flanco não é originário apenas da abrasão, mas também de mecanismos como a adesão além da forte contribuição das severas condições (tais como elevados gradientes de temperatura e tensão) na fronteira entre a superfície da peça e a superfície de folga da ferramenta.

Segundo Dimla (2000), a EA gerada durante o corte é bem menor que a EA gerada quando ocorrem trincas ou fraturas na ferramenta. Portanto, uma das principais deficiências da aplicação da emissão acústica como indicador do estado da ferramenta está no fato que seu sinal é bem mais sensível às variações no ajuste das condições de corte e aos ruídos do que às condições da ferramenta.

Já Blum e Inasaki (1990) concluíram que, embora retirar informações sobre o estado do desgaste da ferramenta através dos sinais de EA seja uma tarefa difícil, a alta sensibilidade destes sinais os tornam superiores para esta tarefa que o monitoramento através dos sinais de força.

#### 2.4.2 Considerações a respeito de sensores de emissão acústica.

Normalmente, as aquisições de sinais de EA são realizadas por sensores piezoelétricos, mas diferentes tipos sensores para esta finalidade estão disponíveis. Porém, apenas alguns deles podem ser usados em uma máquina-ferramenta onde é comum encontrar um ambiente agressivo. As principais desvantagens dos sensores são que eles foram projetados para inspeções não-destrutivas ou para trabalhos de pesquisa e, portanto, eles podem não suportar agressões como altas temperaturas, grandes volumes de fluidos de corte e a abrasividade de colisões com o cavaco. Também é esperado de um sensor usado no monitoramento da usinagem que ele seja sensível a todas possíveis fontes de EA (Dolinsek e Kopac, 1999).

Dolinsek e Kopac (1999) apresentam um novo conceito de sensor, o sensor *water-jet* de EA. Este usa um jato de algum líquido, que pode ser um refrigerante, como meio de transmissão dos sinais de EA para o elemento piezoelétrico. Sendo pequena a distância entre a região de corte e o elemento transdutor, o efeito de amortecimento é minimizado e a razão entre o sinal e ruído melhorado.

Norman (2003), em sua dissertação de mestrado, afirma que é possível adquirir o sinal de emissão acústica sem que haja nenhum contato entre o sensor e a peça ou a ferramenta. Isto pode ser realizado através de um sensor *Laser Doppler Velocimetry* (LDV). Este sensor funciona enviando feixes padrões de laser (em x e em y) contra a superfície e processando as diferenças ao receber o sinal de volta.

Com relação à fixação do sensor de EA, Iwata et al (1977) afirmam que, nas operações de fresamento, deve ser feita na própria peça a ser usinada, pois a atenuação do sinal em função de sua localização em relação à distância de corte é insignificante.

Já Webster et al. (1994) perceberam durante seus ensaios experimentais que, com o posicionamento do sensor de EA na peça, o sinal irá crescer quando a ferramenta estiver cortando próxima do sensor. Porém, este problema não é simples de resolver. Uma possível solução para que a distância da região de corte variável não influencie na intensidade do sinal

de EA, no caso do fresamento, é colocar o sensor na torre da máquina-ferramenta. Esta solução mantém a distância sensor-fontes de emissão acústica constante. Contudo, ao se posicionar o sensor nesta região, algumas importantes freqüências do sinal podem ser perdidas, devido à ação de rolamentos, que atuam como filtros. Estes autores apresentaram como solução para atenuar este problema da variação da distância sensor-fonte e o efeito dos rolamentos na aquisição dos sinais de EA na usinagem o uso de um fluido de acoplamento na interface com a peça.

Beattie (1983) também afirma que uma fina película de algum fluido acoplante melhora a qualidade do sinal na interface do sensor com a superfície da peça. Segundo o autor, isto ocorre porque, como a onda acústica pode ser tratada como uma onda de pressão que se transfere entre o contato de duas superfícies (sensor e peça). Assim, o fluido acoplante aumenta a área de tensão e transfere uniformemente as ondas entre as duas superfícies.

#### 2.4.3 Considerações sobre o ruído no sinal de emissão acústica

Existem diferentes ruídos que aparecem em qualquer sinal adquirido e que devem ser identificados, atenuados ou mesmo eliminados. No caso da emissão acústica, o ruído mecânico (resultado da vibração dos componentes da máquina-ferramenta) é o que apresenta maior amplitude e aparece em freqüências abaixo de 100 kHz. Neste sentido, a filtragem no sinal (no caso, através de um filtro passa alta) deve ser realizado antes de qualquer amplificação (para não fortalecer este tipo de ruído). Ruídos eletromagnéticos com freqüências acima de 1 MHz são eliminados com a implementação de filtros passa baixa (Jemielniak, 2001). A Figura 2.42 mostra a cadeia de instrumentação para aquisição do sinal de EA na usinagem.

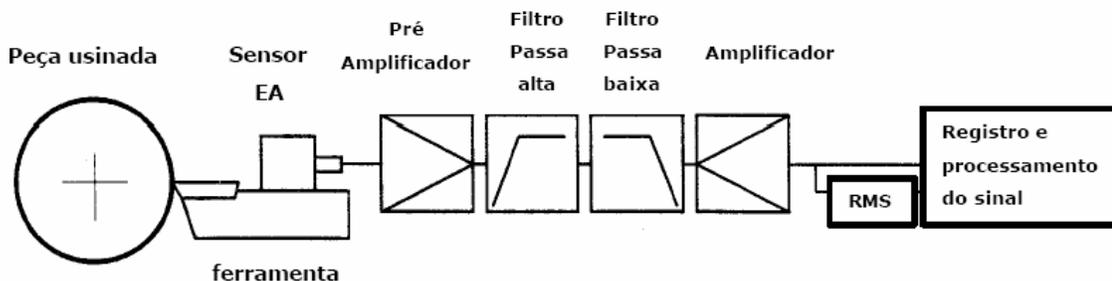


Figura 2.42 – Cadeia de instrumentação de um sinal de EA em usinagem (Jemielniak, 2001).

## 2.5 Redes Neurais Artificiais (RNA)

A verificação das condições de desgaste da ferramenta pode ser realizada via informação sensorial através do operador. Estas informações podem ser detectadas através da visão, da audição e até mesmo pelo olfato. O operador com boa experiência é capaz de realizar associações de um ou mais de seus sentidos com padrões empíricos do desgaste. Contudo, com o avanço tecnológico de máquinas ferramentas e ferramentas de corte, a necessidade de uma consistente melhoria na produtividade e o aumento da competitividade entre fabricantes fez do monitoramento dos processos e uma posterior tomada de decisão com rapidez e confiabilidade tornarem-se fundamentais.

Alguns dos métodos empregados para a tomada de decisão com relação ao andamento do processo são: reconhecimento de padrões, a lógica “Fuzzy”, árvores de decisão ou Redes Neurais Artificiais. Destes métodos, a Rede Neural Artificial (RNA) é um dos mais utilizados na usinagem devido a algumas de suas características que serão descritas no decorrer deste capítulo.

Através de uma analogia com o funcionamento do cérebro humano, foram criadas na década de 40 as Redes Neurais Artificiais (Pitts, 1943). Na usinagem, basicamente, uma RNA é treinada através de informações recebidas por sensores de monitoramento do processo acoplados à máquina ferramentas, tornando-a capaz de classificar, por exemplo, a condição de desgaste de uma ferramenta de corte.

Abordando de uma maneira mais detalhada, as RNAs consistem de uma rede de elementos de processamento de sistemas altamente não lineares em paralelo. Estes elementos são chamados neurônios, sendo que alguns são acessíveis para estímulos de entrada, outros permitem acessos às suas saídas e outros não são acessíveis, como mostrado na Fig. 2.44. As redes neurais artificiais têm tido grande aplicabilidade em sistemas não lineares de difícil solução por métodos tradicionais. Seu emprego para identificação, reconhecimento de padrões, classificação e modelamento em processos de corte vem obtendo excelentes resultados.

O procedimento neurocomputacional empregado nas RNAs tem duas diferenças básicas que o caracteriza e que o diferencia em relação aos algoritmos seqüenciais convencionais. A primeira é a capacidade de aprendizado através de exemplos e sem percepção prévia e explícita de conhecimentos (comportamento físico do processo), exceto pelo tratamento adequado dos dados de entrada. A segunda é a capacidade, após o treinamento, de generalizar durante a operação, fazendo com que ela seja capaz de responder corretamente a novos e desconhecidos estímulos, desde que pertençam ao mesmo domínio de estímulos empregados no treinamento.

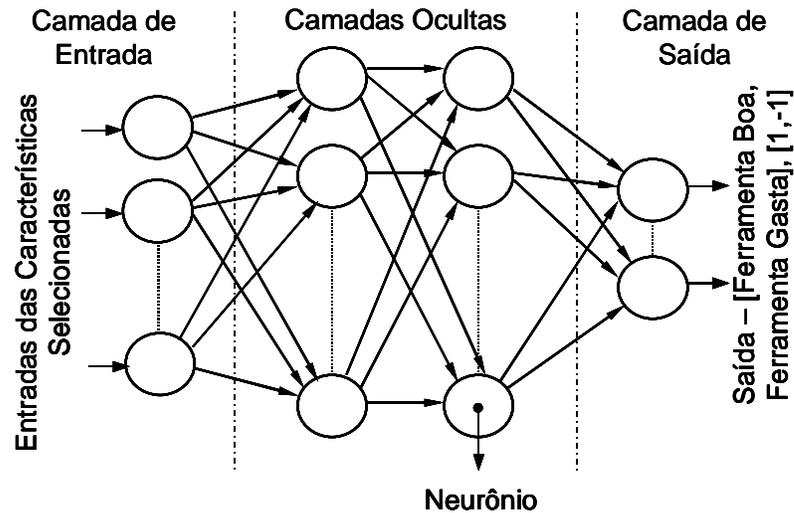


Figura 2.44 – Rede Neural *FeedForward* Multicamadas.

### 2.5.1 Considerações sobre uma rede biológica

As primeiras tentativas de se fazer uma analogia entre o funcionamento da rede de neurônios de um cérebro humano e um processamento computacional foram idealizados no início dos anos 40, em uma cooperação entre o psiquiatra e neuroanatomista McCulloch e o matemático Walter Pitts (1943).

O cérebro humano possui certas características que não estão presentes nos computadores com arquitetura centralizada de Von Neumann e mesmo em computadores paralelos modernos (Jain; Mao, 1996). Dentre estas características, pode-se citar:

- . capacidade de aprendizado;
- . capacidade de generalizar;
- . capacidade de adaptação;
- . paralelismo;
- . baixo consumo de energia;
- . e também é responsável por outras características do ser humano, tais como emoção, percepção, cognição além de controlar as funções motoras e autônomas.

Portanto, o que se espera da neurocomputação ou computação neural é que esta possua algumas das características e habilidades do cérebro humano. Problemas com reconhecimento de padrões, predição, otimização, memória associativa e controle são algumas das características que as RNAs possuem que podem ser associadas com o cérebro humano.

O neurônio biológico ou célula nervosa processa toda a informação que chega ao cérebro. Estas células são compostas por três seções: o corpo da célula e por dois braços, o axônio e os dendritos. Estes têm funções específicas e complementares. O corpo da célula é constituído de um núcleo e um plasma. O corpo carrega informações a respeito da natureza hereditária e o plasma produz material necessário ao neurônio. As informações e impulsos oriundos de outras células são recebidos e conduzidos até o corpo pelos dendritos. Ao chegar ao corpo celular, estas informações são processadas e então novos impulsos são gerados. O axônio (que funciona como um transmissor) se encarrega de transmitir estes impulsos em ramificações que podem se constituir de filamentos ou subfilamentos (dos Santos, 1998).

O córtex cerebral humano contém cerca de  $10^{11}$  neurônios massivamente conectados sendo cada neurônio conectado com  $10^{13}$  a  $10^{14}$  outros neurônios das cerca de  $10^{14}$  a  $10^{15}$  interconexões do cérebro. Estes neurônios se comunicam através de um curto (duração de milissegundos) trem de pulsos. A comunicação é modulada na frequência de transmissão de pulsos, que é algumas poucas centenas de *hertz*. Entretanto, em poucos milissegundos, um número elevado de decisões podem ser realizadas. Isto quer dizer que o cérebro humano processa um programa paralelo que está em torno de 100 passos para realizar uma tarefa de percepção. Como é tido que cada neurônio transmite a outro uma informação de poucos bits, esta informação é capturada e distribuída nas interconexões, e não diretamente transmitida.

### 2.5.2 Modelo genérico de um neurônio artificial

Uma RNA típica consiste de um sistema dinâmico que possui unidades de processamento (neurônios) interligadas de maneira lógica e em forma de camadas. Estas camadas de neurônios apresentam três níveis: uma camada hipotética de entrada, onde os dados são apresentados à rede mas não há nenhum processamento; uma ou mais de uma oculta onde os dados são processados; e uma camada de saída, que apresenta os resultados fornecidos pela rede.

Um neurônio artificial da rede, no modelo proposto por McCulloch-Pitts (1943), funciona com duas fases de processamento. Em uma primeira fase, é calculado o somatório do produto das entradas advindas das camadas prévias pelos pesos associados. Em seguida, na segunda fase, uma função não linear, denominada função de ativação, é aplicada ao resultado do somatório da fase preliminar. No modelo de McCulloch-Pitts, a função de ativação é dada pela função descrita na Eq. 2.16.

$$\sum_{i=1}^n x_i w_i \geq \theta \quad (2.16)$$

Onde  $n$  é o número de entradas do neurônio,  $x_i$  é a entrada e  $w_i$  seu peso associado e  $\theta$  é o limiar do neurônio. A Figura 2.45 representa o modelo de um neurônio artificial genérico.

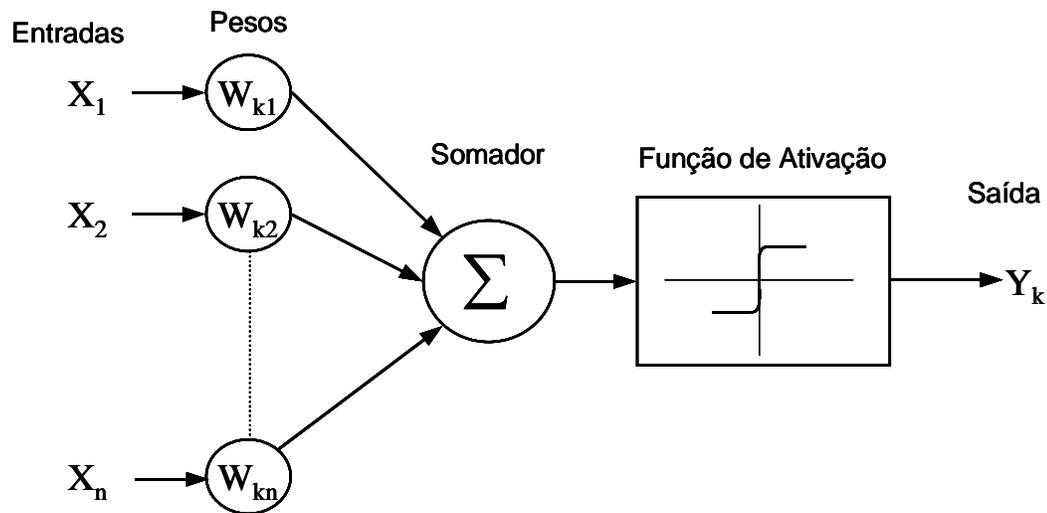


Figura 2.45 – Modelo de um neurônio artificial.

### 2.5.3 Funções de ativação

Em um neurônio, todos os sinais recebidos devem ser combinados para atingir o estado de ativação. O valor obtido da combinação de estímulos, obtido da Eq. 2.16, é chamado de entrada líquida. À entrada líquida, é aplicada a chamada função de ativação, acarretando a ativação propriamente dita do neurônio.

O grau de ativação de um neurônio não é necessariamente o mesmo de um segundo neurônio, mesmo que os dois recebam a mesma entrada líquida, pois existem diferenças de sensibilidade. Estas diferenças estão relacionadas com o limiar de ativação de cada neurônio. Este limiar provoca um deslocamento na função de ativação de modo a criar um aumento ou diminuição da sensibilidade do neurônio. O grau de ativação de um neurônio pode apresentar valores discretos, como é o caso dos valores de ativação binários (+1,-1), ou apresentar valores contínuos, restritos a um intervalo (0,+1).

A seguir serão apresentadas as funções de ativação mais importantes principalmente para os problemas relacionados aos processos de fabricação:

. Função Linear: função de ativação das mais simples (Eq. 2.17) e os valores para ativação são todos números reais. A Figura 2.46 representa graficamente este modelo de função de ativação.

$$f(x) = \alpha \cdot x \quad (2.17)$$

onde  $\alpha$  representa o número real que define a saída linear para os valores de entrada,  $f(x)$  é a saída e  $x$  é a entrada.

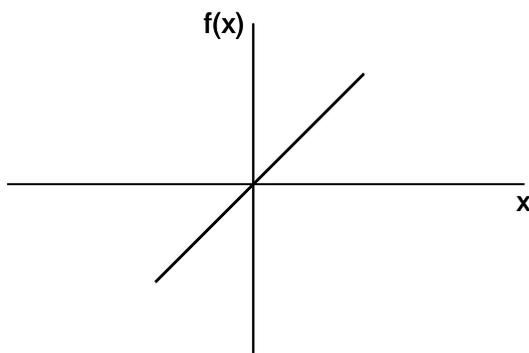


Figura 2.46 – Representação gráfica de uma função de ativação (linear).

. Função Rampa: é uma função linear (Eq. 2.18) que pode ser restringida para obter valores em uma faixa  $[-\gamma, +\gamma]$ , como mostrado na Fig. 2.47.

$$f(x) = \begin{cases} +\gamma & \text{se } x \geq +\gamma \\ x & \text{se } |x| < +\gamma \\ -\gamma & \text{se } x \leq -\gamma \end{cases} \quad (2.18)$$

Nesta função, os valores de máximo e mínimo são  $+\gamma$  e  $-\gamma$ , respectivamente.

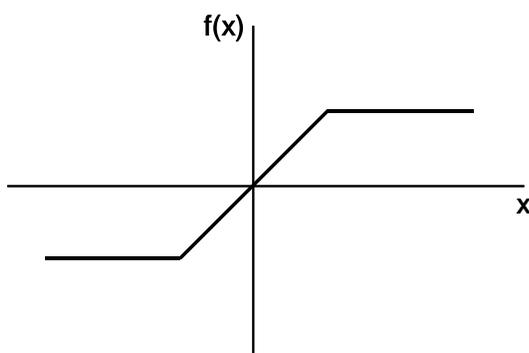


Figura 2.47 – Representação gráfica de uma função de ativação (rampa).

. Função Degrau: esta função produz uma saída  $+\gamma$  para valores de  $x$  maiores que zero e  $-\gamma$  para outros valores de  $x$  (Eq. 2.19). A Figura 2.48 reproduz graficamente a função de ativação degrau.

$$f(x) = \begin{cases} +\gamma & \text{se } x > 0 \\ -\gamma & \text{se } x \leq 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

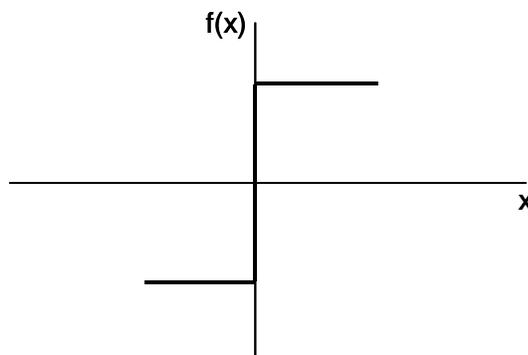


Figura 2.48 – Representação gráfica de uma função de ativação (degrau).

. Função Sigmoidal: é o tipo de função de ativação utilizada na maioria dos modelos de redes neurais existentes. Também conhecida como *S-shape*, confere grande capacidade de aprendizado devido a algumas características peculiares, tais como: ser uma função monotonamente crescente, de exibir suavidade, propriedades assintóticas, além de ser contínua e diferenciável em todo o seu domínio. Existem várias funções sigmoidais, porém uma das mais importantes e comumente usadas é a função logística (Eq. 2.20). A Figura 2.49 representa graficamente uma função de ativação sigmoidal logística.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{x}{T}}} \quad (2.20)$$

Onde o parâmetro  $T$  descreve a suavidade da curva.

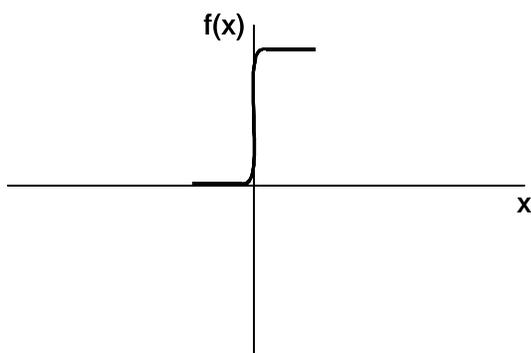


Figura 2.49 – Representação gráfica de uma função de ativação (sigmoide logística).

#### 2.5.4 Arquiteturas das redes neurais

Quando se quer solucionar um problema via RNA, deve-se fornecer para a rede a maior quantidade possível de informações deste problema. Isto deve gerar a utilização de um grande número de nodos para realizar sub-tarefas específicas. Contudo, este procedimento acarreta grande esforço computacional, gerando a necessidade de se buscar uma definição correta do número de nodos e a quantidade de conexões entre eles. Para isto, deve-se realizar uma otimização do número de camadas e do número de nodos por camada na definição da arquitetura da RNA a ser utilizada (Braga et al., 1998).

A arquitetura de uma RNA consiste de um arranjo entre camadas, ou seja, de como os neurônios estão interconectados e organizados. As interconexões entre os neurônios são realizadas através de pesos ( $w$ ). As camadas estão organizadas de forma que haja uma camada de entrada, uma ou mais camadas intermediárias ou ocultas e uma camada de saída.

A definição da arquitetura de uma RNA é um parâmetro importante na sua concepção, uma vez que esta arquitetura irá restringir qual o tipo de problema esta rede poderá tratar. Por exemplo, redes que possuem camada única de nodos só conseguem resolver problemas linearmente separáveis. Por sua vez, redes recorrentes são mais indicadas para resolver problemas que envolvem processamento temporal.

Para se definir a arquitetura de uma RNA, deve-se levar em conta os seguintes parâmetros: número de camadas da rede, número de nodos em cada camada, tipo de conexão entre os nodos e a topologia da rede (Braga et al., 1998).

Arquitetura das redes quanto ao número de camadas:

- . Redes de camada única: só existe um nó entre qualquer entrada e qualquer saída da rede;
- . Redes de múltiplas camadas; existe mais de um neurônio entre alguma entrada e alguma saída da rede.

Arquitetura das redes quanto ao tipo de conexão dos nodos:

- . Redes unidirecionais *feed-forward*: a saída de um neurônio na  $i$ -ésima camada da rede não pode ser usada como entrada em camada de índice menor ou igual a  $i$ .
- . Redes recorrentes *feedback*: a saída de algum neurônio na  $i$ -ésima camada é usada como entrada de nodos em camadas de índice menor ou igual a  $i$ .

Quanto à conectividade, as redes neurais podem ser classificadas como: redes fracamente ou parcialmente conectadas e redes completamente conectadas.

#### 2.5.5 Procedimento de aprendizado de uma rede neural

Uma RNA, para que se possa extrair a solução de uma tarefa, necessita de uma fase preliminar em que a ela é aplicado um aprendizado. Nesta fase, a rede irá extrair importantes informações de padrões que são apresentados. Com isto, a rede cria uma representação particular ao problema a ela apresentada.

O aprendizado consiste em um processo repetitivo de ajuste de parâmetros da rede, dos pesos das conexões entre as unidades de processamento. Ao final, estes parâmetros e pesos guardam o conhecimento que a rede adquiriu do processo em que ela está atuando.

Os principais métodos desenvolvidos para treinamento de rede são (Braga et al., 1998): o aprendizado supervisionado (e o aprendizado por reforço, que é um caso particular) e o aprendizado não-supervisionado (e o aprendizado por competição, que é um caso particular).

. Aprendizado supervisionado:

É chamado de aprendizado supervisionado porque as entradas e saídas da rede são fornecidas por um supervisor externo. Com isto, é possível ajustar os parâmetros de rede de maneira a encontrar uma relação entre os pares de entrada e saída que foram fornecidos.

O supervisor direciona o processo de treinamento fornecendo explicitamente o que é comportamento bom ou ruim para a rede. Então, a rede tem sua saída corrente comparada com a saída desejada e recebendo do supervisor, informação sobre o erro desta resposta.

Com o processo de comparação de padrões de entrada com a resposta desejada, ajusta-se os pesos das conexões para minimizar o erro. Esta minimização é incremental pois pequenos ajustes são feitos nos pesos para que estes convirjam para a solução. A soma de erros quadráticos de todas as saídas é normalmente utilizada como medida de desempenho da rede.

Contudo, o aprendizado supervisionado apresenta a desvantagem de, se não houver supervisor, novas estratégias para situações desconhecidas ou não cobertas pela rede não serão possíveis de aprender.

O aprendizado por reforço é considerado, já que a rede tem um retorno do ambiente, como um caso particular do aprendizado supervisionado, diferindo-se pela medida de desempenho.

No aprendizado por reforço, o aprendizado recebe um *feed-back* do ambiente, que é apenas um sim ou não. Isto é apenas uma avaliação de desempenho da rede sem o fornecimento de informações de como melhorar o desempenho. Este aprendizado pode ser considerado um aprendizado com crítica ao invés de aprendizado com professor, pois ele não dá nenhuma sugestão de como pode ser a resposta correta.

Os paradigmas de aprendizagem por reforço podem ser:

- . Aprendizagem associativa: o meio fornece outras informações além do reforço e um mapeamento, na forma estímulo-ação que deve ser aprendido.

- . Aprendizagem não associativa: o sinal de reforço é a única entrada que o sistema recebe do meio. O sistema seleciona uma única ação ótima, ao invés de associar diferentes ações com diferentes estímulos.

- . Aprendizado não supervisionado:

Neste aprendizado não há professor ou supervisor. Para este tipo de algoritmo, somente os padrões de entrada estão disponíveis para a rede. A partir do momento que a rede estabelece uma coerência com as regularidades estatísticas de entrada de dados, desenvolve-se nela a capacidade de formar representações internas para codificar características de entrada e criar novas classes ou grupos automaticamente. Isto só será possível quando os dados de entrada possuírem redundância, pois do contrário não haveria possibilidade de encontrar padrões ou características dos dados de entrada.

Existem alguns métodos para implementação do aprendizado não supervisionado, dentre eles: Aprendizado Hebbiano, Modelo de Linsker, Regra de Oja, Regra de Yille além do Aprendizado por competição.

No aprendizado por competição, caso particular do aprendizado não supervisionado, as unidades de saída de um padrão de entrada disputam entre si para serem ativadas. Portanto, existe uma competição entre as unidades de saída para saber qual delas terá sua saída ativada e seus pesos atualizados.

Por isso, as unidades que tiverem maior ativação inicial terão maior chance de vencer a disputa das outras unidades, que perderão o poder de inibição ao longo do tempo com relação à unidade de maior ativação.

### 2.5.6 Método *Backpropagation*

O método de treinamento *backpropagation* para redes neurais nasceu da necessidade de solucionar o fraco desempenho proporcionado pelas redes lineares, como uma alternativa às situações onde uma regressão linear era insuficiente para relacionar padrões de entrada aos padrões de saída.

#### . Redes *perceptron* multi-camadas (MLP)

Redes do tipo *perceptron* multi-camadas ou *multilayer perceptron* (MLP) apresentam um poder computacional muito maior do que aquele apresentado pelas redes sem camadas intermediárias ou escondidas. Estas podem tratar dados que não são linearmente separáveis. Teoricamente, redes com duas camadas intermediárias podem implementar qualquer função, seja esta do tipo linearmente separável ou não. Sua precisão e a implementação da função objetivo depende do número de nodos utilizados nas camadas intermediária.

Entende-se que as unidades intermediárias de uma MLP funcionam como detectores de características. Elas geram uma codificação interna dos padrões de entrada, que é então utilizada para a definição da saída da rede. Obtendo-se um número suficiente de unidades intermediárias, é possível formar representações internas para qualquer conjunto de padrões de entrada necessárias para implementar uma RNA (Braga et al., 1998):

- Uma camada intermediária é suficiente para aproximar qualquer função contínua.
- Duas camadas intermediárias são suficientes para aproximar qualquer função matemática.

O número adequado de nodos depende de vários fatores e geralmente é realizado empiricamente. Porém, alguns métodos tem sido empregados e devem levar em consideração os seguintes aspectos:

- Número de exemplos de treinamento;
- Quantidade de ruído presente nos exemplos;
- Complexidade da função a ser aprendida;
- Distribuição estatística dos dados de treinamento.

#### . Algoritmo *backpropagation*

O algoritmo *backpropagation* é empregado no aprendizado das redes MLP, sendo que a maioria das RNA's deste tipo utiliza alguma de suas variações. O *back-propagation* é um algoritmo de aprendizado estático, isto é, não altera a estrutura da rede, apenas variando os valores de seus pesos, diferentemente dos algoritmos dinâmicos, que podem alterar (aumentando ou diminuindo o número de nodos, camadas intermediárias e conexões) o

tamanho da rede. Além disso, este algoritmo utiliza pares de entrada e saída desejado para ajustar os pesos da rede, através de um mecanismo de correção de erros.

O treinamento ocorre em duas fases: a fase *forward* define a saída da rede para um dado padrão de entrada; a fase *backward* utiliza a saída desejada e a saída fornecida pela rede para atualizar os pesos de suas conexões. A seguir, um esquema de como funciona o algoritmo *back-propagation*:

- . Inicializar pesos e parâmetros
- . Repetir até o erro ser mínimo ou a realização de um dado número de ciclos:
  - . Para cada padrão de entrada X
    - . Definir saída da rede através da fase *forward*;
    - . Comparar saídas produzidas com as saídas desejadas;
    - . Atualizar pesos dos nodos através da fase *backward*.

