

RODRIGO HENRIQUES LOPES DA SILVA

**MONITORAMENTO DO DESGASTE DE FERRAMENTAS NO  
FRESAMENTO DE TOPO ATRAVÉS DOS SINAIS DE POTÊNCIA E  
EMIÇÃO ACÚSTICA E REDES NEURAS**



Universidade Federal de Uberlândia  
Faculdade de Engenharia Mecânica

2010

# **Livros Grátis**

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

Milhares de livros grátis para download.

RODRIGO HENRIQUES LOPES DA SILVA

MONITORAMENTO DO DESGASTE DE FERRAMENTAS  
NO FRESAMENTO DE TOPO ATRAVÉS DOS SINAIS DE  
POTÊNCIA E EMISSÃO ACÚSTICA E REDES NEURAIIS

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

Área de Concentração: Materiais e  
Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva

**UBERLÂNDIA – MG**

**2010**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

S586m Silva, Rodrigo Henriques Lopes, 1984-  
Monitoramento do desgaste de ferramentas no fresamento de topo através dos sinais de potência e emissão acústica e redes neurais / Rodrigo Henriques Lopes Silva. - 2010.  
116 f. : il.

Orientador: Márcio Bacci da Silva.

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

1. Fresagem (Trabalhos em metal) - Teses. 2. Ferramentas para cortar metais - Teses. I. Silva, Márcio Bacci da, 1964- II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621.914

---

A Deus por me dar forças e paciência,  
A minha mãe e Elizeu,  
Ao meu irmão Adriano,  
A uma pessoa simplesmente especial, minha namorada Érica,  
As minhas tias e tios,  
Enfim, a toda minha família e amigos,  
que de forma direta ou indireta possibilitaram  
a conclusão deste trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à instituição que me forneceu os conhecimentos necessários para atingir esse estágio de desenvolvimento, a Universidade Federal de Uberlândia por meio da Faculdade de Engenharia Mecânica.

Ao Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva que me transmite seus conhecimentos desde a época de Iniciação Científica e que sempre confiou em mim, me incentivou, me orientou e teve paciência ao longo de todo o tempo de convivência. Além, de ter sido o principal motivador para minha futura carreira profissional.

Ao Prof. Dr. Ulisses Borges Souto, grande amigo, que também me ajudou no “pontapé” inicial de minha carreira.

Aos professores Dr. Álisson da Rocha Machado e Dr. Rosemar Batista da Silva que sempre estiveram dispostos a me ajudar nos momentos que necessitei.

A todos os colegas do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem da UFU, desde os atuais como aqueles que passaram pelo LEPU no período de 6 anos de trabalho: Almir Kazuo Kaminiase, Ildeu Siqueira, Rhander Viana, Paulo Rosa da Mota, Sebastião Gonçalves Júnior, Igor César Pereira, Deborah Oliveira Almeida, Janaína Aparecida, Mauro Paipa, Vitor Tomaz e muitos outros.

Ao grande amigo e atual aluno de iniciação científica, Gabriel Miranda Costa, pelo apoio durante todo o trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFU pelos conhecimentos transmitidos.

Ao CNPq, à FAPEMIG, ao IFM e à CAPES pelo apoio financeiro e a bolsa de mestrado.

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

DA SILVA, R. H. L. **Monitoramento do Desgaste de Ferramentas no Fresamento de Topo Através dos Sinais de Potência e Emissão Acústica e Redes Neurais**. 2010. 116f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

### Resumo

O principal objetivo desse trabalho foi monitorar o desgaste de ferramentas de corte durante o fresamento de topo de um aço VP80 e, além disso, utilizar redes neurais artificiais (RNA) como ferramenta para prever sua condição de corte. Para tanto, foram escolhidas técnicas utilizando potência de corte e emissão acústica (EA). Parâmetros estatísticos foram extraídos dos sinais e comparados com o desgaste de flanco máximo ( $VB_{Bmáx}$ ). Durante o trabalho foram utilizados equipamentos Sensus para a aquisição do sinal bruto de EA e um sensor com princípio de funcionamento baseado no efeito *Hall* para a aquisição da corrente, que era convertida posteriormente em potência efetiva de corte média. Foi utilizada uma fresa de topo com especificação R390-032A32-11M (*Sandvik Coromant*) com 32 mm de diâmetro. Já os insertos eram revestidos com TiN e possuíam especificação R390-11 T3 10M-PH 1025 (*Sandvik Coromant*). Durante os testes de vida (40 no total) eram adquiridos os sinais e realizada a medição do desgaste. O intuito era tentar relacioná-los após a finalização dos testes e extração de parâmetros estatísticos dos sinais. Tais parâmetros extraídos passaram por uma seleção e os que possuíam correlação com o desgaste de flanco máximo foram utilizados no treinamento e validação de uma RNA. Os resultados mostram que o *skewness* do sinal de EA (banda de frequências 50-500 kHz), o nível RMS extraído dos espectros de potência de EA (banda de frequências 100-230 kHz) e a potência efetiva de corte média têm correlação com o desgaste. Além disso, que a utilização desses parâmetros como valores de entrada em uma RNA proporciona excelentes respostas à rede, ao tentar prever se a ferramenta está ou não, em condições de uso.

---

**Palavras-chave:** Fresamento de topo, desgaste, monitoramento do desgaste, emissão acústica, potência, redes neurais artificiais, metal duro.

DA SILVA, R. H. L. **Tool Wear Monitoring in End Milling Trough Cutting Power and Acoustic Emission and Neural Network**. 2010. 116f. M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

### Abstract

This study aims to monitor the cutting tools wear, during an end milling of VP80 steel and moreover use artificial neural networks (ANN) as a tool to predict the cutting condition. Therefore, the acoustic emission (AE) and the cutting power, were chosen as the techniques. Statistical parameters were extracted from the signals and compared with the maximum flank wear ( $VB_{Bm\acute{a}x}$ ). During the study, Sensis equipments were used to purchase the raw signal AE, and a sensor based on the Hall effect to the acquisition of the current, which will be posteriorly converted in effective cutting power. An end mill with R390-032A32-11M (Sandvik Coromant) specification and 32 mm in diameter was used. The inserts were coated with TiN and had R390-11 T3 10M-PH 1025 (Sandvik Coromant). During the life tests (40 in total) were acquired signals and carried out the wear measurement. The intention was try to relate them after tests conclusion and statistical parameters extraction of the signals. These parameters extracted was analyzed and those with had correlation with flank wear values were used in the training and validation of an ANN. The results show that skewness of the AE signal (frequency band 50-500 kHz), the RMS level extracted from power spectra of AE (frequency band 100-230 kHz) and the effective cutting power are correlated with wear. Furthermore, the use of these parameters as input values in an ANN, provides excellent feedback to the network while trying to predict have or not, working condition.

---

**Palavras-chave:** End Milling, wear, tool condition monitoring, acoustic emission, cutting power, neural networks, carbide tools.

## Símbolos

2D = Duas Dimensões.

3D = Três Dimensões.

$a_e$  = Profundidade de Trabalho.

$Al_2O_3$  = Óxido de Alumínio.

AISI = Instituto Americano de Ferro e Aço American Iron and Steel Institute.

$a_p$  = Profundidade de Corte.

APC = Aresta Postiça de Corte.

CBN = Nitreto Cúbico de Boro.

CNC = Comando Numérico Computadorizado.

EA = Emissão Acústica.

$f$  = Avanço.

$f_z$  = Avanço por Dente.

FFT = Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier).

HRc = Dureza "Rockwell" C.

HSS = High Speed Steel (Aço rápido).

$h'$  = Espessura do Cavaco.

KT = Profundidade da Cratera.

LDV = Laser Doppler Velocimetry.

MCP = RNA Perceptron Multicamadas.

MEF = Método de Elementos Finitos.

$N_e$  = Potência Efetiva de Corte.

PCBN = Nitreto Cúbico de Boro Policristalino.

PCD = Diamante Sintético Policristalino.

PH = Endurecimento por Precipitação.

PNN = Probabilistic Neural Network (Rede Neural Probabilística).

$R^2$  = Coeficiente de Correlação.

RMS = Root Mean Square (Nível Médio Quadrático).

RNA = Rede Neural Artificial.

rpm = Rotações por Minuto.

SMCF = Sistema de Monitoramento de Condição de Ferramenta.

STFT = Short-Time Fourier Transform (Transformada Rápida e Curta de Fourier).

T = Vida de Ferramenta de Corte.

TCMS = Tool Condition Monitoring Systems (SMCF).

TiC = Carboneto de Titânio.

TiN = Nitreto de Titânio.

$VB_b$  = Desgaste de Flanco Médio.

$VB_{Bmáx}$  = Desgaste de Flanco Máximo.

$VB_N$  = Desgaste de Entalhe.

$v_c$  = Velocidade de Corte.

$V_{RMS}$  = Nível RMS.

WC = Carboneto de Tungstênio.

### **Outros Símbolos**

$\beta$  = Ângulo de entrada da ferramenta na peça.

$\nabla v_{cav}$  = Gradiente de Velocidades do Cavaco.

$\varepsilon$  = Ângulo de saída da ferramenta peça.

$\alpha_0$  = Ângulo de folga.

$\Delta T$  = Variação de temperatura.

$\chi_r$  = Ângulo de posição da ferramenta.

# SUMÁRIO

	Página
CAPÍTULO I – Introdução.....	01
CAPÍTULO II – Revisão Bibliográfica.....	05
2.1. Processo de Fresamento.....	05
2.1.1. Introdução.....	05
2.1.2. Características Importantes do Processo.....	07
2.1.3. Fresamento Frontal e Tangencial.....	10
2.1.4. Fresamento de Topo.....	12
2.2. Avarias, Desgaste e Mecanismos de Desgaste.....	15
2.2.1. Avarias.....	16
2.2.2. Desgaste, Vida e Critérios de Fim de Vida.....	21
2.2.3. Mecanismos de Desgaste.....	26
2.3. Monitoramento dos Processos de Usinagem.....	32
2.3.1. Monitoramento Através da Temperatura.....	35
2.3.2. Monitoramento Através da Vibração.....	38
2.3.3. Monitoramento Através das Forças em Usinagem.....	41
2.3.4. Monitoramento Através da Potência Corte.....	43
2.3.5. Monitoramento via Sinal de Emissão Acústica (EA).....	46
2.4. Redes Neurais Artificiais (RNA).....	55
2.4.1. Rede Neural Artificial Básica.....	56
2.4.2. Funções de Ativação.....	58
2.4.3. Rede Neural Probabilística.....	59
2.4.4. Procedimento de Aplicação de uma Rede Neural.....	61
2.4.5. Redes Neurais em Usinagem.....	62

CAPÍTULO III – Metodologia.....	65
3.1. Material do Corpo de Prova.....	65
3.2. Condições de Corte e Especificações da Ferramenta.....	66
3.3. Máquina-Ferramenta e Metodologia dos Testes.....	68
3.4. Aquisição do Sinal de EA.....	70
3.5. Aquisição do Sinal de Potência Efetiva de Corte.....	73
3.6. Medição do Desgaste das Ferramentas.....	74
3.7. Aplicação da Rede Neural Artificial.....	75
CAPÍTULO IV – Resultados e Discussões.....	77
4.1. Resultados de Desgaste de Flanco Máximo ( $VB_{Bmáx}$ ).....	77
4.2. Resultados Extraídos da Potência Efetiva de Corte.....	80
4.3. Resultados Extraídos do Sinal de Emissão Acústica (EA).....	84
4.3.1. Estudo do Sinal de EA em uma Banda Determinada.....	97
4.4. Aplicação da RNA.....	101
CAPÍTULO V – Conclusões.....	107
5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros.....	108
CAPÍTULO VI – Referências Bibliográficas.....	109

# CAPÍTULO I

## Introdução

O processo de usinagem é um dos processos de fabricação mais importantes, gerando trabalho e renda a milhares de pessoas ao redor do mundo. Apesar da queda significativa do consumo em manufatura, devido à crise financeira mundial ocorrida na primeira década de 2000, ainda é possível dizer que os valores que representam esse setor continuam significativos no contexto mundial e que devem voltar a crescer nos próximos anos com a retomada do consumo e conseqüentemente da produção. A Figura 1.1, representando apenas dados da economia dos Estados Unidos na última década, apresenta os números de consumo relacionados a todo o tipo de tecnologias aplicadas à usinagem e conformação, e confirma o peso econômico desses dois processos de fabricação com gastos superiores a 100 milhões de dólares anuais na última década (McGIBBON; BORDEN, 2009).

Considerando que nos países industrializados os custos que representam a parcela da usinagem no valor final de um produto manufaturado correspondem a mais de 15% do valor desse produto (TRENT; WRIGHT, 2000), é possível afirmar que a usinagem tem sim, papel fundamental no processo de manufatura.

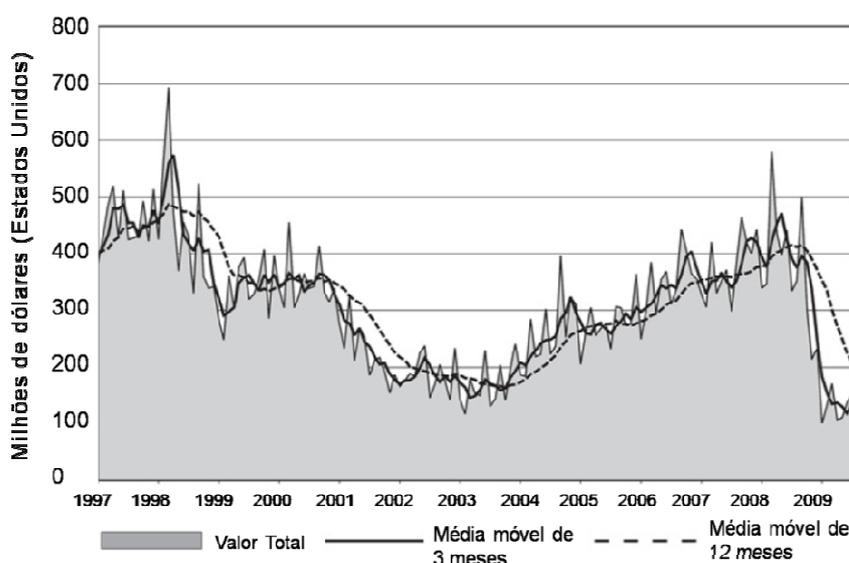


Figura 1.1. Consumo total em manufatura nos Estados Unidos, relacionado à usinagem e conformação (Adaptado de McGIBBON; BORDEN, 2009).

Momentos de crise levam a redução de gastos de diversas formas e em diferentes frentes. Contudo, esse fenômeno já vinha ocorrendo a algumas décadas e não é exclusivo da crise que o mundo enfrenta na era atual, apesar de haver uma grande tendência de piora nesse quadro.

O ambiente de manufatura tem passado por mudanças dramáticas nas últimas décadas. Algumas das tendências mais significantes foram a economia de gastos através, por exemplo, da redução do quadro de funcionários e, ao mesmo tempo, o melhoramento da qualidade do produto e redução do seu tempo de fabricação (BYRNE et al., 1995). O direcionamento das indústrias para poupar gastos e aumentar a produtividade culminou em pesquisa e criação de processos produtivos minimamente dependentes do fator humano (DIMLA, 2000). Desse modo, novas tecnologias tiveram de ser desenvolvidas para que isso se tornasse possível. Uma dessas novas tecnologias é o monitoramento de processos através de diferentes ferramentas, principalmente sensores (emissão acústica, potência, força, tensão, vibração, calor, corrente, emissão sonora, etc.).

Contudo, as melhorias nos processos de fabricação não são devidas simplesmente ao monitoramento. Um fator muito importante deve ser considerado, a escolha do sistema adequado para cada aplicação e se é possível a sua aplicação, de forma a não trazer mais prejuízos que benefícios ao processo como um todo. Sistemas de monitoramento têm grande dependência de seus ajustes e montagens, além dos imprevistos que estão passíveis de ocorrer na própria máquina ferramenta e no ambiente de manufatura. A proteção ao eixo árvore, o acompanhamento da vida da ferramenta e o monitoramento de avarias que ocorrem na ferramenta são responsáveis pela maior parte dos sistemas de monitoramento utilizados em usinagem e dentre os processos de usinagem o torneamento, fresamento, furação e retificação são os que mais utilizam técnicas de monitoramento.

A implantação satisfatória de operações de usinagem monitoradas requer que o monitoramento e controle de funções realizadas pelos operadores em um processo de usinagem convencional, sejam delegados ao processamento através de computadores. Na ausência do operador, informações do estado do processo são fornecidas por um sistema de sensoriamento que deve ser rígido o bastante para resistir ao ambiente de uma operação de usinagem severa e sensível às características do processo. O estado do processo inclui o estado da peça (acabamento superficial, integridade superficial, vibrações, controle do cavaco), o estado da ferramenta (suporte, sistema de fluido, vibrações da máquina) e o estado de corte da ferramenta (desgaste, quebras, avarias). Algumas dessas variáveis de estado são propícias às técnicas de monitoramento direto, contudo, na maioria dos casos o monitoramento indireto é normalmente utilizado, com o intuito de se ganhar tempo e

qualidade, principalmente. As medições de temperatura e de força na interface cavaco-ferramenta no sentido de tomadas de decisões são exemplos de sensoriamento indireto (RANGWALA; DORNFELD, 1991). Deve ser ressaltado também, que as máquinas ferramentas modernas já dificultam bastante a avaliação do desgaste de ferramentas por parte do operador, pois dificulta a utilização dos sentidos para avaliar o estado de corte da ferramenta, como é o caso das máquinas comandadas numericamente, chamadas máquinas CNC.

Por fim, no contexto do desgaste de ferramentas essas mudanças tiveram início nas décadas de 1980 e 1990, em que práticas antigas de troca de ferramentas começaram a ser alteradas, e surgiu a possibilidade de se aplicar procedimentos de mudança de ferramentas baseados no monitoramento do desgaste das arestas de corte por meio da implementação de mecanismos adaptativos de inspeção da ferramenta (DIMLA, 2000). Entretanto, esse tipo de procedimento não é simples, já que muitas variáveis (material da peça, material da ferramenta, processo de usinagem, condições de corte, ambiente de manufatura, etc.) que podem tornar muito dispendioso a utilização desse tipo de tecnologia, caso o uso não seja adequado.

Dentre os processos de usinagem, um dos que figuram entre os mais importantes é o processo de fresamento. Esse processo é extremamente versátil e geram alta taxa de remoção de material, sendo utilizado em larga escala dentro das indústrias. Uma das principais aplicações do processo de fresamento é a fabricação de moldes e matrizes, como as de injeção de plástico. A principal característica do fresamento é o corte descontínuo que confere variações cíclicas de temperatura e tensões na ferramenta, que promovem desgaste e/ou avarias na ferramenta com maior frequência. Devido à importância desse processo e sua grande aplicabilidade, ele se destaca entre aqueles que o monitoramento pode ser uma ferramenta importante para que se obter melhorias no processo de fabricação.

O objetivo deste trabalho é monitorar o desgaste das ferramentas de corte através de fenômenos inerentes ao processo e que tenham correlação com o desgaste. Para tanto, foram escolhidos a emissão acústica (EA) e a potência, por serem dois fenômenos de fácil investigação e que não requerem custos elevados para o monitoramento. O monitoramento ocorreu ao longo da vida de cada ferramenta, com aquisições periódicas dos sinais de EA e potência, além da medição do desgaste. Em seguida foi treinada uma rede neural artificial (RNA), após comprovada a relação entre os dois sinais medidos e o desgaste, a fim de tentar prever o estado de desgaste das ferramentas.

Este trabalho é dividido nos seguintes capítulos: Capítulo II – Revisão Bibliográfica, que apresenta uma revisão dos principais e mais importantes temas relacionados com a

pesquisa; Capítulo III – Metodologia, apresentando de forma completa a metodologia seguida para a realização dos testes, além da aplicação da Rede Neural Artificial (RNA) a partir de parâmetros determinados; Capítulo IV – Resultados e Discussões, dividido em tópicos diz respeito e analisa os resultados de desgaste de flanco máximo ( $VB_{Bmáx}$ ), potência efetiva de corte, emissão acústica e a aplicação da rede neural artificial; Capítulo V, apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros; Capítulo VI, traz as referências bibliográficas.

# CAPÍTULO II

## Revisão Bibliográfica

A usinagem dos metais configura como uma classe de processos de fabricação mais importantes do mundo. O processo e os fenômenos que ocorrem durante a usinagem são bem conhecidos do ponto de vista da manufatura, contudo, cientificamente muitas minúcias e novas tecnologias de processo ainda podem ser trabalhadas e devem ser estudadas.