Descreve-se matematicamente as fórmulas empregadas pelo algoritmo *backpropagation* para atualização dos pesos de uma rede MLP. A Equação 2.21 define o erro a ser minimizado:

$$E = \frac{1}{2} \sum (t_m - u_m)^2 \quad (2.21)$$

Onde  $E$  é o sinal de erro entre os valores reais desejados  $t_m$ , relativos ao padrão de entrada  $x_j$ , e as respostas estimadas pela rede  $u_m$ , dada na camada de saída.

Para cada neurônio “m” na camada de saída, e cada neurônio “k” na camada intermediária, os erros  $\delta_m$  e  $\delta_k$ , respectivamente, são dados pelas Eqs. 2.22 e 2.23:

$$\delta_m = u_m(1 - u_m) \cdot (t_m - u_m) \quad (2.22)$$

$$\delta_k = h_k(1 - h_k) \cdot \sum (\delta_m W_{km}) \quad (2.23)$$

Portanto, as mudanças incrementais nos pesos relativos à n-ésima interação ( $\Delta w(n)$ ) entre a m-ésima unidade da camada de saída e a k-ésima unidade da camada oculta, e entre a k-ésima unidade da camada oculta e a j-ésima unidade da camada de entrada, podendo ser definidas pelas Eqs 2.24 e 2.25:

$$\Delta W_{km}(n) = \eta \delta_m h_k + \alpha \Delta W_{km}(n-1) \quad (2.24)$$

$$\Delta W_{jk} = \eta \delta_k x_j + \alpha \Delta W_{jk}(n-1) \quad (2.25)$$

Onde  $\eta$  é a taxa de aprendizagem e  $\alpha$  é o fator de amortecimento momentum, que tem a função de diminuir mudanças mais bruscas no espaço dos pesos.

### 2.5.7 Rede Neural Probabilística (PNN)

Dentre os vários modelos de redes neurais artificiais existentes, a Rede Neural Probabilística ou *Probabilistic Neural Network* (PNN) foi o modelo escolhido neste trabalho. Os motivos de sua escolha serão apresentadas a seguir em uma breve descrição de sua história e características gerais.

O algoritmo padrão para as Redes PNN foi baseado na teoria dos Classificadores Bayesianos (desenvolvido nos anos 50) e descrito por Meisel em 1972. Este algoritmo leva em consideração a probabilidade relativa dos eventos ocorridos e usa esta informação para predição. As PNN também utilizam os conceitos de Estimadores Parzen, que foram desenvolvidos para construir as funções densidade de probabilidade requeridas pela teoria Bayesiana (Master, 1993).

Apesar de ser uma ferramenta extremamente poderosa, o algoritmo permaneceu no esquecimento em função das exigências de elevado processamento computacional. Entretanto, Specht (1990) mostrou que o algoritmo poderia ser implementado na forma de rede neural, bastando para isso, que fosse dividido em vários componentes individuais (neurônios ou processadores) para operação em paralelo. É esta capacidade de operação em paralelo que permite a associação do algoritmo de Meisel (1972) à uma rede neural, pois a grosso modo, as PNN operam segundo conceitos consolidados da estatística tradicional (Master, 1993).

A PNN é intrinsecamente um algoritmo projetado para executar tarefas de classificação, sendo treinada para avaliar amostras desconhecidas e associá-las com uma determinada classe do conjunto de treinamento.

A classificação de padrões consiste basicamente na alocação de eventos a grupos, ou classes, pré-identificados, com características similares. A classificação é efetuada utilizando como base toda a informação disponível sobre o fenômeno analisado, proveniente de sua classificação. A utilização de um maior número de parâmetros de caracterização aumenta a capacidade discriminatória entre os eventos pelo aumento da dimensão dos dados de análise (Fernandes; Alves; Junior, 2005). Então, a partir de um classificador de padrões, cada evento é avaliado e passa a pertencer a uma determinada classe.

As redes neurais diretas com múltiplas camadas também são excelentes classificadoras. De qualquer forma, apresentam dois problemas: o primeiro é o desconhecimento da forma de operação e o comportamento esperado do mesmo. O segundo e mais sério, é a velocidade de treinamento da rede, a qual pode ser extremamente baixa. Por outro lado, as PNN têm um modelamento matemático consolidado, são treinadas rapidamente e classificam significativamente bem, comparadas com as redes diretas de múltiplas camadas (Master, 1993).

As principais desvantagens das redes probabilísticas são a relativa lentidão para classificar e a exigência de grande quantidade de memória computacional. No entanto, como foi mencionado anteriormente, uma PNN pode ser implementada através de vários processadores, facilitando a implementação da máquina.

Na Figura 2.50 são apresentadas duas classes ( $\clubsuit$ ,  $\diamond$ ), onde a coordenada do eixo das abscissas de um elemento qualquer de uma das classes é definida por uma variável, ao passo que a coordenada do eixo das ordenadas é definida por outra variável. Se uma amostra desconhecida (?), como observado na figura, for apresentada a um classificador que avalia apenas tendências centrais, a mesma será classificada como ( $\diamond$ ), enquanto que esta amostra pertence verdadeiramente à classe dos ( $\clubsuit$ ).

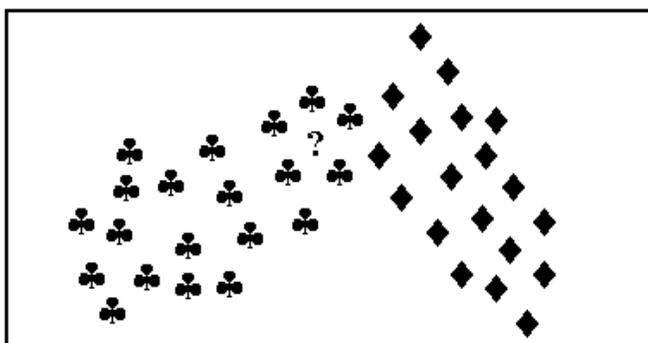


Figura 2.50 - Exemplo de um problema de classificação: tendências centrais (Meola, 2005).

Um método que calcula a distância entre a amostra desconhecida e todos os membros do conjunto de treinamento, chamado comumente de “classificador do vizinho mais próximo”, terá desempenho satisfatório num caso como este, entretanto, falha numa situação como a ilustrada na Fig. 2.51. Nesta, verifica-se que a amostra desconhecida (?) pertence à classe dos ( $\clubsuit$ ), a despeito de estar mais próxima de um membro da classe dos ( $\diamond$ ).

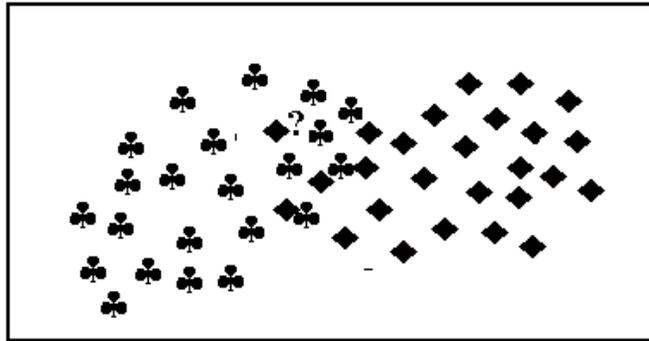


Figura 2.51 - Exemplo de um problema de classificação: vizinho mais próximo (Meola, 2005).

#### . Método de Classificação de Bayes

A rede neural probabilística tem como base o método estatístico de Bayes, o qual será detalhado a seguir.

Considerando-se uma coleção de amostras aleatórias de  $K$  populações, onde cada amostra, indexada de  $k=1, 2, \dots, K$ , é um vetor  $x=[x_1, x_2, \dots, x_m]$ . Num caso geral, admite-se que tais amostras tenham diferentes probabilidades, denominadas  $h_k$ . Quando um erro de classificação é cometido com um caso que certamente pertence à população  $k$ , o custo associado com este erro é  $c_k$ , entretanto, em muitos casos, segundo (Master, 1993), as probabilidades  $h_k$  são admitidas iguais para todas as amostras, e o mesmo é feito para o custo  $c_k$ .

A coleção completa é chamada de conjunto de treinamento, contendo  $n_1$  amostras da classe 1,  $n_2$  da classe 2 e  $n_k$  da classe  $k$ . Um algoritmo apto a associar corretamente uma amostra desconhecida à uma das classes do conjunto de treinamento, deve ser gerado a partir desse procedimento. O algoritmo taxado como um Bayes ótimo ocorre para o caso em que o mesmo tenha um custo de erro de classificação maior do que qualquer outro.

Prova-se que haverá uma regra de decisão de Bayes ótima caso seja fornecida a verdadeira função densidade de probabilidade (fdp) para toda a coleção de amostras. Faz-se a classificação de uma amostra desconhecida  $X$  como pertencente à uma classe  $i$ , como mostrado na Eq. 2.26, se:

$$h_i c_i f_i(X) > h_j c_j f_j(X) \quad (2.26)$$

para toda amostra  $j \neq i$ .

$f_k(X)$  trata-se da concentração (densidade) de membros da classe  $k$  ao redor da amostra desconhecida. De acordo com a regra de Bayes, deve-se favorecer a classe que possui maior

densidade de membros na vizinhança da amostra desconhecida. Há, no entanto, um problema da regra de Bayes, em que não se conhece a verdadeira fdp  $f_k(X)$ . Neste caso, deve-se utilizar uma estimativa para a fdp. Parzen (1962), apresenta um excelente estimador para a fdp unidimensional que converge para a verdadeira fdp quando o número de amostras cresce.

#### . Método de Estimativa da fdp

O estimador da fdp de Parzen utiliza uma função de ponderação  $W(d)$ , conhecida como função Kernel, a qual possui os maiores valores para  $d = 0$  e, decresce rapidamente com o valor absoluto de  $d$ . Um Kernel é centrado em cada ponto da amostra, com o valor de cada uma dessas funções, em uma coordenada  $x$ , determinado pela distância  $d$  entre  $x$  e o ponto da amostra. O estimador da função densidade de probabilidade da amostra é a soma escalonada destas funções para todos os casos da amostra.

Dada uma amostra de uma variável aleatória unidimensional de tamanho  $(n)$ , a sua fdp pode ser estimada segundo a Eq. 2.27:

$$g(x) = \frac{1}{n\sigma} \sum_{i=1}^n W\left(\frac{x - x_i}{\sigma}\right) \quad (2.27)$$

Onde  $\sigma$  é o parâmetro de escala que define a largura da curva sino centrada em cada membro da coleção de dados.

Para uma valor muito pequeno de  $\sigma$ , o estimador tende a valorizar os pontos amostrais demasiadamente, e para valores muito grandes, o estimador despreza quase que completamente a influência dos pontos amostrais vizinhos.

As propriedades impostas para as funções candidatas à janela Kernel foram estabelecidas por Parzen (1962) e Specht (1990), como segue:

- A função deve ser limitada e é dada pela Eq. 2.28

$$\max_x |W(x)| < \infty \quad (2.28)$$

- A magnitude de função de ponderação deve tender a zero à medida que o módulo do seu argumento aumenta. Tal restrição é representada pelas Eqs. 2.29 e 2.30:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |W(x)| dx < \infty \quad (2.29)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{\infty} |W(x)| dx = 0 \quad (2.30)$$

- A função de ponderação deve ser apropriadamente normalizada, atendendo à Eq. 2.31:

$$\int_{-\infty}^{\infty} W(x) dx = 1 \quad (2.31)$$

- A função de ponderação deve estreitar-se com o aumento do tamanho amostral, com intuito de se obter um comportamento assintótico. As Equações 2.32 e 2.33 representam ambas as condições que devem ser satisfeitas para o parâmetro de escala em função de  $n$ .

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \sigma_n = 0 \quad (2.32)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} n\sigma_n = \infty \quad (2.33)$$

A  $W(d)$  muitas vezes emprega a função Gaussiana, devido não à sua normalidade, mas ao fato de satisfazer as exigências do método Parzen, apresentar as conveniências matemáticas de ter bom comportamento e possuir facilidade no cálculo.

#### . Arquitetura e Funcionalidade da Rede Neural Probabilística

Numa rede treinada para executar tarefas de classificação, o número de entradas é exatamente igual ao número de parâmetros necessários para identificar uma determinada classe. A camada de entrada é fictícia, uma vez que seus neurônios não executam nenhuma operação. A camada de classificação é constituída de um neurônio para cada caso do conjunto de treinamento. O processo de classificação inicia com a apresentação da amostra desconhecida para todos os neurônios da camada de classificação. Cada neurônio de classificação calcula a distância medida entre a amostra de entrada e o caso do conjunto de treinamento ao qual ele está associado. Esta distância será o argumento da função de ativação do neurônio, que é necessariamente uma janela Parzen. Cada neurônio da camada de somatório simplesmente soma a saída dos neurônios da camada de classificação correspondente à sua classe. O nível de ativação do neurônio somador  $k$  é o valor da fdp estimada da população  $k$ . O neurônio da camada de saída é um classificador simples, que decide qual das entradas provenientes da camada de somatório possui o valor máximo.

#### . Rede Neural Probabilística aplicada na usinagem

Li et al. (2003) empregou uma PNN no diagnóstico do estado da ferramenta no processo de rosqueamento, além de outros aspectos típicos deste processo. O sinal empregado foi a corrente retirada diretamente do motor do eixo árvore. Após a aquisição do sinal, os autores aplicaram procedimentos matemáticos com a finalidade de primeiro, extrair características relevantes aos objetos de estudo do trabalho e, posteriormente, reduzir a dimensão e eliminar correlação entre as características selecionadas no primeiro estágio. Com os resultados desta primeira etapa, foi treinada uma PNN. As classes resultantes como resposta esperada pela PNN e seus respectivos sucessos são apresentadas na Tab. 2.3:

Tabela 2.3: Taxa de sucesso na classificação dos dados.

Classes:	Ferramenta Normal	Gasta	Furo Desalinhado	Furo Pequeno	Furo Grande	Média
Sucesso:	100%	100%	84,6%	86,7%	92,3%	93,1%

A Figura 2.52 descreve graficamente o sucesso na classificação da PNN. A classe 1 representa o macho de corte no estado normal, a classe 2 representa o centro do furo desalinhado em relação ao centro do macho de corte, a 3 um furo grande, a 4 um furo pequeno e a 5 uma ferramenta gasta. Observa-se que duas amostras que representariam a classe 2 foram classificadas nas classes 3 e 4. Da mesma maneira, uma amostra da classe 3 e outra da classe 4 foram classificadas como classe 2. Os autores acreditam que a razão do relativo insucesso da classe 2 (desalinhamento furo com o macho) é devido a baixa sensibilidade do sinal de corrente às forças laterais relativamente altas que aparecem quando ocorre o desalinhamento.

Axinte (2005) desenvolveu uma metodologia de detecção e classificação do mal funcionamento de uma ferramenta de brochamento. O sinal adquirido foi de força e o autor usinou ligas de níquel de aplicação aeroespacial. O sinal foi analisado no domínio do tempo e um programa desenvolvido por sua equipe extraiu suas características mais relevantes. Em seguida, uma PNN foi empregada para a classificação da ferramenta em 2 situações diferentes de desgaste: dente da brocha bom e dente gasto.

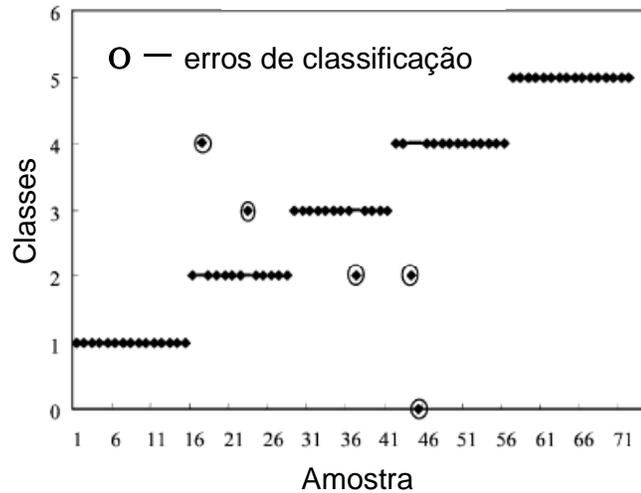


Figura 2.52 – Resultados da classificação da PNN (Li et al., 2003).

A Figura 2.53 representa graficamente os resultados obtidos pela PNN empregada neste trabalho. Nesta figura, a partir de certos valores de força, a PNN deveria classificar a condição do dente da ferramenta como gasta. Segundo o autor, a taxa média de sucesso de sua classificação foi de 92%.

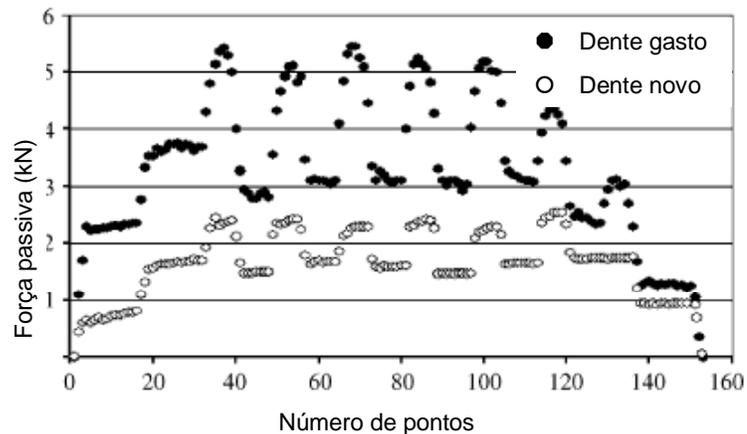


Figura 2.53 – Resultados da classificação da PNN (Axinte, 2005).

## Capítulo III

### Metodologia

Este capítulo tem como objetivo descrever os procedimentos experimentais adotados neste trabalho. A partir destes experimentos, obtiveram-se os resultados que serviram de base para a execução de análises e discussões a respeito do monitoramento da evolução do desgaste de flanco máximo ( $VB_{Bmáx}$ ) e até uma eventual falha em uma ferramenta durante o processo de fresamento, utilizando sinais de emissão acústica.

O trabalho foi realizado em três partes. Na primeira parte foram realizados ensaios para a verificação da possibilidade do emprego do sinal RMS de emissão acústica ( $EA_{RMS}$ ) no fresamento. Para isto, foram usadas diferentes quantidades de insertos na ferramenta e um mapa de intensidade luminosa montado a partir do sinal de EA. Na segunda parte deste trabalho foi utilizado o sinal bruto de emissão acústica e também foi avaliada uma metodologia para utilizá-la no monitoramento da condição de desgaste da ferramenta no fresamento. A primeira e segunda partes integram o objetivo central do trabalho. A terceira parte foi realizada no torneamento e utilizado o sinal RMS da emissão acústica. Foi analisada a correlação entre o sinal de emissão acústica e a rugosidade da superfície usinada para diferentes estágios de desgaste. Esta parte é considerada uma etapa paralela ao trabalho e é apresentada em Anexo único.

#### 3.1 Testes com o Sinal RMS da Emissão Acústica

Os testes foram realizados com o objetivo de facilitar a compreensão de como o mapa de intensidade luminosa montado através do sinal RMS de emissão acústica comporta-se quando os insertos de uma fresa apresentam diferentes estados de desgastes. Foram empregadas algumas combinações do número de insertos (2, 4 e 8, que é o limite da fresa). Também foram realizados testes para verificação do potencial do mapa de intensidade luminosa em outras aplicações no fresamento, tais como: batimento radial e axial, formação de rebarba, reprodução visual do corte em condições normais e com mudança de direção de avanço.

### 3.1.1 Materiais dos corpos de prova

Os experimentos desta tese consistiram basicamente no fresamento frontal de barras de aço microligados perlíticos de forja (DIN 38MnS6) otimizados com dimensões de 400x50 mm e altura de 100 mm, fornecidos pela Aços Villares e cuja composição química é mostrada na Tab. 3.1.

Tabela 3.1 – Composição química do aço microligado perlítico de forja DIN 38MnS6.

<b>Composição</b>	<b>Din 38MnS6 (% peso)</b>
<b>C</b>	<b>0,3800</b>
<b>Mn</b>	<b>1,5000</b>
<b>P</b>	<b>0,0240</b>
<b>S</b>	<b>0,0610</b>
<b>Si</b>	<b>0,5400</b>
<b>Ni</b>	<b>0,0600</b>
<b>Cr</b>	<b>0,1800</b>
<b>Mo</b>	<b>0,0300</b>
<b>V</b>	<b>0,0040</b>
<b>Al</b>	<b>0,0060</b>
<b>Cu</b>	<b>0,1500</b>
<b>Pb</b>	<b>0,0020</b>
<b>Ti</b>	<b>0,0017</b>
<b>Nb</b>	<b>0,0050</b>
<b>B</b>	<b>0,0007</b>
<b>Sn</b>	<b>0,0070</b>
<b>Ca</b>	<b>0,0005</b>
<b>H2</b>	<b>0,0002</b>
<b>N2</b>	<b>0,0159</b>
<b>Te</b>	<b>0,0027</b>

A microestrutura deste aço microligado é predominantemente perlítica, como pode ser observado na Fig. 3.1

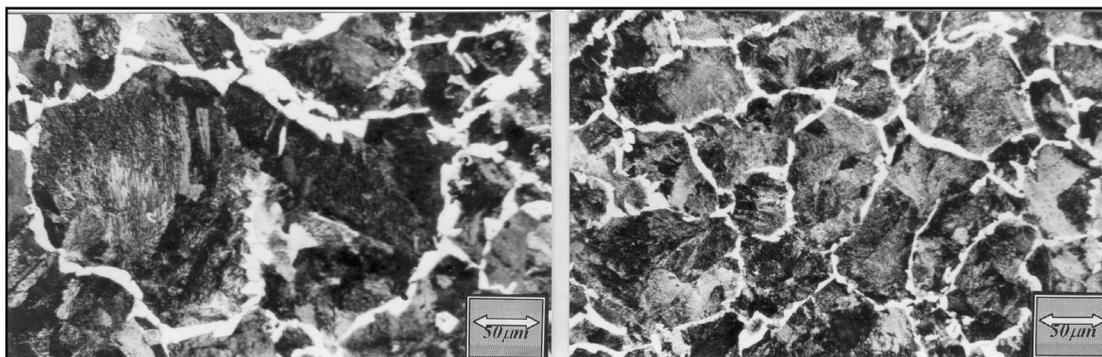


Figura 3.1 – Microestrutura do aço microligado perlítico de forja Din 38MnS6 otimizado. a) região central, b) região periférica.

A dureza dos materiais usinados foi medida sobre duas amostras, sendo cada uma retirada de barras diferentes. As amostras para medição de dureza possuíam as dimensões de 12x15x100 mm. Para monitoramento da variação da dureza ao longo da seção das duas amostras, tomou-se: o ponto central da amostra (ponto 0), 7 pontos acima com espaçamento aproximado de 6,5 mm entre eles e os 7 pontos simétricos abaixo. A Figura 3.2 ilustra a região do corpo de prova de onde foi retirada a amostra e os seus respectivos pontos para avaliação da dureza do aço. Na região de cada ponto da amostra, e para cada uma das amostras analisadas, foi medida a dureza Vickers duas vezes, com um durômetro universal da marca Wolpert sob uma carga de 20 Kg e tempo de permanência de 40 s. Para o cálculo da dureza ao longo da seção dos materiais, tomou-se a média dos valores da dureza obtidos para a região central e a média dos pontos simétricos, para as duas amostras. A Tabela 3.2 traz a dureza média do ponto central e dos pontos periféricos simétricos para o aço empregado como corpo de prova neste trabalho.

Também foram utilizados outros metais ao longo dos ensaios. O sinal de emissão acústica foi monitorado durante o fresamento de um bloco de motor. Este ensaio teve por finalidade a visualização do corte através de um mapa de intensidade luminosa obtido a partir deste sinal. Os blocos foram fornecidos pela TEKSID, do grupo Fiat. É fabricado segundo norma UNI – Ferro Fundido Cinzento Lamelar GH190 e possui as seguintes características (fornecidas pelo fabricante):

- . Dureza Brinell –  $D_R = 190$  a  $240$  HB;
- . Tensão de ruptura (mínima) -  $\tau_R = 255$  N/mm<sup>2</sup>;
- . Módulo de elasticidade –  $E = 117700$  N/mm<sup>2</sup>.

Os resultados desta etapa podem ser vistos no capítulo IV.

No torneamento, foi empregada uma barra de aço ABNT 1045. Maiores detalhes desta etapa do trabalho pode ser visto no Anexo.

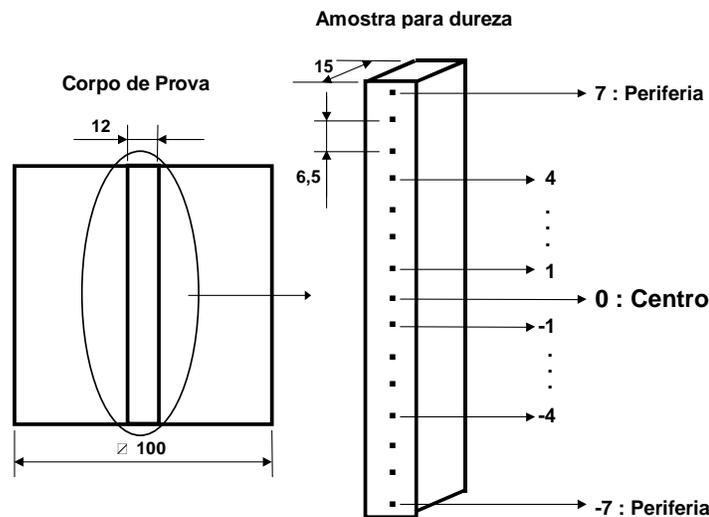


Figura 3.2 – Amostra para obtenção da dureza do aço usinado Din 38MnS6 e os respectivos pontos de medição da dureza.

Tabela 3.2 – Variação da dureza Vickers do aço microligado perlítico de forja ao longo da seção transversal.

Material	0 (centro)	1	2	3	4	5	6	7 (periferia)	Média	Desvio Padrão	Nº de dados
Din 38MnS6 (otimizado)	258	254	256	256	258	264	256	260	258	3,1	8

### 3.1.2 Condições de corte e especificações da ferramenta

A operação de fresamento consistiu na usinagem da peça ao longo de toda sua maior dimensão, como pode ser visto no esquema apresentado na Fig. 3.3. Este procedimento foi adotado para todos os ensaios com o sinal bruto de emissão acústica e para algumas situações em que este sinal foi adquirido com o filtro RMS.

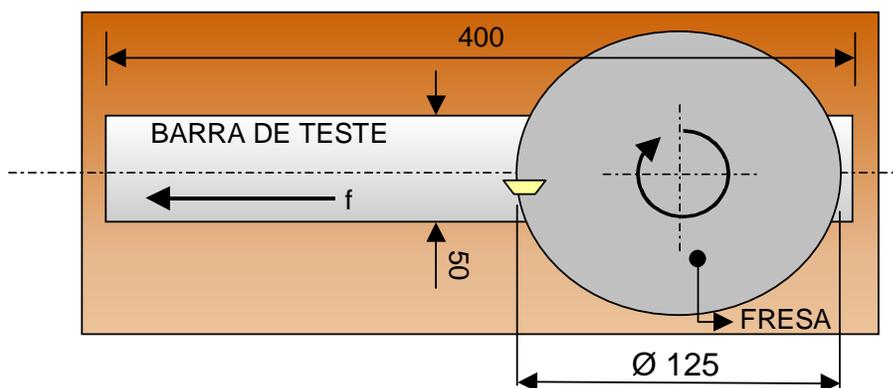


Figura 3.3 – Esquema do fresamento frontal e dimensões da peça empregados neste trabalho.

Alguns ensaios com mudança de direção de avanço também foram realizados. Esta mudança de direção foi realizada com o objetivo de avaliar como este procedimento se reproduziria no mapa. Nestes ensaios, a ferramenta entra pela lateral, no início da peça, depois a percorre longitudinalmente (Figs. 3.4a e b). O *trigger* e o espelho refletor do laser foram ajustados para que não houvesse a mudança de coluna na construção do mapa enquanto um dos insertos estivesse na fase ativa da primeira direção de avanço. Como o *trigger* estava montado no cabeçote do centro de usinagem, acompanhando os movimentos da fresa, o ajuste anterior faz com que haja uma interrupção na representação gráfica da fase ativa de um dos insertos quando ocorre a mudança de direção. Foram utilizados dois insertos em uma barra com 100 mm de largura, contra 50 mm dos outros ensaios. Aqui foi adquirido apenas o RMS do sinal de emissão acústica.

As operações de fresamento foram realizadas em um centro de usinagem CNC Romi *Discovery 760*, que possui potência máxima de 11 kW (15 cv), variação contínua de velocidade de corte e avanço, capacidade máxima de rotação do eixo árvore de 10.000 rpm e avanço rápido de até 25.000 mm/min. A fresa utilizada é uma R245 125Q40-12M de 125 mm de diâmetro, fabricada pela *Sandvik Coromant*, em que podem ser instalados até oito insertos. Os insertos de metal duro empregados têm especificação R245-12 T3 M-PM 4030, classe P, também fabricados pela *Sandvik Coromant*, possuem quatro arestas de corte e quatro arestas alisadoras e são revestidas com nitreto de titânio (TiN).