Fenômenos como os que ocorrem na interface cavaco-ferramenta e temperaturas na zona de corte, por exemplo, têm seus efeitos conhecidos na prática, apesar disso, o que realmente ocorre durante o processo e suas explicações são praticamente desconhecidos. Dessa forma, pesquisas e novos desenvolvimentos são justificáveis, além disso, campos em que as respostas parecem estar corretas na atualidade podem se mostrar errados e aí, haverá a necessidade de outros caminhos de pesquisa.

Dentre os processos de usinagem o fresamento se destaca com um dos mais importantes e a busca por novas tecnologias nesse tipo de processo é de suma importância para se atingir os novos objetivos da era atual. Uma dessas novas tecnologias é o monitoramento do processo de fresamento, que vem de encontro com todas essas necessidades, afinal o objetivo principal do monitoramento é a melhoria do processo como um todo, em específico o desgaste de ferramentas, principal objetivo deste trabalho.

### 2.1. Processo de Fresamento

#### 2.1.1. Introdução

O fresamento é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas geralmente multicortantes. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se deslocam segundo uma trajetória qualquer (FERRARESI, 1970). O conceito de fresamento é o mesmo desde sua criação, o que mudou foram novas tecnologias desenvolvidas ao longo das décadas e que o tornaram ainda mais versátil, dinâmico e eficaz.

Existem três métodos principais de fresamento: frontal, tangencial e de topo (METALS HANDBOOK, 1989), que serão detalhados posteriormente. Além disso, a variação

de qualquer dos tipos principais ou união deles, pode dar origem a outros tipos específicos de fresamento.

O processo de fresamento tem uma característica básica a respeito de seus cavacos, que são curtos e possuem espessura variável. Ao contrário do torneamento, por exemplo, em que o cavaco possui a tendência de ser do tipo fita durante todo o corte (dependendo do material), no fresamento isso não ocorre devido ao fato das ferramentas perderem contato com a superfície da peça que está sendo usinada. Assim, um dos principais problemas da usinagem não existe no fresamento, o controle do cavaco.

No fresamento todas as arestas de corte entram e perdem contato com a peça continuamente, a cada revolução da ferramenta e essa característica de corte descontínuo causa um ciclo térmico de aumento de temperatura, a partir do início do corte, e redução de temperatura, no momento que a ferramenta perde contato com a peça (EDWARDS, 1993). Além disso, as arestas sofrem variações cíclicas de tensões mecânicas, que juntamente com as variações de temperatura, podem trazer prejuízos às ferramentas durante a usinagem. Dessa maneira, as ferramentas utilizadas em fresamento devem ser capazes de suportar as variações térmicas e mecânicas para que possuam vida satisfatória.

Por vários anos as ferramentas de aço rápido (HSS) dominaram o mercado, sendo vendidas na forma inteiriça. Contudo, com o surgimento das pastilhas de metal duro e os suportes intercambiáveis em aço carbono ou especial, elas perderam espaço e hoje representam cerca de um terço do mercado apenas. Mercado que não abrange somente ferramentas de aço rápido e metal duro, mas também cerâmicas, diamante policristalino (PCD), nitreto cúbico de boro (CBN), nitreto cúbico de boro policristalino (PCBN), cermets, etc.

Os desenvolvimentos não ficaram restritos somente à área ferramental, apesar de ter sido o campo mais notável. As máquinas ferramentas sofreram um desenvolvimento expressivo nas últimas três décadas. Com o desenvolvimento de máquinas modernas que podem possuir entre três, como as mais comuns, e sete eixos, a versatilidade do processo ficou ainda maior. Há uma variedade ampla de operações de usinagem que produzem superfícies horizontais, verticais, e inclinadas e podem ser geradas em uma máquina CNC vertical moderna, como a utilizada nesse trabalho. Dentre as operações possíveis, uma que se destaca é a de fresamento de topo, que pode ser utilizada para a confecção de rasgos, cavidades, degraus e perfis. Além disso, operações de furação, rosqueamento, alargamento, etc. podem ser realizadas em uma máquina CNC moderna (BOOTHROYD; KNIGHT, 2006).

### 2.1.2. Características Importantes do Processo

Nesse item serão discutidas algumas características gerais e importantes que o processo de fresamento deve possuir para que o processo de fresamento tenha aplicabilidade satisfatória e produza peças com a qualidade desejada.

Uma dessas características é a de elevada rigidez, ou seja, o conjunto deve possuir rigidez suficiente para suportar os choques mecânicos inerentes ao processo de fresamento, devido à característica de fase ativa (onde ocorre o corte) e fase inativa (onde não há retirada de material), como citado anteriormente. Resultados satisfatórios no fresamento dependem muito da rigidez do conjunto ferramenta-peça e seu arranjo. A deflexão da ferramenta e a trepidação como resultado de folgas, por exemplo, causam desgaste excessivo e quebra da ferramenta, dano à peça, redução da exatidão dimensional e um acabamento superficial inaceitável. Arranjos rígidos minimizam ou eliminam essas condições adversas, aumentando a produção e reduzindo os custos de produção.

O movimento da fresa deve ser considerado durante o processo, pois o tipo de movimento é de fundamental importância. Existem dois tipos de movimentos, o concordante e o discordante. No fresamento concordante a fresa gira no sentido de avanço da peça, ao dar início ao corte o cavaco tem espessura máxima, que vai sendo reduzida ao mínimo até o momento em que a ferramenta perde contato com a peça, como mostra a Fig. 2.1a. Já no fresamento discordante o sentido de rotação da fresa é oposto ao sentido de avanço, o cavaco tem espessura mínima no início do corte e espessura máxima no fim do corte (Fig. 2.1b).

Em geral o fresamento concordante é preferido. A principal vantagem desse tipo de movimento é que as forças de corte são menores e conseqüentemente a potência requerida para remover um volume específico de material é menor. A segunda vantagem é que nessa operação há uma tendência, no caso do fresamento tangencial principalmente, de comprimir a peça contra a mesa, de forma a aumentar a rigidez do conjunto (EDWARDS, 1993). Já o fresamento discordante é melhor para usinagem de peças, cuja seção é pequena, se há folgas no mecanismo de avanço, quando a profundidade varia excessivamente ou ainda em peças fundidas e forjadas, cuja existência de uma camada dura pode prejudicar o processo (METALS HANDBOOK, 1989). Em seu trabalho, Boothroyd e Knight (2006), mencionam que existem evidências suficientes para afirmar que o fresamento concordante produz menores forças e consomem menor potência durante a usinagem, contudo é necessária uma maior rigidez da máquina ferramenta, da peça e seus suportes e da ferramenta e seu sistema de fixação.

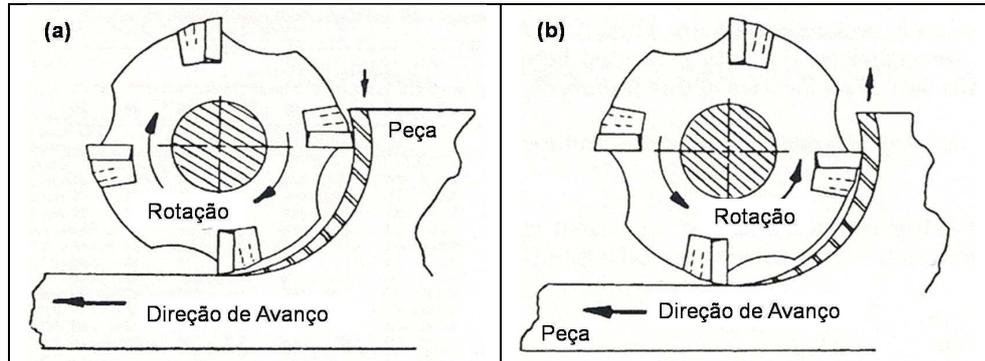


Figura 2.1 – Representação esquemática do fresamento concordante (a) e discordante (b) (adaptado de WALSH;CORMIER, 2006).

Sobre o ângulo de posição ( $\chi_r$ ) da ferramenta é possível afirmar que, ele tem importância fundamental na distribuição de forças sobre a aresta de corte. Por exemplo, um ângulo de  $45^\circ$  balanceia as forças radiais e axiais presentes durante o corte enquanto um ângulo de  $75^\circ$  aumenta a força radial e reduz a força axial, o uso de um ângulo de posição igual a  $90^\circ$  praticamente anula a componente de força axial, restando à força radial como mostra a Fig. 2.2 (EDWARDS, 1993). Além disso, o valor do ângulo de posição da ferramenta interfere na espessura do cavaco ( $h'$ ) e quanto menor for o valor deste ângulo, menor será a espessura do cavaco (Fig. 2.3). Assim, cada tipo de aplicação irá requerer um valor de ângulo de posição, que deve ser cuidadosamente escolhido.

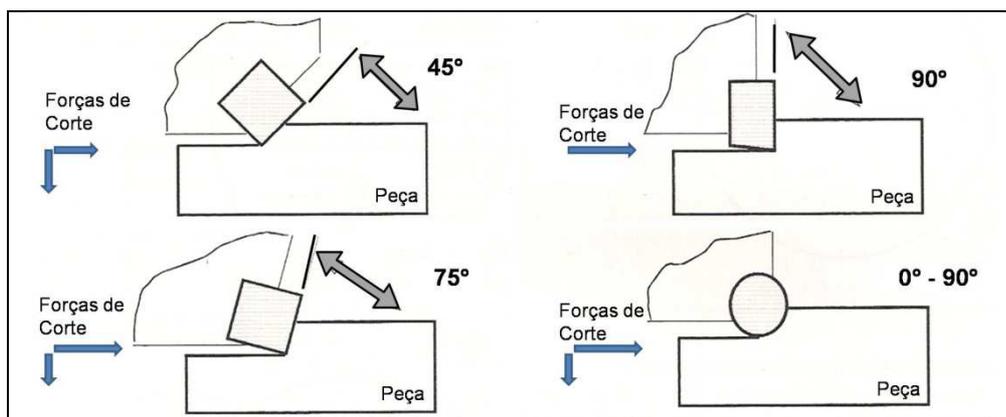


Figura 2.2 – Esquema de atuação das forças radial e axial de acordo com o ângulo de posição da ferramenta (EDWARDS, 1993).

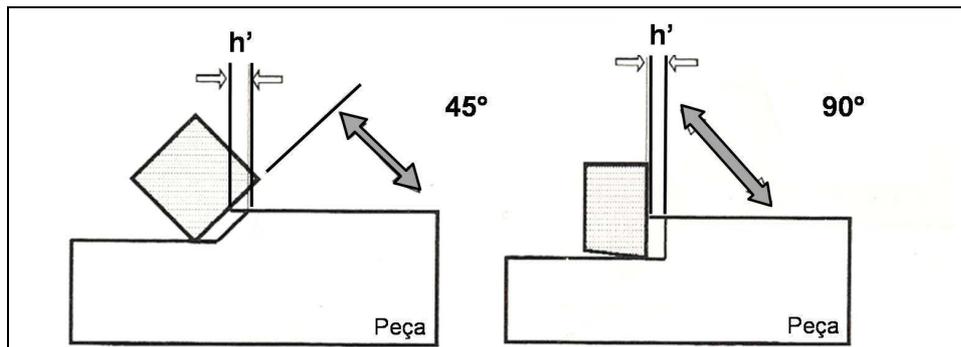


Figura 2.3 – Esquema da variação da espessura do cavaco de acordo com o ângulo de posição da ferramenta (EDWARDS, 1993).

O ângulo de entrada da ferramenta na peça ( $\beta$ ) é determinado pela posição do centro da ferramenta em relação à quina da peça (Fig. 2.4). Valores negativos de ângulo de entrada são preferidos (preferivelmente até cerca de  $-20^\circ$ ), como ilustrado na Fig. 2.4b, onde a linha de centro da fresa está abaixo da quina da peça e isso ocorre devido ao fato de um ângulo negativo garantir que o ponto de contato entre a peça e a pastilha seja o ponto mais resistente do inserto, ou seja, que não seja a aresta de corte. A utilização de uma entrada positiva acarretará maiores choques dos insertos contra a peça, além disso, podem gerar tensões de tração na ponta da pastilha que foi projetada apenas para suportar tensões de compressão, fazendo com que, ao decorrer do processo, a pastilha ocorra fratura precoce. Caso a mudança para uma entrada negativa não seja possível, deve-se optar por um inserto com aresta afiada ou negativa (WALSH; CORMIER, 2006).

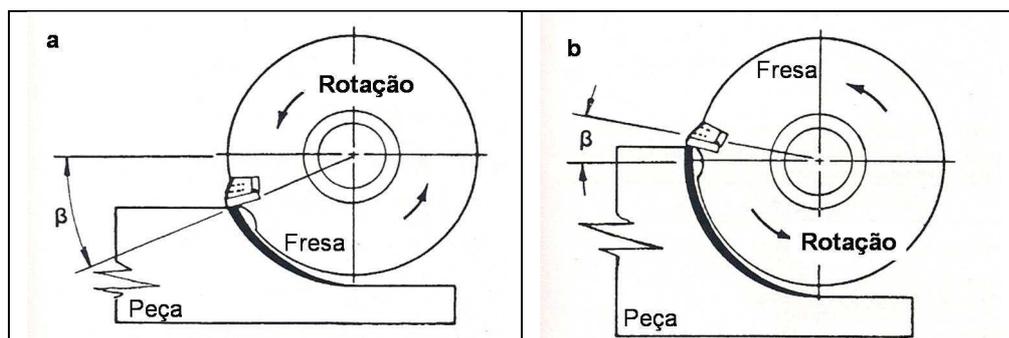


Figura 2.4. Ângulo de entrada da ferramenta na peça. (a) Entrada positiva e (b) entrada negativa (adaptado de WALSH; CORMIER, 2006).

O número de dentes de uma ferramenta é outro fator muito importante no momento do planeamento de um processo de fresamento (Fig. 2.5). Uma ferramenta de corte deve

possuir dentes suficientes para garantir que não haja interrupção de contato com o metal trabalhado, mas não muitos para promover uma distância tão pequena entre eles que não haja espaço suficiente para que o cavaco escoe. Caso os dentes estejam muito próximos uns dos outros, haverá interferência dos cavacos durante a usinagem aumentando o consumo de energia e por fim poderá haver a destruição da ferramenta, da peça, ou ambas. Já se a distância é tão grande entre os dentes, que enquanto um deixa a peça o seguinte nem entrou em contato com ela, poderá haver o aparecimento de vibrações e trepidações, com conseqüente acabamento inferior, redução da exatidão e desgaste excessivo da ferramenta de corte (METALS HANDBOOK, 1989). Dessa forma, é necessário que se busque um compromisso ótimo, de forma a prejudicar o processo minimamente, fazendo com que o resultado seja o desejado. No entanto, ainda é preciso lembrar que a escolha correta do número de dentes vai depender do material que se pretende usinar, sendo assim, pode haver casos em que um número considerado excessivo de dentes para um tipo de material é satisfatório para outro, como na usinagem de metais frágeis em que é possível a utilização de uma quantidade maior de arestas durante o corte (exemplo: ferro fundido).

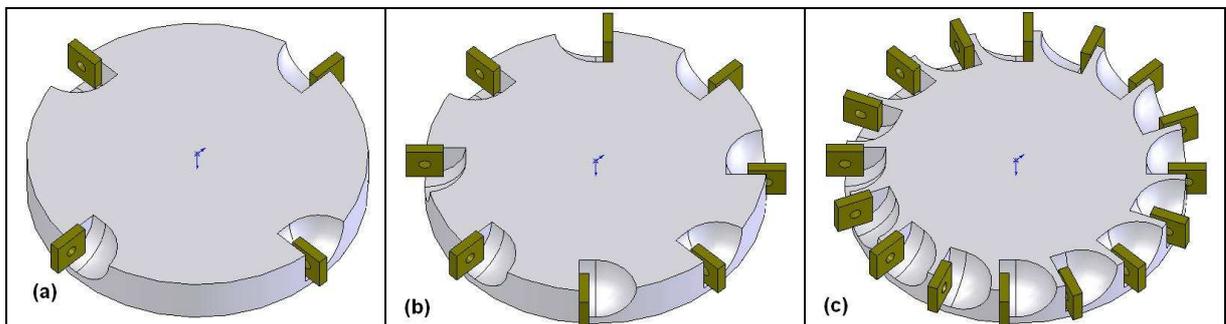


Figura 2.5 – Esquema que ilustra a quantidade de dentes de uma fresa. Fresa com 4 arestas (a). Fresa com 8 arestas (b). Fresa com 16 arestas (c).

### 2.1.3. Fresamento frontal e tangencial

As operações de fresamento, frontal e tangencial serão comentadas nessa sessão de forma simplificada, pois o tipo de fresamento utilizado nesse trabalho foi o de topo, o qual será estudado com maiores detalhes nas sessões seguintes.

O fresamento frontal é o tipo de fresamento em que o plano de trabalho, plano que contém as direções de corte e avanço, é paralelo à superfície que está sendo usinada. Os dentes da fresa ficam situados na sua superfície frontal e o eixo da fresa é perpendicular a

superfície que está sendo gerada, sendo esse tipo de fresamento utilizado para a produção de superfícies planas (Fig. 2.6).



Figura 2.6 – Representação de um fresamento frontal.

O fresamento tangencial é o tipo de fresamento em que o plano de trabalho é perpendicular à superfície que está sendo usinada, em que os dentes da fresa ficam situados em sua periferia e o eixo da fresa é paralelo à superfície que está sendo usinada. Ao contrário do que normalmente ocorre no fresamento frontal, o tangencial é profundo axialmente e estreito radialmente.

As ferramentas para o fresamento tangencial são normalmente utilizadas em máquinas fresadoras universais e montadas em um trecho intermediário do eixo árvore da máquina, como mostrado na Fig. 2.7. Além disso, o fresamento tangencial é bem versátil, podendo ser utilizado para a produção de superfícies planas, rasgos profundos, superfícies com dois ou mais planos e superfícies de formas complexas.

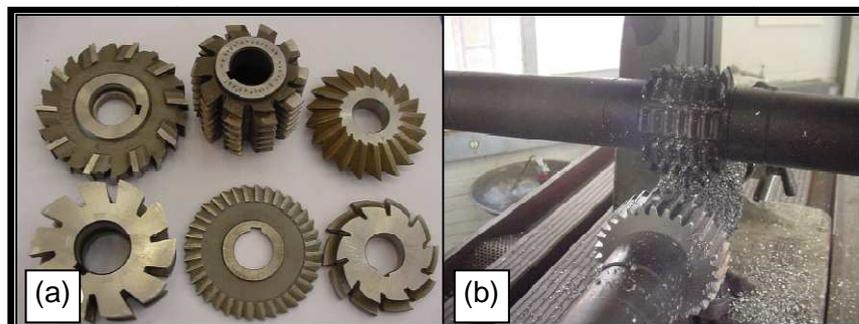


Figura 2.7 – Representação de um fresamento tangencial. (a) Alguns exemplos de fresas tangenciais; (b) Modelo de fresa caracol utilizada na fabricação de uma engrenagem de dentes retos (SOUTO, 2007).

O fresamento frontal possui as seguintes vantagens sobre o fresamento tangencial (METAL HANDBOOK, 1989):

- Melhor relação de remoção de material por potência consumida, afinal há mais dentes efetuando o corte simultaneamente;
- A fresa possui maior rigidez, devido ao menor comprimento em balanço e por estar presa diretamente ao eixo árvore da máquina;
- As forças de corte são melhores distribuídas;
- Maior eficiência de corte, produzindo mais durante um tempo menor;
- Menor tempo é requerido para a mudança de ferramenta.

Apesar do grande número de vantagens do fresamento frontal sobre o fresamento tangencial e de topo, já que a maioria dessas vantagens incide sobre ele também, a escolha definitiva do método de usinagem não leva em conta a análise apenas dos dados de eficiência do processo. No momento da escolha é preciso ter em mente o que se quer executar com a fresa, ou seja, os objetivos desejados, já que o fresamento frontal, por exemplo, está limitado à produção de superfícies planas, ao contrário dos outros dois processos que podem ser muito versáteis. Além disso, deve se ter em mente o tipo de material que está sendo usinado e a geometria que se deseja obter.

#### 2.1.4. Fresamento de topo

O fresamento de topo pode ser considerado uma combinação entre o fresamento frontal e tangencial. Nele a aresta de corte está presente tanto na face frontal quanto na tangencial da fresa (Fig. 2.8a), pois o corte ocorre tanto paralelamente quanto perpendicularmente ao eixo de rotação da fresa. Além disso, a relação entre o diâmetro e o comprimento da fresa é pequeno, pois o diâmetro é muito menor que o comprimento (Fig. 2.8b).