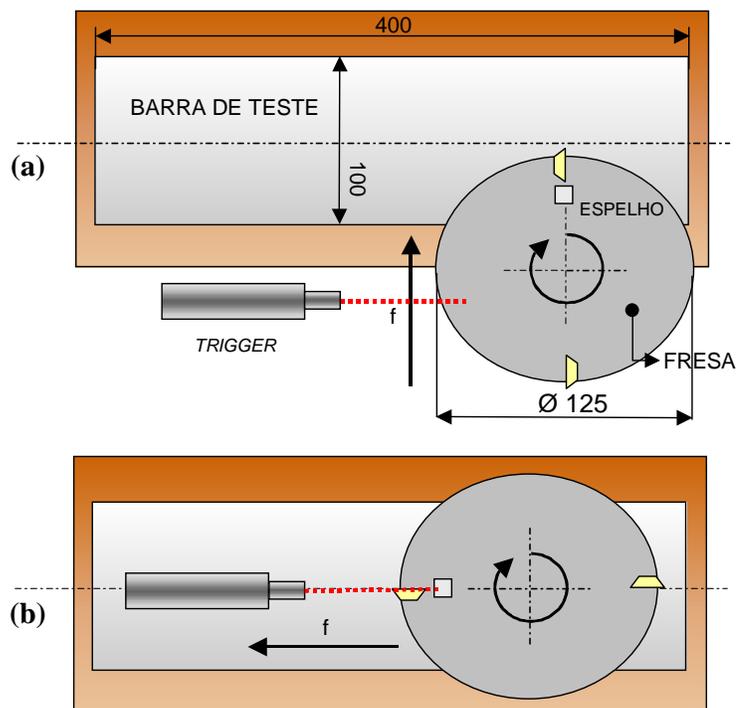


Figura 3.4 – (a) Direção de avanço inicial do fresamento; (b) Direção de avanço final do fresamento.

As condições de corte empregadas nos experimentos são mostrados na Tab. 3.3:

Tabela 3.3 – Condições de corte empregadas para os testes.

teste	$V_c$ (m/min)	$a_p$ (mm)	$f_z$ (mm/volta)
1 (desbaste)	205	1,5	0,24
2 (intermediária)	250	1,0	0,20
3 (acabamento)	300	0,5	0,16

Estas condições foram escolhidas com a finalidade de se criar condições extremas de usinagem. Portanto, uma condição mais severa, que é a de desbaste, uma bem mais suave, que é uma condição de acabamento e uma terceira, intermediária, criada com intuito de se obter um campo mais abrangente de resultados.

O desgaste foi medido a cada cinco passadas da fresa sobre o corpo de prova. As medições do desgaste de flanco máximo foram realizadas em um microscópio ferramenteiro construído no próprio laboratório, com uma resolução de 0,01 mm.

### 3.1.3 Aquisição dos sinais de emissão acústica

A aquisição do sinal de emissão acústica foi realizada a partir de um sensor de EA conectado na peça e um condicionador de sinais DM 42 (com quatro canais de entrada e um canal de saída que fornece sinal RMS e outro canal de saída que fornece o sinal bruto). No condicionador de sinais foi ajustada uma constante de integração de 0,2 milisegundos para o sinal RMS gerando uma amostragem de 50 k/seg. Estes equipamentos citados foram fabricados pela Sensis. Os sinais RMS da emissão acústica adquiridos eram enviados a um bloco de conectores BNC-2110 e a seguir para uma placa de aquisição NI-DAQ PCI-6035E que possui uma taxa de amostragem de 200 kS/s ou para a placa NI-DAQmx PCI-6251M, que possui uma taxa de amostragem de 1,25 MS/s, indicada para a aquisição do sinal bruto de EA. Estes últimos equipamentos citados foram fabricados pela *National Instruments*.

O sensor de emissão acústica possui um núcleo composto por dois cristais piezoelétricos. A frequência de ressonância de cada cristal individualmente é de 1 MHz. Os sinais dos cristais são adquiridos de forma diferencial, a fim de eliminar ruídos. Posteriormente, o sinal é amplificado com ganho 200 pelo pré-amplificador que fica embutido no sensor. Dessa forma, este sensor fornece um sinal de baixa impedância e grande sensibilidade para o monitor. A faixa de frequência do sinal é de 100 kHz a 500 kHz.

A primeira fase deste trabalho foi realizada e avaliada exclusivamente com sinais RMS da emissão acústica em virtude principalmente do número mais baixo de pontos adquiridos, o que facilita o processamento e o armazenamento dos dados para os computadores. Este procedimento não influencia em uma das mais importantes informações que se buscou avaliar, que é o nível da energia do sinal (que é o próprio RMS) de emissão acústica que o processo está gerando.

Um instrumento virtual, baseado no *LabVIEW*, foi criado para que se efetuasse a aquisição, armazenamento dos pontos e montagem de um mapa de intensidade luminosa. O mapa de intensidade luminosa é construído da seguinte maneira: os pontos da aquisição de  $EA_{RMS}$  são agrupados a cada rotação completa da fresa. O sinal de emissão acústica é então transformado em um gráfico de intensidade luminosa. Os gráficos individuais, por cada volta da fresa, são então posicionados lado a lado, formando um mapa que se completa após um passe completo na peça. Um exemplo de um mapa de intensidade luminosa pode ser visto na Fig. 3.5. Para transformar o sinal de emissão acústica em gráfico de intensidade luminosa foi

utilizado um software desenvolvido no NUMA – Núcleo de Manufatura Avançada, da USP de São Carlos.

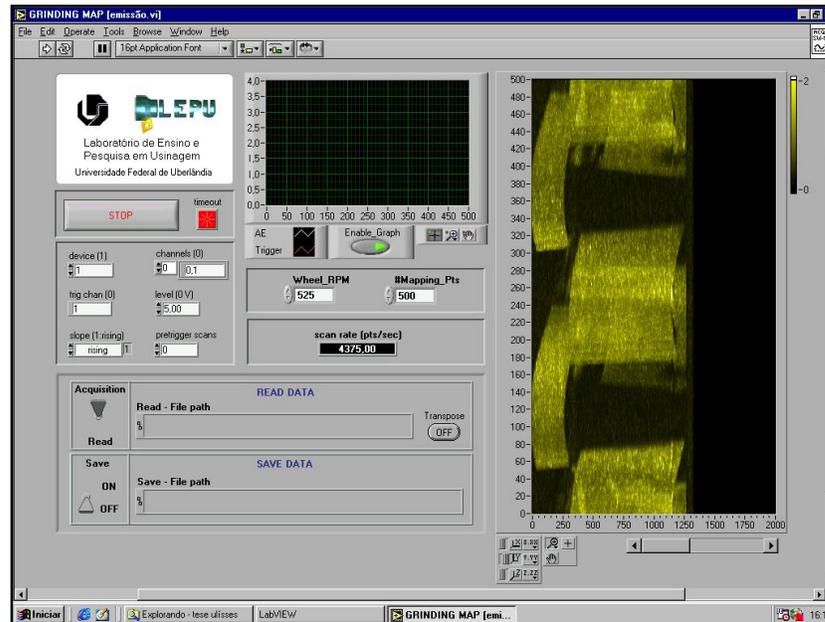


Fig. 3.5 – Exemplo do mapa de intensidade luminosa gerado a partir do sinal de  $EA_{RMS}$  representando o fresamento de uma barra com dois insertos.

Onde houver maior intensidade de EA em determinada volta (no fresamento será na fase ativa de cada pastilha), na linha correspondente a esta volta aparecerá uma região de maior luminosidade representando o aumento de intensidade do sinal de emissão acústica. As regiões de luminosidade menos intensa indicam que houve um menor nível de emissão. Se a região estiver negra, não foi adquirido nenhum sinal de EA (indicando que nesta região não ocorreu nenhuma fonte de EA, que no caso do fresamento corresponde à fase inativa ou um vazio na peça). Com a evolução do corte, o mapa vai sendo gerado e tem-se uma autêntica fotografia do que ocorreu no processo em termos da emissão acústica. Neste mapa, a abscissa corresponde ao número de voltas da ferramenta durante o tempo de aquisição e a ordenada representa o número de pontos adquiridos a cada volta. Porém, no mapa, o número de voltas será sempre ligeiramente menor ao número de voltas realizados na operação do fresamento. Este fato ocorre devido às limitações de processamento e armazenamento de dados que o computador tem, dificultando para o aplicativo montar o mapa.

Para a construção do mapa de intensidade luminosa houve a necessidade de construir um dispositivo para detectar os giros da fresa e possibilitar ao *software* separar os pontos da aquisição a cada revolução. Este dispositivo é o *trigger*, que para este trabalho, foi desenvolvido e construído nas instalações do LEPU. Este *trigger* consiste basicamente, como visto na Fig. 3.6, de uma fonte de *laser*, um fotodiodo e um anteparo reflexivo (foi usado um pequeno espelho). Com a fonte do *laser* ligada, o seu feixe será refletido quando o espelho montado no corpo da fresa passar na sua direção. Um fotodiodo posicionado em um ângulo adequado irá captar este feixe refletido. Ao captar o feixe, o fotodiodo mandará um pulso para a placa de aquisição, avisando que uma rotação se completou e outra esta sendo iniciada, criando assim o sincronismo necessário para a construção do mapa.

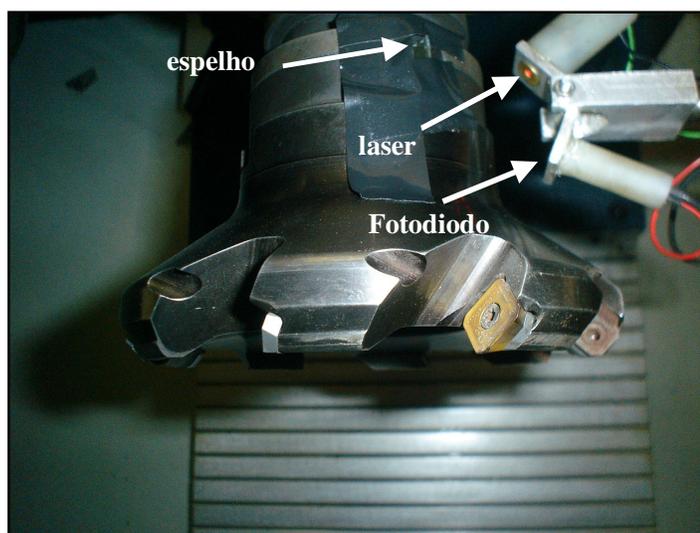


Figura 3.6 – Dispositivo (*trigger*) de sincronização de voltas para a montagem do mapa de intensidade luminosa.

A Figura 3.7 representa todo o esquema de montagem dos dispositivos para a aquisição do sinal RMS de emissão acústica.

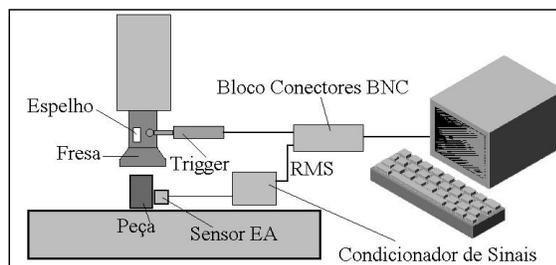


Figura 3.7 – Representação esquemática da montagem dos sistemas de aquisição de  $EA_{RMS}$ .

### 3.2 Testes com o Sinal Bruto de Emissão Acústica

Estes testes também foram realizados na operação de fresamento. Com os resultados desta parte do trabalho foram realizadas as análises do sinal bruto de EA para fins de monitoramento da evolução do desgaste de flanco. Aqui se empregou apenas o sinal bruto de EA.

Nestes ensaios foi empregado apenas um inserto de cada vez para que não houvesse a sobreposição das informações contidas na aquisição do sinal de mais de uma aresta, que poderiam estar em diferentes estágios de desgaste. Além disto, esta sobreposição poderia conter eventuais diferenças de batimentos radiais e axiais que porventura pudessem influenciar o sinal de EA adquirido.

Os sinais adquiridos nesta parte do trabalho foram adquiridos, armazenados, tratados e avaliados como o mostrado na Fig. 3.8.

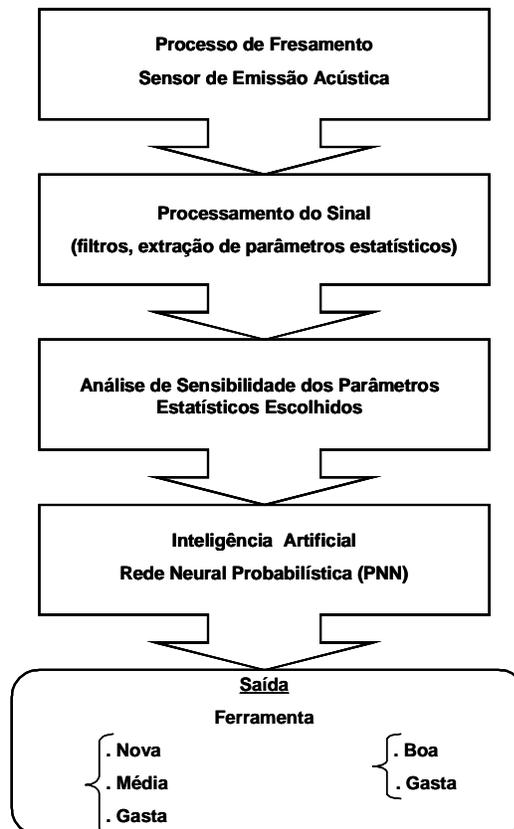


Figura 3.8 – Esquema do emprego do sinal de emissão acústica no monitoramento do desgaste.

### 3.2.1 Condições de corte, especificações da ferramenta e estágios de desgaste

Utilizou-se as mesmas condições de corte e ferramentas descritas na seção 3.1.2 e empregou o material (aço microligado) descrito na seção 3.1.1. Porém, foram estabelecidos estágios de desgaste com a finalidade de observar como o sinal de emissão acústica se apresenta em cada uma delas. Estes estágios foram criados levando-se em consideração a experiência adquirida em ensaios preliminares em relação à evolução do desgaste dos insertos empregados usinando o aço microligado.

A Tabela 3.4 apresenta os estágios de desgaste utilizadas neste trabalho. Para simplificar e reduzir espaços dentro de tabelas e figuras, as ferramentas sem nenhum desgaste anterior, as com desgaste intermediário e as com desgaste elevado serão nomeadas respectivamente de: nova, média e gasta.

Tabela 3.4 – Valores de desgaste da ferramenta em que foram realizadas aquisições de EA.

Estágios do desgaste (1º situação)	valor de $VB_{Bmáx}$
Nova	0 (primeira passada)
Média	entre 0,20 e 0,30 mm
Gasta	acima de 0,40 mm
Estágios de desgaste (2º situação)	valor de $VB_{Bmáx}$
Boa	entre 0 e 0,30 mm
Gasta	acima de 0,40 mm

A segunda situação apresentada na tabela é apenas uma fusão dos dois primeiros estágios, nos quais o sinal de emissão acústica foi adquirido para apenas dois estágios de desgaste das ferramentas, ferramenta boa ou gasta. O critério de final de vida estabelecido foi de 1,00 mm de  $VB_{Bmáx}$ , valor habitualmente empregado para ferramentas de metal duro (Norma ISO 8688-1 1989) ou a ocorrência de uma falha catastrófica.

Ao final de cinco passadas, a fresa era retirada do centro de usinagem e efetuado as medições de  $VB_{Bmáx}$ . No momento que o desgaste atingia uma das faixas descritas na tabela anterior, era realizada uma aquisição de EA durante a primeira passada do novo ciclo. A Figura 3.9 apresenta resumidamente como foram realizados os ensaios deste trabalho.

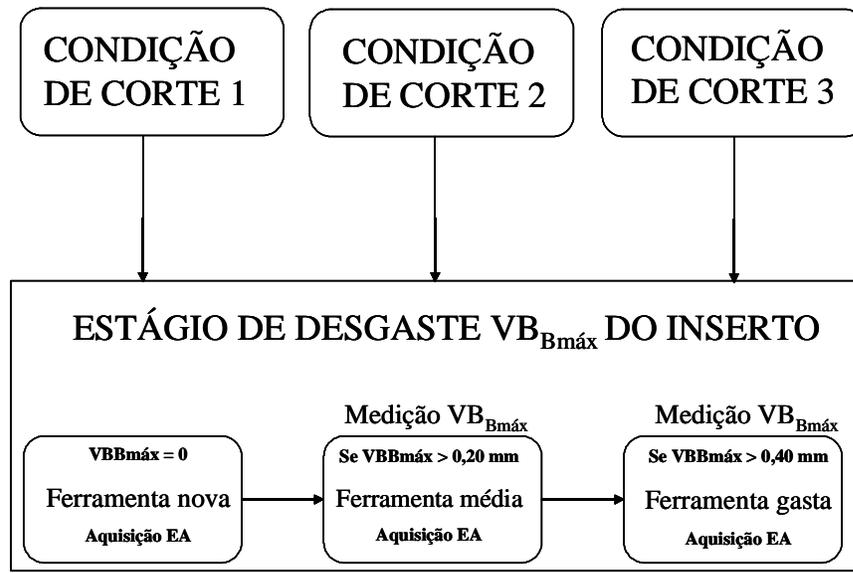


Figura 3.9 – Representação esquemática da metodologia do trabalho.

### 3.2.2 Processamento do sinal

A taxa de aquisição para o sinal bruto foi empregada observando-se a literatura existente, já citada na revisão de emissão acústica (capítulo 2 – Revisão Bibliográfica), de que a faixa dentro das frequências de 50 kHz até 500 kHz representa bem os fenômenos presentes na usinagem convencional. Portanto, a taxa empregada na aquisição do sinal bruto foi de 1 MHz. Durante a aquisição, os parâmetros empregados no condicionador foram: filtro passa-alta de 50 kHz, ganho de entrada de 1 unidade e ganho de sinal de 5 unidades. Estes parâmetros não foram mudados ao longo dos experimentos.

A Figura 3.10 mostra a interface do instrumento virtual empregado para a aquisição do sinal bruto. Este instrumento foi empregado principalmente para armazenar os dados, mas também gerava uma visualização gráfica do sinal que estava sendo adquirido.

Nesta etapa também optou-se por posicionar o sensor na própria peça já que, na literatura a respeito deste tema (capítulo 2 - revisão bibliográfica), afirma que a atenuação do sinal devido sua localização em relação à distância da região de corte seria insignificante (Fig. 3.11).

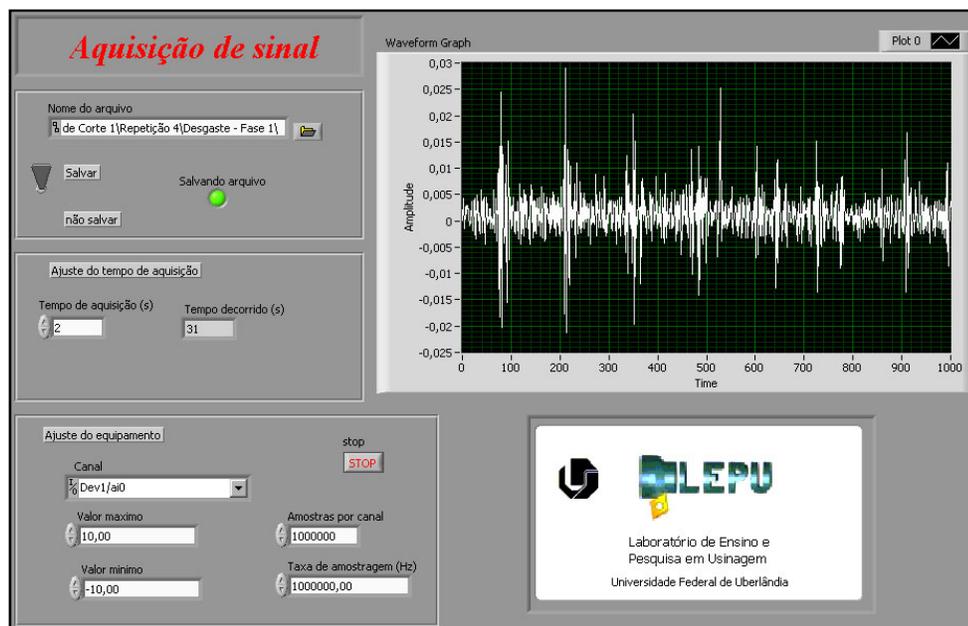


Figura 3.10 – Instrumento virtual para aquisição do sinal bruto de emissão acústica.

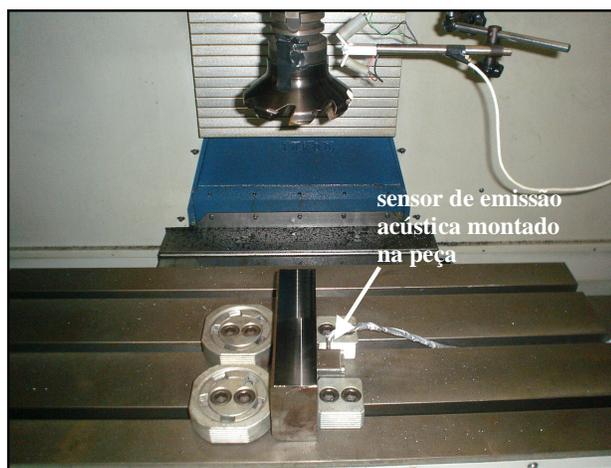


Figura 3.11 – Posicionamento do sensor de EA na peça.

Para a interface do sensor com a superfície da peça, foi usado vaselina como fluido acoplante, baseado em trabalho de Beattie (1983), que afirma que uma película de um fluido colocada entre o sensor e a superfície da peça é capaz de aumentar e melhorar o sinal.

Cada aquisição foi realizada por dois segundos. Este tempo de aquisição foi empregado em virtude da taxa de aquisição utilizada e do número de pontos máximo que podiam ser armazenados por arquivo. O aplicativo que suportava o maior número de pontos era o bloco de notas (dois milhões de pontos) gerando, portanto, arquivos com dois milhões de pontos da

aquisição de EA. Devido esta limitação, a aquisição foi realizada durante três etapas durante cada passada da fresa. A região de aquisição na peça foi dividida em três partes, uma parte (1) na entrada da fresa no corte, uma parte (2) onde a fresa passa aproximadamente pelo meio da peça e uma última parte (3) nas proximidades da saída da fresa da peça, como mostrado na Fig. 3.12. Em cada uma das partes, foi realizada uma aquisição. Este procedimento foi adotado com o objetivo de aumentar a representatividade da aquisição, visto que uma passada completa pela peça, dependendo da velocidade de avanço, demorava mais de 3 minutos e cada aquisição apenas 2 segundos.

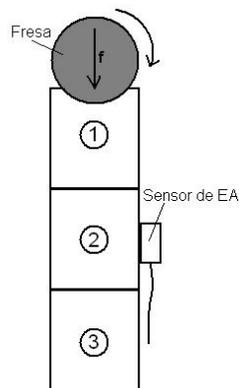


Figura 3.12 – Esquema de aquisição em etapas durante a usinagem.

Posteriormente, os arquivos com as aquisições foram avaliados com o objetivo de observar se a adoção deste procedimento trouxe resultados adequados. O método da avaliação será apresentado na seção 3.2.3 e os resultados no capítulo de resultados e discussão.

Para extrair informações do sinal bruto de emissão acústica, foi necessário retirar deste sinal alguns parâmetros estatísticos para posterior análise de sua sensibilidade à evolução do desgaste de flanco. A princípio, cinco parâmetros foram selecionados:

- . Curtose;
- . *Skewness*;
- . RMS;
- . Pico;
- . Fator de crista.

Os três primeiros parâmetros foram descritos no capítulo 2 (Revisão Bibliográfica). O valor de pico indica níveis máximos de sinais transientes da amostra. O parâmetro fator de crista é a razão entre o valor do pico e o valor RMS desta amostra.

Em seguida, com a finalidade de ampliar os parâmetros a serem avaliados a um valor significativo, quatro bandas de frequência foram retiradas do espectro de potência de cada estágio de desgaste dentro de cada condição de corte. A retirada destas quatro bandas ampliou o número de parâmetros a serem analisados, porém até um valor que não aumentasse desnecessariamente a quantidade de avaliações. Os espectros foram obtidos com 1024 pontos e uma resolução de 976 Hz. Uma descrição mais detalhada e as representações gráficas deste procedimento serão mostradas no capítulo dos resultados e discussões. De cada uma dessas quatro bandas de frequência foi retirado o valor do parâmetro RMS. Com isto, criaram-se mais quatro parâmetros a serem avaliados:

- . Banda 1 – (120 a 170 kHz);
- . Banda 2 – (190 a 240 kHz);
- . Banda 3 – (260 a 300 kHz);
- . Banda 4 – (120 a 300 kHz).

Souto et al. (2006) correlacionaram o sinal bruto de EA diretamente com o parâmetro desgaste com objetivo de encontrar bandas de frequências. Para isso, os autores buscaram, dentro do espectro de frequências, bandas onde as três condições de corte (as mesmas utilizadas neste trabalho) possuíam simultaneamente os melhores coeficientes de correlação entre os dois parâmetros. Dentro destas bandas selecionadas, foram montados os gráficos das magnitudes normalizadas (dB) versus os estágios de desgaste da ferramenta. Com isto foi possível observar o comportamento do nível de energia do sinal com a evolução do desgaste.

Estabelecidos todos os parâmetros que representarão o sinal de EA, aplicou-se cada um deles para os sinais de cada estágio de desgaste de cada uma das condições de corte estabelecidas.

Foram realizadas o máximo de repetições possíveis para cada um dos ensaios com a finalidade de aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos. Em função da limitação de material disponível (cada aresta consumia enorme quantidade de material e de tempo até atingir o critério de final de vida), o número de repetições realizadas foi dezesseis. Deste total, doze repetições foram empregadas para o treinamento da rede neural. As outras quatro repetições foram empregadas na validação do treinamento da rede.

### 3.2.3 Análise de sensibilidade dos parâmetros estimados

Com o resultado da aplicação dos parâmetros aos sinais, partiu-se para a verificação da capacidade de cada um destes parâmetros de diferenciar o estágio de desgaste dentro de cada condição de corte. O resultado que interessa neste caso é que, um conjunto de resultados de um dado parâmetro para um dado estágio de desgaste seja diferente de um conjunto de resultados de um mesmo parâmetro de um outro estágio de desgaste. Com isto, é possível o emprego, posteriormente, destes parâmetros escolhidos em uma ferramenta que reconheça a condição de desgaste de ferramenta.

Para a verificação da diferença de um conjunto de resultados de um parâmetro dentro de um estágio de desgaste para a mesmo conjunto dentro de outro estágio, foi empregado uma ferramenta estatística presente no *software* Matlab®, o “boxplot”. A Figura 3.13 representa um modelo do *boxplot*.

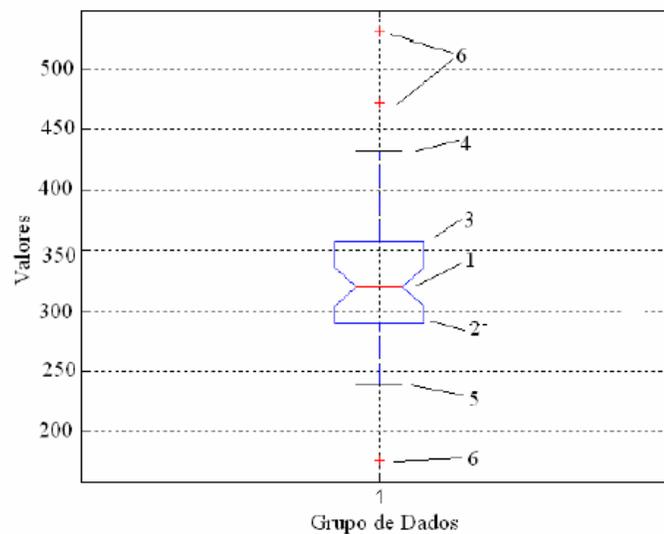


Figura 3.13 – Representação de um modelo de *boxplot* e dos seus componentes (Meola, 2005).

O *boxplot*, conhecido também como diagrama de caixas e bigodes, é uma valiosa ferramenta que condensa em um gráfico um grande número de informações a respeito da distribuição do conjunto de dados, como mostrados a seguir:

- . A linha 1 vermelha representa a mediana;
- . A linha 2 representa o primeiro quartil (indica que 25% dos dados estão abaixo desta linha);
- . A linha 3 representa o terceiro quartil (indica que 75% dos dados estão abaixo desta linha);

- . A linha 4 representa o bigode superior referente ao valor máximo de dados que é menor que o terceiro quartil mais uma constante (normalmente 1,5) vezes o comprimento do interquartil (valor da linha 3 menos o valor da linha 2);
- . A linha 5 representa o bigode inferior referente ao valor mínimo de dados que é maior que o primeiro quartil menos uma constante vezes o comprimento do interquartil;
- . Estas cruces vermelhas (6) representam os valores de dados que estão fora dos limites dos bigodes.

Também pode-se observar desta ferramenta algumas interessantes informações estatísticas (Meola, 2005):

- . Em casos em que o grupo de dados tem grandes dispersões, como no caso da EA, a mediana é mais útil para análise que a média pois a primeira é menos sensível a valores extremos.
- . O nível de achatamento da distribuição pode ser avaliado pela distância das linhas do primeiro e do terceiro quartil até a mediana.
- . A assimetria da distribuição pode ser avaliada pela diferença entre o comprimento das caixas superior e inferior.
- . A distancia entre a mediana e os bigodes é um bom indicativo das “excursões fora da média” do grupo de dados.
- . As cruces estão normalmente associadas a problemas na aquisição de dados.

Através da aplicação desta ferramenta, foi possível visualizar o quanto cada parâmetro, representando um estágio de desgaste de flanco, é diferente do mesmo parâmetro representando outro estágio de desgaste dentro da mesma condição de corte. Quanto maior a diferença do parâmetro para cada estágio de desgaste, melhor ele será para o reconhecimento da condição da ferramenta. Os parâmetros escolhidos serão utilizados posteriormente como será mostrado na seção 3.2.4. A Figura 3.14 mostra exemplo de um *boxplot* utilizado neste trabalho. Através deles foi possível definir o quanto cada parâmetro empregado se diferencia em cada estágio do desgaste.

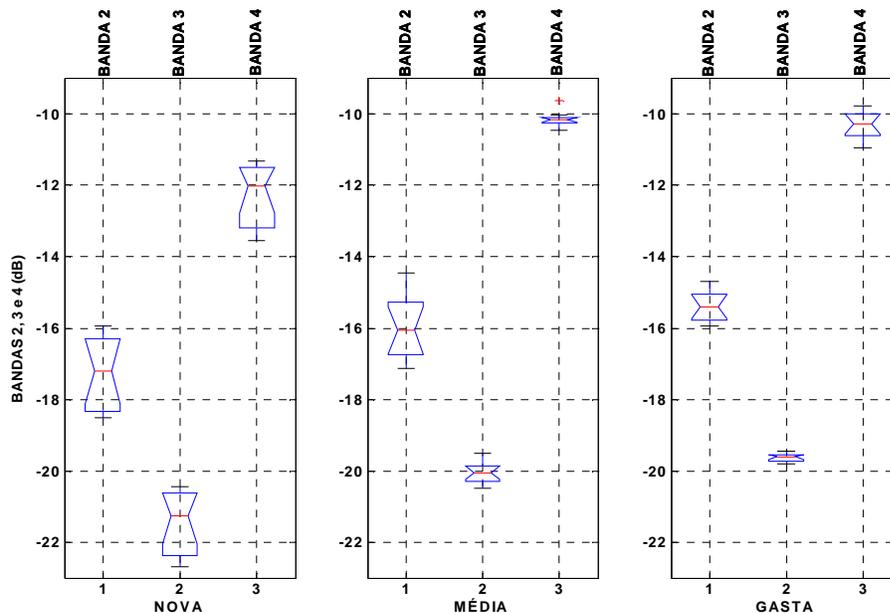


Figura 3.14 – Exemplo de *boxplot* com alguns dos parâmetros utilizados neste trabalho.

A figura anterior mostra exemplos dos critérios adotados na verificação da capacidade de diferenciação dos estágios de desgaste de cada parâmetro. Em situações em que a diferenças entre os sinais foram mais claras, os bigodes superior e inferior para cada estágio de desgaste tem pouca ou nenhuma sobreposição de valores uns com os outros. O parâmetro Banda 3 representa bem esta situação. Para os casos em que a diferenciação por bigodes não foi clara, foi utilizada a mediana como recurso para a escolha de parâmetros (Banda 2). Em outras situações, o parâmetro foi excluído porque não conseguiu diferenciar bem o estado da ferramenta por nenhum dos critérios citados acima (Banda 4).

Nesta etapa de análise do sinal também foi avaliada a metodologia empregada na aquisição do sinal de EA, que separou a peça em três partes distintas e em cada uma foi realizada uma aquisição. Esta avaliação foi executada pois havia interesse em saber se o posicionamento relativo entre o sensor e a fresa, que era móvel, afetaria ou não o sinal. Nesta avaliação foi empregado o Teste de Hipótese na verificação dos conjuntos de dados. O dados de entrada do teste foram os nove parâmetros estatísticos calculados a partir do sinal de cada uma das etapas de aquisição anteriormente mencionados.

Para o cálculo do Teste de Hipótese, tem-se que  $t_0$ , dado pela Eq. 3.1, é uma distribuição t de Student com o número de graus de liberdade calculado pela Eq. 3.2.

$$t_0 = \frac{|\bar{x} - \bar{y}|}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (3.1)$$

$$v = \frac{\left[ \left( \frac{s_1^2}{n_1} \right) + \left( \frac{s_2^2}{n_2} \right) \right]^2}{\frac{\left( \frac{s_1^2}{n_1} \right)^2}{n_1 + 1} + \frac{\left( \frac{s_2^2}{n_2} \right)^2}{n_2 + 1}} - 2 \quad (3.2)$$

Onde:

- .  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  são as estimativas das médias dos grupos 1 e 2, respectivamente;
- .  $s_1^2$  e  $s_2^2$  são as estimativas das variâncias dos grupos 1 e 2, respectivamente;
- .  $n_1$  e  $n_2$  são os números de dados dos grupos 1 e 2, respectivamente.

Considerando como hipótese nula que as médias dos dois grupos sejam iguais e com hipótese alternativa que as médias dos grupos sejam diferentes. Para um nível de significância  $\alpha_t$  alto de 95% para o Teste de Hipótese, se o valor calculado de  $t_0$  for maior que o de  $t_\alpha$ , então  $t_0 / t_\alpha > 1$ , a hipótese nula é rejeitada e conclui-se que as duas médias pertencem a grupos estatísticos distintos. Caso contrário, se  $t_0$  for menor que  $t_\alpha$ , então  $t_0 / t_\alpha < 1$ , a hipótese nula é aceita e conclui-se que as duas médias pertencem ao mesmo grupo estatístico.

No caso da verificação da influência no sinal do procedimento de dividir a aquisição em três partes, é esperado que o teste mostre que os grupos estatísticos que representem cada uma das partes não sofreram nenhum tipo de influência de posicionamento, ou seja, as três aquisições representam o mesmo grupo estatístico. Portanto, a aquisição não sofreu nenhuma influência do posicionamento se o resultado do teste for menor que 1.

As comparações para este teste foram realizadas duas a duas. Portanto, o grupo 1, que representa os parâmetros estatísticos retirados da aquisição na parte 1, foi comparado com o grupo 2, retirado da parte 2. Em seguida, o grupo 1 foi comparado com o grupo 3. E, finalmente, o grupo 2 foi comparado ao grupo 3, tendo-se assim calculadas todas as combinações possíveis.

#### 3.2.4. Aplicação de inteligência artificial (RNA)

Neste trabalho empregou-se uma rede neural artificial com a finalidade de avaliar a capacidade do sinal de emissão acústica e da metodologia utilizada como uma ferramenta para o reconhecimento das classes (estágios de desgaste de flanco máximo do inserto). O modelo de classificação empregado foi do tipo Rede Neural Probabilística (PNN). Esta rede foi desenvolvida por Master (1993) em um *software* C++ e adaptada por um grupo de professores da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU (FEMEC). Os valores de entrada desta rede (*input*) são os parâmetros estatísticos que foram previamente escolhidos (seção 3.2.3) para representar cada estágio de desgaste em cada condição de corte. Primeiro foram usados as doze repetições de treinamento, em seguida as quatro repetições reservadas para a validação dos resultados. Durante o treinamento, cada um dos conjuntos de parâmetros é que será responsável pelos cálculos que irão definir suas respectivas classes na saída da rede.

Como a PNN é uma rede de aprendizado supervisionado, durante o treinamento foi fornecido a qual classe pertencia os dados fornecidos a ela (se pertencia ao conjunto de dados referentes a uma ferramenta sem desgaste, com desgaste intermediário ou altamente desgastada).

Quando houve o reconhecimento do desgaste através de duas classes (boa ou gasta), os parâmetros da classe nova e da classe média foram empregados juntos para representar a nova classe (boa).

Quando houve o reconhecimento do desgaste independentemente da condição de corte, os parâmetros que representam certo estágio de desgaste em determinada condição de corte foram somados com os parâmetros que representam o mesmo estágio de desgaste das outras duas condições de corte.

#### 3.2.5 Saída da rede

Na classificação, são empregados os dados de validação e estes são desconhecidos da rede. Os valores de saída (*output*) da PNN aparecem em termos da probabilidade de cada novo conjunto de dados fornecidos à rede pertencer a cada uma das classes definidas na seção anterior.

Duas formas de saída da rede foram utilizadas: Na primeira, a rede classificou três estágios de desgaste (ferramenta nova, ferramenta com desgaste intermediário e ferramenta desgastada). Na segunda, apenas duas classes representavam o estágio do desgaste (ferramenta boa ou ferramenta desgastada).

## Capítulo IV

### Resultados e Discussões

Neste capítulo são mostrados os resultados obtidos empregando-se os procedimentos experimentais descritos no capítulo III. Além disto, serão realizadas discussões item por item dos resultados apresentados.

#### 4.1 – Resultados Obtidos nos Testes com Sinal RMS da Emissão Acústica

Os resultados de testes com o sinal de  $EA_{RMS}$ , em que se buscou também uma melhor compreensão dos equipamentos de aquisição e observar as potencialidades da emissão acústica na usinagem, apresentaram interessantes imagens geradas pelo mapa de intensidade luminosa.

##### 4.1.1 Fresamento com quatro insertos

A Figura 4.1 mostra o mapa de intensidade luminosa de uma fresa montada com quatro insertos. Para este ensaio, foram utilizadas três insertos novos, sem nenhum tipo de desgaste e um inserto com desgaste de flanco em torno de 0,31 mm. Como o processo foi o fresamento frontal em uma barra de 400 mm de comprimento e 50 mm de largura, não havia a possibilidade de haver dois insertos simultaneamente no corte.

No mapa, cada região em que a intensidade luminosa é maior, corresponde a fase ativa de cada uma das insertos, representadas pelos números 1, 2, 3 e 4. O inserto número 2 é o que apresentava desgaste de flanco preliminar. Observa-se no mapa que o inserto 2 gera uma intensidade luminosa menor. Como a intensidade luminosa é diretamente proporcional ao nível de energia emitido, o desgaste de flanco diminui a profundidade de corte deste inserto e diminui a geração de emissão acústica, o que está em acordo com a literatura existente.

Outro aspecto interessante observado nesta figura é uma região de maior intensidade luminosa, que é representada pelo círculo, que está fora da fase ativa dos insertos. Isto acontece em virtude dos insertos possuírem aresta alisadora que, ao passarem pela superfície já usinada, durante a fase inativa, raspam e causam deformações plásticas e elásticas nestas superfícies. Estas deformações são uma das fontes de emissão acústica na usinagem. Os

insertos 1 e 3 estão montados diametralmente opostos na fresa, assim como os insertos 2 e 4. Assim, como esta região de intensidade luminosa aparece próxima da fase ativa do inserto 1, significa que esta região está a 180° deste inserto, representando portanto, o alisamento efetuado pelo inserto 3 durante sua fase inativa.

Todos os insertos deveriam produzir uma região similar na fase inativa, porém, estas não estão bem claras na figura devido ao batimento axial. O inserto 3 estava montado cerca de 0,03 mm abaixo do nível dos outros. Com isto, sua profundidade de corte estava ligeiramente superior às outras, impedindo-os de alisarem a superfície com a mesma intensidade durante suas respectivas fases inativas. Este fato também pode ser observado pelo sinal do inserto 3 na sua fase ativa, que é ligeiramente mais claro que o das outros insertos devido ao maior nível de geração de energia.

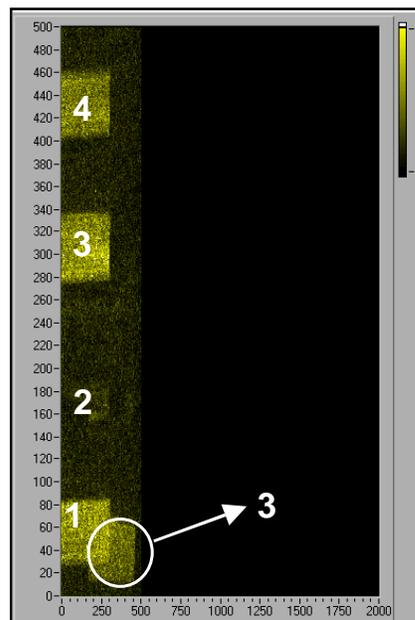


Figura 4.1 – Mapa de intensidade luminosa de uma fresa frontal com quatro insertos.

#### 4.1.2 Fresamento com oito insertos

Os mesmos procedimentos descritos no ensaio anterior foram realizados para uma fresa frontal com oito insertos montados. Os insertos são idênticos aos anteriores. Na Figura 4.2 pode-se identificar os mesmos fatos vistos no mapa da fresa com quatro insertos. Aqui se observa claramente a fase ativa de cada um dos oito insertos. Este mapa também mostra as fases inativas, que no caso destes insertos também tem um trecho em que estão alisando a superfície. Como aparece apenas o alisamento executado pelos insertos 4, 6 e 7, conclui-se que estes possuem batimento axial mais acentuado em relação aos outros.

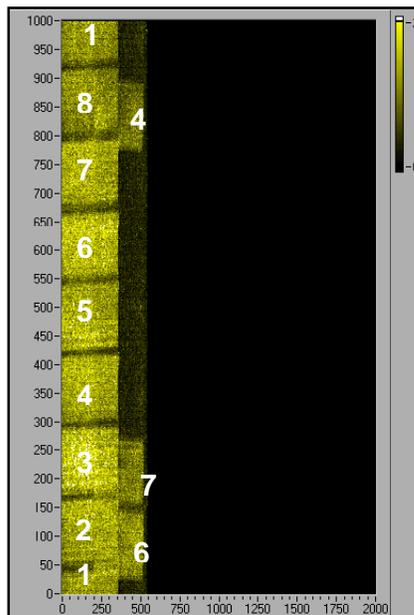


Figura 4.2 – Mapa de intensidade luminosa de uma fresa frontal com oito insertos.

Um eventual erro de batimento radial não apresentaria qualquer influência no sinal durante o alisamento. Este erro pode ser visto apenas no ciclo ativo, com o aumento da intensidade da luminosidade referente a este inserto no mapa devido ao aumento da geração de energia causado pelo aumento da espessura do cavaco, considerando que todas ferramentas possuam o mesmo nível de desgaste.

#### 4.1.3 Fresamento com dois insertos e mudança de direção de avanço

O comportamento visual da mudança de direção de avanço pode ser visto nas Figs. 4.3a e b, onde uma reta vertical separa as duas regiões. A diferença de espessura também é possível de ser visualizada no mapa, pois a região do ciclo ativo dos dois insertos (1 e 2) na ordenada é maior que nas figuras anteriores.

O inserto 1, após a mudança de direção do avanço, teve sua representação no mapa partida em duas partes. Isto ocorre devido ao posicionamento do *trigger*. O ajuste deste foi idealizado para não dividir o sinal da fase ativa dos insertos dentro de mapa de intensidade durante a primeira direção de avanço. Após a mudança de direção, este ajuste acabou sendo alterado. Com isto, durante a fase ativa do inserto 1, o sinal do *trigger*, que avisa o final de uma rotação e o começo de outra, era dado e iniciava-se a construção de uma nova coluna. Portanto, parte do sinal representando o ciclo ativo deste inserto era transferido para o início da outra coluna que representa a próxima rotação.

Nestas duas figuras, pode-se observar o comportamento da utilização de dois insertos em estágios diferentes de desgaste. Na Figura 4.3a, foi empregado um inserto novo (1) e o outro (2) com  $VB_{Bmáx}$  de 0,30 mm. Na Figura 4.3b, um era novo (1) e o outro (2) apresentava um  $VB_{Bmáx}$  de 0,31 mm. Na segunda figura, a peça usinada apresentava uma pequena deformação (devido a algum problema de fabricação) em baixo relevo em sua superfície. Pode-se observar esta deformação através da mancha escura na região do inserto 1 (seta). Esta mancha apareceu apenas no inserto 1 pois este apresentava uma combinação de desgaste e de diferença no batimento axial. Com isto, tinha sua penetração na peça reduzida e sua aresta não tocava em nada ao passar por essa região. Ao contrário do inserto 2 que, por ser novo e não apresentar nenhum desgaste, tinha altura suficiente para penetrar abaixo do ponto mais profundo deste defeito.

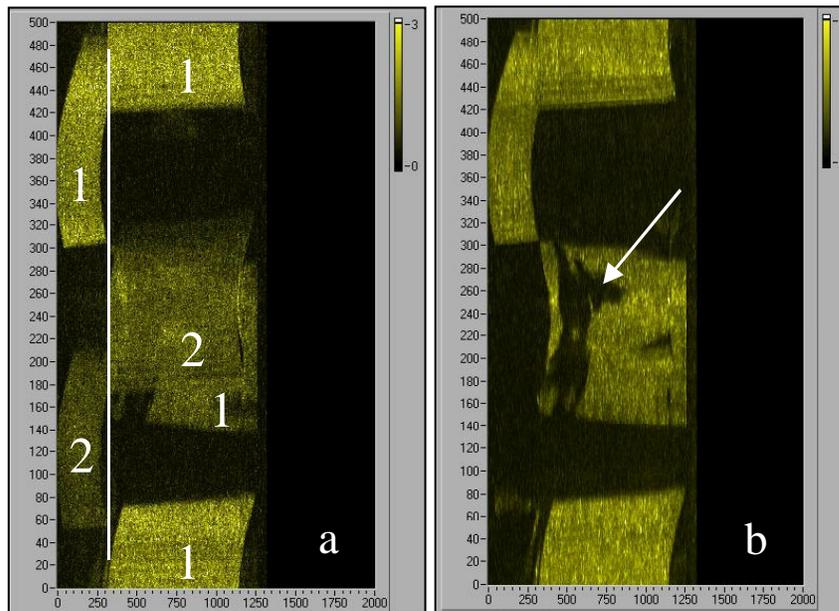


Figura 4.3 – Mapa de intensidade luminosa de uma fresa frontal com dois insertos. (a) visualização dos insertos 1 e 2 e mudança de direção de avanço da fresa; (b) visualização de um defeito na peça (em baixo relevo) através do inserto com maior desgaste.

#### 4.1.4 Reprodução do fresamento de um bloco de motor

A emissão acústica, através do mapa de intensidade luminosa, também se revelou útil na reprodução da superfície que está sendo usinada e alguns fenômenos que ocorrem durante a usinagem. A Figura 4.4 mostra uma superfície de um bloco de motor de ferro fundido cinzento com quatro cilindros. A usinagem foi realizada com apenas um inserto montado em

uma fresa frontal de 125 mm para que não houvesse sobreposição do sinal de mais de um inserto no mapa.

O mapa mostra claramente a superfície do bloco, evidentemente com as distorções provocadas pela geometria circular da fresa. No mapa, observam-se a posição dos cilindros, canais de lubrificação e refrigeração e também os furos de montagem. Também se pode observar que na entrada e saída da ferramenta na peça e nas interrupções devido aos furos e canais, a intensidade do sinal é maior devido às intensas solicitações mecânicas ocasionados pelo corte que ocorrem nestas regiões. Além disto, durante a fase inativa deste inserto, este também tocava a peça, provocando a outra reprodução, de menor intensidade, da superfície, porém com menor intensidade luminosa.

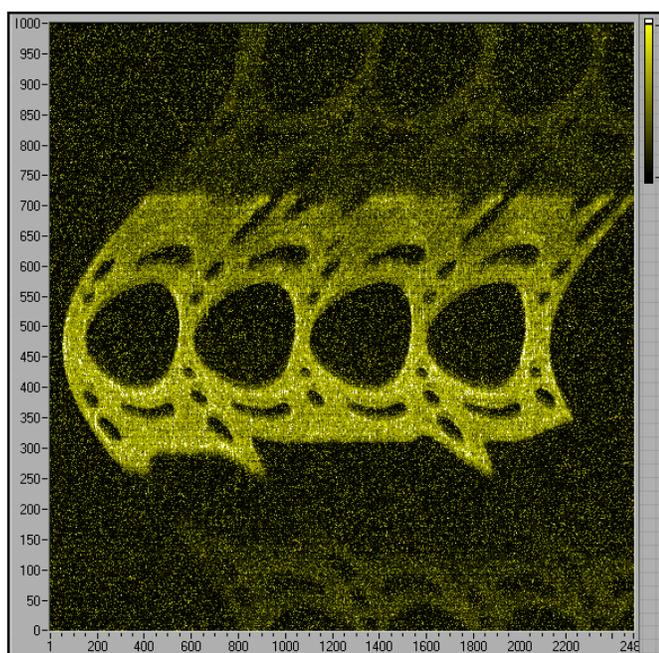


Figura 4.4 – Mapa de intensidade luminosa reproduzindo o fresamento de um bloco de motor.

#### 4.1.5 Reprodução do lascamento de uma aresta de corte

Através do sinal de emissão acústica adquirido durante o corte, é possível detectar um eventual lascamento das ferramentas de usinagem, além do desgaste e batimento axial. A Figura 4.5 mostra o comportamento do sinal durante um fresamento em que ocorreu um lascamento aproximadamente na metade do percurso de avanço. Na parte a, o corte é reproduzido no plano, como feito nos itens anteriores. A parte b mostra o comportamento tridimensional do sinal de emissão acústica. Como nos ensaios mencionados anteriormente, a diminuição da penetração da aresta de corte, devido ao lascamento, diminui o nível do sinal de  $EA_{RMS}$  gerado e portanto, a intensidade luminosa.

Nestas figuras outros dois aspectos interessantes podem ser observados. Nas figuras a e b, o alisamento da superfície durante a fase inativa aparece nas extremidades das figuras, mesmo após o lascamento da aresta. Um segundo aspecto é mais facilmente observável na figura a: na entrada da ferramenta, parte inferior da representação da peça, o sinal aumenta de modo brusco, quase instantaneamente, distinguindo claramente a fase inativa da fase ativa. Porém, durante a saída da ferramenta, parte superior da representação da peça, o sinal tem uma atenuação menos brusca, o que gera uma região meio difusa, evidenciada no retângulo. Durante a usinagem, verificou-se visualmente que, na saída da ferramenta, houve a formação de rebarba de grandes proporções. O mecanismo de formação da rebarba de saída pode ser o responsável por este fenômeno (Kaminise et al., 2004). Quando a ferramenta se aproxima da aresta da peça, o plano de cisalhamento primário sofre uma rotação, devido à deformação plástica pela falta de resistência mecânica (Pekelharing, 1978). Isto faz com que a saída da ferramenta da peça seja mais suave.

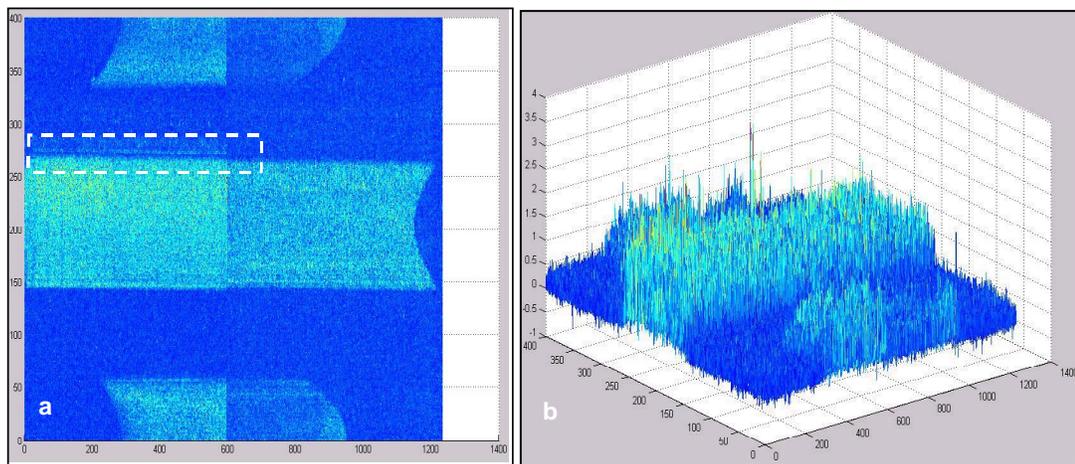


Figura 4.5 – Reprodução via EA do lascamento da aresta de corte da ferramenta.

#### 4.2 Resultados dos Testes com Sinal Bruto de Emissão Acústica

Nesta seção serão apresentados os resultados da aquisição do sinal bruto de emissão acústica, da análise de sensibilidade dos possíveis parâmetros indicativos de desgaste de flanco máximo, bem como da classificação da rede PNN, para fins de monitoramento, que é o objetivo principal deste trabalho.

A Figura 4.6 mostra o comportamento deste sinal durante o fresamento da barra de testes com um único inserto. É possível ver claramente as fases ativas da usinagem. Esta se apresenta nas regiões onde há picos na amplitude do sinal. Onde o sinal apresenta apenas

uma faixa contínua, de baixa intensidade, é a fase inativa deste processo. Este sinal constitui-se de ruído e do sinal da aresta alisadora ao raspar a superfície da peça nesta fase. Porém, este sinal foi todo desprezado e a análise concentrou-se apenas no sinal da fase ativa.

Nesta figura observam-se alguns aspectos interessantes: em primeiro lugar, quando se conta o número de ciclos ativos dentro da faixa de tempo da aquisição (2 segundos), é possível saber o número de rotações por minuto empregado nesta fase dos testes através de simples cálculos; em segundo lugar, ao observar uma aproximação do sinal que representa uma fase ativa qualquer (no detalhe da figura), nota-se que, a entrada do inserto na peça é representado por um crescimento praticamente instantâneo do sinal de EA. Porém, na saída do inserto da peça, há um decaimento mais suave do sinal. Isto pode ser justificado, como mostrado para o sinal de  $EA_{RMS}$  (seção 4.1.5), devido ao fato de que na saída da peça há a formação de rebarbas de grandes proporções, resultante de uma intensa deformação plástica. Mesmo que o inserto já tenha saído da peça, ele ainda está em contato com a rebarba. Assim, o sinal vai caindo até que o inserto perca totalmente o contato com esta rebarba.

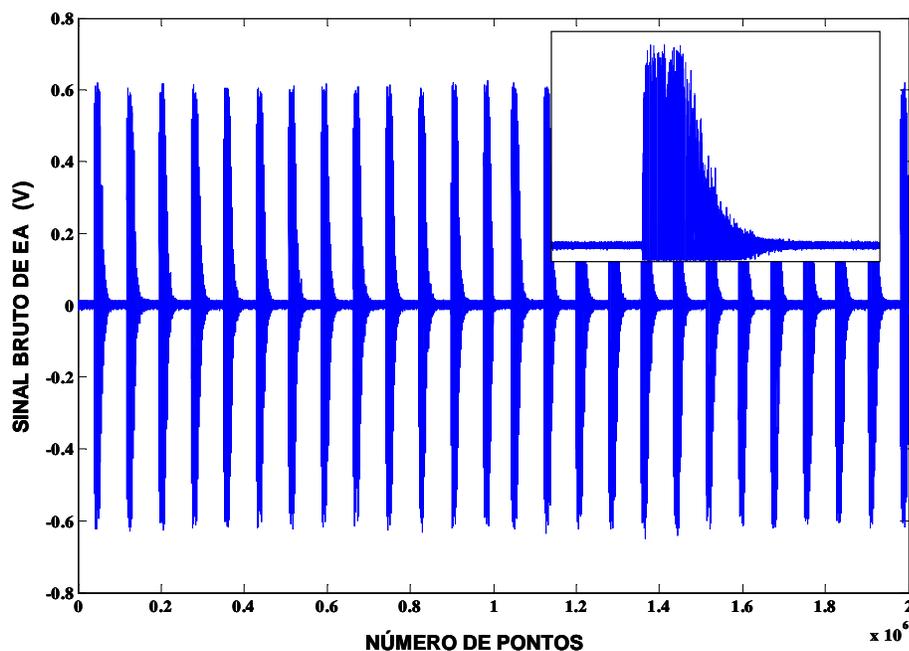


Figura 4.6 – Representação do sinal bruto de EA durante o fresamento com um único inserto.

#### 4.2.1 Determinação de possíveis parâmetros do sinal de EA indicativos de $VB_{Bmáx}$

Alguns parâmetros estatísticos foram estimados dos dados das aquisições do sinal bruto de EA, como descrito mais detalhadamente no capítulo III (Procedimentos Experimentais). Estes parâmetros foram: curtose, *skewness*, fator de crista, pico e RMS global.

Porém, outros parâmetros também foram determinados com o objetivo de facilitar a tarefa de encontrar alguns destes que apresentem uma boa sensibilidade com o desgaste. Estes parâmetros foram determinados no domínio da frequência, de onde se observou bandas que apresentassem curvas (ferramenta nova, média e gasta) sensíveis à evolução do desgaste. As curvas consideradas mais sensíveis foram aquelas que se apresentaram mais distintas, de fácil identificação e o menos sobrepostas possível. As Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 apresentam os espectros de frequências para as condições de corte 1, 2 e 3, respectivamente, determinadas para estes experimentos.

Os gráficos apresentados a seguir estão dentro da faixa de frequências (50 a 500 kHz) delimitadas previamente durante os ensaios.

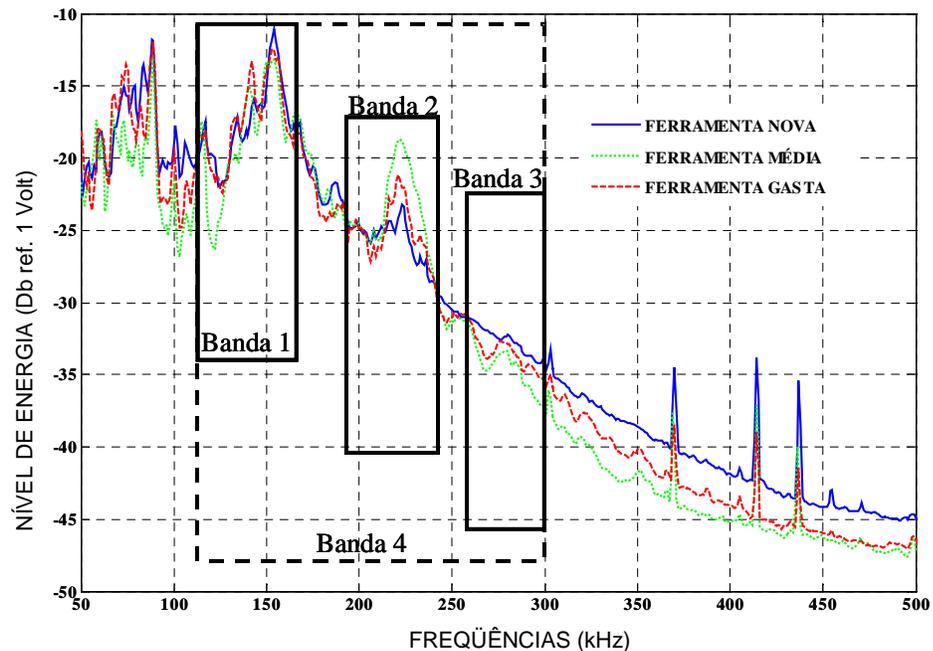


Figura 4.7 – Nível de energia global do sinal de EA em função da frequência para os estágios de desgaste (nova, média, gasta) na condição de corte 1.