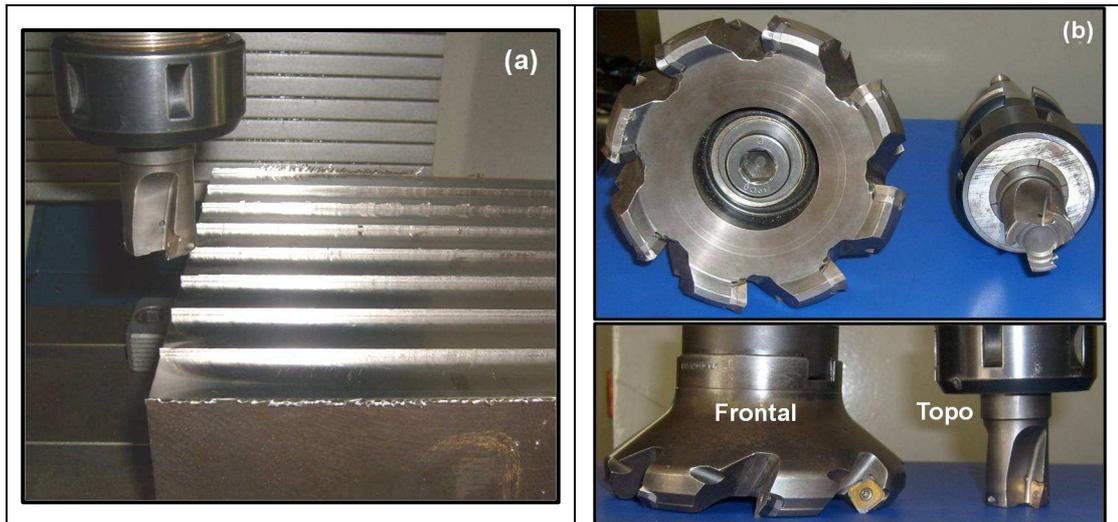


Figura 2.8 – (a) Representação de um fresamento de topo. (b) Comparação entre dimensões e geometria de uma fresa frontal com uma de topo.

Existe uma série de categorias de ferramentas para cada operação de fresamento (frontal, tangencial e topo). Quanto às características uma fresa deve ser definida a partir de seu número de estrias, pelo ângulo de hélice, material e o tipo de cobertura que recebe. Esses fatores são mais importantes ainda no fresamento de topo, afinal esse tipo de fresamento costuma ser mais sensível às variáveis de processo que os outros tipos.

Esse processo pode produzir uma variedade de sulcos, chanfros, canais, rasgos e cavidades através de uma infinidade de ferramentas. As fresas mais comuns são as ferramentas de canto vivo (*square end cutters*), as esféricas (*ball end cutters*) e as de ranhuras em T (*t-slot cutters*), como mostra a figura 2.9.

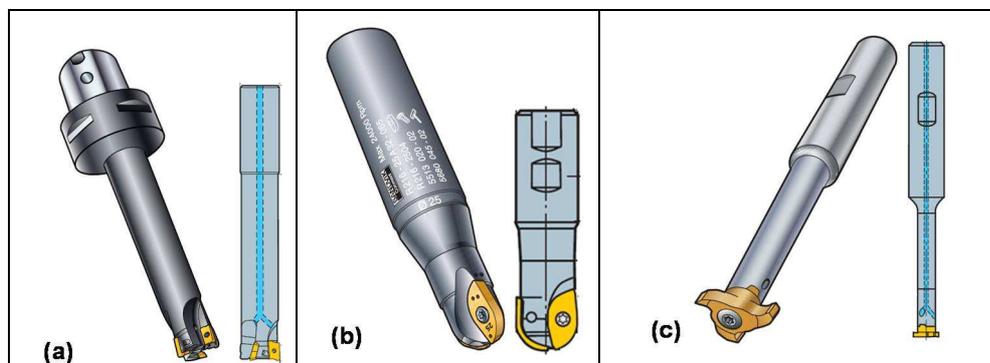


Figura 2.9 – Exemplos de ferramentas utilizadas no fresamento de topo: (a) de canto vivo; (b) esféricas; e (c) de ranhuras em T (SANDVIK COROMANT, 2009).

As tolerâncias e acabamento superficial da peça, através do fresamento de topo, podem ser excelentes, para tanto alguns fatores devem ser avaliados como (TODD; ALLEN; ALTING, 1994):

- Geometria da ferramenta e formato;
- Velocidade de corte ( $v_c$ ) e avanço ( $f$ );
- Rigidez da ferramenta, peça e máquina ferramenta;
- Alinhamento dos componentes da máquina e o sistema de fixação;
- Fluido de corte, caso esse esteja sendo utilizado.

O principal problema de uma ferramenta utilizada no fresamento de topo é o fato de possuir uma rigidez bem menor que uma ferramenta para o fresamento frontal. Essa característica, como já foi citada, ocorre devido à diferença existente entre seu diâmetro e seu comprimento, fazendo com que ela fique em balanço. Devido a esse fato, a taxa de remoção de cavaco tem de ser pequena, para que não haja prejuízos ao processo por deflexão do eixo. Os prejuízos podem ocorrer tanto na máquina ferramenta e ferramenta, quanto na peça que está sendo usinada (erros de forma e no acabamento superficial), como mostra a Fig. 2.10. Devido a esse fato, é de fundamental importância que os parâmetros de corte (velocidade de corte, profundidade de corte ( $a_p$ ), profundidade de trabalho ( $a_e$ ) avanço ( $f$ ), etc.) estejam em uma faixa que não produzam forças excessivas, a ponto de causar problemas durante a fabricação.

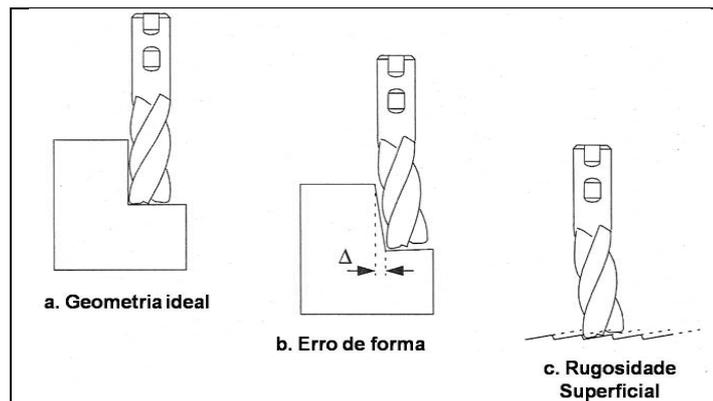


Figura 2.10 – Efeito da deflexão da ferramenta no erro de forma e no acabamento superficial (Adaptado: TRENT, 2000).

Finalmente, outro fator de extrema importância para o fresamento de topo é a escolha da quantidade de canais, que deve ser feita principalmente de acordo com o

material a ser usinado. É fato que um número excessivo de canais diminui o espaço para a saída dos cavacos, contudo aumenta a rigidez do sistema e permite a utilização de uma taxa de avanço maior. Em contrapartida, a utilização de um número menor de canais aumenta o espaço para a saída dos cavacos e reduz a rigidez do sistema. Dessa forma, deve-se buscar uma condição ideal para cada aplicação e em cada circunstância, levando-se em conta o material a ser usinado, dimensão da peça de trabalho e condições de corte.

## **2.2. Avarias, Desgaste e Mecanismos de Desgaste**

A vida de uma ferramenta é uma das mais importantes considerações econômicas na usinagem dos metais. Condições de corte que façam com que a vida seja pequena não são econômicas, pois aumentam o número de trocas e elevam o custo de produção. Contudo, a utilização de baixas velocidades e avanços resulta em uma taxa de produção pequena e por consequência torna pouco econômico o processo de produção. Grande esforço foi realizado ao longo das últimas décadas para desenvolver novos produtos e melhorar os materiais de ferramenta existentes no mercado. Além disso, procurou-se estudar a natureza do desgaste de ferramentas e outras formas de falhas (BOOTHROYD e KNIGHT, 2006).

Para o caso de ferramentas de corte tem-se em mente, sempre, que o desgaste é indesejado e sua taxa deve ser minimizada. Contudo, é preciso notar que, em alguns casos, o desgaste é bem vindo e tem papel importante para a realização de algumas tarefas em nosso cotidiano, inclusive nos processos de usinagem. Alguns benefícios do desgaste são apresentados por Shaw (1984):

1. Escrever em um papel com um lápis;
2. Apagar palavras escritas a lápis;
3. Remoção de material por processos abrasivos de usinagem;
4. Afiação de ferramentas ou outros objetos cortantes;
5. Ajuste de superfícies novas de rolamentos para melhorar a capacidade de carga e a conformidade;
6. A capacidade de autoreafiação de discos de retificação;
7. Superfícies desgastadas para melhor assentamento em montagens;
8. Etc..

Retornando somente aos processos de usinagem, estudar e entender como as ferramentas se desgastam ou sofrem uma avaria é muito importante. Dessa maneira é

possível utilizar ações coerentes e efetivas para aumentar a vida de uma ferramenta reduzindo-se assim, o número de paradas da máquina, o descarte de ferramentas, o possível descarte de peças, enfim, o custo é reduzido de maneira geral.

Por maior que seja a dureza e a resistência ao desgaste das ferramentas de corte, e por menor que seja a resistência mecânica da peça de trabalho, a ferramenta sofrerá um processo de destruição que mais cedo ou mais tarde exigirá sua substituição (MACHADO; DA SILVA, 2004).

Existem três formas de se levar uma ferramenta à destruição durante um processo de usinagem: a avaria, o desgaste e a deformação plástica. A avaria e o desgaste serão tratados em maiores detalhes, afinal são mais comuns em ferramentas de metal duro, além disso, são as duas causas principais de substituição de uma ferramenta, ao contrário da deformação plástica, cuja definição é dada a seguir (TRENT; WRIGHT, 2000).

- **Deformação plástica:** é o tipo de destruição que ocorre quando os limites de resistência do material da ferramenta são superados. Existem dois tipos de deformação plástica, a deformação plástica superficial por cisalhamento em altas temperaturas, que ocorre na superfície de saída da ferramenta e é causado pela redução dos limites de resistência ao cisalhamento devido ao aumento de temperatura. Esse tipo de fenômeno é característico de ferramentas de aço rápido e é muito difícil de ocorrer em ferramentas de metal duro. O outro tipo é a deformação plástica por tensão compressiva. Nesse caso as tensões de compressão chegam a níveis muito elevados na aresta de corte, devido à utilização de condições severas de usinagem, assim há um aumento na temperatura, redução dos limites de resistência e, conseqüentemente, a aresta de corte é deformada, esse processo também não é comum em ferramentas de metal duro e outras mais resistentes.

### 2.2.1. Avarias

Avaria é o tipo de destruição da ferramenta que ocorre de forma repentina e inesperada, não segue um padrão e nem uma seqüência de acontecimentos. A avaria normalmente ocorre por lascamento, trinca ou quebra da ferramenta (TRENT; WRIGHT, 2000), sendo que o lascamento e a trinca podem não inutilizar a ferramenta, mas na maioria dos casos evoluem para uma quebra, caso o corte continue e aí sim a ferramenta será condenada.

As avarias são mais comuns em processos de corte descontínuo, como o fresamento, por exemplo. Nesses casos a ferramenta é freqüentemente rejeitada por

trincamento, lascamento ou mesmo quebra. O desgaste uniforme só será desenvolvido, caso as ferramentas tenham tenacidade suficiente para resistir aos choques inerentes a tais processos. A partir daqui serão listados alguns tipos de avaria que ocorrem nos processo de usinagem:

- **Avaria de Origem Térmica**

As temperaturas atingidas durante o corte podem chegar a aproximadamente  $900^{\circ}\text{C}$ , dependendo das condições de corte e material utilizado (MACHADO; DA SILVA, 2004). Imagine que durante algum tempo o corte não ocorra e a ferramenta que estava superaquecida se resfrie (fase inativa), logo depois a ferramenta volte a produzir cavaco e as temperaturas voltem a atingir níveis de aproximadamente  $900^{\circ}\text{C}$  (fase ativa). Com certeza, a diferença entre a temperatura de entrada da ferramenta na peça e a temperatura de saída da peça será muito grande. O processo que possui uma fase ativa e outra inativa, como é o caso do fresamento, é chamado de corte do tipo interrompido ou descontínuo (Fig. 2.11).

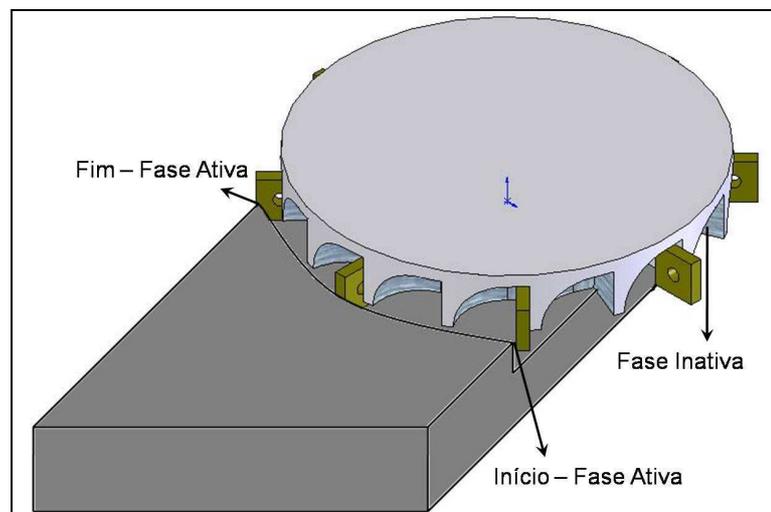


Figura 2.11 – Representação de um processo em que o corte é do tipo descontínuo, nesse caso o fresamento frontal.

As avarias de origem térmica são iniciadas justamente a partir dessa variação de temperatura, ocorrendo de forma cíclica em um processo de corte descontínuo e inúmeras vezes (Fig. 2.12). Durante o processo, a distribuição de temperaturas irá depender das condições de corte utilizadas (principalmente a velocidade de corte, avanço e a razão entre o tempo do ciclo ativo e inativo).

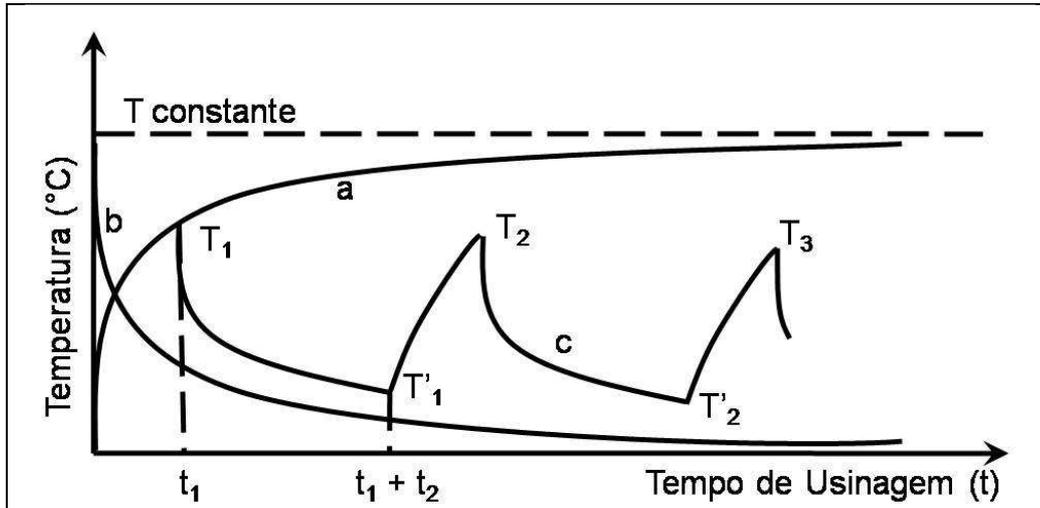


Figura 2.12 – Variação cíclica da temperatura de corte no processo de corte descontínuo (PALMAI, 1987).

A Fig. 2.12 apresenta três curvas de temperatura em um processo de corte, a primeira (a) é característica de um processo de corte contínuo, em que a temperatura vai se elevando até certo nível que tende a ficar constante. A segunda curva (b) representa o resfriamento dessa mesma ferramenta, saindo de sua temperatura máxima e indo a zero denotando uma curva exponencial. Por fim, a última curva (c) representa o processo de corte descontínuo, em que há a variação de temperatura de acordo com o ciclo de entrada e saída da ferramenta da peça, de forma que quanto maior a diferença entre a temperatura máxima e mínima de corte, maior será o choque térmico e o prejuízo à vida da ferramenta.

A flutuação cíclica da temperatura na interface cavaco-ferramenta leva a uma modificação, também cíclica, da distribuição de tensão na região de corte da ferramenta, o que pode provocar a formação de trincas térmicas (MACHADO; DA SILVA, 2004). O que ocorre, de maneira simples, é que há uma variação do tipo de tensões durante o processo de corte, que em determinado momento são compressivas e em outro são trativas, tanto na superfície da ferramenta, como logo abaixo dela. Essa variação de tensões conduz à formação e desenvolvimento de trincas térmicas perpendiculares à aresta de corte, destacando que existem trincas de origem mecânica e que elas normalmente são paralelas à aresta de corte. É importante ressaltar que quanto maior a tenacidade maior é a resistência ao aparecimento das trincas térmicas.

As trincas térmicas, por si só, já são um grave problema para a ferramenta de corte. Contudo, ainda há a possibilidade de interagirem com trincas de origem mecânica e acelerar a fratura da ferramenta.

Ferraresi (1970) mostra que há um limite para o número de trincas térmicas formadas por esse processo, cujo fenômeno nomeou de “número limite de sulcos”. O número de trincas se estabiliza porque o processo de fadiga é aliviado pela abertura dessas 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 a abertura de nova fissura.

- **Avaria de Origem Mecânica**

As avarias de origem mecânica estão ligadas aos choques mecânicos, aos quais as ferramentas estão sujeitas na entrada da ferramenta na peça ou ainda, durante sua saída, respeitando algumas condições.

Imagine o impacto gerado por uma ferramenta girando em elevada velocidade ao entrar em contato com uma peça. Pois então, esses impactos podem ocorrer tanto em processos de corte contínuo, quanto em processos de corte descontínuo (mais comum). Para que o impacto provoque a quebra da ferramenta no momento em que é iniciado o corte, as condições devem ser extremamente severas e isso pode ocorrer tanto no corte descontínuo (ex. fresamento), quanto em cortes contínuos (ex. torneamento). Contudo, o mais comum, é que esse fenômeno ocorra após vários ciclos de carregamento e descarregamento da ferramenta e impactos gerados durante a entrada da ferramenta na peça, fenômenos característicos de processos como o fresamento. É evidente que quanto maior for este carregamento, mais rápido a avaria ocorrerá. Portanto, grandes profundidades de corte, grandes avanços, alta resistência da peça de trabalho, entre outros fatores, aceleram o processo de fadiga e avaria da ferramenta (MACHADO; DA SILVA, 2004). Situação típica de avaria de entrada é o destacamento de grandes lascas na superfície de saída da ferramenta. O aparecimento dessas lascas pode ancorar material, piorando ainda mais o problema da adesão de material na superfície, ocorrendo para alguns materiais e que configura como um dos principais agravantes do aparecimento desse tipo de avaria. Enfim, situações que favorecem o aparecimento de trincas por choques mecânicos de entrada devem ser evitadas, para tanto basta observar o processo como um todo e se necessário, alterar as condições de corte, geometria da ferramenta, sistemas de fixação, máquina ferramenta, material da ferramenta, etc.

Podem ocorrer ainda avarias por choque mecânico durante a saída da ferramenta da peça, tal fenômeno foi estudado por Pekelharing (1980) que, ao final de seu estudo concluiu que o lascamento excessivo de ferramentas de metal duro usadas no fresamento é devido a problemas durante a saída da aresta de corte da peça. O que ocorre é que, ao se aproximar da saída da peça há uma rotação no plano de cisalhamento primário, o plano se torna negativo, as tensões altamente compressivas são transformadas em tensões de tração na ponta da ferramenta (PEKELHARING, 1984) e por fim o “pé”, como foi chamado, é formado, pois a ferramenta não suporta esse tipo de tensão. Foi assim chamado devido à semelhança que o material arrancado da peça tinha com um pé humano. Tal fenômeno foi comprovado em outro trabalho por Van Luttervelt, Willemse e Pekelharing (1984), em que testaram a teoria em ferramentas comerciais de metal duro e obtiveram excelentes resultados. Existem algumas situações críticas para o aparecimento de avarias de saída, com listado abaixo (MACHADO; DA SILVA, 2004):

- a) Ferramentas com baixa tenacidade;
- b) Corte severo (grandes profundidades, avanços, velocidades de corte, alta resistência do material da peça);
- c) Quando não há a presença do chanfro na borda da peça, propiciando o fenômeno;
- d) Ângulo de saída,  $\epsilon$ , próximo a zero fazendo com que a maior espessura de corte seja na saída da peça. Podendo ser bem utilizados positivos ou negativos, até certo ponto (Fig. 2.13);
- e) Usinagem de superfícies irregulares, em que exista um número muito grande de saídas, como é o caso da usinagem de blocos de motores.