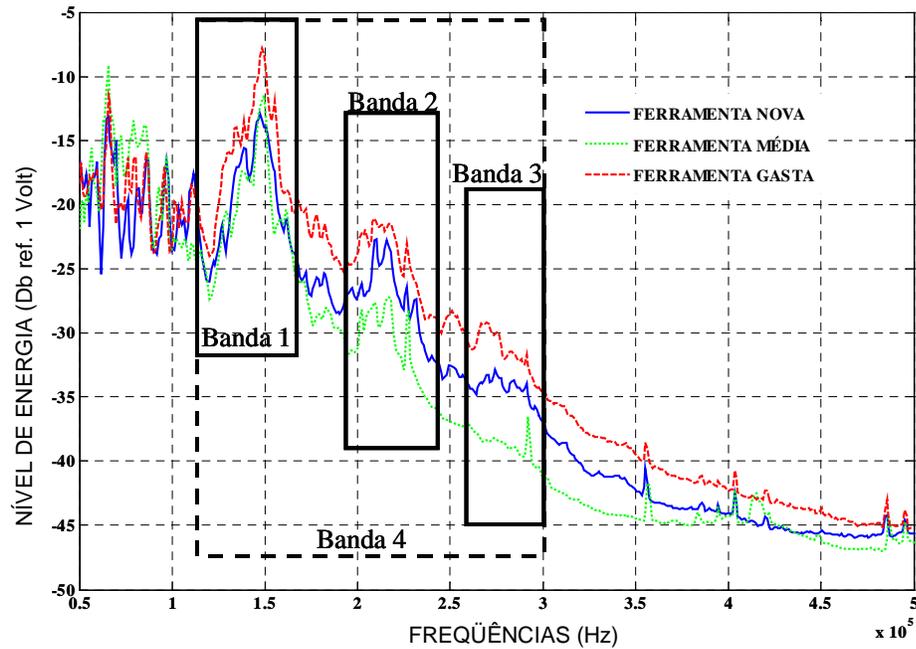


Figura 4.8 – Nível de energia global do sinal de EA em função da frequência para os estágios de desgaste (nova, média, gasta) na condição de corte 2.

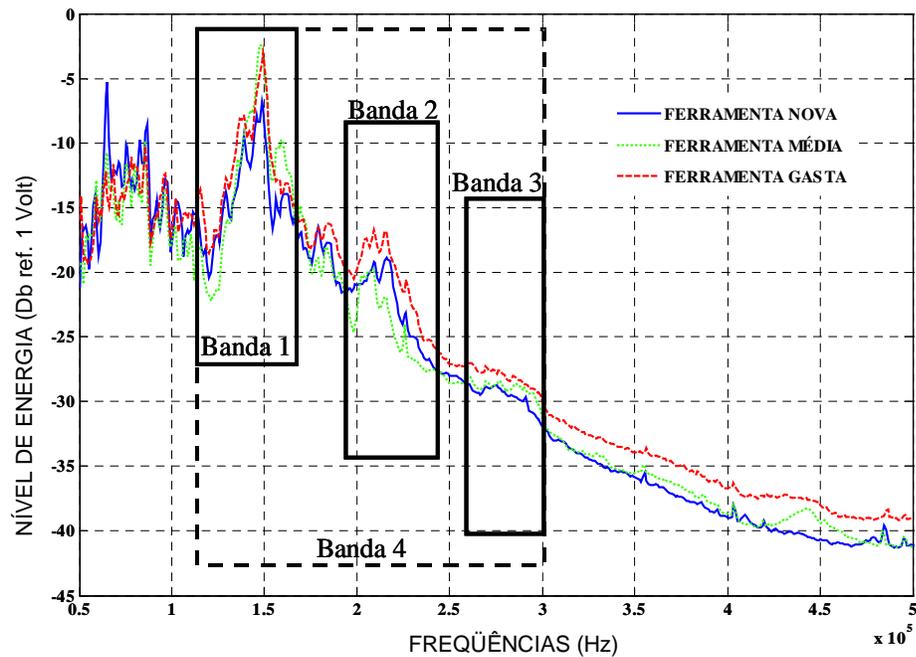


Figura 4.9 – Nível de energia global do sinal de EA em função da frequência para os estágios de desgaste (nova, média, gasta) na condição de corte 3.

As Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 apresentam detalhes dos espectros mostrados (120 a 300 kHz). As aproximações foram realizadas dentro de uma banda menor para facilitar a visualização das melhores bandas que representassem o objetivo de observação dos espectros. Estas figuras também são apresentadas na mesma seqüência das anteriores: condição 1, 2 e 3, respectivamente.

Para a seleção das bandas que melhor distinguisse o sinal de cada estágio de desgaste, levou-se em consideração que estas deveriam ser aplicadas a todas as condições de corte. Por isto, mesmo que algumas bandas em certas condições possam aparentar não serem ideais, para a maioria dos casos, elas são as melhores.

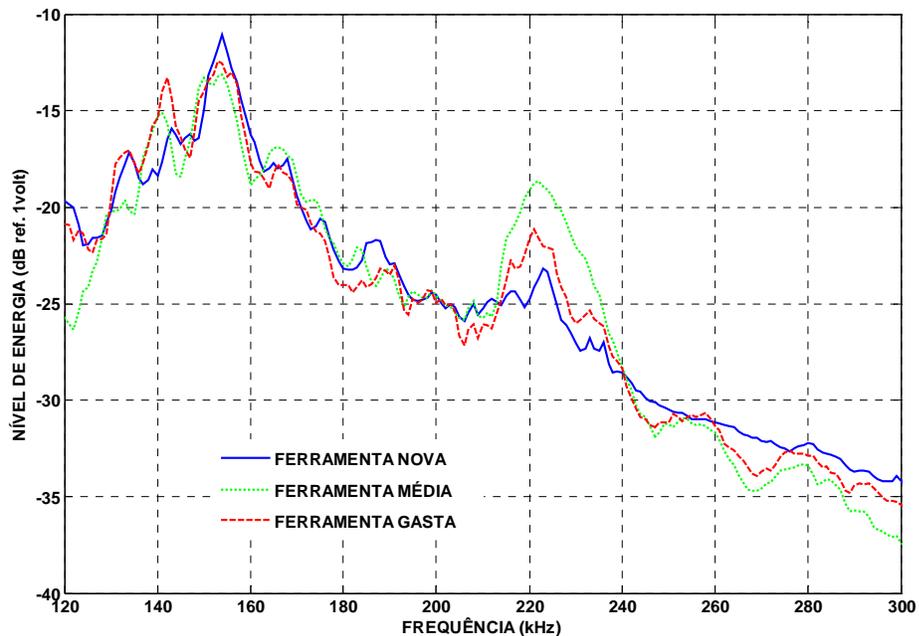


Figura 4.10 – Detalhe do espectro de potências dos sinais de desgaste para os estágios (nova, média, gasta) na condição de corte 1.

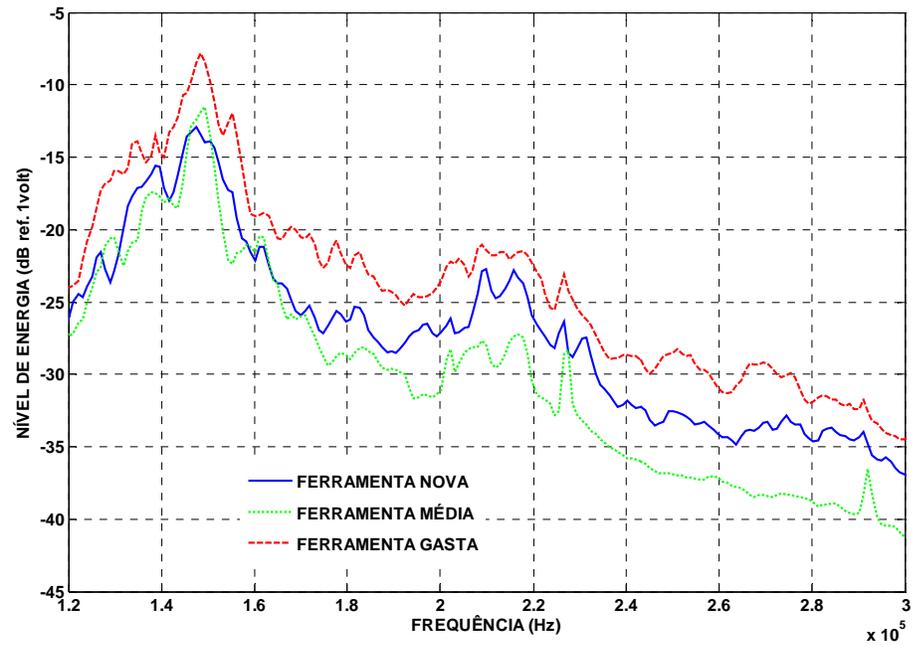


Figura 4.11– Detalhe do espectro de potências dos sinais de desgaste para os estágios (nova, média, gasta) na condição de corte 2.

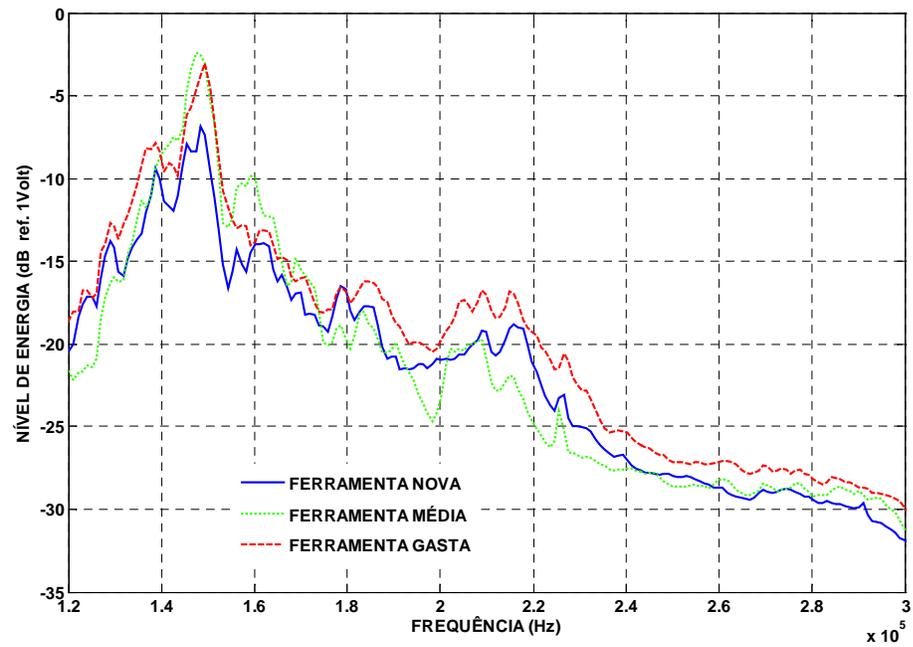


Figura 4.12 – Detalhe do espectro de potências dos sinais de desgaste para os estágios (nova, média, gasta) na condição de corte 3.

Da observação das figuras anteriores, foram escolhidas as seguintes bandas de frequência:

- . Banda 1: nível de energia do sinal (ref. 1V) na banda de frequências 120 a 170 kHz;
- . Banda 2: nível de energia do sinal (ref. 1V) na banda de frequências 190 a 240 kHz;
- . Banda 3: nível de energia do sinal (ref. 1V) na banda de frequências 260 a 300 kHz.
- . Banda 4: nível de energia do sinal (ref. 1V) na banda de frequências 120 a 300 kHz.

O parâmetro banda 4 foi escolhido com o objetivo de analisar a influência de uma banda mais ampla, que englobasse todas as demais. Portanto, esta foi obtida a partir da menor frequência que caracteriza a banda 1 e a maior que caracteriza a banda 3.

#### 4.2.2 Avaliação da influência da variação da distância da região de corte para o sensor no sinal de EA

Como mostrada no capítulo 3, uma série de procedimentos foi adotada durante os experimentos para que fosse possível a aquisição do sinal às altas taxas de amostragem empregadas. Estes procedimentos serão analisados nesta seção, visto que a partir dos seus resultados e de suas interpretações foi dado prosseguimento à maior parte da avaliação.

O procedimento de dividir um passe completo de usinagem da peça, em três partes e em cada uma delas se realizar uma aquisição foi realizado com intuito de melhorar a relação entre o tempo de usinagem e o tempo de aquisição. A aplicação deste procedimento resultou em uma variação da posição do sensor com relação à região de corte e conseqüentemente, a posição relativa à fonte de EA e o sentido de propagação do sinal. A Figura 4.13 mostra o sentido do avanço da fonte de EA e de suas ondas elásticas que são captadas pelo sensor. Nos dois primeiros trechos, a fonte de EA está aproximando do sensor. Tanto o sentido de avanço da fonte de EA como os de suas ondas elásticas são os mesmos. No último trecho, a fonte de EA se afasta do sensor devido ao avanço enquanto que as ondas elásticas captadas por ele têm sentido contrário.

Após estas observações, houve a necessidade de se realizar uma avaliação de como estas variações influenciaram nas aquisições.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados do Teste de Hipótese para a ferramenta no estágio de desgaste nova para cada uma das condições de corte utilizadas neste trabalho.

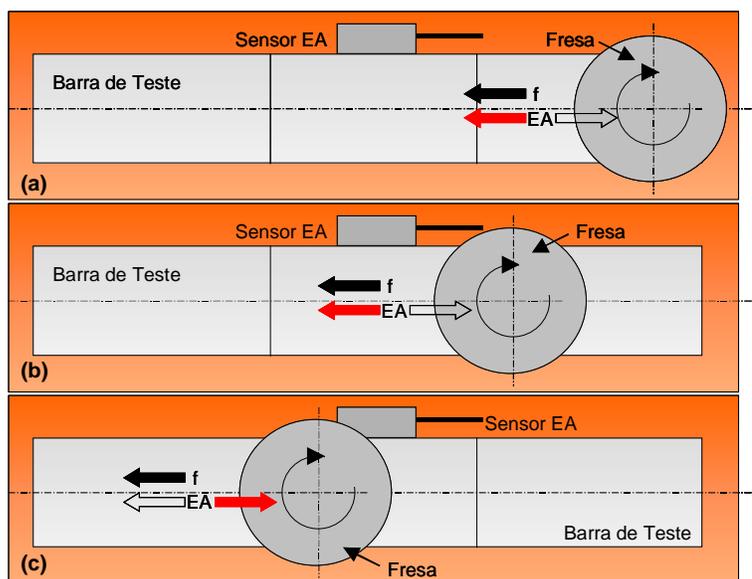


Figura 4.13 – Variação da posição da fonte de EA com relação ao sensor. (a) e (b) nas partes 1 e 2 da aquisição, respectivamente, o avanço de corte faz com que a fonte de EA esteja aproximando do sensor; (c) a fonte de EA está afastando do sensor.

Tabela 4.1 – Teste de Hipótese de verificação das partes de aquisição 1, 2 e 3 nas ferramentas com estágio de desgaste nova.

	CONDIÇÃO DE CORTE 1			CONDIÇÃO DE CORTE 2			CONDIÇÃO DE CORTE 3		
	1 e 2	1 e 3	2 e 3	1 e 2	1 e 3	2 e 3	1 e 2	1 e 3	2 e 3
Curtose	0,17	1,31	1,14	0,26	8,81	8,21	0,95	4,76	2,26
Pico	0,28	0,24	0,10	0,24	0,09	0,16	0,17	0,52	0,32
RMS	0,05	0,26	0,29	0,12	1,39	1,42	1,56	1,38	0,93
Fator de crista	0,05	0,38	0,34	0,09	1,62	1,68	1,81	1,44	0,97
Skewness	0,04	0,39	0,32	0,07	0,67	0,58	0,41	3,78	2,68
Banda 1	0,01	0,28	0,28	0,16	1,38	1,36	0,02	0,65	0,64
Banda 2	0,01	0,27	0,26	0,06	1,35	1,34	0,25	0,55	0,37
Banda 3	0,02	0,12	0,14	0,03	1,18	1,20	0,17	0,25	0,13
Banda 4	0,00	0,27	0,26	0,13	1,31	1,30	0,07	0,63	0,59

O Teste de Hipótese foi aplicado para a verificação do comportamento do sinal para cada uma dos trechos da aquisição. Nestes testes, os trechos foram comparados dois a dois, como mostrado na tabela anterior. Foram empregados para análise todos parâmetros estimados dos sinais de cada condição. Como foram realizadas 16 repetições, cada parâmetro é resultado da média destas repetições. Todos parâmetros foram testados com seu

correspondente de outro trecho, mas dentro de um mesmo estágio de desgaste. Espera-se deste teste que a hipótese de que as médias que representam cada trecho pertençam ao mesmo grupo estatístico. Para isto, os resultados do teste ( $t_0/ t_{\alpha}$ ) devem ser menores que 1. Valores do teste maiores que 1 indicam que as partes não pertencem a um mesmo grupo estatístico e que, portanto, a variação da posição do sensor em relação a fonte de EA de alguma forma influenciou na aquisição do sinal.

A Tabela 4.2 apresenta os resultados do Teste de Hipótese para a ferramenta no estágio de desgaste média para cada uma das condições de corte utilizadas neste trabalho.

Tabela 4.2– Teste de Hipótese de verificação das partes de aquisição 1, 2 e 3 nas ferramentas com estágio de desgaste médio.

gasta	CONDIÇÃO DE CORTE 1			CONDIÇÃO DE CORTE 2			CONDIÇÃO DE CORTE 3		
	1 e 2	1 e 3	2 e 3	1 e 2	1 e 3	2 e 3	1 e 2	1 e 3	2 e 3
Curtose	0,09	1,65	3,15	0,05	2,99	3,46	0,49	5,79	3,42
Pico	0,20	0,17	0,02	0,17	0,40	0,24	0,27	0,25	0,07
RMS	0,04	0,50	0,50	0,09	0,48	0,60	0,41	8,45	4,02
Fator de crista	0,10	0,64	0,65	0,07	0,72	0,87	0,46	7,78	3,95
Skewness	0,02	0,54	0,53	0,47	0,41	1,02	0,14	3,10	2,39
Banda 1	0,10	0,63	0,55	0,10	0,47	0,64	0,17	3,93	3,41
Banda 2	0,08	0,23	0,32	0,05	0,25	0,30	0,27	1,27	0,92
Banda 3	0,17	0,42	0,59	0,10	0,02	0,07	0,19	3,22	2,61
Banda 4	0,04	0,51	0,50	0,09	0,41	0,55	0,34	6,28	4,38

A Tabela 4.3 apresenta os resultados do Teste de Hipótese para a ferramenta no estágio de desgaste gasta para cada uma das condições de corte utilizadas neste trabalho.

Dos resultados dos Testes de Hipótese, observa-se que a maior parte dos parâmetros que representam a parte 3, quando comparado com a parte 1 ou com a parte 2, foram recusados, ou seja, seus valores foram maior que 1. Esta observação é ainda mais realçada quando:

- . Passa-se da condição de corte 1 para 2 e ainda mais quando se passa da condição 2 para 3;
- . Faz-se a comparação das partes 2 com 3 em relação as partes 1 com 3;
- . Evolui o estágio de desgaste da ferramenta.

Tabela 4.3– Teste de Hipótese de verificação das partes de aquisição 1, 2 e 3 nas ferramentas com estágio de desgaste gasta.

	CONDIÇÃO DE CORTE 1			CONDIÇÃO DE CORTE 2			CONDIÇÃO DE CORTE 3		
	1 e 2	1 e 3	2 e 3	1 e 2	1 e 3	2 e 3	1 e 2	1 e 3	2 e 3
Curtose	1,21	3,00	3,39	0,54	4,88	8,19	0,28	6,32	5,34
Pico	0,08	0,38	0,44	0,26	0,27	0,45	0,21	0,30	0,07
RMS	0,27	0,02	0,24	0,44	1,64	1,49	0,56	7,40	7,58
Fator de crista	0,57	0,45	1,04	0,46	1,98	2,01	0,38	8,03	7,47
Skewness	0,13	0,97	1,29	1,20	1,66	0,28	1,82	3,46	1,87
Banda 1	0,15	0,11	0,25	1,67	3,46	2,52	0,15	2,99	3,54
Banda 2	0,06	0,04	0,02	0,40	1,43	1,17	0,19	3,25	2,16
Banda 3	0,17	0,17	0,02	0,33	0,86	0,59	0,88	4,07	4,61
Banda 4	0,14	0,08	0,21	1,14	2,47	1,83	0,15	3,45	3,78

Em função dos resultados anteriores, ficou decidido que a parte 3 seria excluída das avaliações deste trabalho, pois este poderia interferir de maneira não previsível nos resultados. As análises realizadas posteriormente levaram em consideração a soma das partes 1 e 2, como se fosse uma única aquisição. Esta soma foi realizada no *software* Matlab<sup>®</sup> gerando arquivos de quatro milhões de pontos com extensão deste aplicativo. Com isto, foi possível o emprego de suas ferramentas em análises posteriores.

#### 4.2.3 Análise de sensibilidade dos parâmetros estimados

Nesta parte do trabalho foi analisada a sensibilidade dos parâmetros previamente escolhidos com a evolução do desgaste. O número de parâmetros avaliados foram relativamente elevados pois o objetivo foi aumentar a possibilidade de encontrar alguns destes que realmente sejam sensíveis. Para a análise da sensibilidade de cada parâmetro, foi utilizado o gráfico *boxplot*. Uma explicação mais detalhada desta ferramenta foi realizada no capítulo 3 (Métodos Experimentais).

O que se espera observar de cada parâmetro é que as linhas dos quartis de cada grupo de dados representante de cada estágio de desgaste não estivessem contidas dentro dos grupos dos outros estágios, não havendo assim interferências, e/ou pelo menos a mediana deles esteja o mais distanciado possível. A Figura 4.14 apresenta os gráficos *boxplot* para os parâmetros curtose, pico e RMS global em cada estágio de desgaste na condição de corte 1.

Nesta figura observa-se que os parâmetros analisados apresentam uma elevada sobreposição dos quartis dos grupos que representam cada estágio de desgaste. Em nenhum deles há uma clara diferenciação, mesmo quando se analisa pela mediana.

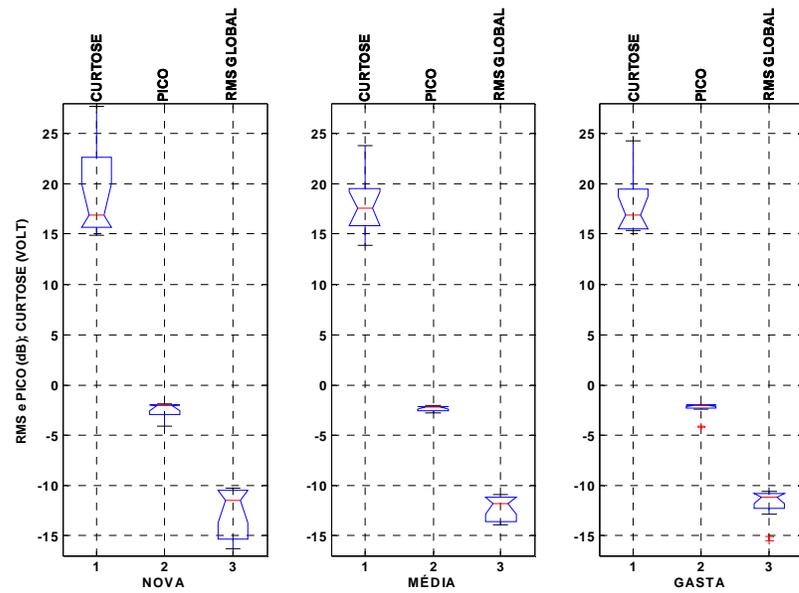


Figura 4.14 – Gráficos *boxplot* para os parâmetros curtose, pico e RMS global na condição de corte 1.

A Figura 4.15 apresenta os gráficos *boxplot* para os parâmetros fator de crista, *skewness* e banda 1 na condição de corte 1.

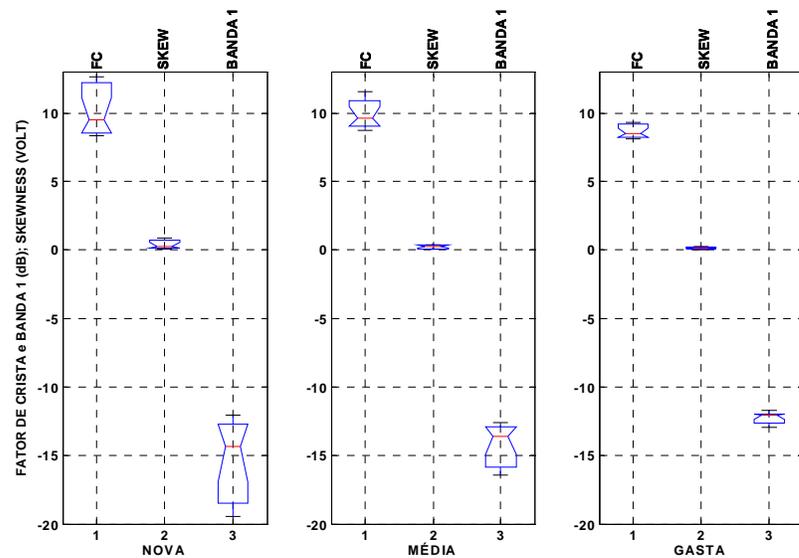


Figura 4.15 – Gráficos *boxplot* para os parâmetros fator de crista, *skewness* e banda 1 na condição de corte 1.

Na figura anterior pode-se observar que todos parâmetros possuem elevada sobreposição entre seus quartis. Com relação às medianas, apenas o parâmetro banda 1 apresentou um bom distanciamento entre os estágios.

A Figura 4.16 apresenta os gráficos *boxplot* para os parâmetros banda 2, banda 3 e banda 4 na condição de corte 1.

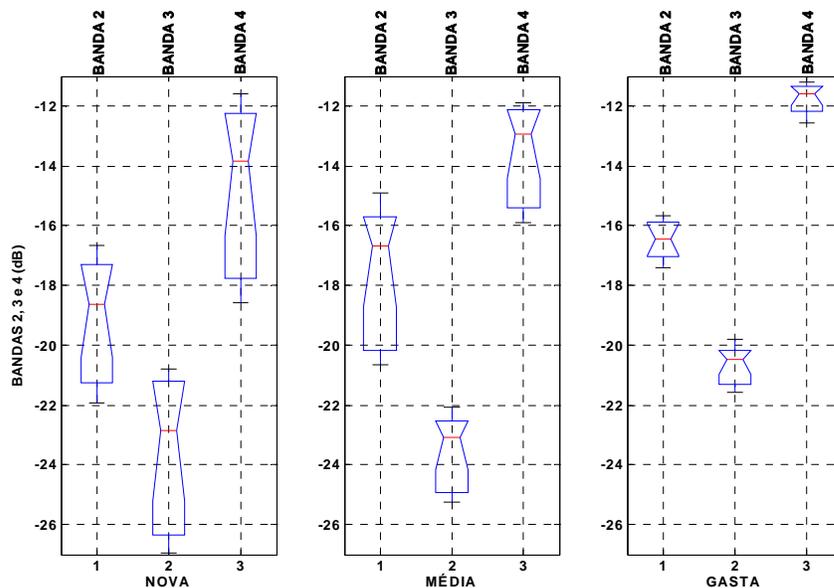


Figura 4.16 – Gráficos *boxplot* para os parâmetros banda 2, banda 3 e banda 4 na condição de corte 1.

Na figura anterior pode-se observar uma pequena diminuição na sobreposição dos quartis dos parâmetros, especialmente no estágio de desgaste mais elevado. Porém, o distanciamento entre as medianas revelou-se aqui também como um critério mais interessante para a diferenciação dos estágios de desgaste através destes parâmetros.

As Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 apresentam os gráficos *boxplot* para alguns dos parâmetros estatísticos na condição de corte 2.

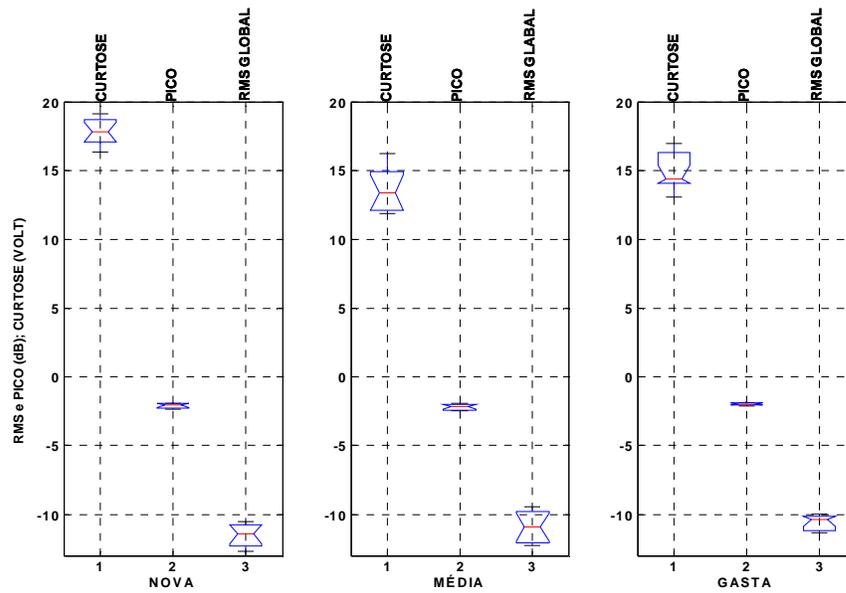


Figura 4.17 – Gráficos *boxplot* para os parâmetros curtose, pico e RMS global na condição de corte 2.

Os parâmetros mostrados na figura anterior apresentaram uma elevada sobreposição entre seus quartis para cada estágio de desgaste. As medianas também não mostraram um distanciamento razoável entre os estágios de desgaste para estes parâmetros.