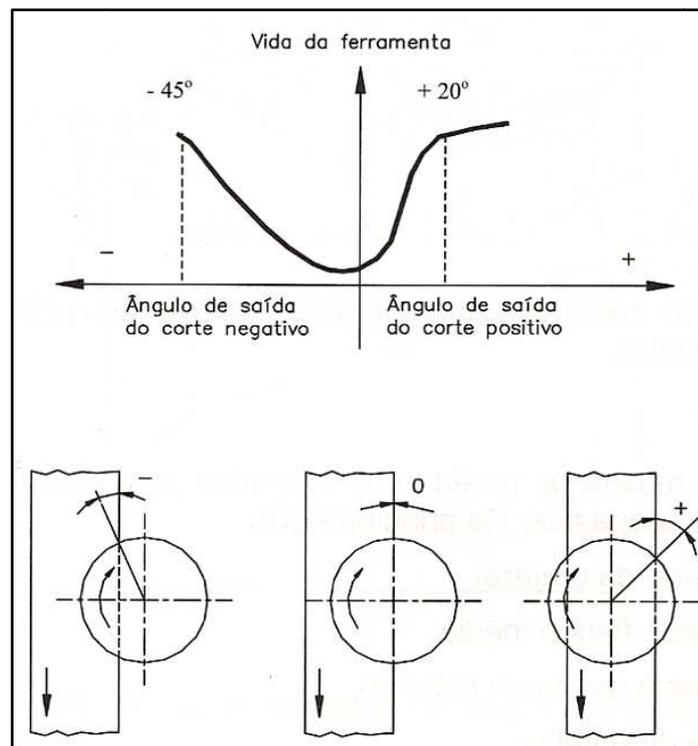


Figura 2.13 – Influência do ângulo de saída,  $\epsilon$ , da peça (SANDVIK COROMANT, sem data).

### 2.2.2. Desgaste, Vida e Critérios de fim de vida

As ferramentas de corte podem estar livres de avarias ao possuírem tenacidade suficiente para resistirem aos choques mecânicos e térmicos inerentes aos processos de usinagem. Contudo, ocorrerá outro fenômeno que ao longo do tempo levará a ferramenta à falha, o desgaste (MACHADO; DA SILVA, 2004).

O desgaste é o tipo de destruição da ferramenta que segue um padrão e que evolui ao longo de toda sua vida. O desgaste é caracterizado pela perda de material de alguma região da ferramenta que participa do processo de usinagem e pode ocorrer de diversas formas. De acordo com a norma ISO 3685 (1993), o desgaste é a mudança de forma da ferramenta a partir da forma original durante o corte, resultado da perda gradual de material.

Existem três formas principais de desgaste em uma ferramenta, apresentadas, por exemplo, nos trabalhos de Machado e Da Silva (2004), e Boothroyd e Knight (2006) e ilustrados na Fig. 2.14:

- i. Desgaste de flanco;
- ii. Desgaste de cratera;
- iii. Desgaste de entalhe.

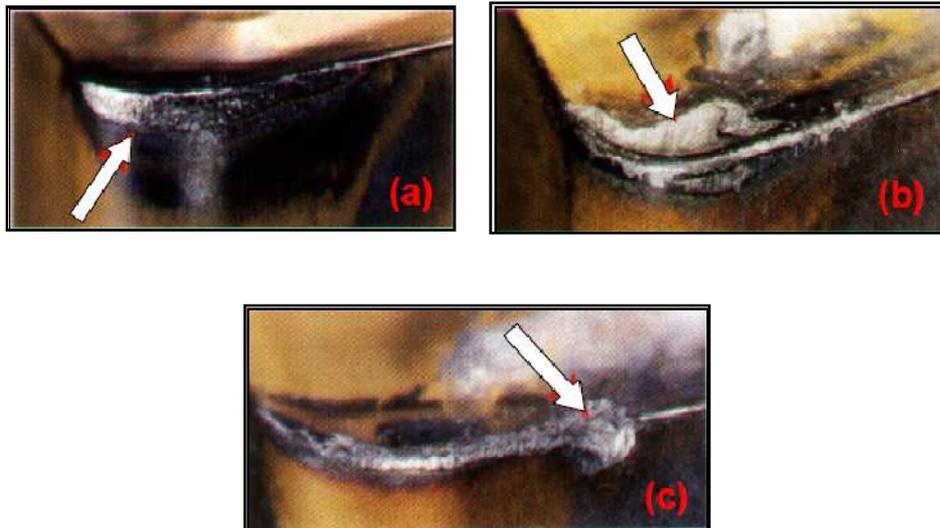


Figura 2.14 – Formas de desgaste em uma ferramenta de corte: (a) flanco, (b) cratera e (c) entalhe (SANDVIK COROMANT, 1999).

O desgaste de flanco, como o próprio nome informa, desenvolve-se no flanco da ferramenta e pode ser causado por diversos mecanismos de desgaste (Fig. 2.14a). A cratera normalmente é formada na superfície de saída da ferramenta, a princípio tem a vantagem de aumentar o ângulo de saída, contudo esse tipo de desgaste faz com que a ferramenta vá se fragilizando e perdendo a capacidade de corte (Fig. 2.14b).

A terceira forma de desgaste, o de entalhe, é muito peculiar e suas causas ainda não são bem conhecidas. Ele é caracterizado por um desgaste localizado, como pode ser visto na figura 2.14c, e aparece nas extremidades do flanco da ferramenta. Além disso, é característico de superligas, como as de níquel e as vezes nas ligas de titânio. Algumas das prováveis características do entalhe citadas por Shaw (1984) podem ser:

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

As três formas de desgaste podem ser quantificadas e a norma ISO 3685 (1993) apresenta o procedimento de identificação e quantificação dessas formas desgastes (Fig. 2.15).

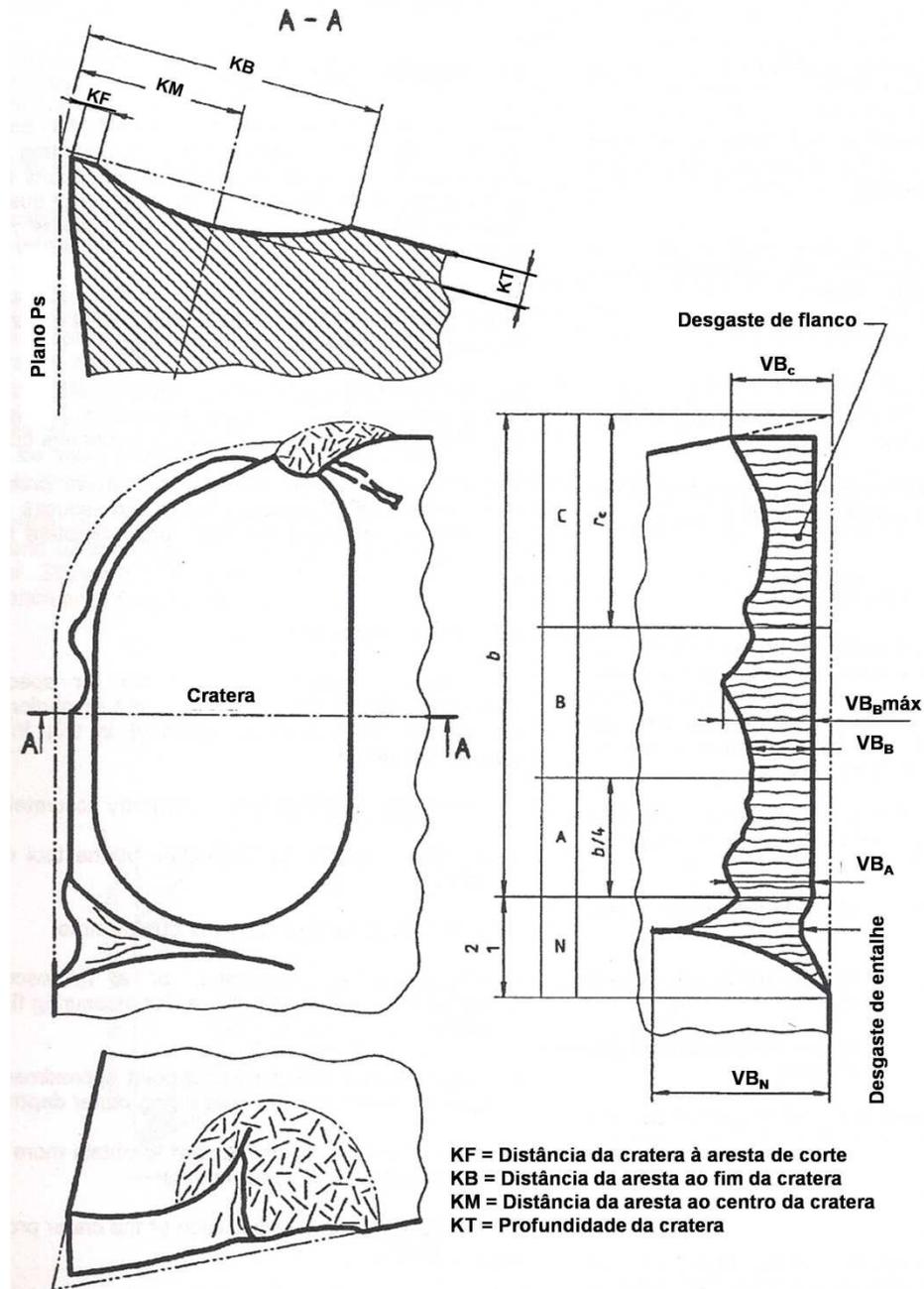


Figura 2.15 – Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte (ISO 3685, 1993), identificando as três principais formas de desgaste: profundidade da cratera (KT); desgaste de flanco médio (VB<sub>B</sub>); desgaste de flanco máximo (VB<sub>Bmáx</sub>); e desgaste de entalhe (VB<sub>N</sub>).

O desgaste de flanco é considerado por Boothroyd e Knight (2006) como sendo a principal forma de desgaste, pois é ele que determina, na maioria dos casos, o fim de vida de uma ferramenta. A curva de desgaste de flanco apresenta um comportamento padrão, como mostrado na figura 2.16, encontrado por vários autores ao longo dos anos. Essa curva apresenta três etapas de evolução do desgaste. Na parte I, a curva possui uma alta taxa de desgaste, contudo essa taxa é decrescente, dessa forma o desgaste é alto até que o sistema se adapte ao processo de corte e então, a taxa de desgaste se torne constante, entrando na etapa II de desgaste. A etapa II é a mais longa, caracterizada por um desgaste contínuo e uniforme da ferramenta, facilmente monitorado e controlável. O desgaste evolui e, então, é atingida a etapa III de desgaste, que é caracterizada novamente por uma alta taxa de desgaste, entretanto, com uma taxa crescente. No último estágio, etapa III, a ferramenta rapidamente chega ao seu fim de vida, por desgaste ou falha, e deverá ser substituída ou reafiada. A principal característica da etapa III, é que ela deve ser evitada ao máximo, pois facilmente provocará problemas ao processo.

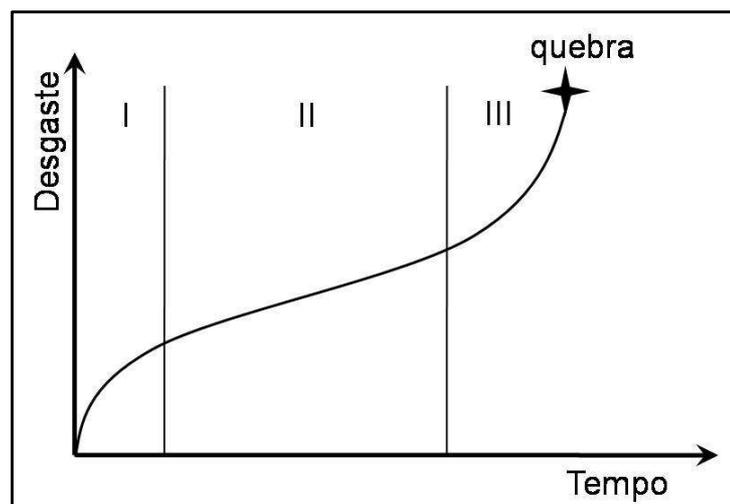


Figura 2.16 – Comportamento do desgaste de uma ferramenta ao longo de sua vida, T (LENZ; HWANG; LEE, 1978).

Falar em vida de uma ferramenta significa dizer qual o tempo requerido para que uma ferramenta atinja determinado critério de fim de vida. Ou seja, é o tempo que a ferramenta trabalha efetivamente em corte antes de ser reafiada ou substituída por outra.

Assim, devem ser adotados critérios de fim de vida durante o processo de corte. O critério de fim de vida será predeterminado por um valor limite de uma das formas de desgaste, escolhido por norma e respeitando as condições de realização do corte (ex. ISO

3685 para ferramentas monocortantes de torneamento; ISO 8688-1(1993) e 8688-2(1993) para o fresamento em faceamento e de topo, respectivamente) ou ainda pela ocorrência de algum fenômeno durante o processo. Os fenômenos que podem ser estabelecidos como critério de fim de vida de uma ferramenta são: acabamento superficial da peça, vibrações e trepidações excessivas do sistema, consumo de potência de corte elevado, ruído incomum no ambiente, temperaturas excessivas na ferramenta, tolerâncias dimensionais fora dos valores de projeto, etc..

Alguns fatores podem influenciar a vida de uma ferramenta de corte, a maioria de forma negativa. A Tab. 2.1 apresenta parte desses fatores, relacionados em itens e apresentados por Machado e Da Silva (2004).

Tabela 2.1 – Fatores de influência na vida de ferramentas de corte (adaptado MACHADO; DA SILVA, 2004).

<b>Peça</b>	<b>Ferramenta</b>	<b>Fluído de Corte</b>	<b>Máquina Ferramenta</b>
➤ Composição química	➤ Composição	➤ Propriedades refrigerantes	➤ Tipo de máquina
➤ Tamanho do grão	➤ Tratamento térmico	➤ Propriedades lubrificantes	➤ Rigidez
➤ Fusão	➤ Dureza	➤ Forma de aplicação	➤ Avanço
➤ Processo de fundição	➤ Resistência ao desgaste	➤ Tipo de fluido	➤ Profundidade de corte
➤ Fabricação	➤ Geometria	➤ Técnica de aplicação	➤ Qualidade
➤ Tratamento térmico	➤ Qualidade	➤ Nível de impurezas	
➤ Propriedades mecânicas			
➤ Dimensões e forma			
➤ Microestrutura			
➤ Qualidade			

Na Tab. 2.1 não é apresentado diretamente a influência da aresta postiça de corte (APC), contudo, não é possível estudar vida de uma ferramenta sem pensar na possibilidade da existência da APC e seus efeitos. A formação desse fenômeno é característico de materiais com duas fases e durante usinagem em baixas velocidades de

corte. A APC pode, em relação à vida da ferramenta, ser benéfica ou maléfica, como mostrado nos itens a seguir (MACHADO; DA SILVA, 2004):

- Na presença de APC instável fragmentos duros do cavaco podem ficar presos na superfície do próprio cavaco, da peça e/ou da ferramenta de forma a reduzir a sua vida;
- Uma APC estável pode proteger a superfície da ferramenta e aumentar sua vida consideravelmente;
- Durante a usinagem de aço, principalmente, utilizando ferramentas de metal duro em processos de corte descontínuo, a diferença entre os coeficientes de dilatação do material da APC aderida na superfície de saída da ferramenta poderá provocar trincas durante o ciclo de variação térmica.

Dentre todos os fatores citados na Tab. 2.1, o que exerce maior influência com o desgaste de flanco é o ângulo de folga ( $\alpha_o$ ) da ferramenta. Quanto maior o ângulo de folga menor será o contato entre a ferramenta e a peça, conseqüentemente menor será o atrito e, portanto o desgaste também será reduzido (Fig. 2.17).

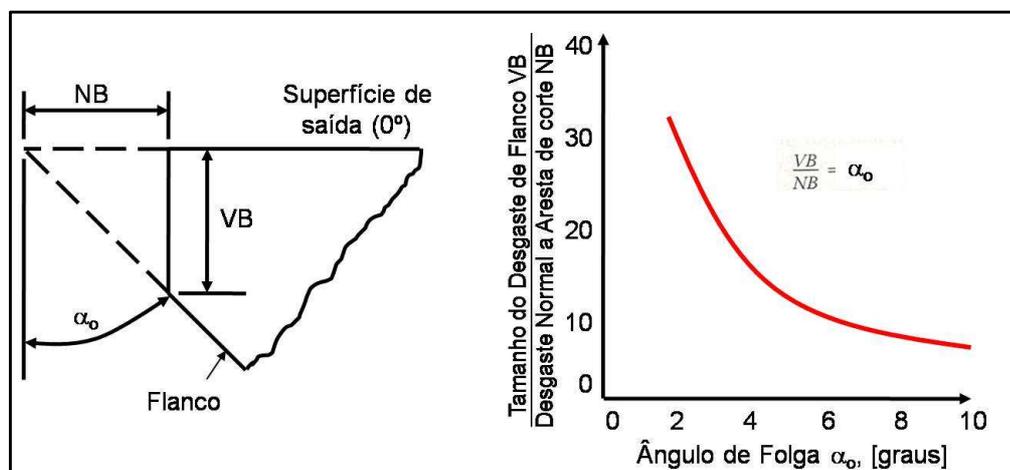


Figura 2.17 – Efeito do ângulo de folga no desgaste de flanco da ferramenta (BOOTHROYD; KNIGHT, 2006).

### 2.2.3. Mecanismos de desgaste

Ao comentar sobre desgaste e vida de ferramentas é fundamental discutir os mecanismos que levam as ferramentas a se desgastarem. Nessa sessão serão tratados os

mecanismos de desgaste, respeitando o consenso presente na literatura, mas com algumas considerações pertinentes.

Para Trent e Wright (2000) são seis os mecanismos de desgaste (Fig. 2.18):

- 1) Difusão;
- 2) Abrasão;
- 3) *Attrition* (Adesão + Arrastamento);
- 4) Cisalhamento plástico a altas temperaturas;
- 5) Deformação sob tensão de compressão;
- 6) Desgaste de entalhe.

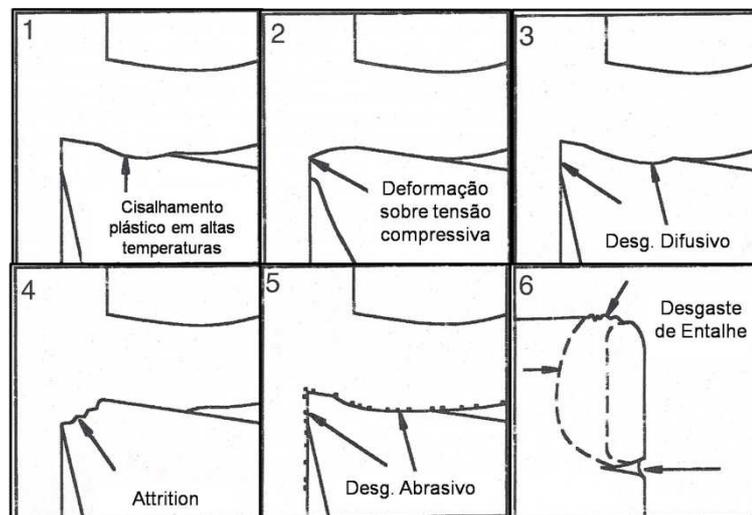


Figura 2.18 – Mecanismos e processos de desgaste que podem acontecer nas ferramentas de corte (TRENT; WRIGHT, 2000).

Apesar destes autores considerarem como sendo seis, os mecanismos de desgaste em uma ferramenta de corte, no presente trabalho serão considerados os mecanismos difusão, abrasão e *attrition* (adesão + arrastamento) apenas. Afinal, o cisalhamento e a deformação, itens 4 e 5 respectivamente, são elementos de destruição da ferramenta e o desgaste de entalhe (item 6) é apenas uma forma de desgaste, assim não são mecanismos que dão origem ao desgaste.

Deve ser ressaltado que na maioria das vezes um desses mecanismos é predominante, apesar de normalmente trabalharem em conjunto. Muitas vezes nem é possível notar a atuação de mais de um tipo, pois há a predominância de alguma das formas de desgaste.