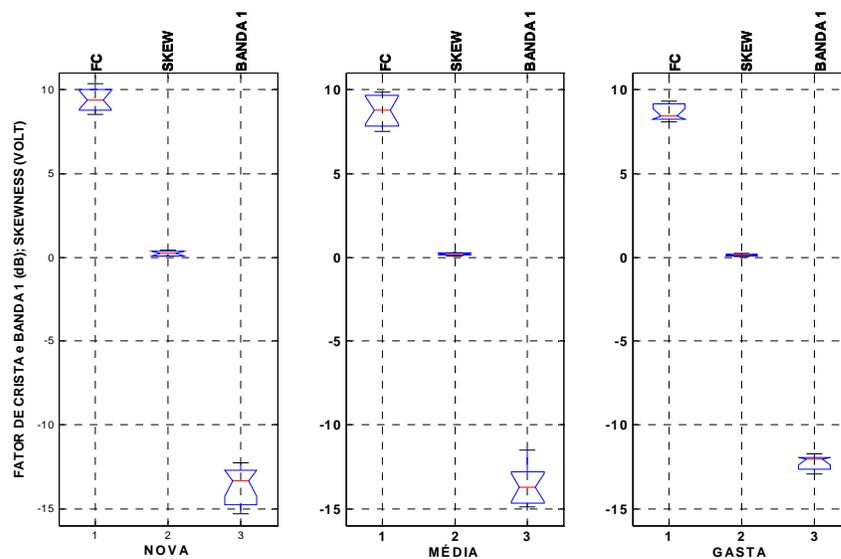


Figura 4.18 – Gráficos *Boxplot* para os parâmetros fator de crista, skewness e banda 1 na condição de corte 2.

Os parâmetros apresentados na figura anterior apresentam uma elevada sobreposição entre os quartis de cada estágio de desgaste, com exceção para o estágio de desgaste mais elevado do parâmetro banda 1. As medianas não se revelaram um bom critério, apresentando um melhor distanciamento apenas para o parâmetro banda 1.

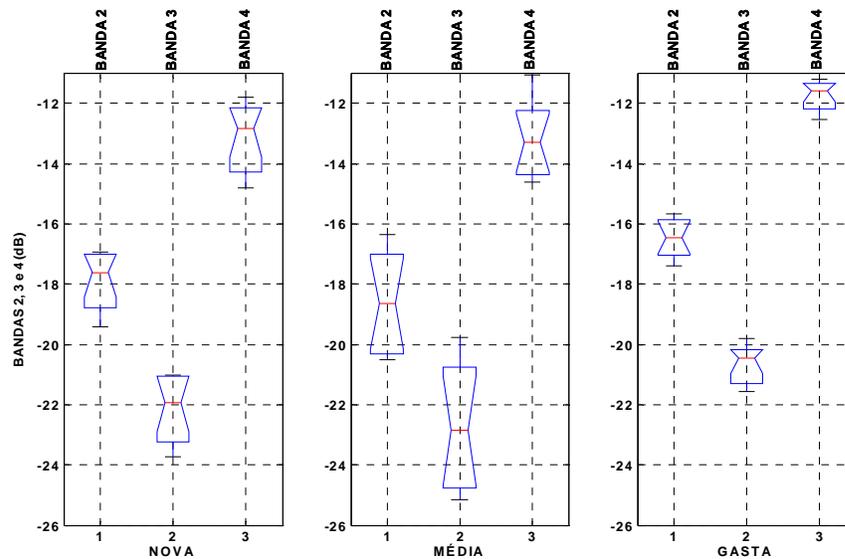


Figura 4.19 – Gráficos *Boxplot* para os parâmetros banda 2, banda 3 e banda 4 na condição de corte 2.

Os parâmetros apresentados na figura anterior apresentam sobreposição entre os quartis dos grupos que representam os estágios de desgaste nova e média, porém uma baixa sobreposição entre quartis dos grupos que representam o estágio de desgaste mais elevado. A mediana apresentou um bom distanciamento entre os estágios de desgaste para estes parâmetros.

A Figura 4.20 apresenta o *boxplot* dos parâmetros curtose, pico e RMS global para a condição de corte 3.

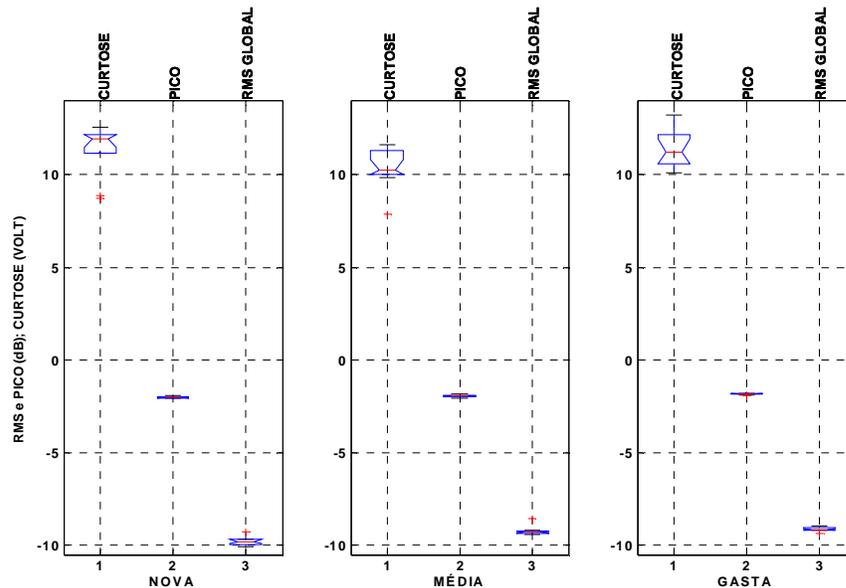


Figura 4.20 – Gráficos *Boxplot* para os parâmetros curtose, pico e RMS global na condição de corte 3.

Destes parâmetros acima, apenas o parâmetro curtose apresenta uma fácil visualização. Para este, houve uma sobreposição razoável entre os quartis dos grupos de desgaste, principalmente entre o do estágio de desgaste média com os outros dois estágios. Com relação à mediana, os estágios de desgaste nova e gasta apresentaram baixo distanciamento.

As Figuras 4.21 e 4.22 mostram aproximações da figura anterior para melhorar a visualização dos parâmetros pico e RMS global, respectivamente. Na figura anterior, estes parâmetros aparecem bastante achatados em função da escala geral empregada no gráfico.

Para o parâmetro pico, não houve nenhuma sobreposição dos quartis dos grupos que representam os estágios de desgaste. A mediana também apresenta um bom distanciamento entre seus valores para cada estágio de desgaste.

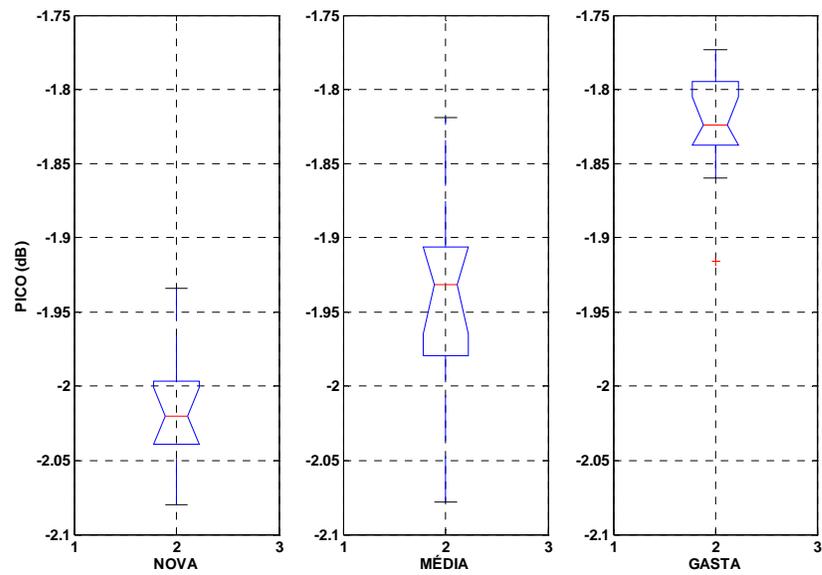


Figura 4.21 – Aproximação do gráfico *boxplot* anterior para a visualização do parâmetro pico.

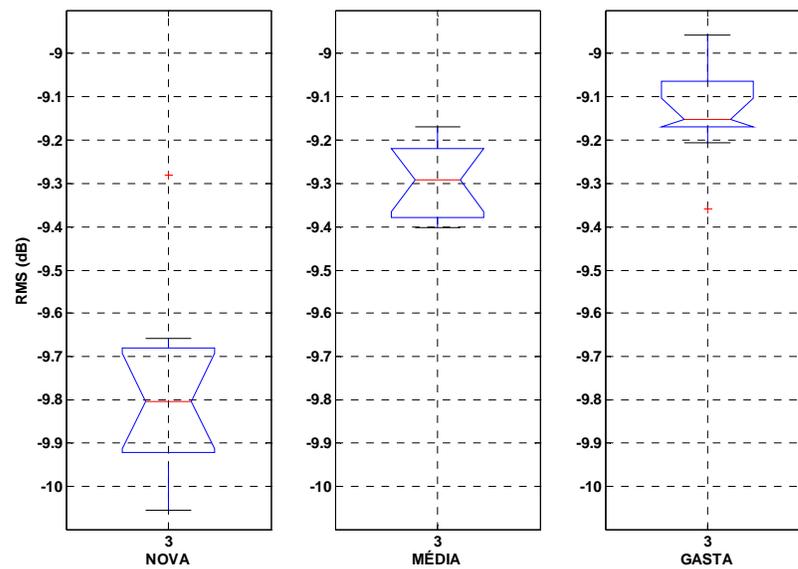


Figura 4.22 – Aproximação do gráfico *boxplot* anterior para a visualização do parâmetro RMS global.

Para o parâmetro RMS, também não houve nenhuma sobreposição dos quartis dos grupos que representam os estágios de desgaste. A mediana também apresenta um bom distanciamento entre seus valores para cada estágio de desgaste.

As Figuras 4.23 e 4.24 apresentam os gráficos *boxplot* para o restante dos parâmetros empregados na condição de corte 3.

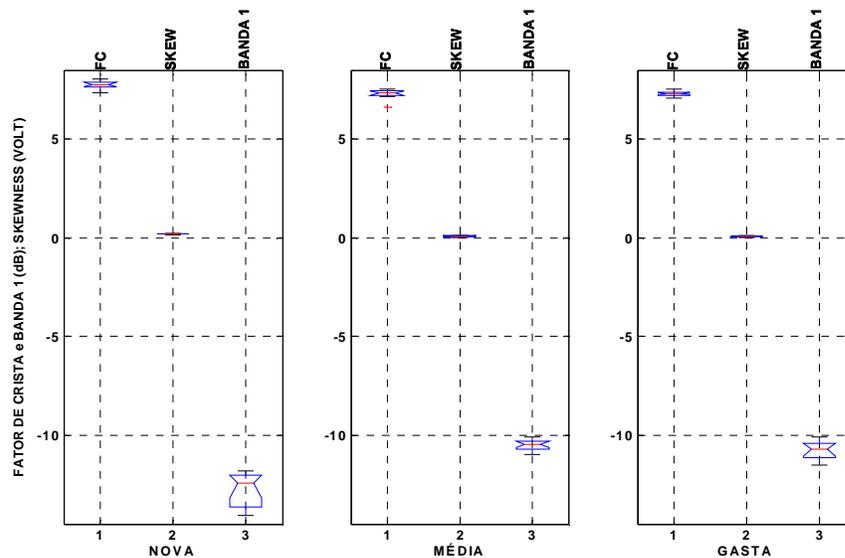


Figura 4.23 – Gráficos *Boxplot* para os parâmetros fator de crista, *skewness* e Banda 1 na condição de corte 3.

Os parâmetros da figura anterior apresentam sobreposição entre os quartis dos grupos que representam os estágios de desgaste. Em todos parâmetros, apenas o estágio de desgaste nova apresenta boa diferenciação. As medianas apresentam um baixo distanciamento, exceção também apenas para o estágio de desgaste nova.

Nesta figura, dos parâmetros apresentados, apenas o parâmetro banda 3 não apresenta nenhuma sobreposição dos quartis entre os estágios de desgaste. As medianas apresentam um razoável distanciamento entre estágios de desgaste, com exceção do parâmetro banda 4, em que os estágios média e gasta estão bem próximos.

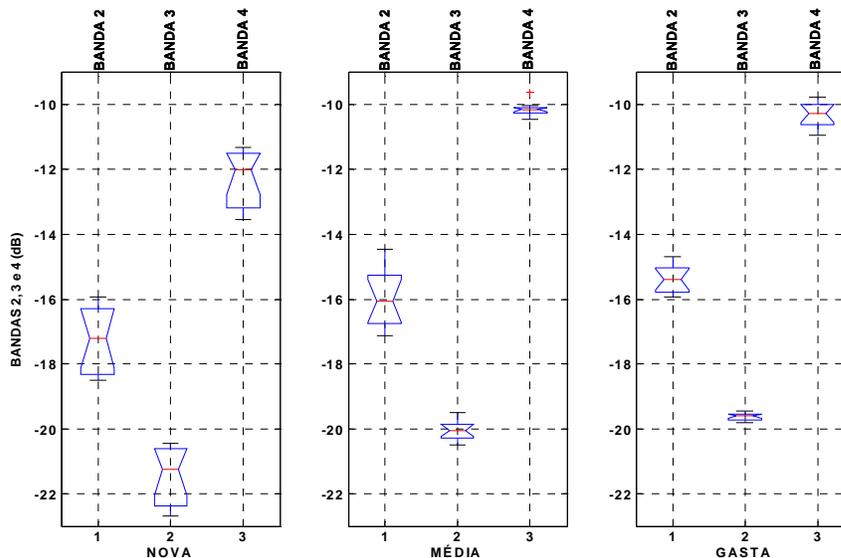


Figura 4.24 – Gráficos *Boxplot* para os parâmetros Banda 2, Banda 3 e Banda 4 na condição de corte 3.

Destas figuras analisadas foram escolhidos os parâmetros que apresentavam maior sensibilidade na tarefa de diferenciar os estágios de desgaste. Dos nove parâmetros estatísticos estudados, buscou-se escolher três ou no máximo quatro mais adequados para cada condição de corte.

A condição de corte 1 (desbaste) foi a que apresentou maiores dificuldades para encontrar parâmetros bem diferenciados. Nesta condição, a geração de energia que origina as ondas elásticas da EA é normalmente mais elevada devido ao emprego de parâmetros de corte mais severos. Este fato pode estar evidenciando outros fenômenos que ocorrem na usinagem que possuem maiores quantidades de energia nesta situação e mascarando as fontes de EA que se relacionam com o desgaste. Com isto, os parâmetros escolhidos neste trabalho para descreverem o sinal não conseguem reproduzir as variações no desgaste com muita clareza, nesta condição de corte. Porém, três parâmetros se apresentaram com melhores características para diferenciar o desgaste e foram selecionados baseados principalmente no distanciamento das medianas. O distanciamento variou de 1 a 2 decibéis, valores razoáveis levando-se em consideração a escala total de variação destes parâmetros. Os parâmetros selecionados para a condição de corte 1 foram:

- . Banda 1;
- . Banda 2;
- . Banda 3.

Na banda 1, o grupo que representa a ferramenta em um estágio de desgaste médio está completamente inserido no grupo que representa uma ferramenta nova. Contudo, suas medianas apresentam uma razoável separação. O grupo que representa a ferramenta desgastada apresentou uma boa diferenciação, com uma mediana bem separada e linhas que representa seus quartis completamente fora dos demais.

No caso das bandas 2 e 3, a diferenciação ocorreu melhor através das medianas. Os grupos representando cada estágio de desgaste não bons na diferenciação, pois havia grande sobreposição dos dados.

A condição de corte 2 (intermediária) apresentou menos dificuldades na seleção de parâmetros que a condição 1, porém, mais que a condição 3 (acabamento). Para este fato pode-se aplicar a mesma explicação dada nas discussões para a condição 1. Então, à medida que a severidade da operação diminui, algumas das fontes de EA que estão ligadas ao desgaste ficam mais evidenciadas. Os parâmetros selecionados para a condição de corte 2 foram:

- . Banda 1;
- . Banda 2;
- . Banda 3;
- . Banda 4.

As bandas 1, 2, 3 e 4 apresentaram uma fraca diferenciação entre grupos, havendo uma razoável sobreposição de seus valores extremos. Portanto, as medianas foram mais eficientes para a diferenciação, havendo um distanciamento de até 2 decibéis entre elas. Todos os parâmetros selecionados na condição 2 apresentaram uma queda da mediana para o estágio de desgaste médio em relação a ferramenta nova. Quando o desgaste está no nível mais elevado, há um crescimento considerável da mediana. Este comportamento foi verificado em boa parte dos parâmetros em que se retirou o valor RMS (RMS global, banda 1, banda 2, banda 3 e banda 4).

O valor eficaz (RMS) representa uma das medidas mais importantes da amplitude, uma vez que ele quantifica a energia contida no sinal. Portanto, este parâmetro estaria descrevendo uma acomodação do sinal no estágio de desgaste intermediário. Este fato é coerente com a curva que descreve o comportamento padrão da evolução da taxa desgaste de uma ferramenta.

O comportamento padrão de desgaste apresenta um rápido crescimento da taxa de desgaste no início da utilização da ferramenta. A seguir, este passa por um período relativamente longo de estabilização até que a taxa desgaste rapidamente cresça e a ferramenta atinja seu final da vida. Nestes períodos de crescimento rápido da taxa, há uma

maior geração da energia que origina a EA que no estágio intermediário do desgaste, onde há uma acomodação do sinal. E, finalmente, no estágio final de desgaste da ferramenta, o nível da energia é maior que os dois estágios anteriores. Portanto, os parâmetros citados estão reproduzindo este comportamento.

Na condição de corte 3 (acabamento), quase todos parâmetros apresentaram boas condições de diferenciação do estágio de desgaste. Foram escolhidos os que mais se sobressaíram para esta tarefa. Os parâmetros selecionados para a condição de corte 3 foram:

- . Pico;
- . RMS;
- . Banda 3.

Em todos estes parâmetros escolhidos para a condição de corte 3, houve uma evolução crescente dos valores da mediana. Houve muito pouca sobreposição dos valores extremos de um grupo dentro de outro, o que irá facilitar muito no reconhecimento de padrões com este sinal.

Diferentemente das outras condições, os parâmetros que empregam o RMS não apresentaram o comportamento entre os estágios de desgaste descritos na condição de corte 2. Este comportamento diferenciado pode ser justificado pela menor geração de energia proveniente de operações de acabamento, fazendo com que não seja possível reproduzir as fases de rápido crescimento da fase de acomodação do desgaste. Nesta situação, a EA se mostrou satisfatória apenas para reconhecer a evolução dos estágios de desgaste propostos neste trabalho.

#### 4.2.4 Saída da rede (classificação do sinal de entrada)

Nesta etapa foi possível analisar o índice de acertos dos procedimentos descritos nas etapas anteriores.

A resposta de uma PNN é a probabilidade de um conjunto de dados fornecidos a ela pertencer a uma das classes previamente definidas durante a etapa de treinamento. Em cada uma das classes aparecerá o valor da probabilidade, mesmo que zero, dos dados pertencerem a ela. Aqui foram empregados os dados reservados (quatro repetições) para validação do treinamento.

A Tabela 4.4 apresenta as classificações para a condição de corte 1 e com três estágios de desgaste distintos (ferramenta nova, média e gasta). Nesta tabela, na primeira coluna, aparecem a qual das quatro repetições pertencem os dados fornecidos a rede. As quatro primeiras linhas desta coluna indicam que o conjunto de dados é de uma ferramenta nova, as quatro seguintes são de um conjunto de dados de uma ferramenta com desgaste intermediário

e as quatro últimas são de um conjunto de dados das ferramentas com desgaste elevado. Todas essas separações podem ser visualizadas na última coluna.

Cada repetição possui um conjunto de dados para cada estágio do desgaste. Estes conjuntos de dados foram fornecidos a rede sem que esta soubesse previamente a qual classe eles pertencem.

As três colunas intermediárias indicam a probabilidade dos dados de cada repetição pertencerem a cada uma das classes que representam os estágios de desgaste. A coluna que estiver em destaque (números em negrito) é aquela que se espera que os dados pertençam, para dado estágio de desgaste. Isto quer dizer que, para um conjunto de dados de certo estágio, é esperado que a probabilidade deste pertencer a sua respectiva classe seja maior que as outras classes.

Tabela 4.4 – Classificação da PNN para a condição de corte 1 com três estágios de desgaste da ferramenta distintos (nova, média e gasta).

	Classe: nova (%)	Classe: média (%)	Classe: gasta (%)	Desgaste
Repetição 1	<b>99,97</b>	0,00	0,03	Ferramenta nova
Repetição 2	<b>99,76</b>	0,00	0,24	
Repetição 3	<b>13,95</b>	0,46	85,58	
Repetição 4	<b>0,13</b>	27,42	72,42	
Repetição 1	0,00	<b>77,01</b>	22,99	Ferramenta Média
Repetição 2	0,00	<b>20,18</b>	79,82	
Repetição 3	0,00	<b>99,20</b>	0,80	
Repetição 4	0,01	<b>59,68</b>	40,31	
Repetição 1	0,67	0,00	<b>99,33</b>	Ferramenta gasta
Repetição 2	46,28	0,00	<b>53,72</b>	
Repetição 3	10,00	2,90	<b>87,10</b>	
Repetição 4	00,24	23,59	<b>76,17</b>	

A Tabela 4.5 mostra a classificação para os mesmos dados da condição de corte 1. Porém, esta tabela foi empregada para a situação de desgaste da ferramenta em que há apenas duas classificações. A ferramenta será classificada como em condições (boa) ou como ferramenta com desgaste elevado (gasta). A primeira classificação é resultado da união dos dois primeiros estágios de desgaste da tabela anterior.

A mesma leitura da tabela anterior pode ser aplicada a esta com relação aos valores das duas colunas intermediárias. Dentro de certo estágio de desgaste, é esperado que os valores das repetições de validação tenham maior probabilidade de pertencer a sua respectiva classe. Os valores desta classe estarão evidenciados com negrito.

As tabelas seguintes seguem o mesmo padrão, mudando apenas a condição de corte empregada na geração do conjunto de dados.

Tabela 4.5 – Classificação da PNN para a condição de corte 1 com dois estágios de desgaste da ferramenta distintos (ferramenta boa e ferramenta gasta).

	Classe: boa (%)	Classe: gasta (%)	Desgaste
Repetição 1	<b>99,93</b>	0,07	Ferramenta boa
Repetição 2	<b>99,50</b>	0,50	
Repetição 3	<b>7,88</b>	92,12	
Repetição 4	<b>16,06</b>	83,94	
Repetição 5	<b>62,46</b>	37,54	
Repetição 6	<b>11,36</b>	88,64	
Repetição 7	<b>98,33</b>	1,67	
Repetição 8	<b>42,46</b>	57,54	
Repetição 1	0,35	<b>99,65</b>	Ferramenta gasta
Repetição 2	30,05	<b>69,95</b>	
Repetição 3	7,00	<b>93,00</b>	
Repetição 4	13,62	<b>86,38</b>	

Analisando as tabelas anteriores, conclui-se que a porcentagem de acertos da PNN para distinguir os três estágios de desgaste foi de 75 % e para distinguir os dois estágios de desgaste também foi de 66,67 %. O critério adotado para se atingir estas porcentagens foi de a rede reconhecer o estágio de desgaste na sua respectiva classe com probabilidade acima de 50 %.

Se for analisada a capacidade de reconhecimento apenas por estágio de desgaste, na primeira tabela observa-se que o índice de acertos para o estágio nova foi de 50 %, para o estágio média foi de 75 % e para o estágio gasta foi de 100 %. Pela segunda tabela, observa-se o índice de acertos para o estágio de desgaste boa foi de 50 %, mas para o reconhecimento do estágio gasta foi de 100 %.

Era esperado que a PNN tivesse certas dificuldades com sua tarefa de reconhecer o estágio de desgaste para essa condição de corte (desbaste). Quando foram extraídos os parâmetros estatísticos que seriam fornecidos à rede, verificou-se, através da ferramenta *boxplot*, que cada conjunto de dados formado por cada parâmetro (cada um representando certa condição de desgaste) tinham os bigodes sobrepostos entre si. As explicações sobre os motivos desta interferência foram discutidas na seção 4.2.3.

Portanto, ao se empregar estes parâmetros como dados de entrada da rede, eles reproduziram na PNN a dificuldade que tiveram para separar o estado de desgaste da ferramenta nos gráficos *boxplot*.

A Tabela 4.6 mostra as classificações da PNN para os dados de validação da condição de corte 2 com três estágios de desgaste distintos (ferramenta nova, média e gasta).

Tabela 4.6 – Classificação da PNN para a condição de corte 2 com três estágios de desgaste da ferramenta distintos (nova, média e gasta).

	Classe: nova (%)	Classe: média (%)	Classe: gasta (%)	Desgaste
Repetição 1	<b>99,75</b>	0,00	0,25	Ferramenta nova
Repetição 2	<b>0,76</b>	2,90	96,34	
Repetição 3	<b>68,05</b>	19,32	12,62	
Repetição 4	<b>59,44</b>	1,19	39,37	
Repetição 1	0,00	<b>100,00</b>	0,00	Ferramenta Média
Repetição 2	0,00	<b>100,00</b>	0,00	
Repetição 3	11,84	<b>51,05</b>	37,11	
Repetição 4	47,93	<b>37,02</b>	15,05	
Repetição 1	10,33	6,55	<b>83,12</b>	Ferramenta gasta
Repetição 2	57,86	7,31	<b>34,83</b>	
Repetição 3	0,00	8,45	<b>91,55</b>	
Repetição 4	0,00	0,56	<b>99,44</b>	

A Tabela 4.7 mostra as classificações da PNN para os dados de validação da condição de corte 2 com dois estágios de desgaste distintos (ferramenta boa e ferramenta gasta).

Tabela 4.7 – Classificação da PNN para a condição de corte 2 com dois estágios de desgaste da ferramenta distintos (ferramenta boa e ferramenta gasta).

	Classe: boa (%)	Classe: gasta (%)	Desgaste
Repetição 1	<b>96,09</b>	3,91	Ferramenta boa
Repetição 2	<b>6,35</b>	93,65	
Repetição 3	<b>33,29</b>	66,71	
Repetição 4	<b>42,06</b>	57,94	
Repetição 5	<b>100,00</b>	0,00	
Repetição 6	<b>100,00</b>	0,00	
Repetição 7	<b>46,33</b>	53,67	
Repetição 8	<b>72,27</b>	27,73	
<hr/>			
Repetição 1	18,88	<b>81,12</b>	Ferramenta gasta
Repetição 2	47,90	<b>52,10</b>	
Repetição 3	7,60	<b>92,40</b>	
Repetição 4	0,97	<b>99,03</b>	

Analisando as duas tabelas anteriores que mostram os resultados da classificação da rede para a condição de corte 2 (intermediária), observa-se que o índice de acertos não melhorou em relação à condição de corte 1. Na situação que empregou três estágios de desgaste o índice de acertos geral da rede foi de 75 % e na situação que empregou dois estágios de desgaste o índice de acerto foi de 66,67 %.

Na análise do estágio de desgaste individualmente, para a tabela com três estágios de desgaste distintos, o índice de acertos para o estágio nova foi de 75 %, para o estágio média foi de 75 % e para o estágio gasta também foi 75 %. No caso da tabela com dois estágios de desgaste distintos, o índice de acertos foi de 50 % para o estágio boa e de 100 % para o estágio gasta.

Novamente a alta interferência entre os grupos representantes de cada estágio de desgaste, discutida na seção 4.2.3, interferiu na capacidade de reconhecimento da rede. A extração dos parâmetros teve de ser realizada levando-se em consideração apenas a separação das medianas.

A Tabela 4.8 mostra as classificações da PNN para os dados de validação da condição de corte 3 com três estágios de desgaste distintos (ferramenta nova, média e gasta).

Tabela 4.8 – Classificação da PNN para a condição de corte 3 com três estágios de desgaste da ferramenta distintos (nova, média e gasta).

	Classe: nova (%)	Classe: média (%)	Classe: gasta (%)	Desgaste
Repetição 1	<b>100,00</b>	0,00	0,00	Ferramenta nova
Repetição 2	<b>100,00</b>	0,00	0,00	
Repetição 3	<b>100,00</b>	0,00	0,00	
Repetição 4	<b>100,00</b>	0,00	0,00	
Repetição 1	0,00	<b>68,33</b>	31,67	Ferramenta Média
Repetição 2	0,00	<b>96,26</b>	3,74	
Repetição 3	0,00	<b>99,65</b>	0,35	
Repetição 4	0,00	<b>87,02</b>	12,98	
Repetição 1	0,00	0,00	<b>100,00</b>	Ferramenta gasta
Repetição 2	0,00	11,60	<b>88,40</b>	
Repetição 3	0,00	4,88	<b>95,12</b>	
Repetição 4	0,00	9,55	<b>90,45</b>	

Nesta tabela observa-se que a condição de corte 3 (acabamento) foi a que obteve os melhores resultados na classificação. Este resultado também era esperado visto que, na etapa de extração dos parâmetros relevantes, foi a que apresentou maiores facilidades na seleção. As razões deste resultado também estão discutidas na seção 4.2.3.

A Tabela 4.9 mostra as classificações da PNN para os dados de validação da condição de corte 3 com dois estágios de desgaste distintos (ferramenta boa e ferramenta gasta).

O índice geral de acerto foi de 100 % para a situação de três estágios distintos de desgaste e de 100 % para o caso de acerto na situação de apenas dois estágios de desgaste. Com isto, o índice de acertos para o reconhecimento dos estágios de desgaste individualmente também foi de 100 % tanto para a tabela com os três estágios distintos quanto para a tabela com dois estágios de desgaste distintos.

Tabela 4.9 – Classificação da PNN para a condição de corte 3 com dois estágios de desgaste da ferramenta distintos (ferramenta boa e ferramenta gasta).

	Classe: boa (%)	Classe: gasta (%)	Desgaste
Repetição 1	<b>100,00</b>	0,00	Ferramenta boa
Repetição 2	<b>100,00</b>	0,00	
Repetição 3	<b>100,00</b>	0,00	
Repetição 4	<b>100,00</b>	0,00	
Repetição 5	<b>51,92</b>	48,08	
Repetição 6	<b>92,80</b>	7,20	
Repetição 7	<b>99,30</b>	0,70	
Repetição 8	<b>77,07</b>	22,93	
<hr/>			
Repetição 1	0,00	<b>100,00</b>	Ferramenta gasta
Repetição 2	6,14	<b>93,86</b>	
Repetição 3	2,50	<b>97,50</b>	
Repetição 4	5,00	<b>95,00</b>	

A seguir serão apresentados os resultados da classificação da rede quando não há distinção da condição de corte. O objetivo deste procedimento foi observar se a rede seria eficiente no reconhecimento das classes independente da condição de corte, o que é uma situação mais realista no chão de fábrica de uma indústria.

Não foi realizada nova avaliação, item por item, como a descrita até esta seção. O objetivo foi verificar se os mesmos procedimentos aplicados para reconhecer o estágio de desgaste em uma condição de corte qualquer poderiam ser eficiente mesmo se não fosse fornecido em que condições foram realizadas as aquisições. Isto é importante pois, como verificado nos resultados anteriores, a análise empregada com EA não foi muito sensível às condições de corte mais severas. Portanto, para este procedimento, os parâmetros simplesmente foram somados, como explicado no parágrafo anterior. Com isto, cada estágio de desgaste, que tinha três ou quatro parâmetros por condição de corte, passou a ter dez parâmetros para representá-lo, mesmo que alguns sejam repetidos.

A Tabela 4.10 mostra as classificações da PNN para os dados de validação com três estágios de desgaste distintos independente da condição de corte.

Tabela 4.10 – Classificação da PNN para três estágios de desgaste da ferramenta distintos (nova, média e gasta) independente da condição de corte.

	Classe: nova (%)	Classe: média (%)	Classe: gasta (%)	Desgaste
Repetição 1	<b>100,00</b>	0,00	0,00	Ferramenta nova
Repetição 2	<b>12,72</b>	0,00	87,28	
Repetição 3	<b>100,00</b>	0,00	0,00	
Repetição 4	<b>100,00</b>	0,00	0,00	
Repetição 1	0,00	<b>100,00</b>	0,00	Ferramenta Média
Repetição 2	0,00	<b>100,00</b>	0,00	
Repetição 3	0,00	<b>99,76</b>	0,24	
Repetição 4	0,00	<b>83,25</b>	16,75	
Repetição 1	0,00	0,00	<b>100,00</b>	Ferramenta gasta
Repetição 2	0,00	0,00	<b>100,00</b>	
Repetição 3	0,00	0,07	<b>99,95</b>	
Repetição 4	0,00	1,31	<b>98,69</b>	

A Tabela 4.11 mostra as classificações da PNN para os dados de validação com dois estágios de desgaste distintos independente da condição de corte.

Estas tabelas mostram que a rede obteve um índice de acerto de 91,67 % no reconhecimento da classe a qual o estágio de desgaste pertence.

Na situação em que se empregou três estágios distintos de desgaste, a rede acertou quatro das quatro repetições empregadas para validação (100%), tanto para ferramenta com estágio de desgaste intermediário como para ferramenta com desgaste elevado. Para uma ferramenta nova, a rede acertou três em quatro repetições (75 %).

Na situação em que se empregou apenas dois estágios de desgaste, a rede acertou sete em oito repetições para a ferramenta boa (87,5 %). Para a ferramenta gasta, a rede acertou na classificação de todas quatro repetições (100 %).

Destas duas últimas tabelas, observa-se que o valor responsável por a rede não obter um índice de acerto de 100 % em qualquer situação foi a repetição 2 dos valores de validação. Analisando todas tabelas anteriores que descrevem os resultados da rede, observa-se que na condição de corte 2 esta mesma repetição apresenta valores extremamente baixos onde deveria haver a classificação correta.

Tabela 4.11 – Classificação da PNN para dois estágios de desgaste da ferramenta distintos (ferramenta boa e ferramenta gasta) independente da condição de corte.

	Classe: boa (%)	Classe: gasta (%)	Desgaste
Repetição 1	<b>100,00</b>	0,00	Ferramenta boa
Repetição 2	<b>1,57</b>	98,43	
Repetição 3	<b>100,00</b>	0,00	
Repetição 4	<b>100,00</b>	0,00	
Repetição 5	<b>100,00</b>	0,00	
Repetição 6	<b>100,00</b>	0,00	
Repetição 7	<b>99,99</b>	0,01	
Repetição 8	<b>80,27</b>	19,73	
<hr/>			
Repetição 1	0,00	<b>100,00</b>	Ferramenta gasta
Repetição 2	0,00	<b>100,00</b>	
Repetição 3	0,00	<b>100,00</b>	
Repetição 4	0,05	<b>99,95</b>	

Como esta etapa do trabalho foi realizada com a adição de todas repetições de todas as condições de corte, certamente a repetição 2 da condição de corte 2 influenciou fortemente no erro de classificação da rede. Portanto, esta repetição deve apresentar um problema aleatório, tal como um erro ou algum fator que passou despercebido durante a aquisição, visto que as repetições 2 das outras condições comportaram dentro do esperado.

O bom índice de acertos de classificação nesta última situação pode ser justificado pelo aumento do número de amostras por cada estágio de desgaste que foram fornecidas para a rede. Com isto, aproxima-se da função densidade de probabilidade (fdp) verdadeira e aumenta-se a probabilidade de um certo valor cair dentro do trecho que representa a classificação correta. Como houve uma limitação no número de repetições para as condições de corte avaliadas individualmente, valores que antes não foram classificados corretamente aumentaram suas chances de serem incluídos dentro da classe correta.

Uma análise mais aprofundada destes resultados baseia-se no estimador de Parzen, empregado na PNN. Este estimador demonstra ser uma ótima ferramenta para aproximar a verdadeira função densidade de probabilidade quando o número de amostras cresce. Como a PNN é baseada na regra de decisão de Bayes, a classificação será mais correta se lhe for fornecido uma estimativa mais aproximada da fdp verdadeira. Estas explicações podem ser vistas mais detalhadamente na seção 2.4.7 da revisão sobre redes neurais artificiais.

A seguir, será apresentado um resumo dos índices de acertos da rede (PNN) no reconhecimento do estágio de desgaste correto:

Porcentagem de acerto total na classificação (critério: classificação correta e probabilidade acima de 50 %):

Condição de corte 1 (desbaste):

- . Para 3 estágios de desgaste: 75,00 %
- . Para 2 estágios de desgaste: 66,67 %

Condição de corte 2 (intermediária):

- . Para 3 estágios de desgaste: 75,00 %
- . Para 2 estágios de desgaste: 66,67 %

Condição de corte 3 (acabamento):

- . Para 3 estágios de desgaste: 100,00 %
- . Para 2 estágios de desgaste: 100,00 %

Independente da condição de corte:

- . Para 3 estágios de desgaste: 91,67 %
- . Para 2 estágios de desgaste: 91,67 %

Porcentagem de acerto na classificação por estágio de desgaste (critério: classificação correta e probabilidade acima de 50 %):

Condição de corte 1 (desbaste):

- . Para 3 estágios de desgaste:
  - . Nova: 50 %
  - . Média: 75 %
  - . Gasta: 100 %
- . Para 2 estágios de desgaste:
  - . Boa: 50 %
  - . Gasta: 100 %

Condição de corte 2 (intermediária):

- . Para 3 estágios de desgaste:
  - . Nova: 75 %
  - . Média: 75 %

- . Gasta: 75 %
- . Para 2 estágios de desgaste:
  - . Boa: 50 %
  - . Gasta: 100 %

Condição de corte 3 (acabamento):

- . Para 3 estágios de desgaste:
  - . Nova: 100 %
  - . Média: 100 %
  - . Gasta: 100 %
- . Para 2 estágios de desgaste:
  - . Boa: 100 %
  - . Gasta: 100 %

Independente da condição de corte:

- . Para 3 estágios de desgaste:
  - . Nova: 75 %
  - . Média: 100 %
  - . Gasta: 100 %
- . Para 2 estágios de desgaste:
  - . Boa: 87,5 %
  - . Gasta: 100 %



## Capítulo V

### Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas neste trabalho.

- 1) O mapa de intensidade luminosa empregado no fresamento mostrou-se uma interessante ferramenta na avaliação de alguns problemas típicos desta operação, tais como: erros de batimento axial e radial e insertos com diferentes níveis de desgaste.
- 2) É possível representar a superfície usinada através do mapa de intensidade luminosa. Nesta representação identificam-se fenômenos como: maior intensidade de energia durante o impacto do inserto na entrada da peça; uma área difusa na saída da peça, que é gerada pela intensa formação de rebarbas nesta região; o momento exato em que a aresta de corte do inserto lascou; também é possível observar o momento em que as arestas alisadoras raspam a superfície da peça durante a fase inativa.
- 3) Os espectros de potência mostram que o nível de energia do sinal de emissão acústica tem valores maiores para as frequências próximas de 150 kHz e 200 kHz para este trabalho.
- 4) Quanto menos severas foram as condições de corte empregada, mais fácil foi a diferenciação dos estágios de desgaste da ferramenta através dos espectros de potência do sinal de emissão acústica.
- 5) A faixa de frequência de 120 a 300 kHz mostrou ser interessante, dentro do espectro utilizado (50 a 500 kHz), para a diferenciação dos estágios de desgaste. Dentro desta faixa há outras menores que apresentam resultados de diferenciação ainda melhores.
- 6) A variação do posicionamento relativo do sensor de EA com a região de corte devido ao movimento causado pelo avanço, apresentou influência nos dados adquiridos. As duas

aquisições realizadas quando a região de corte se aproximava do sensor diferenciaram da aquisição quando a região de corte se afastava.

7) Os gráficos *boxplot* demonstraram ser uma ferramenta útil para análise de sensibilidade e extração dos parâmetros estatísticos empregados que foram mais sensíveis. Estes gráficos expõem claramente o comportamento estatístico dos dados facilitando sua análise.

8) Os parâmetros banda 1, banda 2, banda 3, banda 4 além do RMS global foram os mais representativos da evolução do desgaste em todas condições de corte. Isto quer dizer os parâmetros que empregam o filtro RMS, que quantifica a energia contida no sinal, foram os que melhor descreveram o comportamento geral da evolução do desgaste.

9) Dos parâmetros que empregam o filtro RMS a banda 3 foi o que melhor representou a evolução do desgaste para as condições de corte empregadas. Isto indica que uma faixa de frequências próxima de 260 a 300 kHz pode ser ideal para o monitoramento do desgaste com o sinal  $EA_{RMS}$ .

10) Os resultados da PNN foram bem consistentes na condição de acabamento. Foi possível classificar os estágios de desgaste das ferramentas com um excelente índice de acerto (100%). Nas condições de corte intermediária e de desbaste, os índices de acerto foram menores tanto para dois estágios de desgaste como para três (66,67 % e 75,00 %, respectivamente), com exceção do estágio de ferramenta desgastada. Neste caso, o índice de acerto também foi muito bom (quase sempre 100 %).

11) Os resultados da PNN mostram que o monitoramento do desgaste via emissão acústica é fortemente influenciado pelas condições de corte. Porém, quando não se informa a condição de corte empregada, os resultados foram extremamente satisfatórios, com índices de 91,67 % de acertos na classificação do estágio de desgaste.

## 5.1 – Sugestão para Trabalhos Futuros

- . Expandir progressivamente este trabalho realizado com um inserto para dois, quatro e oito insertos.
  
- . Verificar a viabilidade desta proposta de monitoramento para fresas com mais de oito insertos, para diferentes penetrações de trabalho, para o fresamento de topo e o tangencial, para diferentes geometrias de ferramentas e para diferentes materiais da peça e da ferramenta.
  
- . Criar procedimentos para que o monitoramento seja capaz não só de avaliar a condição de desgaste das ferramentas na fresa, mas também de apontar qual delas está fora dos padrões de desgaste recomendável.
  
- . Utilizar outros sinais, como o de potência, trabalhando em conjunto e simultaneamente com a emissão acústica, para verificar se há uma melhora ainda mais significativa da resposta do sistema.
  
- . Elaborar um *software* para utilizar todos os procedimentos deste trabalho em um processo de monitoramento em tempo real.
  
- . Verificar a viabilidade da utilização destas propostas de monitoramento em tempo real via emissão acústica em um ambiente industrial.



## Capítulo VI

### Referências Bibliográficas

ABNT, NBR 6162. **Movimentos e Relações Geométricas na Usinagem dos Metais – Terminologia**. 1989.

ABNT, NBR 6163. **Conceitos da Técnica de Usinagem – Geometria da Cunha Cortante – Terminologia**. 1980.

ASPINWALL, D.K.; CHEN, W. Machining Grey Cast Iron using Advanced Ceramic Tool Materials. 1978, 27<sup>th</sup> International MATADOR Conference, Manchester, UK.

AXINTE, D.A. Approach Into the Use of Probabilistic Neural Networks for Automated Classification of Tool Malfunctions in Broaching. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. 46, pp. 1445-1448, 2005.

AXINTE, D.A.; GINDY, N.; FOX, K.; UNANVE, I. Process Monitoring to Assist the Workpiece Surface Quality in Machining. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. 44, pp. 1091-1108, 2004.

BALINT, J.J.; BROWN, R.H. **International Journal Machining Tool Des. Res.**, vol. 4, pp. 117-122, 1964.

BEATTIE, A.G. Acoustic Emission: Principles and Instrumentation. **Journal of Acoustic Emission**. Volume 2, Number ½, 1983.

BER, A., KALDOR, S. The first second of cutting, wear behaviour. **Ann. CIRP** 31/1, pp. 13-17, 1982.

BHATIA, S.M.; PANDEY, P.C.; SHAN, H.S. The Thermal Condition of the Tool Cutting Edge in Intermittent Cutting. **Wear**. vol. 61, pp. 21-30, 1986.

BLUM, T.; INASAKI, I. A Study on Acoustic Emission from the Orthogonal Cutting Process. **Journal of Engineering for Industry**. vol. 112, pp. 203-211, 1990.

BOOTHROYD, G. **Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools**. New York: Mc Graw – Hill, 1975.

BRAGA, A.P.; CARVALHO, A.P.L.F.; LUDEMIR, T.B. **Fundamentos de Redes Neurais Artificiais**. 11ª Escola de Computação, UFRJ, 1998.

BRAGA, D.U. **Monitoramento do Processo de Torneamento via Parâmetros Elétricos do Motor**. 1992. Dissertação de Mestrado, DEF-FEM-UNICAMP.

CALDEIRANI FILHO, J. **Estudo e Monitoramento do Processo de Fresamento Frontal com Fresas de Insertos Intercambiáveis**. 1998. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

CHAO, B.T.; TRIGGER, K.J. **Trans. ASME**, vol. 77, pp.1074-1121, 1955.

CHATTOPADHYAY, A.K.; CHATTOPADHYAY, A.B. Wear and Performance of Coated Carbide and Ceramic Tools. **Wear**. vol. 80, pp. 239-258, 1982.

Centro de Informação Metal Mecânica (CIMM), Apostila Didática, Usinagem, <[http://www.cimm.com.br/cimm/geral/jsps/frame\\_univers.jsp?pagina=http://construtor.cimm.com.br/cgi-win/construt.cgi?configuradorresultado&id=1220&construt=true](http://www.cimm.com.br/cimm/geral/jsps/frame_univers.jsp?pagina=http://construtor.cimm.com.br/cgi-win/construt.cgi?configuradorresultado&id=1220&construt=true)>. Acesso em: 15 dezembro 2006.

DAN, L.; MATHEW, J. Tool wear and failure monitoring techniques for turning – a review. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. V. 30, pp. 579 – 598, 1990.

DE CARVALHO, S.R.; SILVA, S.M.M.L.; MACHADO, A.R.; GUIMARÃES, G. Determinação da Temperatura na Interface Cavaco-Ferramenta a Partir da Modelagem 3D do Conjunto Ferramenta e Porta-Ferramenta. In: 3º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, abril 2005, Joinville, SC, Brasil.

DE MELO, A.C.A. **Estudo das Trincas de Origem Térmica Geradas em Ferramentas de Metal Duro Durante o Fresamento Frontal**. 2001. Tese de Doutorado, FEMEC – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

DEARNLEY, P.A.; TRENT, E.M. Wear Mechanisms of Coated Carbides Tools. **Metals Technology**. vol. 9, February, pp.60-75, 1982.

DIEI, E.N.; DORNFELD, D.A. Acoustic Emission Sensing of Tool Wear in Peripheral Milling. **ASME**. vol. 14, pp. 107-124, 1984.

DIMLA SNR, D.E. **Multivariate Tool Condition Monitoring in a Metal Cutting Operation Using Neural Networks**. 1998, Ph.D. thesis, School of Engineering and the Built Environment, The University of Wolverhampton, UK.

DIMLA SNR, D.E. Sensor Signals for Tool-Wear Monitoring in Metal Cutting Operations – A Review of Methods. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. pp. 1073-1098, 2000.

DINIZ, A.E.; LIU, J.J., DORNFELD, D.A. Correlating Tool Life, Tool Wear and Surface Roughness by Monitoring Acoustic Emission in Finish Turning. **Wear**. 152, pp. 395-407, 1992.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia de Usinagem dos Materiais**. 3ª edição, São Paulo, Artliber Editora, 2001.

DOLINSEK, S.; KOPAC, J. Acoustic Emission Signals for Tool Wear Identification. **Wear**. 225-229, pp. 295-303, 1999.

DORNFELD, D.A. Monitoring of the Cutting Process by Means of AE Sensor. **Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Machine Tool Engineering Conference**. 1988.

DORNFELD, D.A. Neural Networks Sensor Fusion for Tool Condition Monitoring. CIRP, **CIRP Annals**, Vol. 39/1, pp, 101-105, 1990.

DORNFELD, D.A. Monitoring of Machining Process – Literature Review. In STC “C” Meeting. Paris: **CIRP**, p.51, 1992.

DOS SANTOS, A.L.B. **Metodologia Via Redes Neurais para Estimativa da Rugosidade e do Desgaste de Ferramentas de Corte no Processo de Fresamento**. 2001. Tese de Doutorado, FEMEC – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

DOS SANTOS, M.T. **Estudo do Monitoramento do Desgaste de Fresas de Topo Baseado em Emprego de Sensores**. 1988, Tese de Doutorado, USP, São Paulo.

DUARTE, M. A. V. **Manutenção Preditiva Via Análise de Vibrações**. Apostila Didática. Laboratório de Vibração e Acústica, FEMEC – Universidade Federal de Uberlândia, 2005, Uberlândia, MG.

DU, R.; ELBESTAWI, M.A.; WU, S.M. Automated Monitoring of Manufacturing Process, Part 1: Monitoring Methods. **Journal Engineering for Industry**. vol. 117, pp. 121-132, 1995.

DU, R.; ELBESTAWI, M.A.; WU, S.M. Automated Monitoring of Manufacturing Process, Part 2: Applications. **Journal Engineering for Industry**. vol. 117, pp. 133-141, 1995.

EL-WADARNY, T.I.; GAO, D.; ELBESTAWI, M.A. Tool Condition Monitoring in Drilling Using Vibration Signature Analyses. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. 36 (6), pp. 687-711, 1996.

EL-WADARNY, T.I.; MOHAMMED, E.; ELBESTAWI, M.A. Cutting Temperature of Ceramic Tools in High Speed Machining of Difficult-to-Cut Materials. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. Vol.36 nº 5, pp. 611-634, 1995.

FERNANDES, E.B.F.; ALVES, M.F.; JUNIOR, P.P.C. Classificação de Padrões de Afundamentos de Tensão em Sistemas de Monitoramento da Qualidade da Energia Elétrica. VI SBQEE, Belém, 2005.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo, ed. Edgard Blücher, 1977, 751 p.

HARRIS, S. G., DOYLE, E. D., VLASVELD, A. C., AUDY, J., QUICK, D. A study of the wear mechanism of  $Ti_{1-x} Al_x N$  and  $Ti_{1-x-y} Al_x Cr_y N$  coated high-speed steel twist drills under dry machining conditions. **Wear**, 254, pp. 723 – 734, 2003.

ISO 8688-1. **Tool Life Testing in Milling – Part 1: Face Milling**. 1989-05-01.

IWATA, K.; MORIWAKI, T.; TAKENAKA, N. An Application of Acoustic Emission Measurement to In-Process Sensing of Tool Wear. In: CIRP, **CIRP Annals**, vol. 25, pp. 21-26, 1977.

JAIN, A.K.; MAO, J. Artificial Neural Networks: A Tutorial. *Computer – IEE*, pág. 31-44, março, 1996.

JEMIELNIAK, K. Some Aspects of Acoustic Emission Signal Pre-Processing. **Journal of Materials Processing technology**. 109, pp 242 – 249, 2001.

JETLY, S. Measuring Cutting Tool Wear On-Line: Some Practical Considerations. **Manufacturing Engineering**. pp 55-60, 1984.

KAMINISE, A.K., ARIZA, R.G., MACHADO, Á.R., DA SILVA, M.B., Properties of Burrs Formed When Cutting AISI 1045 Carbon Steel in Turning Operation, 7<sup>th</sup> International Conference on Deburring and Surface Finishing, Berkeley, Estados Unidos, p.127 – 135, 2004.

KANNATEY-ASIBU, E.J.; DORNFELD, D.A. Quantitative Relationships for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting, *Trans. ASME, Journal of Engineering Industry*. 103, 330, 1981.

KANNATEY-ASIBU, E.J.; DORNFELD, D.A. A Study of Tool Wear Using Statistical Analyses of Metal Cutting Acoustic Emission. **Wear**. 76, pp. 247-261, 1986.

LAN, M.S.; DORNFELD, D.A. In-Process Tool Fracture Detection. *Trans. ASME, J. Eng. Ind.* 106, pp. 111-118, 1984.

LEE, D.E.; HWANG, I.; VALENTE, C.M.O.; OLIVEIRA, J.F.G.; DORNFELD, D.A. Precision Manufacturing Process Monitoring with Acoustic Emission. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. 46, pp. 176-188, 2005.

LENZ, E., MAYER, J. E., LEE, D. G. Investigation in drilling. **Ann. CIRP** 27/1, pp. 49-53, 1978.

LI, X. A Brief Review: Acoustic Emission Method for Tool Monitoring During Turning. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. 42, pp. 157-165, 2002.

LI, W.; LI, D.; NI, J. Diagnosis of Tapping Process Using Spindle Motor Current. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. 43, pp. 73-79, 2003.

LIANG, S.Y., DORNFELD, D.A. Detection of Cutting Tool Wear Using Adaptive Time Series Modeling of Acoustic Emission Signal. In: **ASME**, Boston, Winter Annual Meeting, 1987.

MACHADO, A.R.; DA SILVA, M.B. **Usinagem dos Metais**. Apostila Didática, 8ª edição, Editora da UFU, 2004.

MASTER, T. Advanced Algorithms for Neural Networks. **John Wiley & Sons, New York**, 1993.

MATSUMOTO, H.; DINIZ, A.E. Torneamento de Aço Endurecido Monitorado por Emissão Acústica e Corrente do Motor. In: 14ª COBEM, Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Bauru, SP, Brasil, 1997.

MCCULLOCH, W.S.; PITTS, W, A Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity. **Bulletin of Mathematical Biophysics**, 5, pp. 115-133, 1943.

MEISEL, W., **Computer-Oriented-Approaches to Pattern Recognition**. Academic Press, New York, 1972.

MEOLA, T. **Monitoramento em Tempo Real da Qualidade de Sinais de Vibrações, Utilizando Inteligência Artificial**. 2005. Dissertação de Mestrado, FEMEC – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

METAL'S HANDBOOK. **Machining**. 9ª ed., Vol. 16, ASM International, 1989.

MODERN METAL CUTTING. **A Practical Handbook**. First Edition, 1994.

NAERHEIM, Y.; LAN, M. Acoustic Emission Reveals Information About The Metal Cutting Process and Tool Wear. SME, **Proc. 16<sup>th</sup> North American Manufacturing Research Conf.**, Detroit, MI, pp. 240-244, 1988.

NORMAN, P. **Monitoring and Control of Highspeed Milling**. 2003. Master's Thesis. Lulea University of Technology, Division of Manufacturing Systems Engineering, Sweden.

OLIVEIRA, J.F.G., DORNFELD, D.A. Application of AE Contact Sensing In Reliable Grinding Monitoring. **CIRP Annals** , 50 (1), 2001.

PALMAI, Z. Cutting Temperature in Intermittent Cutting. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. Vol. 27 (2), pp. 261-274, 1987.

PARZEN, E. On Estimation of a Probability Density Function and Mode, **Annals of Mathematical Statistics**, V. 33, pp. 1065-1076, 1962.

PEKELHARING, A.J. The Exit Failure in Interrupted Cutting. **CIRP Annals**, vol 27, n 1, pp. 5-10, 1978.

PIGARI, A.C. **Monitoramento do Desgaste de Ferramenta no Processo de Torneamento Usando Emissão Acústica**. 1995, 130 p, Dissertação de Mestrado, DEF-FEM-UNICAMP, Campinas, SP.

RANGWALA, S.; DORNFELD, D.A. A Study of Acoustic Emission Generated During Orthogonal Metal Cutting - 1: Energy Analyses. **International Journal of Mechanical Science**. Vol. 33, N. 6, pp. 471 – 487, 1991.

RANGWALA, S., DORNFELD, D.A. A Study of Acoustic Emission Generated During Orthogonal Metal Cutting - 2: Spectral Analyses. **Int. J. of Mech. Science**. vol. 33, nº 6, pp. 489-499, 1991.

RAVINDRA, H.V.; SRINIVASA, Y.G.; KRISHNAMURTHY, R. Modeling of Tool Wear Based on Cutting Forces in Turning. **Wear**. 169, pp. 25-32, 1993.

RAVINDRA, H.V.; SRINIVASA, Y.G.; KRISHNAMURTHY, R. Acoustic Emission for Tool Condition Monitoring in Metal Cutting. **Wear**. 212, pp. 78-84, 1997.

ROTBURG, J.; BRAUN, S.; LENZ, E. Mechanical Signature Analyses in Interrupted Cutting. **CIRP Annals**. 36 (1), pp. 249-252, 1987.

SANDVIK COROMANT. **Manual do Fresamento 3**. Sandvik do Brasil S.A., São Paulo, 1989, 76 p.

SANDVIK COROMANT. **Modern Metal Cutting**. 1º Edition, Sweden, Sandvik Coromant Technical Editorial Dept., Tofters Tryckeri AB, ISBN 91-972299-0-3, 1994, pp. X1-X159.

SANDVIK COROMANT. **Application Guide: Die and Mould Making**. 1999.

SANDVIK COROMANT. **Produtos para Usinagem de Metais: Ferramentas Rotativas**. Sandvik do Brasil S.A., São Paulo, 2003, 665 p.

SHAW, M.C. *Metal Cutting Principles*. Oxford Science Publications, **ISBN 0 19 859002 4**, USA, 594 pgs, 1986.

SOUSA, M. M. **Utilizando a Vibração Mecânica para Monitorar o Desgaste das Ferramentas de Corte e o Acabamento Superficial no Processo de Fresamento**. 1998. Tese de Doutorado, FEMEC – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

SOUTO, U.B.; DA SILVA, R.H.L.; MEOLA, T.; DA SILVA, M.B. Monitoramento do Fresamento: Análise da Correlação do Sinal de Emissão Acústica com o Desgaste. IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, CONEM, Recife, PE, Brasil, agosto 2006.

SPECHT, D. Probabilistic Neural Network, **Neural Network**, V. 3, pp. 109-118, 1990.

TAY, A.A.O. A Review of Methods of Calculating Machining Temperature. **Journal of Materials Processing Technology**. 36, pp. 225-257, 1993.

TETI, R.; DORNFELD, D.A. Modeling and Experimental Analyses of Acoustic Emission from Metal Cutting. **Int. Journal of Engineering for Industry**. Vol. III, pp. 229-237, 1989.

TLUSTY, J.; ANDREWS, G.C. A Critical Review of Sensors for Unmanned Machining. **Annals of the CIRP**. vol. 32, pp 563-572, 1983.

TRENT, E.M.; WRIGHT, P.K. **Metal Cutting**. 4<sup>th</sup> Edition, Butterworths - Heinemann, ISBN 0-7506-7069-X, 2000, 446 pags.

USUI, E.; SHIRAKASHI, T.; KITAGAWA, T. **ASME J. Eng.**, vol. 100, pp. 236-243, 1978.

WANG, K.K.; TSAO, K.C.; WU, S.M. Investigation of Face-Milling Tool Temperatures by Simulation Techniques. **Journal of Engineering for Industry**. august, pp. 772-80, 1969.

WEBSTER, J.; MARINESCO, I.; BENNETT, R. Acoustic Emission for Process Monitoring Control and Monitoring of Surface Integrity During Grinding. **CIRP Annals**. vol. 43, 1994.

XIAOLI, L.; ZHEJUN, Y. Tool Wear Monitoring with Wavelet Packet Transform – Fuzzy Clustering Method. **Wear**. 219, pp. 145-154, 1998.



# Anexo

## Estudo da Relação Entre o Sinal de Emissão Acústica e a Rugosidade no Torneamento

### 1. RUGOSIDADE DE UMA SUPERFÍCIE USINADA

Blum e Inasaki (1990); Lan e Dornfeld (1983); Iwata, Moriwaki e Takenaka (1977); Xiaoli (2002) afirmam que a intensidade do sinal de EA cresce linearmente com o aumento da velocidade de corte, é pouco influenciado pela profundidade de corte e diminui com o aumento do avanço e do ângulo de saída da ferramenta. O aumento do desgaste de flanco da ferramenta, que afeta diretamente a rugosidade da superfície gerada, aumenta a área de contato entre o cavaco e a ferramenta, fazendo com que aumente o atrito entre ambas. Portanto, o aumento do desgaste da ferramenta aumenta a intensidade do sinal de EA.

A condição de uma superfície usinada é o resultado de um processo que envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e às vezes reações químicas (Machado; da Silva, 2004). Assim, o acabamento superficial é a combinação de alguns fatores que podem ser definidos como ondulação, rugosidade e falhas.