### - Desgaste Difusivo

O mecanismo de difusão envolve a transferência de átomos de um material para outro e é fortemente dependente da temperatura, do tempo e da solubilidade dos elementos envolvidos na zona de fluxo atuante na zona de cisalhamento secundário (MACHADO, 1991). Contudo, outro fator é fundamental para que ocorra o processo de difusão, o gradiente de velocidades presente na zona de fluxo (Fig. 2.19). Esse gradiente faz com que a velocidade do cavaco ( $v_{cav}$ ) na superfície da ferramenta seja igual a zero e que vá aumentando à medida que se caminha para “dentro” do cavaco. Esse gradiente de velocidades ( $\nabla v_{cav}$ ) propicia a difusão e ao mesmo tempo garante que não haverá a saturação de elementos no cavaco, assim serão removidos átomos continuamente do material da ferramenta, que ao longo do tempo vai sendo desgastada.

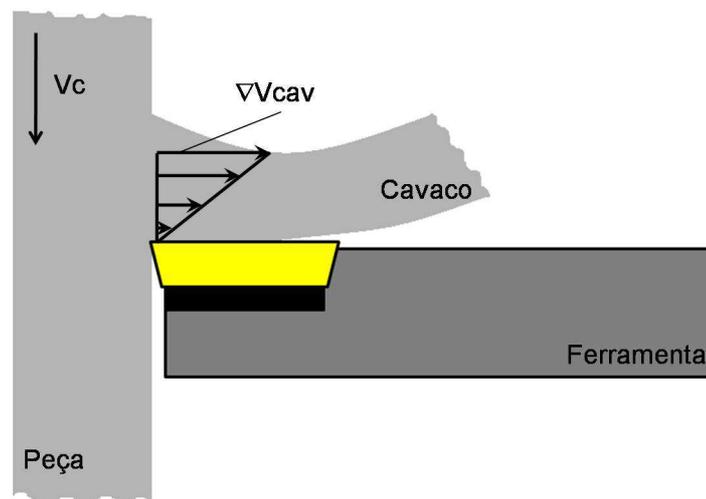


Figura 2.19 – Esquema do gradiente de velocidades do cavaco que garante o aparecimento da difusão no processo de corte.

O aumento de temperatura faz com que o mecanismo de difusão se acelere rapidamente, e dessa forma onde forem desenvolvidas as maiores temperaturas será o local em que o desgaste será mais acentuado. Em altas temperaturas a solubilidade do carbono na fase cobalto é baixa e há a saturação desse elemento, como o ferro tem solubilidade total na fase cobalto, átomos de ferro são transferidos por difusão para o material da ferramenta, formando um carboneto menos resistente e reduzindo a resistência à abrasão da ferramenta (MACHADO; DA SILVA, 2004). O mecanismo de desgaste difusivo é mais comum em ferramentas de metal duro, mas também pode ocorrer em outros tipos de ferramentas. Além

disso, é um processo característico de altas velocidades, mas os valores de velocidade não devem atingir níveis que propiciem o aparecimento do cisalhamento plástico em altas temperaturas. Por fim, as temperaturas associadas ao desgaste difusivo situam-se em torno de 850°C a 1200°C, temperaturas que não são suficientes para promover a fusão do material (TRENT; WRIGHT, 2000).

Este mecanismo de desgaste poderá atuar tanto na superfície de saída como na superfície de folga, e a taxa de desgaste irá aumentar com todos os parâmetros de corte que tem relação com o aumento de temperatura, como é o caso da velocidade de corte e do avanço. Como o desgaste se desenvolve no material da ferramenta em nível atômico, a superfície desgastada tem como característica ser uma superfície com aspecto liso ou espelhado (MACHADO; DA SILVA, 2004).

#### - Desgaste Abrasivo

Desgaste abrasivo caracteriza-se pela perda de matéria devido ao movimento relativo entre duas superfícies e decorrentes da ação de (ZUM GAHR, 1987):

- Asperidades duras em uma das superfícies, ou;
- Partículas abrasivas livres entre as duas superfícies, ou;
- Partículas abrasivas engastadas em uma das superfícies.

Trezona, Allsopp e Hutchings (1999) fornecem novas classificações aos tipos de desgaste por abrasão e os denominam de desgaste abrasivo por deslizamento e por rolamento, deixando de lado a antiga definição de abrasão por dois e três corpos. Para os autores essa definição é mais adequada, pois a classificação anterior deixa lacunas que não podem ser explicadas e induzem a um conceito ou explicação incorretos, ou seja, mecanismos de desgaste que literalmente seriam classificados como abrasão a dois corpos são classificados como a três corpos e vice-versa. Isso ocorre, pois, a antiga definição leva em conta o sistema como um todo e não o comportamento das partículas, devido a esse fato foi introduzido a nova definição que leva em consideração o comportamento das partículas abrasivas.

De acordo com essa definição, o desgaste abrasivo por deslizamento é um processo de desgaste em que a mesma região da partícula abrasiva ou asperidade está efetivamente em contato com a superfície que sofre o desgaste do início ao fim do processo. As superfícies produzidas pela abrasão por deslizamento são caracterizadas por sulcos paralelos na direção do escorregamento.

Já a desgaste por rolamento é o processo de desgaste abrasivo em que a região da partícula abrasiva em contato com a superfície que está sendo desgastada é continuamente mudada. As superfícies desgastadas produzidas por abrasão por rolamento são caracterizadas por serem bastante deformadas, pela aparência de múltiplas idetações e a pequena ou nenhuma direcionalidade das marcas.

Como a usinagem se dá justamente através do movimento relativo entre dois corpos (peça/cavaco e ferramenta), a presença de partículas duras ou a formação dessas partículas durante a usinagem podem promover o desgaste abrasivo. As partículas abrasivas podem ser provenientes tanto da peça, quanto da própria ferramenta. Precipitados duros (óxidos, carbonetos, nitretos ou carbonitretos) provenientes da peça ou do cavaco poderão dar origem ao desgaste. Em contrapartida, outro tipo de desgaste, o *attrition*, poderá arrancar partículas duras da superfície da ferramenta e assim elas promoverão o desgaste. Ferramentas de aço rápido, algumas vezes metal duro com e sem revestimento e cerâmicas puras e mistas tem o desgaste abrasivo como sendo o principal mecanismo de desgaste durante o processo. A superfície de uma ferramenta que sofre desgaste abrasivo é bem característica, possuindo sulcos e riscos paralelos uns aos outros.

O processo de desgaste abrasivo em ferramentas de metal duro é pouco eficiente, no que diz respeito à degradação da ferramenta, afinal esse material possui quantidades muito grandes de carboneto de tungstênio (WC) em sua composição. Esse tipo de carboneto é muito duro e possui alta resistência, fazendo com que normalmente só haja abrasão considerável quando partículas de WC são desprendidas da superfície por *attrition* (MACHADO; DA SILVA, 2004).

#### - *Attrition* – Desgaste por aderência e arrastamento

Durante a usinagem em velocidades relativamente baixas, as temperaturas também são baixas e os desgastes baseados no cisalhamento e na difusão não acontecem. O fluxo de metal através da aresta de corte é mais irregular, menos contínuo e laminar. Além disso, dependendo do material da peça, a APC pode ser formada e isso reduz a continuidade do contato. Sobre essas condições uma grande quantidade de fragmentos, de tamanho microscópico, podem ser arrancada intermitentemente da superfície da ferramenta, e esse mecanismo é chamado de *attrition* (TRENT; WRIGHT, 2000).

Esse mecanismo de desgaste não é um consenso entre os autores, afinal muitos o chamam de adesão apenas, somente na escola inglesa o termo *attrition* é aplicado. Nesse trabalho achou-se conveniente a adoção de *attrition*, pois se acredita que a adesão pura e

simples não daria origem a nenhuma forma de desgaste e, ocorreria, apenas a ligação entre as duas superfícies. Para que houvesse o desgaste, seria necessária uma forte adesão entre os materiais e, além disso, o movimento relativo entre as duas superfícies a fim de provocar a perda de material.

Em geral, a zona de escorregamento (ao invés da zona de aderência), o corte descontínuo (ex. fresamento), a profundidade de corte variável, dentre outros fatores, promovem o fluxo irregular de material e, portanto, favorecem a participação do mecanismo de desgaste por *attrition*. Contudo, se o fluxo de material que corre na superfície de saída ou na superfície de folga for irregular, também em altas velocidades, pode favorecer o *attrition*. O que pode ocorrer nessa situação é a predominância de mecanismos mais fortemente dependentes da temperatura que o *attrition* em altas velocidades (difusão e deformações), ofuscando a contribuição deste mecanismo de desgaste, caso ele esteja presente (MACHADO; DA SILVA, 2004). Outro fator que pode levar a esse tipo de desgaste, devido ao fluxo desigual promovido, são máquinas ferramentas que possuem carência de rigidez, peças delgadas e ocorrência de trepidações e vibrações.

Esse mecanismo de desgaste tem por característica a produção de superfícies ásperas, já que o processo se dá em nível granular. Além disso, a granulação fina desfavorece seu aparecimento (TRENT; WRIGHT, 2000).

A Fig. 2.20 mostra que quanto maior o grão, mais evidente é a parcela de contribuição do fim de vida da ferramenta pelo desgaste por *attrition*, em que, utilizando-se baixas velocidades, o fim de vida da ferramenta de grão relativamente grande é atingido rapidamente.

Por fim, para se aumentar a vida da ferramenta quando o desgaste por *attrition* é dominante, atenção deve ser dada à redução de vibrações, aumento de rigidez e o uso adequado dos ângulos de folga da ferramenta (TRENT; WRIGHT, 2000).

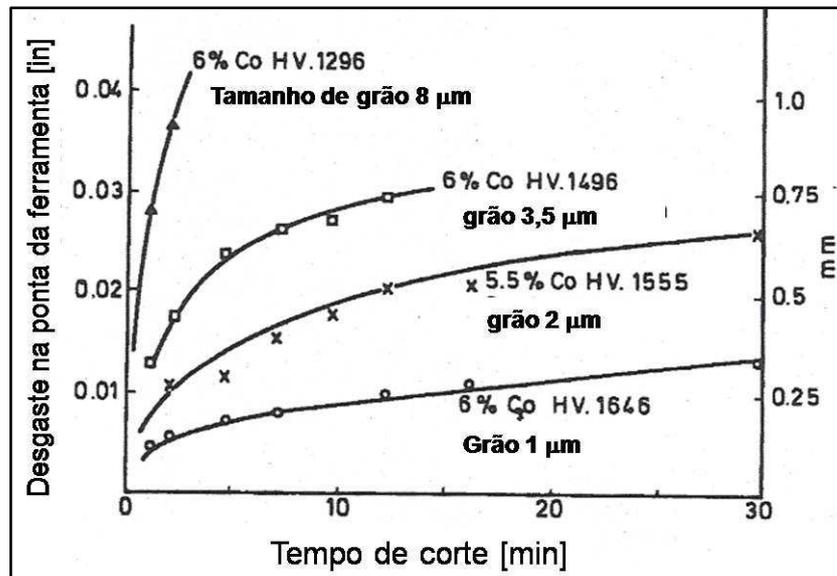


Figura 2.20 – Desgaste de flanco em ferramentas de metal duro em função do tempo de corte e do tamanho de grão em condições onde há presença de *attrition* (TRENT; WRIGHT, 2000).

### 2.3. Monitoramento dos Processos de Usinagem

As indústrias de manufatura sempre se preocupam com reduções de custo e melhoria da qualidade do produto. Nesse sentido, foram desenvolvidos sistemas de monitoramento, que têm papel de substituir a função do homem, minimizando a necessidade de paradas e prevendo o que ocorre durante o processo. O monitoramento de um processo consiste em utilizar variáveis que podem ser extraídas durante a produção, de forma a darem respostas adequadas ao objetivo que se quer alcançar, como por exemplo, a condição de uma ferramenta de corte.

A necessidade de monitoramento em um processo de usinagem inclui o monitoramento da máquina e da dinâmica do processo, ferramentas de corte e peça, a fim de se obter o melhor desempenho do sistema (BYRNE et al., 1995). Uma grande variedade de sistemas de monitoramento podem ser utilizados em um processo de usinagem com intuito de avaliação de elementos variados, tais como: condição da ferramenta de corte, condição do eixo árvore, qualidade superficial, falhas no sistema de corte e avanço, qualidade do fluido, colisões durante o processo, erros de posicionamento devido ao aquecimento e, conseqüentemente, dilatação de eixos, entre outros.

Existem duas formas de se realizar o monitoramento de um processo de usinagem, o direto e o indireto. No monitoramento direto as variáveis que devem ser avaliadas são

medidas diretamente por contato: tais como sensores óticos, equipamentos de medição de geometria e condição da ferramenta. Um exemplo é a medição do desgaste por meio de um microscópio ou ainda a qualidade superficial de uma peça por meio de um rugosímetro. Já no monitoramento indireto utilizam-se variáveis de processo que são afetadas pelo fenômeno que se estuda e são elas que serão monitoradas, por exemplo, para monitorar o desgaste de uma ferramenta de corte poderia ser utilizada a potência de corte, emissão acústica e/ou forças geradas, já que esses fenômenos estão intimamente ligados ao desgaste.

Métodos diretos de medição são mais confiáveis, contudo, não é possível ter acesso às ferramentas de corte enquanto ele ocorre, dessa forma é necessária a parada do processo para o acompanhamento da variável que se quer estudar. Assim, com o intuito de evitar perdas, reduzindo o número de paradas e a interferência no processo, tenta-se utilizar métodos de medição indireta.

Durante o processo de usinagem a condição de corte das ferramentas pode ser monitorada pelos próprios operadores ou por sistemas de monitoramento *on-line* (*Tool Condition Monitoring Systems – TCMS*). Com o aumento da demanda por redução de custos e aumento da qualidade do produto, sistemas de monitoramento vêm se tornando cada vez mais importantes em um processo de produção (PRICKETT; JOHNS, 1999).

Para Dimla (2000) um sistema de monitoramento de condição de ferramentas (SMCF) completo deveria atender a alguns requisitos:

- Possuir um sistema avançado de detecção de falhas para o corte e máquina ferramenta;
- Verificação e defesa da estabilidade do processo;
- A partir de valores de tolerâncias aceitáveis, manter os padrões dentro de uma faixa que não prejudique o processo, compensando o desgaste das ferramentas;
- Possuir um sistema que evite a avaria da ferramenta.

Atender a todos esses requisitos em um SMCF é muito complexo, pois a confiabilidade do sistema deve possuir níveis elevados e isso requer um dispêndio excessivo de tempo e, conseqüentemente, um custo elevado. Dessa forma, o que se procura, em um SMCF, é encontrar e identificar o máximo de problemas que podem ocorrer sendo monitorados.

Contudo, fica a pergunta, quais técnicas podem ser utilizados em um monitoramento de processo de usinagem? Na verdade o que ocorre, é que uma série de técnicas podem ser aplicados a um sistema de monitoramento, entre eles podem ser citados:

- Emissão Acústica (EA);
- Corrente;
- Temperatura de corte;
- Dimensões da peça;
- Sinais ultrasônicos e óticos;
- Acabamento superficial;
- Tensões e deformações;
- Vibrações;
- Emissão Sonora;
- Etc..

Dessa forma, é possível ter noção da infinidade de técnicas que podem ser utilizados em um sistema de monitoramento. Contudo, a aplicação pura e simples de um sistema desses não fará com que o objetivo seja atingido com sucesso. Para Rangwala e Dornfeld (1991), um sistema requer o conhecimento da dependência do sinal com as variáveis de processo e ainda, o entendimento dos mecanismos fonte, responsáveis pela geração do sinal. Além disso, para Tönshoff et al. (1988) alguns requisitos básicos, relativos aos sensores devem ser respeitados no monitoramento indireto:

- Estar o mais próximo possível do ponto de corte;
- A rigidez da ferramenta não deve ser reduzida para a introdução do sensor;
- Não se deve reduzir o espaço de trabalho;
- Não se devem alterar condições de corte;
- Devem ser livres de desgaste e manutenção, facilmente substituídos e terem baixo custo;
- Sua função deve ser independente da ferramenta e/ou peça;
- As características metrológicas devem ser adequadas;
- Devem resistir à sujeira, cavacos e às influências mecânicas, eletromagnéticas e térmicas;
- Transmissão de sinal deve ser confiável.

Dentre todas as técnicas citadas, algumas são mais comumente utilizados no processo de usinagem. Tais técnicas serão detalhadas a seguir, dando ênfase àqueles utilizados no trabalho, ou seja, emissão acústica (EA) e corrente do motor principal, representada através da potência efetiva de corte.

### 2.3.1. Monitoramento Através da Temperatura de Corte

O processo de usinagem gera uma quantidade significativa de calor. As temperaturas resultantes ao redor das arestas de corte têm influência direta na taxa e no modo com que ocorre o desgaste da ferramenta e no atrito entre a ferramenta e o cavaco e a ferramenta e a nova superfície formada (DIMLA, 2000). Portanto, o estudo da geração de calor e do campo de temperaturas em uma ferramenta de corte é extremamente importante quando o objetivo é obter o controle sobre os mecanismos e as formas de desgaste de uma ferramenta.

Existem três possíveis fontes de geração de calor em um processo de usinagem: a zona de cisalhamento primário, a zona de cisalhamento secundário e a zona de interface entre a ferramenta e a peça na superfície de folga. A origem do calor nessas fontes se principalmente através de duas formas, na primeira o atrito entre duas superfícies em movimento relativo dá origem a geração de calor, na segunda forma a deformação realiza o papel de geração através da conversão de energia de deformação em calor. Normalmente as duas formas atuam juntas, já que ocorre tanto a deformação, quanto o atrito durante o processo de usinagem (MACHADO; DA SILVA, 2004).

A geração de calor nas três fontes está diretamente ligada ao desgaste, seja ele de qual tipo for. Dessa maneira, ao longo da vida de uma ferramenta haverá mudanças no campo de temperaturas, sempre tendendo ao aumento da geração calor e a elevação das temperaturas. Assim, o monitoramento dessas mudanças será muito importante.

Vários métodos, práticos e analíticos, vêm sendo desenvolvidos ao longo do tempo com o objetivo de determinar a temperatura gerada durante o processo de usinagem (MACHADO; DA SILVA, 2004). O estudo das temperaturas na interface cavaco-ferramenta é muito importante em usinagem, afinal, a temperatura tem influência direta na vida de uma ferramenta de corte.

Métodos analíticos podem ser muito eficientes na busca de respostas, porém, há uma dificuldade muito grande em se encontrar respostas adequadas ao problema que se estuda. Como exemplos de métodos analíticos é possível citar elementos finitos, em que através de uma malha se busca o campo de temperaturas em uma ferramenta ou ainda problemas inversos, em que através de medições fora da região de corte. Vale lembrar que ainda não é possível medir as temperaturas nessa região e assim, tenta-se estimar o campo de temperaturas na interface cavaco-ferramenta de forma inversa.

Outra maneira de se estimar as temperaturas na interface cavaco ferramenta é a utilização de métodos práticos de medição, como os citados por Trent e Wright (2000):

- Método do termopar ferramenta-peça;
- Método de inserção de termopares na ferramenta;
- Método de medição por sensores de radiação de calor;
- Método que segue o princípio de mudança na dureza e microestrutura das ferramentas (pouco utilizado);
- Método utilizando vernizes termo-sensíveis;
- Método dos pós-químicos;
- Método do filme PVD.

Vários autores já dedicaram esforços com o intuito de monitorar temperaturas durante o corte de materiais, alguns, inclusive, relacionando esta com o desgaste. Em seu trabalho, Carvalho (2005), estudou o campo de temperaturas de uma ferramenta de corte no processo de torneamento, para tanto, variou velocidade de corte e avanço. Por meio de termopares soldados na ferramenta e suporte, coletou temperaturas que seriam usadas na resolução do problema. Sua técnica consistiu no uso de um problema direto resolvido numericamente por meio do método das diferenças finitas implícito, na Fig. 2.21 é mostrado o campo de temperaturas encontrado pelo autor na condição mais severa de usinagem ( $f = 0,138 \text{ mm/rot}$ ;  $a_p = 1,5 \text{ mm}$  e  $v_c = 217,72 \text{ m/min}$ ).

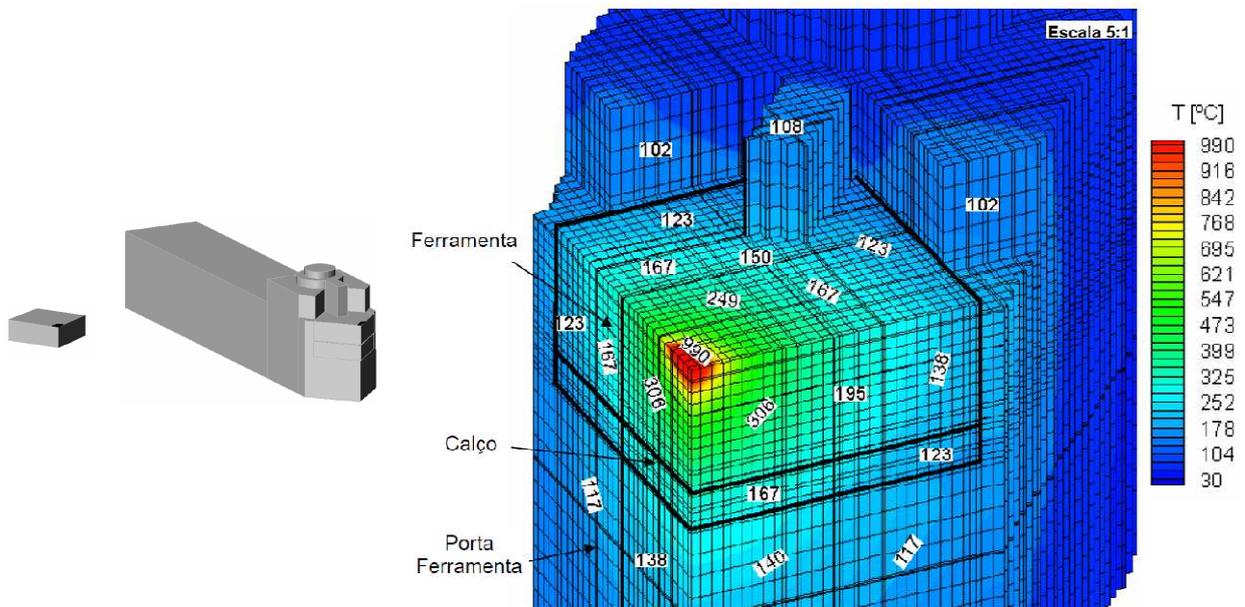


Figura 2.21 – Detalhe da pastilha e do suporte utilizado nos testes (esquerda). Campo de temperaturas geradas a partir da resolução do problema direto por meio do método das diferenças finitas (direita) (CARVALHO, 2005).

A Fig. 2.21 mostra que o autor chegou a valores bem próximos aqueles encontrados na literatura e que dizem respeito à temperatura máxima encontrada na interface cavaco-ferramenta, cerca de 990°C. Ele ressalta ainda o alto gradiente térmico na ferramenta, apresentando uma variação de temperatura ( $\Delta T$ ) de aproximadamente 750°C entre a temperatura na interface e a temperatura a cerca de 3,0 mm dessa interface. Além disso, vale ressaltar que o elevado gradiente térmico é um dos principais fatores responsáveis pelo aumento do desgaste e diminuição da vida de uma ferramenta.

Tay (1993) conclui, em seu trabalho, que dos métodos por ele avaliados, o Método dos Elementos Finitos (MEF) e o das diferenças finitas foram os que apresentaram a melhor exatidão para estimarem a temperatura. Segundo esse 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 de tensão com a deformação, taxa de deformação e temperatura e as variações das propriedades do material com a temperatura. Entre os dois métodos selecionados, o autor diz que o método de elementos finitos apresenta uma vantagem em relação ao método das diferenças finitas, a sua 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.

Shih (1996) e Majumdar et al. (2005) utilizaram técnicas de diferenças finitas, para prever o campo de temperaturas em uma ferramenta de torneamento, ambos encontraram resultados próximos aos esperados para os materiais que estavam utilizando, aço AISI 1020 e aço de livre corte, respectivamente. Nos dois casos foi considerado o corte ortogonal, ou seja, um campo 2D de distribuição de temperaturas devido à dificuldade que há em se simular em 3D. A dificuldade em se efetuar a simulação em três dimensões é um dos principais problemas da utilização da técnica de elementos finitos.

Outro trabalho, apresentado por Wanigarathne (2005), utilizou o monitoramento da temperatura de corte através de medições infravermelhas no corte ortogonal. Durante os testes foram utilizadas ferramentas de metal duro que possuíam quebra-cavacos do tipo cratera e se usinou um aço AISI 1045. Os resultados encontrados mostraram a relação entre a máxima temperatura encontrada na ferramenta e a localização da maior taxa de desgaste em um tempo qualquer, em que sempre a ferramenta sofreu o maior desgaste nesse ponto.

Através de um pirômetro de duas cores com fibra ótica Ueda et al. (2001) monitorou a temperatura do flanco da ferramenta durante fresamento de topo em alta velocidade. Sua

investigação consistiu na avaliação da influência das velocidades de corte, avanço e da profundidade de corte nas temperaturas geradas na região com a utilização de uma ferramenta de metal duro em um aço AISI 1045. Os autores chegaram à conclusão que a velocidade de corte é o parâmetro que exerce maior influência no aumento da temperatura, seguido por avanço e profundidade de corte. Além disso, comprovaram a grande variação de temperatura presente no corte. Assim, pode-se considerar que a velocidade tem papel fundamental na aceleração do desgaste, que está ligado à variação de temperatura.

### 2.3.2. Monitoramento 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 devido à 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).

Em usinagem as vibrações são produzidas por variações cíclicas nas componentes dinâmicas das forças. Usualmente, esses movimentos vibracionais começam como pequenas trepidações devido aos pequenos serrilhamentos na superfície da peça e irregularidades na espessura do cavaco, e o seu progresso leva ao que é chamado de vibração propriamente dita. Vibrações mecânicas são geralmente resultado de movimentos periódicos de ondas. Medições diretas de vibração são difíceis de serem conseguidas devido à dificuldade de se determinar seu aspecto característico, pois o modo de vibração é dependente da frequência. Conseqüentemente, parâmetros relacionados como a taxa com que as forças dinâmicas mudam por unidade de tempo (aceleração) são medidas e as características de vibração derivadas desses padrões obtidos (DIMLA, 2000).

Costa (1995) apresentou resultados de seu trabalho em que relacionou o sinal de vibração ao desgaste de ferramentas de corte durante o torneamento de um aço laminado 4340 em um torno CNC Romi Cosmos 30, utilizando ferramentas de metal duro com revestimento triplo de TiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e TiN. Para tanto, o autor variou a velocidade de corte e o avanço. Contudo, ele não encontrou uma relação significativa entre o aumento do desgaste e o valor RMS do sinal de vibração, mostrando que a vibração não é sensível à perda de cobertura e ao conseqüente aumento da taxa de desgaste. Além disso, não foi possível

estabelecer um nível de vibração que determinasse o fim de vida da ferramenta, pois as condições de corte de usinagem exercem bastante influência nos valores de vibração.

Alonso e Salgado (2008) utilizaram dois acelerômetros, posicionados o mais perto possível da ferramenta, durante uma operação de torneamento de um aço C45. Foram variadas as condições velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Medições periódicas do sinal de vibração foram realizadas ao longo da vida da ferramenta e o sinal foi correlacionado com o desgaste de flanco (VB). Os dados estatísticos extraídos do sinal foram introduzidos em uma rede neural artificial (RNA) com o objetivo de obter como resposta o estado de desgaste da ferramenta (nova, em condição de uso e gasta). Através do treinamento da rede foi feita a estimativa de valores de desgaste de flanco que a ferramenta possuía. Ao final do trabalho, os autores chegaram à conclusão que a RNA conseguiu estimar com bastante exatidão os valores do desgaste das ferramentas, contudo devem-se utilizar frequências mais altas. Fato muito interessante desse trabalho é que foram escolhidas aquelas ferramentas cujos dados estatísticos adquiridos do sinal possuíam maior correlação com o desgaste para efetuar o treinamento da rede, essa etapa foi realizada com o intuito de reduzir de forma significativa as chances de a rede neural fazer de forma errada a detecção da condição da ferramenta.

O principal motivador de outro trabalho foi o fato de que o desgaste pode provocar distorções na dimensão das peças acabadas, às vezes aumentando o nível de sucata e provocando custos adicionais e desnecessários (DIMLA; LISTER, 2000). Dessa forma, o intuito foi desenvolver um sistema de monitoramento do desgaste utilizando sinais de vibração e força. O método foi baseado em uma análise multivariada dos dados adquiridos durante o torneamento com duas ferramentas revestidas de metal duro (P15 e P25). De acordo com as análises realizadas é possível identificar tendências de mudanças nos sinais à medida que a ferramenta vai se desgastando, muito provavelmente devido a menor resistência mecânica da ferramenta nessa direção o que proporcionou resultados melhores ao estudo. O melhor resultado aparente está relacionado à componente vertical de força e vibração, em que seus dados parecem ser mais sensíveis ao desgaste da ferramenta. Além disso, é possível notar diferenças nos sinais quando comparados em diferentes condições de corte, como utilizado no trabalho.

Dimla (2004) estudou o impacto das condições de corte nas forças e vibrações produzidas durante o torneamento de um aço (EN8 BS 970) como resultado do desgaste de ferramentas. Para tanto, o autor utilizou ferramentas novas e desgastadas (metal duro – P10) em diferentes condições de corte (profundidade, avanço e velocidade de corte) e o domínio do tempo e da frequência para avaliar a natureza exata das mudanças nos sinais

devido às alterações das condições de corte. Os resultados dos experimentos demonstraram que tanto as vibrações quanto as forças são afetadas por alterações nas condições de corte, em especial velocidade de corte e avanço, que apresentaram variações mais complexas, ao contrário da profundidade de corte, como pode ser visto na quantidade de energia e na amplitude dos espectros dos sinais. Além disso, é possível perceber que há uma diferença entre os espectros de uma ferramenta nova e outra gasta em todas as condições de corte avaliadas, sendo assim, pode-se presumir que é possível realizar a identificação da condição de uma ferramenta através dos sinais de força e vibração.

Ghani, Choudhury e Husni (2002) avaliaram o comportamento de três parâmetros (vibração, acabamento superficial e desgaste) durante a usinagem de um ferro fundido nodular através de uma ferramenta cerâmica mista ( $Al_2O_3 + TiC$ ). Além de estudar cada parâmetro individualmente, eles os compararam. A primeira conclusão a que chegaram foi que esse tipo de ferramenta não é adequada para a usinagem desse tipo de material e que o acabamento não foi afetado com o aumento do desgaste, mas somente com as variações de condições de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade). Contudo, os resultados relacionados à vibração mostraram que aparentemente o aumento da velocidade tende a fazer com que o processo de corte fique mais estável, ou seja, o nível de vibração é maior em menores velocidades de corte. Dessa forma, a partir desse fato, é de se esperar que o aumento da velocidade de corte conduza a uma tendência menor de identificação entre os níveis de desgaste de uma ferramenta de corte, já que a amplitude de vibração é reduzida com o aumento da velocidade de corte.

No monitoramento da usinagem via sinal de vibração, é também muito importante conhecer o comportamento dinâmico da máquina-ferramenta. Sousa (1998) realizou um mapeamento dos locais mais apropriados para o acoplamento dos acelerômetros em uma fresadora CNC Romi Interact 4. Para isto, ele determinou 80 possíveis locais de acoplamento do sensor na fresadora. A partir daí, foi realizada uma análise de sensibilidade utilizando-se Funções de Resposta em Freqüência (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 uma na própria peça a ser usinada.

O monitoramento via vibração é muito importante também em áreas que não sejam a usinagem como, por exemplo, em desgaste de rolamentos em que é possível prever com relativa certeza os problemas que podem ocorrer antes que eles tragam prejuízos, muitas vezes incalculáveis ao processo em que o rolamento está contido. Al-Ghamd e Mba (2006),

por exemplo, apresentaram um estudo em que utilizam sinais de emissão acústica e análise de vibrações para identificar e estimar o tamanho do defeito contido em rolamentos.

### 2.3.3. Monitoramento Através das Forças em Usinagem

O conhecimento da força de usinagem que age na cunha cortante e o estudo do comportamento de suas componentes são de grande importância, não somente porque a potência requerida para executar o corte pode ser estimada, mas também, porque elas devem ser consideradas no projeto das máquinas ferramentas e de seus elementos. Ela pode ser responsável direta pelo colapso da ferramenta de corte por deformação plástica da aresta, além de influenciar no desenvolvimento de outros mecanismos e processos de desgaste. A força de usinagem pode também representar um índice de usinabilidade, além de poder ser usada como parâmetro para controle adaptativo do processo (MACHADO; DA SILVA, 2004).

Dessa forma é possível imaginar a utilidade de um monitoramento das forças presentes no processo de usinagem. Afinal, através desse monitoramento é possível avaliar se as forças estão dentro da faixa permissível para a máquina-ferramenta, se há alguma alteração inesperada durante o processo ou, ainda, avaliar a condição de corte de uma ou de várias ferramentas.

Além dos trabalhos já citados que utilizam as forças para monitorar a vida das ferramentas de corte é possível citar uma infinidade de estudos que avaliaram esse fato e outros pertinentes em um processo de usinagem. Um exemplo é o trabalho de Rossi (2007) que avaliou o comportamento das forças durante o fresamento das bordas de chapas utilizadas na fabricação de tubos com costura (aço API 5L X80) utilizando pastilhas de metal duro. Em seu trabalho o autor analisa estatisticamente a influência dos parâmetros de corte (velocidade de avanço, avanço por dente ( $f_z$ ) e profundidade de trabalho ( $a_e$ ) nas forças e no acabamento superficial gerados. Foi aplicado o método da regressão linear múltipla aos dados e encontrou-se maior influência, tanto na força de corte quanto no acabamento superficial, a partir do avanço por dente, seguido pela profundidade de trabalho e a velocidade de avanço, sendo que todos têm influência significativa e fazem com que as forças de corte aumentem. A parte final do estudo foi a aplicação do monitoramento no ambiente industrial e a validação dos resultados.

Said, Saï e Saï (2009) propuseram uma formulação analítica para as forças no processo de fresamento de topo esférico, além de estudarem o comportamento das forças nesse tipo de operação com o aumento do desgaste de flanco. A principal contribuição do

trabalho, de acordo com os autores, foi a incorporação no modelo do efeito do desgaste de flanco, da velocidade de corte, da geometria de corte, da geometria do cavaco e das forças de corte no caso específico do fresamento de topo esférico, o que proporcionou maior precisão aos resultados, confirmados através de ensaios experimentais para validação do método. Por fim, ficou demonstrado no trabalho que as forças de corte também aumentam para o processo específico de fresamento, assim como ocorre em outros processos de fresamento, com o aumento do desgaste de flanco.

Outro trabalho (JEMIELNIAK; ARRAZOLA, 2008) aplicou técnicas de monitoramento utilizando sinais de emissão acústica e força no microfresamento de um aço ferramenta trabalhado a frio (50 HRC) utilizando uma ferramenta de topo com dois insertos, 400 µm de raio e velocidade de corte de 68 m/min (36.210 rpm). O critério de fim de vida utilizado no trabalho segue outro caminho, que não a medição de desgaste e não foi detalhado. A medição de desgaste é utilizada apenas para se estabelecer um padrão para o fim de vida e para efeito de comparação com os sinais de EA e força. Os resultados apresentados mostraram que os dois sinais forneceram informações valiosas para o monitoramento da condição das ferramentas. O sinal de EA é livre de perturbações mecânicas, como vibrações de ressonância, o que é muito importante em um processo de micro-usinagem, onde as velocidades são muito altas em função do pequeno diâmetro da fresa. A emissão acústica foi robusta, de fácil registro, mostrou reação rápida ao contato ferramenta-peça, significando que é uma boa ferramenta para detectar o contato e para monitorar a integridade do processo de corte. O principal problema em relação ao sinal de força é que ele foi severamente afetado pelas vibrações de ressonância no dinamômetro, mas apesar disso, as medições aparentam ser muito úteis ao monitoramento.

Lin e Lin (1996) monitoraram *on-line* o desgaste da ferramenta no fresamento de uma liga de alumínio utilizando insertos de metal duro através de dois métodos, no primeiro eles utilizaram como dados de entrada em uma rede neural os valores médios da força de corte e parâmetros de corte conhecidos, como a taxa de avanço e geometria da peça. Nesse caso a rede neural foi treinada para estimar o desgaste nos insertos. No outro método os autores utilizam um modelo de regressão para estimar o desgaste da ferramenta, tal modelo é obtido a partir dos dados extraídos dos experimentos. Os resultados mostram que todos os tipos de redes neurais aplicadas conseguiram ser treinadas e monitoraram adequadamente o desgaste, além disso, o método de regressão também respondeu de forma positiva à evolução do desgaste. Assim, foi possível afirmar que a utilização de sinais de força em uma RNA é uma boa forma de estimar o desgaste de uma ferramenta no faceamento.

Outro sentido que pode ser dado ao estudo das forças presentes em usinagem é como, por exemplo, o do estudo de Mota (2006), em que o autor estudou o torque presente em machos de corte durante o processo de rosqueamento de um ferro fundido cinzento GH190, apesar de não ter sido o foco principal. Nesse caso a força de usinagem é convertida em torque. Durante os testes foram utilizadas duas velocidades de corte, dois substratos de ferramentas e dois tipos de revestimentos. Uma das variáveis analisadas pelo autor foi o comportamento do torque quanto ao aumento do desgaste e, ao final do estudo, ele chegou à conclusão que os sinais de torque permitiram fazer análises do estado de desgaste dos machos e que pode ser uma ferramenta extra no monitoramento da condição de ferramentas, como vem sendo ainda analisado e melhor entendido pelo mesmo autor.

#### 2.3.4. Monitoramento Através da Potência Corte

Uma das maneiras de se medir a potência efetiva de corte é transformando as forças de corte e avanço em potência, através da multiplicação de seus valores pela velocidade de corte e velocidade de avanço, respectivamente. Dessa forma a soma vetorial dos dois valores de potência resulta na potência efetiva de corte, que é a potência necessária para que seja realizado o corte (MACHADO; DA SILVA, 2004; BOOTHROYD; KNIGHT, 2006).

Como a diferença entre a potência de corte ( $N_c$ ) e a potência de avanço ( $N_f$ ) é muito grande, devido aos valores das velocidades necessárias para cada movimento, muitos autores consideram como sendo a potência de corte ( $N_c$ ) a própria potência efetiva de corte ( $N_e$ ).

Já que a potência efetiva pode ser considerada como sendo a própria potência de corte, chega-se a conclusão que em teoria apenas o motor principal da máquina, ou seja, aquele que produz o movimento de corte é suficiente para determinar a potência consumida em um processo de usinagem. Dessa forma, como a corrente consumida por um motor elétrico tem relação direta com a potência que ele consome é possível dizer que a medição do sinal de corrente produzido no motor, e através de relações matemáticas simples, é possível chegar ao valor da potência consumida através da corrente elétrica do motor que produz o movimento de corte. Verdade é que, existem perdas no caminho entre o motor e o eixo-árvore da máquina-ferramenta, contudo, é de se esperar que caso haja uma tendência de alteração nos valores de corrente, com certeza isso quer dizer que houve uma mudança nos mecanismos de corte durante a usinagem. Assim, ocorrendo esse fato é possível monitorar um processo de usinagem através da potência consumida pelo motor do eixo-árvore.

O monitoramento da potência de corte durante a usinagem é baseado no fato de que uma quantidade menor de potência é consumida quando se usina com uma ferramenta nova, do que quando se usina com uma ferramenta gasta (SHAO; WANG; ZHAO, 2004).

Alguns autores já dedicaram seu tempo monitorando a potência durante o processo de usinagem e relacionando com fenômenos do processo, como é o caso de Shao, Wang e Zhao (2004), que fizeram uma modelagem relacionando a potência e o desgaste das ferramentas no processo de fresamento de um ferro fundido com ferramentas de metal duro. Após a modelagem os autores a validaram através de testes experimentais, comparando as curvas obtidas pelo modelo e as curvas experimentais. A principal dificuldade do autor foi comparar a potência instantânea de corte com o modelo proposto, não sendo muito eficaz o método por ele apresentado para esse intuito. O mesmo não ocorreu quando foi comparada a média do sinal de potência com o resultado obtido por seu modelo, em que a resposta foi satisfatória.

Al-Sulaiman, Baseer e Sheikh (2005) avaliam o comportamento da potência consumida também com o aumento do desgaste, contudo no processo de furação para três diâmetros de brocas diferentes e em diferentes avanços, em um aço médio carbono. Na maioria dos casos houve o aumento nos valores de potência consumida com a evolução do desgaste de flanco máximo ( $VB_{Bmáx}$ ) medido, além disso, ficou provado que quanto maior o avanço, maior será a potência consumida pelo motor.