A rugosidade de uma superfície usinada é também o resultado da combinação de alguns fatores que ocorrem durante o processo de corte tais como as condições de corte, geometria da ferramenta, geometria da peça, rigidez da máquina ferramenta, material da peça e material da ferramenta (Nakayama et al., 1966; Shouckry, 1982).

Em geral, alguns fatores podem ser trabalhados para se conseguir um melhor acabamento superficial, tais como (Machado; da Silva, 2004):

- deflexões geradas por esforços de usinagem ou pequenas vibrações;
- raio de arredondamento da ponta da ferramenta;
- posicionamento e centragem corretas da peça e da ferramenta;
- o material da peça é inerentemente puro (sem trincas, bolhas, e inclusões);
- eixo principal da máquina ferramenta corretamente alinhado e as guias sem desgastes;

- aresta de corte sem desgaste ou quebras;
- corte sem aresta postiça de corte (APC).

As condições de corte, principalmente o avanço e a velocidade de corte, tem grande influência na rugosidade superficial. Velocidades de corte muito baixa podem favorecer o aparecimento da APC, que é altamente prejudicial ao acabamento. As diferenças de altura entre os picos e vales das marcas de avanço são aumentadas à medida que se aumenta o avanço.

## 2. METODOLOGIA

Os experimentos deste trabalho foram realizados em um torno convencional IMOR PRN-320. O corpo de prova tem a forma de barra cilíndrica de 160 mm de comprimento 65,80 mm de diâmetro de aço ABNT 1045, com dureza média de 206 HB.

O equipamento usado para a aquisição do sinal de emissão acústica é fabricado pela Sensis e constitui-se de um sensor de EA, um condicionador de sinal de 4 canais DM 42, uma fonte para o condicionador e um instrumento virtual do *LabVIEW* específico para EA. Além destes equipamentos, também foram utilizados uma placa de aquisição NI-DAQ PCI-6035E, um computador e um *trigger*. A função deste *trigger* é sincronizar as rotações da peça com a aquisição do sinal de EA. Com isto, consegue-se separar o sinal de EA adquirido a cada volta da peça. Seu funcionamento consiste de uma fonte de luz que é refletida por um anteparo espelhado localizado na placa do torno e captada por um *led* sensível à luz na outra extremidade do *trigger*. Este dispositivo foi criado e construído nas instalações do LEPU. A Figura 1 mostra um esquema do sistema de aquisição de sinais utilizado neste trabalho.

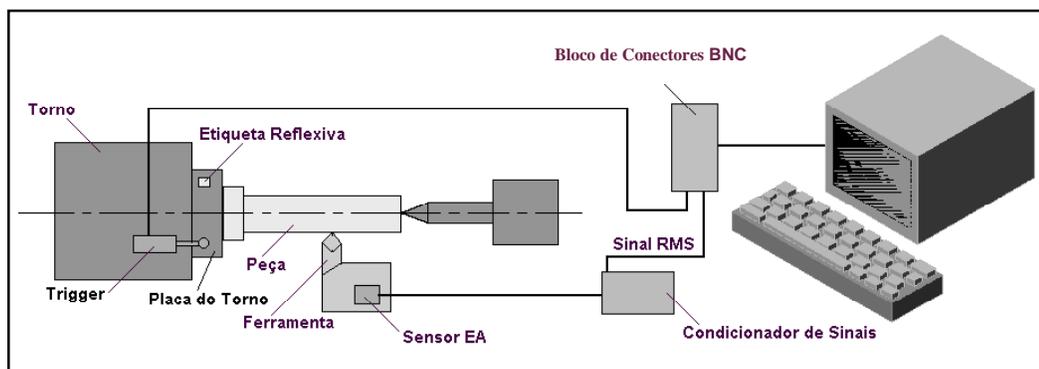


Figura 1. Esquema do sistema de aquisição de sinais de emissão acústica utilizado.

Para facilitar a localização do sinal de EA adquirido durante a volta, foi feito um canal de 10x10 mm ao longo de todo o comprimento da peça, como mostrado na Fig. 2. Para obtenção do perfil de rugosidade foi utilizado um rugosímetro Mitutoyo SJ 201P.



Figura 2. Barra cilíndrica feita com o aço ABNT 1045.

As condições de corte consistiram em rotação da máquina ferramenta de 618 rpm que, para o diâmetro inicial da peça de 65,80 mm e o diâmetro final de 64,80 mm após o último passe, implicou em velocidades de corte  $v_c$  de 127,65 m/min e 125,81 m/min respectivamente. A profundidade de corte  $a_p$  adotada foi de 0,50 mm e avanço  $f$  de 0,079 mm/rotação. O porta ferramenta utilizado tem especificação ISO CSBPR 2020 K12 e o inserto de metal duro revestido SPUN 12 03 08, classe ISO P35.

Este trabalho consistiu em comparar a rugosidade obtida na direção longitudinal da superfície usinada da peça com o sinal de emissão acústica médio adquirido ao longo deste mesmo trecho. Um gráfico do sinal de EA foi adquirido a cada volta da peça. Como foi necessário um comprimento de 4 mm para a obtenção do perfil de rugosidade (utilizou-se um *cut-off* de 0,8 mm), foram necessários 50 gráficos de EA (pois para avançar 4 mm são necessárias 50 rotações da peça). Cada gráfico de EA continha aproximadamente 400 pontos.

A Figura 3 mostra um sinal de EA típico obtido ao longo de uma revolução da peça. Pelo gráfico observa-se que, aproximadamente no ponto 250 (para este gráfico), a ferramenta passa pelo canal da peça, pois o sinal de emissão acústica tende a cair para zero. Deste gráfico retira-se apenas um valor, que corresponde ao sinal de EA na região onde foi medida a rugosidade. Para este trabalho foi feita uma média dos cinco pontos nas vizinhanças da região analisada (entre os pontos 315 e 319). A cavidade na peça serve assim como referência.

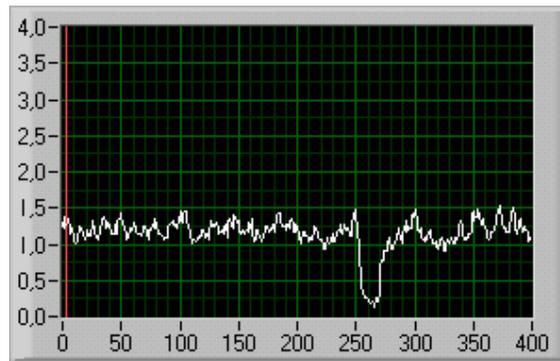


Figura 3. Característica do sinal de EA ao passar pela cavidade.

A fim de se obter várias situações de rugosidade, duas ferramentas de metal duro com diferentes estados de desgaste foram empregadas. Na primeira, a ferramenta já iniciava o corte com um desgaste de flanco máximo  $VB_{Bmáx}$  de 0,31 mm. Na segunda, foi utilizada uma ferramenta nova, portanto sem nenhum tipo de desgaste. Para cada situação, foram marcados três trechos de 4 mm ao longo da barra para que se fossem realizadas as aquisições de rugosidade e do sinal de EA. Estes trechos foram marcados a uma distância de 15, 65 e 120 mm da face da peça. Com isto, também se obteve situações diferentes de rugosidade, pois, quanto mais longe do seu engastamento, maior era o momento aplicado e maior era a vibração. Foram realizadas duas repetições para cada estado de desgaste da ferramenta. A Tabela 1 mostra como foram subdivididas e numeradas as etapas de usinagem deste trabalho.

Tabela 1. Subdivisões e numeração das etapas do experimento

Trecho – 1ª repetição	Pastilha com desgaste	Pastilha sem desgaste
1º trecho (15mm)	Teste A <sub>1.1</sub>	Teste B <sub>1.1</sub>
2º trecho (65mm)	Teste A <sub>1.2</sub>	Teste B <sub>1.2</sub>
3º trecho (120 mm)	Teste A <sub>1.3</sub>	Teste B <sub>1.3</sub>
Trecho – 2ª repetição	Pastilha com desgaste	Pastilha sem desgaste
1º trecho (15mm)	Teste A <sub>2.1</sub>	Teste B <sub>2.1</sub>
2º trecho (65mm)	Teste A <sub>2.2</sub>	Teste B <sub>2.2</sub>
3º trecho (120 mm)	Teste A <sub>2.3</sub>	Teste B <sub>2.3</sub>

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O perfil de rugosidade é composto por vários eventos, entre eles as marcas de avanço de acordo com a geometria da ferramenta. Estas marcas formariam uma superfície teórica, para a qual o perfil poderia ser previsto. O perfil real, no entanto, desvia do teórico devido a

vibrações do sistema, rebarbas, fluxo lateral (*side flow*), partículas de APC, desgaste ou avarias da cunha cortante.

O sinal de emissão acústica por sua vez é composto por deformações plásticas e elásticas que ocorrem durante a formação do cavaco e outros fenômenos. Desta forma, mesmo que se conseguisse usinar um perfil teórico, o sinal de EA não poderia representar o perfil de rugosidade. No entanto, o sinal de EA poderia indicar outros fenômenos que contribuem para formar o perfil. Assim, seria interessante analisar o perfil de rugosidade em busca de alterações em relação ao perfil teórico e, se possível, identificar dentre estas alterações, quais poderiam ser detectadas pelo sinal de EA.

A Figura 4 apresenta o sinal de emissão acústica completo durante a realização do teste a. percebe-se claramente a queda do sinal de EA, tendendo ao valor zero, quando a ferramenta passa pelo canal da peça. O gráfico contém cerca de 32.000 pontos, já que são adquiridos 400 pontos a cada rotação da peça e que o gráfico corresponde a um tempo de aquisição em que foram dadas 80 rotações da peça.

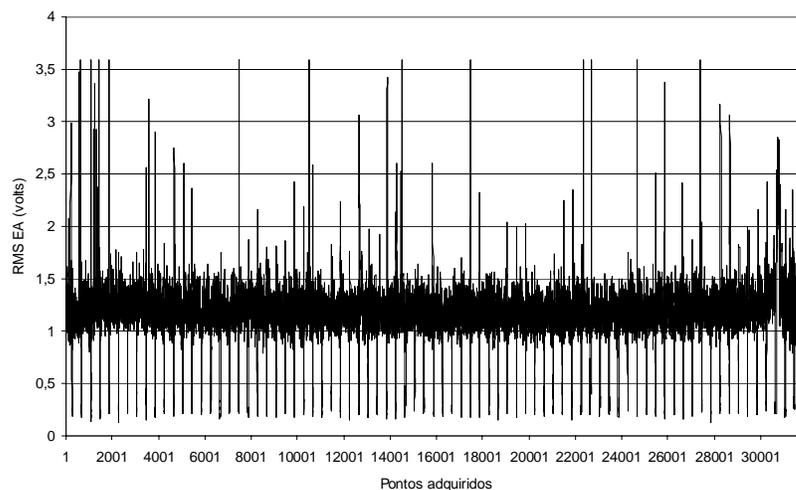


Figura 4. Sinal de emissão acústica para o teste A.

Diniz; Liu; Dornfeld (1992) empregou em seus experimentos com EA e torneamento uma faixa de frequência, após analisar o espectro de frequência, entre 200 kHz e 300 kHz. Devido à limitações do equipamento empregado neste experimento, principalmente com a faixa de corte do filtro passa baixa, empregou-se apenas o filtro passa alta com 100 kHz.

Para este trabalho, entretanto, não se buscou algum tipo de relação através do espectro de frequência, pois, além da limitação da placa de aquisição de dados, trabalhou-se apenas com o sinal RMS, portanto, qualquer informação advinda do espectro poderia não corresponder à realidade.

A Figura 5 mostra a parte correspondente aos primeiros 1000 pontos adquiridos do gráfico da Figura 4. Este gráfico permite uma melhor observação do comportamento do sinal de EA durante a usinagem. A região da peça onde foi obtido o perfil de rugosidade corresponde a uma região entre os pontos 315 e 319 do gráfico da Figura 5.

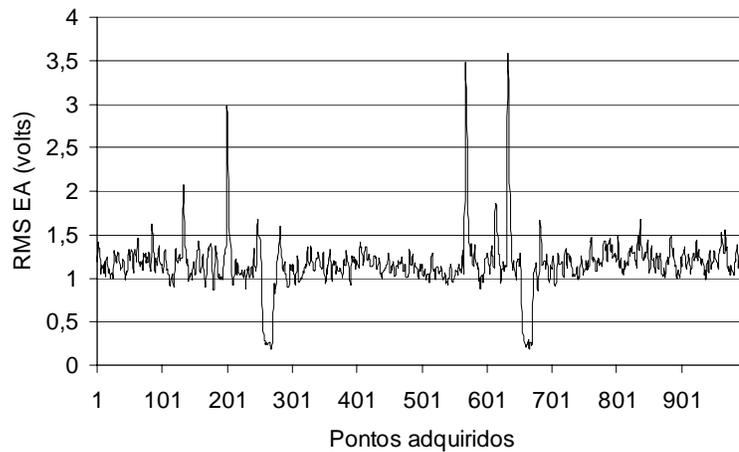


Figura 5. Sinal de EA para os primeiros 1000 pontos adquiridos.

Assim, o sinal de EA que corresponderia ao início do trecho onde foi obtido o perfil de emissão acústica foi admitido como sendo uma média do sinal entre os pontos 315 a 319, o que resulta num valor de 1,034 V (nível RMS). Utilizando o mesmo procedimento para a segunda volta, obtemos a média do sinal entre os pontos 715 a 719 que é de 1,1284 V. Repetindo este procedimento para todas as voltas necessárias para a usinagem de aproximadamente 4 mm de comprimento, obtemos os resultados apresentados na Figura 6.

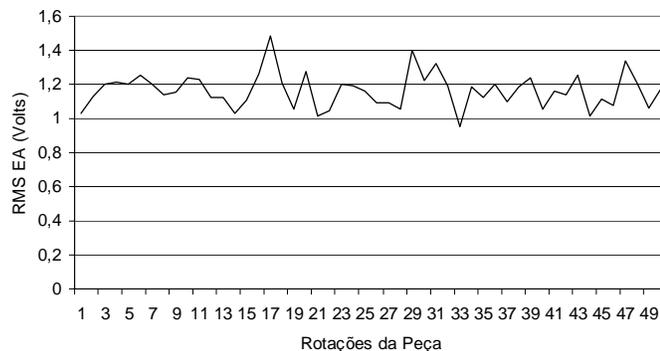


Figura 6. Sinal de EA correspondente ao trecho de medição da rugosidade.

A Figura 7 mostra o perfil de rugosidade da superfície correspondente ao ensaio A.

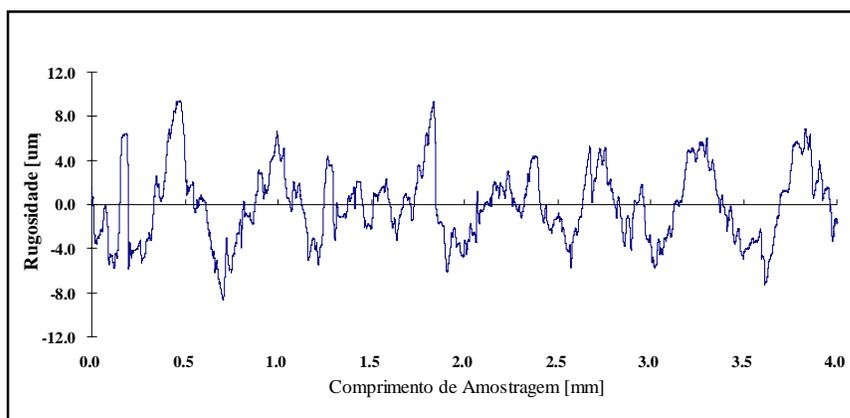


Figura 7. Perfil de rugosidade da superfície obtida no teste A<sub>1.1</sub>.

A comparação entre os gráficos das figuras 6 e 7 não devem ser feitos diretamente, já que o primeiro representa 50 pontos e o segundo cerca de 8000 pontos. É necessário então utilizar um parâmetro que represente os dois gráficos e assim comparar os sinais. Para a medição do perfil da superfície usinada, existem inúmeros parâmetros que podem ser utilizados para avaliar a rugosidade. Entre eles está a rugosidade média ( $R_a$ ), parâmetro mais utilizado pela sua simplicidade. No entanto, apesar de ser bastante utilizado, a rugosidade  $R_a$  não se mostra um bom parâmetro para trabalhos estatísticos, ainda mais se levando em consideração o número de pontos do sinal de EA. A curtose ( $R_{ku}$ ) dos pontos que formam um sinal é um parâmetro utilizado para avaliar a rugosidade de uma superfície, porém, não é normalmente muito empregado.

Este parâmetro pode detectar se os picos do perfil estão distribuídos de forma uniforme no comprimento de amostragem. Se a distribuição da amplitude de um perfil tiver uma forma gaussiana balanceada, o valor de  $R_{ku}$  será próximo de 3. Uma superfície acidentada e áspera terá  $R_{ku}$  menor que 3, enquanto que para superfícies com muitos picos o valor será maior que 3. Uma superfície retificada, por exemplo, com um rebolo afiado, teria  $R_{ku}$  igual a 3. A curtose é portanto uma medida da aspereza da superfície. Quanto ao sinal de EA obtido, será utilizado a média dos cinco pontos obtidos e das duas repetições.

Repetindo-se o procedimento para obtenção do gráfico da Figura 6, para todos os testes da Tabela 1, e calculando-se a média para todos os gráficos de EA resultantes, obtém-se os valores mostrados na Tabela 2, assim como os valores de curtose, skewness ( $R_{sk}$ ) e rugosidade média para o perfil de rugosidade das superfícies correspondentes.

Tabela 2 – Média dos conjuntos de pontos do RMS de EA e curtose da rugosidade.

Teste	Sinal EA (RMS)	Rugosidade $R_{ku}$ ( $\mu\text{m}$ )	Rugosidade $R_{sk}$ ( $\mu\text{m}$ )	Rugosidade $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )
A <sub>1,1</sub>	1,167	-0,2624	0,2801	2,74
A <sub>1,2</sub>	1,133	-0,4070	0,1099	2,15
A <sub>1,3</sub>	1,166	-0,1409	-0,2486	1,62
A <sub>2,1</sub>	1,185	1,9813	0,9724	5,62
A <sub>2,2</sub>	1,246	0,3086	0,4679	4,40
A <sub>2,3</sub>	1,355	3,0227	0,6262	3,28
B <sub>1,1</sub>	1,400	0,1250	0,2601	2,38
B <sub>1,2</sub>	1,727	0,6999	0,0948	1,47
B <sub>1,3</sub>	2,163	7,1876	2,0529	2,86
B <sub>2,1</sub>	1,241	0,0871	-0,4263	2,09
B <sub>2,2</sub>	1,259	0,2653	-0,4718	2,37
B <sub>2,3</sub>	0,725	0,0157	-0,4179	2,47

Utilizando os dados da tabela anterior podemos construir um gráfico representando a relação entre os dois parâmetros calculados, o que é mostrado na Figura 8.

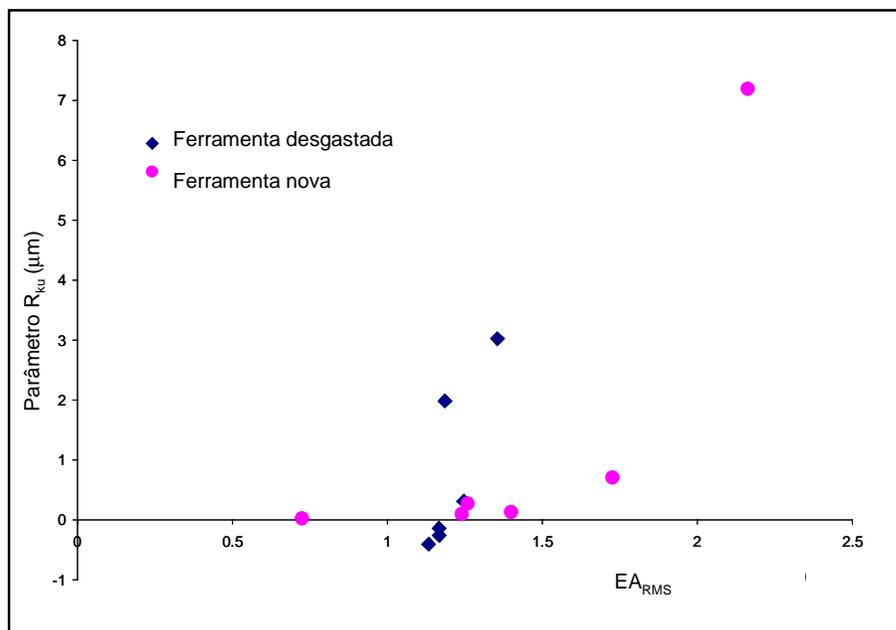


Figura 8. Relação entre a média do sinal de EA e a curtose do perfil de rugosidade.

O gráfico mostra claramente uma tendência de aumento do sinal de emissão acústica com o parâmetro  $R_{ku}$  do perfil de rugosidade da superfície usinada. O sinal de EA parece ainda ser mais sensível para valores de  $R_{ku}$  superiores a 1.

A variação do nível de emissão acústica durante a usinagem, partindo-se do princípio que nenhuma condição de corte foi variada, esta relacionada com a variação do nível de energia liberado de suas fontes. Entre essas fontes, as principais seriam: movimento de discordâncias, transformações de fase, formação de trincas e mecanismos de fricção (Liptai; Harris; Tatro, 1972). Provavelmente, durante a usinagem com as condições de corte fixas e pré-estabelecidas nos procedimentos experimentais, as três primeiras fontes de liberação de EA não se aplicam na variação do nível RMS do sinal. A última fonte citada é a que melhor se aplica a situação da variação do desgaste da pastilha com o nível do sinal.

No entanto, a relação entre rugosidade e emissão acústica deve ser muito influenciada pela relação entre desgaste de flanco e emissão acústica. Com a evolução do desgaste de flanco, que é o tipo de desgaste mais comum nas ferramentas de corte empregadas nestes experimentos, a área de contato da peça com a ferramenta aumenta fazendo com que o atrito, ou o contato da superfície de folga secundária com a superfície usinada da peça, aumente nesta região. Segundo Pigari e Diniz (1996), o nível do sinal RMS da EA aumenta substancialmente quando o fim de vida da ferramenta está próximo. Como o aumento do nível de EA, neste caso, está associado ao aumento do desgaste de flanco máximo da ferramenta, a associação com o nível de rugosidade gerado na peça também pode ser feita, já que o estado do desgaste da pastilha influencia diretamente os parâmetros de topografia de superfície.

Outro parâmetro de rugosidade que pode indicar a forma do perfil obtido é a skewness ( $R_{sk}$ ), que é um parâmetro derivado da curva de distribuição de amplitude. A relação entre  $R_{sk}$  e o sinal de EA para os resultados deste trabalho é mostrado na Figura 9. Percebe-se também uma tendência de aumento do sinal de EA (da forma como calculado neste trabalho valor) com o aumento do  $R_{sk}$ . Este parâmetro é uma boa indicação da simetria do perfil de rugosidade, ou seja, pode indicar se uma superfície é dominada por picos ou vales. Este parâmetro, juntamente com  $R_{ku}$  é indicado quando é necessário distinguir a forma do perfil de rugosidade para superfícies com mesmo valor de  $R_a$ .

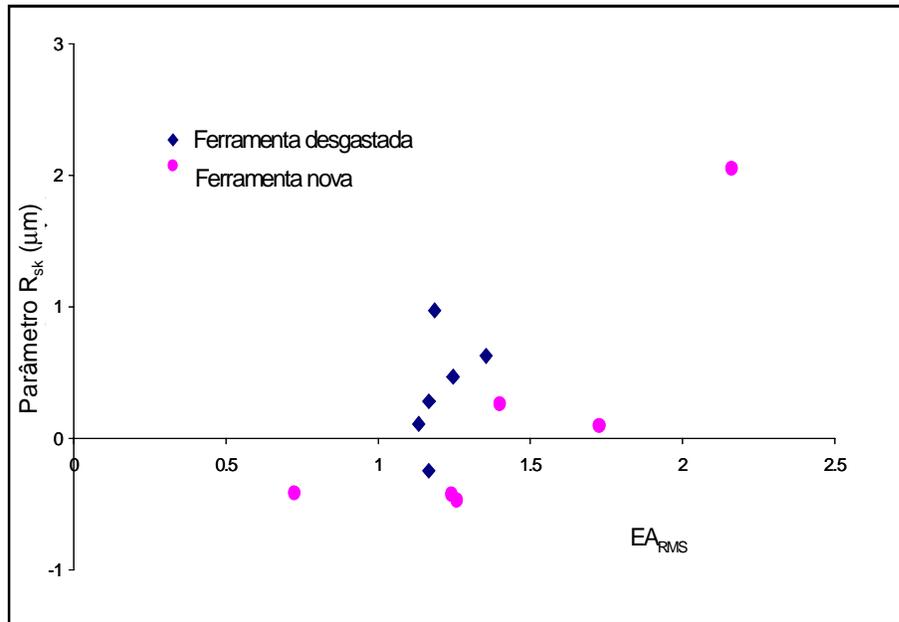


Figura 9. Relação entre a média do sinal de EA e a skewness do perfil de rugosidade.

É interessante observar que não se obtém correlação entre o sinal de EA e a rugosidade  $R_a$  (valores mostrados na Tabela 2), as rugosidades de todos os testes são valores próximos. Neste caso, a rugosidade  $R_a$  parece não ser influenciada pelos fenômenos responsáveis pelo sinal de EA (Fig. 10).

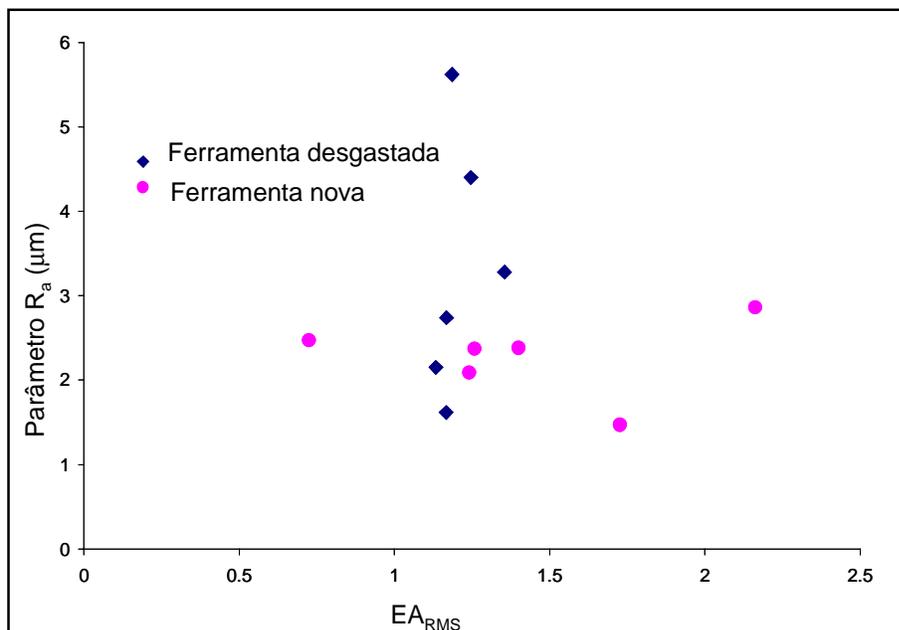


Figura 10. Parâmetro  $R_a$  x  $EA_{RMS}$ .

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem as seguintes conclusões, para as condições de corte e materiais empregados neste trabalho:

1. Não houve uma relação do sinal de EA com o parâmetro de rugosidade  $R_a$ , porém percebe-se uma certa relação entre EA e os parâmetros  $R_{ku}$  e  $R_{sk}$ ;
2. A ferramenta nova apresentou uma boa correlação dos parâmetros  $R_{ku}$  e  $R_{sk}$  com o sinal  $EA_{RMS}$ . Quando os dois parâmetros crescem, o sinal de EA cresce;
3. A ferramenta desgastada não apresentou uma boa correlação dos parâmetros  $R_{ku}$  e  $R_{sk}$  com o sinal de  $EA_{RMS}$ .

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BLUM, T; INASAKI, I. A study on Acoustic Emission from the Orthogonal Cutting Process. **International Journal of Engineering for Industry**, vol. 112, pp.203-211, 1990.
2. DINIZ, A.E.; LIU, J.J.; DORNFELD, D.A. Correlating Tool Life, Tool Wear and Surface Roughness by Monitoring Acoustic Emission in Finish Turning. **Wear**, vol. 152, pp. 395-407, 1992.
3. IWATA, K; MORIWAKI, T.; TAKENAKA, N. An Application of Acoustic Emission Measurement to in-Process Sensing of Tool Wear. **Annals of the CIRP**, vol. 25, pp 21-26, 1977.
4. LAN, M.S.; DORNFELD, D.A. Chip Form Detection Using Acoustic Emission. Madson: **Proceedings of 11 th NARMC**, pp. 386-389, 1983.
5. LIPTAI, R.B.; HARRIS, D.O.; TATRO, C.A. An Introduction of Acoustic Emission. **ASTM STP** 505, pp. 3-10, 1972.
6. MACHADO, A.R.; DA SILVA, M.B. Usinagem dos Metais. 8ª versão, Universidade Federal de Uberlândia, pp. 222-233, 2004.
7. NAKAYAMA, K.; SHAW, M.C.; BREWER, R.C. Relationship Between Cutting Forces, Temperature, Built-up Edge and Surface Finish. **Annals of CIRP**, vol. 14, pp.211-223, 1966.

8. FIGARI, A.C.; DINIZ, A.E. Monitoramento do Desgaste de Ferramenta no Processo de Torneamento Usando Emissão Acústica. **Revista Brasileira de Ciências Mecânicas**, vol. XVIII, nº 3, pp. 227-238, 1996.
9. SHOUCKRY, A.S. The Effect of Cutting Conditions on Dimensional Accuracy. **Wear**, vol.80, pp.197-205, 1982.
10. XIAOLI, L. A Brief Review: Acoustic Emission Method for Tool Wear Monitoring During Turning. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 42, pp.157-165, 2002.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)