Outros dois trabalhos avaliaram o comportamento do sinal de potência durante o processo de fresamento, contudo em materiais diferentes. Em ambos, o primeiro apresentado por Ramos (2004) e o segundo Naves (2009), os resultados se comportaram de maneira semelhante, houve o aumento da potência consumida para todos os materiais analisados, valores esses bem significativos (Fig. 2.22), considerando que o processo era diferente, fresamento de topo para Ramos e frontal para Naves, além dos testes terem sido realizados em aço e ferro fundido, respectivamente. Naves (2009) afirma que, muito provavelmente, o aumento da potência está relacionado à deformação da ferramenta, contudo, a causa mais provável do acréscimo da potência é o aumento da área de contato entre ferramenta e peça devido ao crescimento do desgaste de flanco, pois a diminuição da profundidade de corte, devido à evolução do desgaste, é compensada e ultrapassada pela área de contato que passa a ser maior, gerando mais atrito e dificultando o corte.

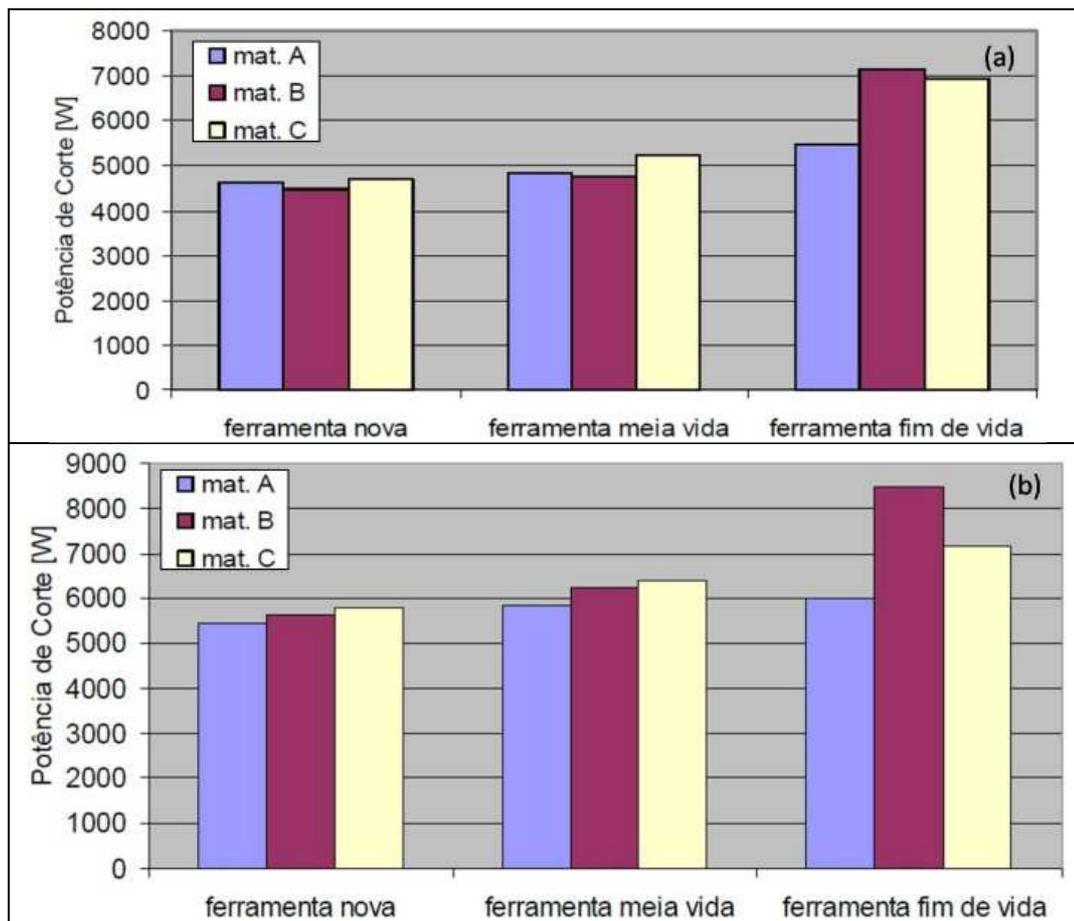


Figura 2.22 – Consumo de potência para três ferros fundidos diferentes (Material A – Ferro fundido ligado CrCuSn; Material B – Ferro fundido ligado CrCuSnMo; Material C – Ferro fundido vermicular, classe 350) durante o corte a 800 m/min (a) e 1000 m/min (b). (NAVES, 2009)

Suarez (2008) avaliou o comportamento da potência de corte através do sinal de corrente elétrica do motor principal da máquina durante o fresamento de topo de uma liga de alumínio aeronáutico 7075-T7 com ferramentas de metal duro. Foram avaliadas diversas variáveis como, velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, espaçamento entre canais e o tipo de fluido (Mínima Quantidade de Fluido (MQF) ou jorro). De acordo com o autor a variável mais influente na potência consumida em seus testes, com 95% de confiabilidade, é a velocidade de corte, seguida pela profundidade de corte e o avanço por dente. Para o autor o aumento das velocidades provoca a redução da resistência do material da peça, reduzindo as forças de corte e conseqüentemente a potência de corte.

### 2.3.5. Monitoramento via Sinal de Emissão Acústica (EA)

De acordo com Ravindra, Srinivasa e Krishnamurthy (1997) a emissão acústica (EA) é definida como ondas elásticas transientes geradas pela rápida liberação de energia de uma fonte ou fontes localizadas no interior do material sujeito a um estado de tensão. Essa energia liberada está associada com a redistribuição abrupta de tensões internas e como resultado há a propagação de uma onda de tensões através do material. Dentre as fontes relacionadas com EA, apenas deformação plástica, principalmente pelo movimento de discordâncias, e fratura são significantes no processo de usinagem.

Essa definição de EA é uma das mais completas encontradas na literatura. Vários autores ao longo do tempo definiram o que seria esse fenômeno e apesar da aparente diferença a maioria seguiu o mesmo caminho. A única ressalva a respeito dela é o fato de que um material sujeito a um estado de tensão dará origem à propagação do sinal. Entretanto, é preciso lembrar que esse estado de tensões deve ser variável ao longo do tempo, para que a emissão acústica possa ser medida de forma contínua. A aplicação de um estado de tensão em um material provoca a geração de um campo de ondas elásticas e sua propagação, caso não houvesse nenhuma mudança nesse estado, novas ondas não seriam geradas e não seria possível a medição contínua do sinal.

Ainda nesse sentido, o sinal de emissão acústica pode ser classificado em dois tipos de sinais (Fig. 2.23), definidos como do tipo contínuo e transiente (pico). O sinal contínuo está associado com deformações plásticas em materiais dúteis, enquanto o sinal transiente é observado durante a formação e propagação de trincas no material. Adicionalmente, impactos ou embaraçamento do cavaco geram picos de energia no sinal (INASAKI, 1998).

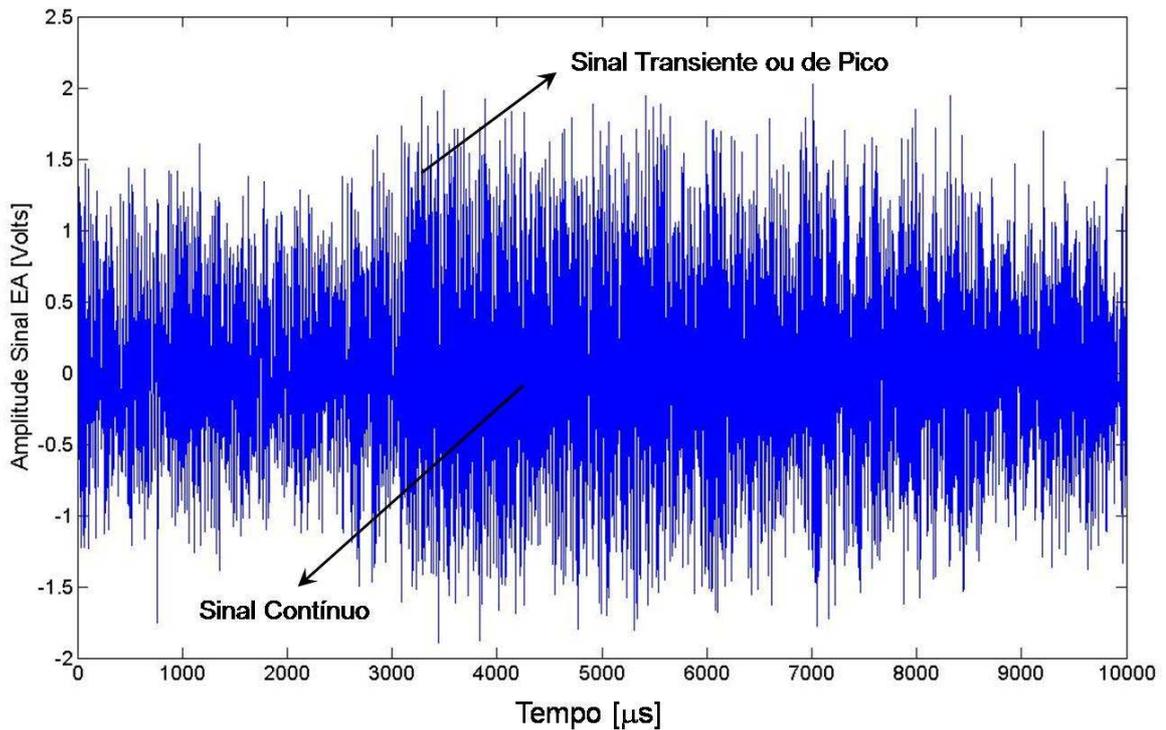


Figura 2.23 – Exemplo de sinal contínuo e de pico (transiente) de emissão acústica.

O comportamento do sinal de emissão acústica é semelhante àquele que ocorre quando uma criança arremessa uma pedra em um lago parado. Quando a pedra atingir a superfície do lago serão formadas ondas devido à variação de tensões, nesse caso tais ondas podem ser visualizadas na superfície do lago. Com o passar do tempo tudo se estabiliza e volta ao estado inicial, semelhante ao comportamento em um metal na fase elástica. A diferença está no fato de que para que, o movimento seja percebido em materiais sólidos são necessários equipamentos especiais, que sejam capazes de captar deslocamentos da ordem de micrometros. A Fig. 2.24 apresenta uma seqüência de imagens de uma gota d'água caindo sobre a superfície líquida estacionária, nela é possível perceber o mesmo efeito que ocorre no exemplo da pedra.

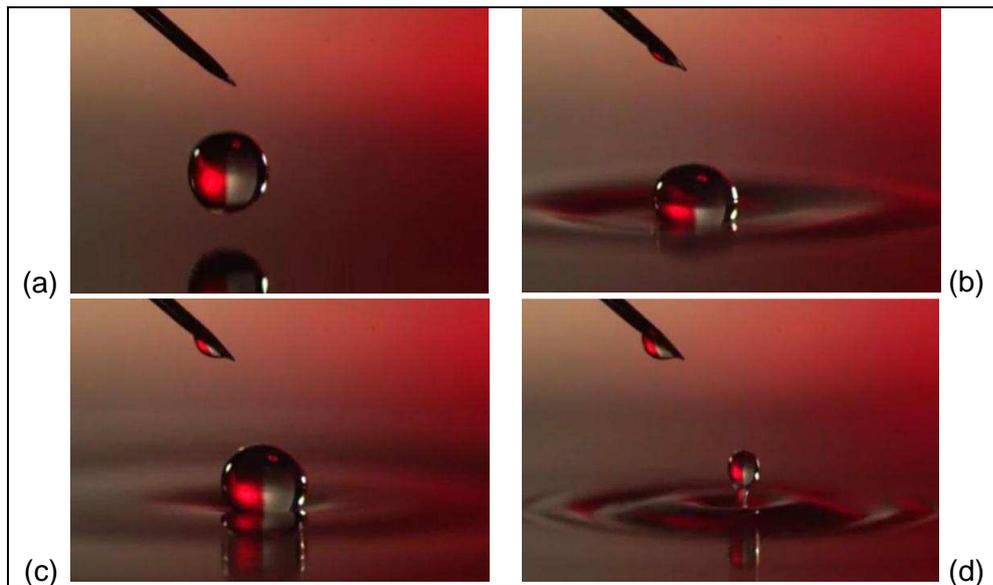


Figura 2.24 – Seqüência de imagens representando a propagação de ondas em uma superfície líquida após a aplicação de tensão por uma gota d’água (Adaptado ANON, 2009).

A usinagem é um processo dinâmico em que forças, tensões, deformações, temperaturas estão em constante mudança. Processos cujo corte é do tipo descontínuo, principalmente, estão sujeitos a uma variação muito grande de tensões e deformações a cada rotação da fresa. Como há variações durante o processo de usinagem é de se esperar que alterações no campo de tensões na interface cavaco-ferramenta e ferramenta-peça possam ser captadas através de sensores de emissão acústica instalados em algum ponto da máquina, do suporte, da ferramenta ou da própria peça.

Existem cinco possíveis fontes de emissão acústica em um processo de usinagem (Fig. 2.25) e que podem ser identificadas em um processo típico de corte ortogonal (RANGWALA; DORNFELD, 1991):

1. Deformação plástica na zona primária de cisalhamento;
2. Deformação plástica na zona secundária de cisalhamento devido ao contato por aderência;
3. Atrito que ocorre na zona de escorregamento na superfície de saída da ferramenta;
4. Fratura do cavaco;
5. Atrito entre a ferramenta e a nova superfície da peça gerada.

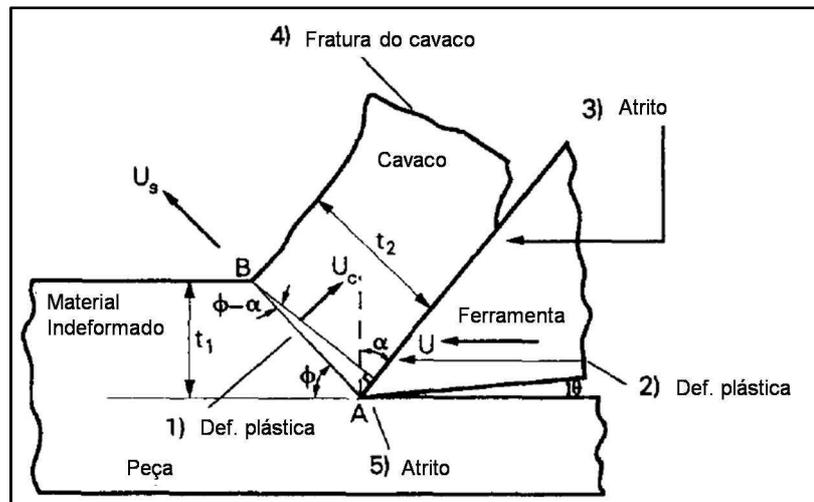


Figura 2.25 – Esquema com as possíveis fontes de geração de emissão acústica no corte ortogonal (RANGWALA; DORNFELD, 1991).

Após serem geradas, as ondas de EA propagam no material com determinadas frequências, contudo não há consenso sobre qual seria a faixa. Os valores variam muito de autor para autor, como apresentado na literatura. Dolinsek e Kopac (1999), por exemplo, afirmam que a faixa correspondente está acima dos 20 kHz, para Inasaki (1998) e Li (2002) a emissão acústica existe acima de 100 kHz. Lee et. al. (2006) afirmam entre 20 kHz e 2000 kHz há a EA, já para Diniz, Liu e Dornfeld (1992) e Pigari (1995) os valores estão acima de 50 kHz. Apesar disso, independente de qual é o valor exato da faixa de frequências de propagação do sinal de EA, o importante é ressaltar que seus valores estão acima de ruídos presentes nos ambientes comuns e de manufatura. Essa característica é muito importante, afinal não é interessante que sinais externos interfiram naquele que se deseja medir, o que pode impedir a análise com qualidade e resultados satisfatórios.

Normalmente os sensores utilizados para a captação do sinal de EA são do tipo piezoelétricos, contudo existem outros tipos de sensores como o *water-jet* ou o *Laser Doppler Velocimetry* (LDV). O sensor piezoelétrico, por exemplo, segue um princípio de funcionamento simples, convertendo uma variável de processo medida em uma variação de tensão elétrica. Esse fenômeno ocorre em certos materiais (cristais piezoelétricos) quando sob estado de tensão mecânica. A tensão é tipicamente de compressão, tração ou torção exercida no cristal diretamente por um elemento sensor ou por um elo mecânico ligado ao elemento sensor.

A utilização da emissão acústica para o monitoramento de um processo é relativamente simples e de baixo custo, o sinal é de fácil captação e muito sensível aos

fenômenos que ocorrem no processo. Além disso, o sinal não consegue apenas detectar disfunções, mas também fornece informações valiosas sobre a ocorrência de anomalias na superfície das peças. Contudo, alguns problemas devem ser citados, como:

- Fixar o sensor na peça é relativamente simples, contudo traz o prejuízo que o sinal de EA passa a não ser constante, afinal a distância entre o local de corte e onde está o sensor varia. Dessa forma, o ideal é utilizar sensores cuja distância do ponto de corte é constante (INASAKI, 1998);
- Há uma dificuldade muito grande de se desenvolver modelos teóricos adequados, devido às várias fontes geradoras de EA. Além disso, o sinal de EA viaja através de um corpo físico e sempre haverá algumas interfaces da geração até o sensor, as quais intervêm no sinal (HANCHI; KLAMECKI, 1991);
- Em uma operação de fresamento é esperado que maiores dificuldades para entender e manipular o sinal sejam encontradas, devido às características específicas do processo (MARINESCU; AXINTE, 2008). Sendo assim, quanto mais complexo o processo de usinagem, mais complexo também será a utilização do sinal de emissão acústica no monitoramento;
- Uma alta taxa de aquisição é requerida em um processo de monitoramento via sinal de EA, e isso faz com que a quantidade de dados a serem tratados seja enorme, provocando dificuldades de armazenamento e processamento;
- Para que o sinal amostrado seja representativo do sinal real, seguindo o teorema de Nyquist, é necessário que ele seja digitalizado com uma frequência que equivalha à pelo menos o dobro da frequência que se deseja. Por exemplo, caso queira trabalhar em frequências de até 1000 kHz será necessária a aquisição com uma taxa de 2000 kHz, aumentando ainda mais a quantidade de dados.
- Processos de usinagem que possuem vários dentes usinando ao mesmo tempo, têm agravantes. Considere as cinco fontes principais de geração de EA no corte ortogonal, leve-as para o fresamento. Nesse caso o número de fontes será multiplicado pelo número de dentes em corte, aumentando ainda mais a dificuldade de processamento e a identificação de qualquer fenômeno que ocorra durante o processo;
- Outra dificuldade está na questão da flexibilidade e confiabilidade do sistema de monitoramento, ou seja, um problema mais amplo, que atinge não só a emissão acústica. Transferir o que foi realizado em condições laboratoriais para o chão de fábrica é muito complexo.

Apesar dos problemas e dificuldades encontradas ao se utilizar a EA em um processo de monitoramento, independente do objetivo, vários autores já dedicaram esforços a respeito e muitos conseguiram êxitos consideráveis, como será comentado a seguir.

Marinescu e Axinte (2008; 2009) realizaram dois trabalhos relacionados, em que no primeiro analisaram a efetividade do sinal de EA para detectar defeitos na peça e na ferramenta em operações de fresamento. No segundo trabalho utilizaram uma técnica de tempo-freqüência para identificar esses defeitos durante o corte de vários dentes simultaneamente. Poucos autores, ao longo dos anos, se arriscaram no campo da utilização do sinal de emissão acústica para detectar falhas durante o processo multicortante, devido às dificuldades já citadas. Para tanto, eles utilizam outro tipo de análise espectral do sinal, que não a mais comum (FFT – *Fast Fourier Transform* – Transformada Rápida de Fourier), a STFT (*Short-Time Fourier Transform*), pois acreditam que a principal desvantagem da FFT é que no processo de transformação do sinal bruto do domínio do tempo ao da freqüência, o sinal perde informações. A utilização da STFT faz com que essa perda de informações seja menor ao unir tempo e freqüência. Os autores propõem um método de identificação da ferramenta de corte ao longo do tempo e ao mesmo tempo a banda de freqüência que sofre maior influência durante o corte. Uma ferramenta gasta é inserida propositalmente entre ferramentas novas e os autores conseguem de forma relativamente boa identificá-la em mapas de intensidade de energia. O maior problema do estudo é que o método é muito subjetivo e muito trabalhoso, o que parece inviabilizá-lo a princípio, contudo parece ser promissor e mostra que a STFT pode ser uma ferramenta muito interessante no monitoramento via EA.

Farrelly et al. (2004) analisam as propriedades estatísticas do sinal de EA no processo de torneamento. Contudo, o ponto principal do trabalho é que utilizaram dois sensores ao mesmo tempo, em posições diferentes e à uma distância constante do ponto de corte. A utilização desses dois equipamentos conferiu maior confiança e esforço intensivo dos dados. Além disso, possibilitou a comparação entre os dados adquiridos, comprovando a diferença entre os sinais. Ao fim do trabalho, os autores chegam à conclusão de que apesar de o comportamento dos sinais ser diferente, foi possível analisar o desgaste da ferramenta através de qualquer um dos dois satisfatoriamente.

Dolinsek e Kopac (1999) utilizaram um sensor *water-jet* para adquirir o sinal de EA durante o processo de acabamento no torneamento. Esse tipo de sensor utiliza um meio fluido, podendo ser o próprio fluido de corte, para realizar a transmissão do sinal, assim, eliminando a necessidade de contato, mantendo o sensor a uma distância constante do ponto de corte, reduzindo o efeito de amortecimento de vibrações e minimizando a questão

do ruído. O experimento foi conduzido desde uma ferramenta nova até o seu fim de vida, considerando alguns níveis de desgaste pré-estabelecidos, para ferramentas de metal duro e cermet. Ao fim do trabalho constatou-se que esse tipo de sensor apresentou um bom comportamento, sendo sensível aos fenômenos que ocorrem durante o corte. Foi demonstrado também que o desgaste da ferramenta é o fator que mais influencia no aumento de energia do sinal. Além disso, os autores determinaram para o seu caso e utilizando análise por espectros de frequência, que a banda de frequência sensível ao desgaste varia entre 100 kHz e 610 kHz, evidenciando assim, a importância da análise espectral de sinais.

Alguns trabalhos demonstram a dificuldade em se utilizar ferramentas multicortantes e tentar relacionar o sinal de EA com o desgaste. Para demonstrar esse fato, basta buscar na literatura a quantidade de trabalhos que estudam o comportamento do sinal de EA em ferramentas multicortantes com os fenômenos do processo, como o desgaste. Um desses casos foi apresentado por Mathew, Pai e Rocha (2008) em que claramente houve grande diferença no nível RMS do sinal. Contudo, o monitoramento não conseguiu de forma adequada demonstrar o estado de desgaste ao se utilizar mais de uma ferramenta ao mesmo tempo. Fato parecido ocorreu com o trabalho de Souto (2007) em que seus melhores resultados estão relacionados ao fresamento com apenas um inserto, apesar da fresa possuir capacidade para oito.

Cisneros, Muraka e Batalha (2004) fizeram um estudo a respeito do monitoramento de processos de fresamento via emissão acústica. No trabalho os autores avaliam o comportamento de dois elementos projetados, que são importantíssimos em uma cadeia de monitoramento, o amplificador e o filtro. O amplificador tem a função de amplificar e fortalecer o sinal para que ele seja melhor trabalhado, enquanto o filtro elimina as frequências relativas às vibrações mecânicas e os ruídos elétricos e eletromagnéticos. Os resultados mostram que se o amplificador utilizado não for adequado à aplicação, o sinal coletado será fraco e posteriormente causará problemas. Além disso, o filtro passa-banda utilizado (100 kHz e 1000 kHz) deve eliminar adequadamente as vibrações e os ruídos. Assim, todos os elementos que fazem parte do conjunto devem ser bem avaliados durante projeto ou aquisição, pois a escolha inadequada de qualquer desses aparelhos poderá causar problemas para a aquisição e, principalmente, durante a análise dos dados.

Lee et al. (2006) utilizam o sinal de emissão acústica para o monitoramento de processos de manufatura de precisão. O ponto principal do artigo é o fato de utilizarem mapas de energia gerados a partir do sinal para detectar falhas superficiais nos processos (retificação, fresamento e torneamento de precisão com diamante), tais processos requerem

tolerâncias extremamente apertadas. A Fig. 2.26 apresenta o detalhe de um rebolo abrasivo monitorado via sinal de EA, em que os defeitos de sua superfície foram mostrados no mapa de intensidade luminosa. Isso demonstra que o uso da EA para o monitoramento do processo e caracterização da ferramenta pode servir como ferramenta ligando a manufatura aos estágios de controle de qualidade e podendo evoluir no futuro para a eliminação da necessidade de etapas de controle de qualidade, sendo esta realizada *on-line* durante a fabricação do produto. Outro exemplo é dado no trabalho de Souto (2007), em que o sinal de EA conseguiu detectar falhas na superfície do material. Além disso, o autor consegue reproduzir a superfície de um bloco de motor através, também, de técnicas de mapas de intensidade luminosa (Fig. 2.27).

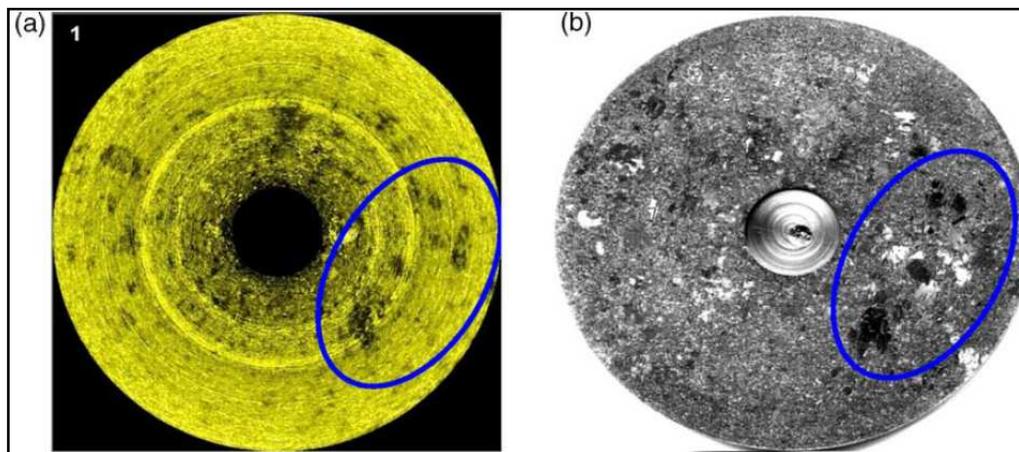


Figura 2.26 – Mapa polar de EA da superfície da peça de cobre utilizada nos experimentos (a). Detalhe da metalografia da superfície da peça com seus defeitos superficiais (b). (LEE et al., 2006)

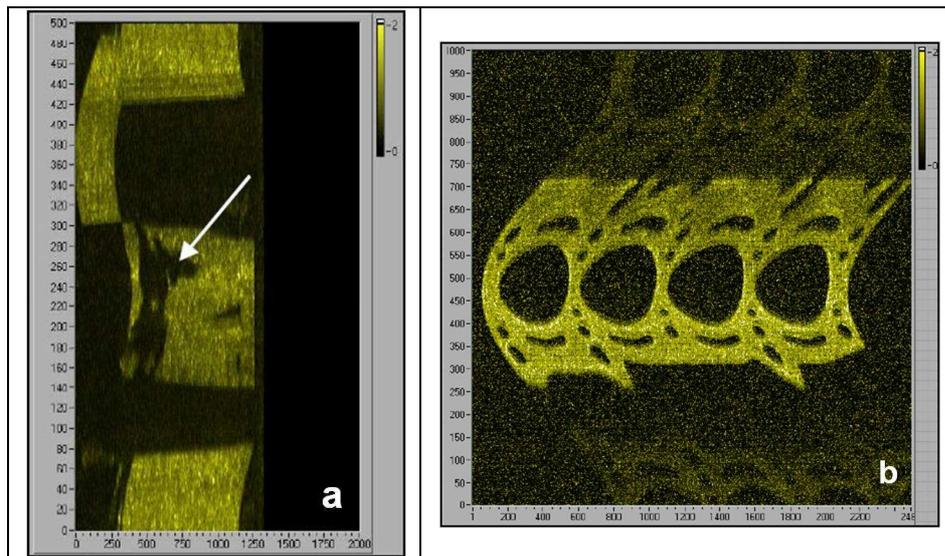


Figura 2.27 – Mapa de intensidade luminosa de EA mostrando o detalhe de um defeito superficial na peça usinada (a). Reprodução de um bloco de motor através do sinal de EA (b) (SOUTO, 2007)

Diniz, Liu e Dornfeld (1992) foram um pouco além ao tentar relacionar a vida e o desgaste da ferramenta, além da rugosidade superficial por meio do sinal de emissão acústica. Para tanto, sugerem alguns parâmetros que podem ser extraídos do sinal bruto de EA, como: tensão RMS ( $V_{RMS}$ ), número total de picos, taxa do número de picos, taxa de cruzamento do zero, desvio padrão, *skewness* (coeficiente de simetria), curtose, função autocorrelação, análise de distribuição de amplitude. Os resultados demonstram que a melhor banda, para o caso estudado, está em torno de 200-300 kHz, o que mostra mais uma vez que as bandas de frequência para a avaliação do desgaste são altas, contudo variam bastante de caso para caso. Além disso, os autores descobriram que o aumento do desgaste e da rugosidade fizeram com que a dispersão dos dados RMS do sinal, fossem aumentadas. Os resultados demonstram, mais uma vez a dificuldade do uso do monitoramento, apesar dos resultados serem muito bons, já que a resposta é muito afetada pelas condições e processo de corte.

Rangwala e Dornfeld (1991) tratam da geração da EA na usinagem, para tanto simplificam o processo para o corte ortogonal em que, no caso específico, duas das cinco fontes são consideradas como se não produzissem sinal. Os autores atribuem ao amortecimento de discordâncias a principal fonte de EA, com a presença de altas tensões e deformações durante o processo. Estes autores propuseram então um modelo e partiram para a parte experimental para validar a equação proposta. Durante os experimentos,

manteve-se o comprimento de contato artificialmente constante, mostrou-se que há uma relação entre a velocidade de cisalhamento e a taxa de avanço, além disso, que há uma relação linear entre velocidade de cisalhamento e o sinal  $V_{RMS}$  de EA. Por fim, com dos dados coletados, foi realizada a validação da equação proposta para diferentes comprimentos de contato, ficando claro que o aumento do comprimento de contato faz com que as condições na interface sejam alteradas, pois o modelo vai perdendo sua precisão. A perda é muito provavelmente devido ao surgimento ou prevaletimento de uma zona de escorregamento, além da zona de aderência, cujo modelo não prevê. O trabalho desses autores mostra a necessidade que ainda existe de simplificação do processo e a dificuldade de se encontrar modelos que tenham valor para a maior parte dos processos.

#### **2.4. Redes Neurais Artificiais (RNA)**

O cérebro humano contém em torno de  $10^{11}$  neurônios, sua célula fundamental. Cada um destes neurônios processa e se comunica com milhares de outros continuamente e em paralelo. A estrutura individual dos nodos, a topologia de suas conexões e o comportamento conjunto destes nodos naturais forma a base para o estudo das RNAs (BARRETO, 2002). Tais redes foram criadas através dessa analogia com o funcionamento do cérebro humano na década de 1940 por McCulloch e Pitts.

As RNAs tentam reproduzir as funções das redes biológicas, buscando implementar seu comportamento básico e sua dinâmica. No entanto, do ponto de vista físico, atualmente as redes artificiais se diferem bastante das redes biológicas. Contudo, é importante observar as similaridades entre estes dois tipos de sistemas, tanto para que se possa entender melhor o sistema nervoso quanto para buscar idéias e inspirações para a pesquisa em neurocomputação. Como características comuns, pode-se citar que os dois sistemas são baseados em unidades de computação paralelas e distribuídas que se comunicam por meio de conexões sinápticas, possuem detectores de características, redundância e modularização das conexões. Apesar da pouca similaridade, do ponto de vista biológico, entre os dois sistemas, estas características comuns permitem às RNAs reproduzir com fidelidade várias funções somente encontradas nos seres humanos (BRAGA; CARVALHO; LUDEMIR, 2007).

As RNAs podem ser consideradas, então, como metodologia de resolver problemas característicos da inteligência artificial, sendo a capacidade de aprender por exemplos a grande motivadora do uso das redes neurais. Elas consistem em um modo de abordar a solução de problemas de inteligência artificial. Neste caso, em lugar de tentar programar um

computador digital de modo a fazê-lo reproduzir um comportamento inteligente, se procura construir um computador que possua circuitos modelando os circuitos cerebrais, como também espera-se observar um comportamento inteligente emergindo, aprendendo novas tarefas, errando, fazendo generalizações e descobertas, e freqüentemente ultrapassando seu professor. Da mesma forma, estes circuitos neurais artificiais poderão se auto-organizar, quando apresentados à ambientes diversos, criando suas próprias representações internas e apresentar comportamentos imprevisíveis (BARRETO, 2002). A Fig. 2.28 apresenta um esquema de uma rede neural *feedforward* multicamadas.

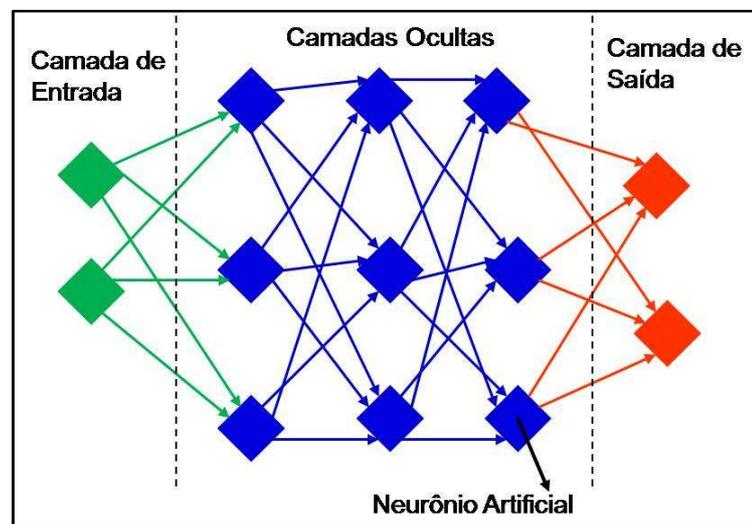


Figura 2.28 – Esquema representando uma rede neural artificial *feedforward* multicamadas, com seus neurônios de entrada, ocultos e de saída que fornecem a resposta.

#### 2.4.1. Rede Neural Artificial Básica

As redes neurais artificiais (RNAs) são um sistema de processamento de informações que tem certas características de desempenho em comum com a rede neurológica biológica. As RNAs foram desenvolvidas como generalizações de modelos matemáticos do conhecimento humano ou biologia neural, baseado nas hipóteses a seguir (FAUSETT, 1993):

1. O processamento das informações ocorre em muitos elementos simples, chamados neurônios;
2. Os sinais são transmitidos entre os neurônios através de conexões;
3. Cada conexão está associada a um peso, que, em uma típica malha neural, multiplica o sinal transmitido.

4. Cada neurônio aplica uma função de ativação (usualmente não linear) à sua malha de entrada (soma de peso do sinal de entrada) para determinar o seu sinal de saída.

Uma rede neural artificial é caracterizada por (1) seu padrão de conexões entre neurônios (chamada de arquitetura), (2) seu método de determinação de pesos nas conexões (chamado de treinamento, ou aprendizado, algoritmo), e (3) sua função de ativação (FAUSETT, 1993):

Os pesos representam informações que estão sendo utilizadas pela malha para resolver o problema. A malha neural pode ser aplicada em uma ampla variedade de problemas, como armazenamento e recorrência de dados ou padrões, classificação de padrões, mapeamento geral de padrões de entrada em padrões de saída, agrupamento de padrões similares, ou encontrando soluções para problemas (FAUSETT, 1993):

Cada neurônio tem um estado interno, chamado de ativação ou nível de atividade, que é a função de entrada recebida. Tipicamente, um neurônio envia sua ativação como um sinal para muitos outros neurônios. É importante notar que o neurônio envia um único sinal de cada vez, contudo o sinal é difundido por diversos neurônios diferentes. Por exemplo, considere o funcionamento de um neurônio simples (Y) (FAUSETT, 1993), ilustrado na Fig. 2.29, esse neurônio recebe sinal de três outros neurônios ( $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ). As ativações desses neurônios (sinais de saída) são  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ , e os pesos das conexões  $w_1$ ,  $w_2$  e  $w_3$ , respectivamente. A função de entrada no neurônio Y (Eq. 2.1) será a soma dos sinais com seus respectivos pesos dos três neurônios que enviaram sinais, assim:

$$y_{en} = w_1x_1 + w_2x_2 + w_3x_3 \quad (\text{Equação 2.1})$$

A Eq. 2.1 apresenta de forma genérica e simples a função de entrada de um neurônio qualquer (Y), a ativação (y) do neurônio poderá ser dada por alguns tipos de funções características e que serão tratadas posteriormente e que substituirá os valores de  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$  na equação.

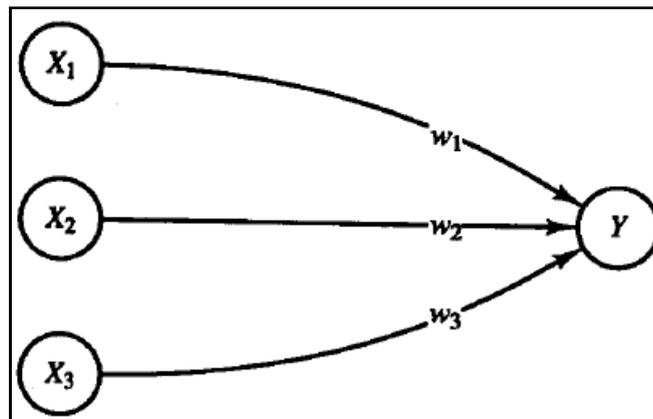


Figura 2.29 – Representação de um neurônio simples recebendo sinais de outros três neurônios (FAUSETT, 1993).

Para que o exemplo da Fig. 2.29 seja transformado em uma rede neural simples, basta acrescentar saídas ao neurônio  $Y$ , dessa forma ter-se-ia uma entrada através dos neurônios  $X$ , uma camada interna com  $Y$  e outra camada de saída com os  $Z$ . A Fig. 2.30 mostra a representação de uma rede básica.

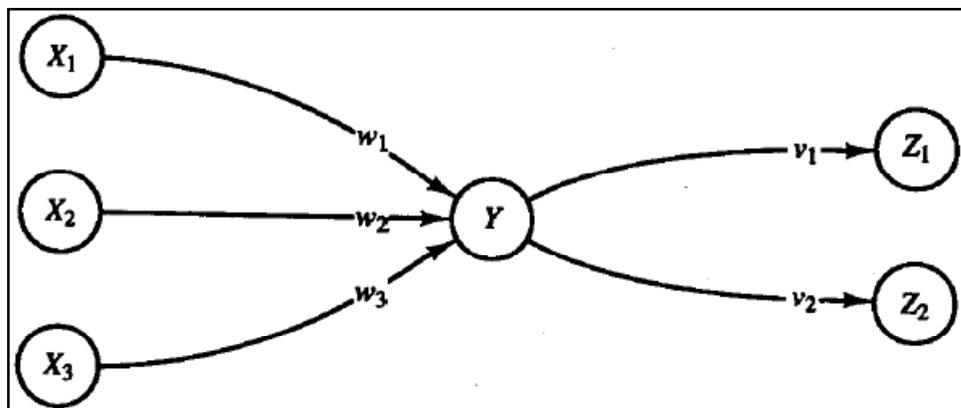


Figura 2.30 – Esquema de uma rede neural extremamente simples, com seus neurônios de entrada ( $X$ ), de processamento ( $Y$ ) e de saída ( $Z$ ), além dos pesos das funções de ativação ( $w$  e  $v$ ) (FAUSETT, 1993).

#### 2.4.2. Funções de Ativação

O primeiro e mais simples modelo de uma RNA foi proposto por McCulloch e Pitts que produzia saídas necessariamente iguais a zero ou um. Para a época já era um tanto

quanto complexo. A partir desse modelo proposto, foram derivados vários outros modelos que permitem a produção de uma saída qualquer e com diferentes funções de ativação.

Como mencionado anteriormente, uma operação básica em um neurônio artificial envolve a soma dos sinais de entrada com seus respectivos pesos e a aplicação de uma função de saída ou ativação. Para as unidades de entrada, essa função é uma função identificada. Tipicamente, a mesma função ativação é usada para todos os outros neurônios em qualquer das camadas na malha neural, contudo, isso não é obrigatório. Na maioria dos casos, uma função de ativação não linear é usada. Para ativar as vantagens das redes multicamadas, comparadas com as capacidades limitadas de redes monocamadas, funções não lineares são requeridas (BARRETO, 2002).

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). Os tipos comuns de funções de ativação para um neurônio são (FAUSETT, 1993):

- a) Identidade;
- b) Função degrau binária;
- c) Binária sigmóide;
- d) Bipolar sigmóide.

#### 2.4.3. Rede Neural Probabilística (PNN)

Dentre os vários modelos de redes neurais artificiais existentes, a escolhida para esse trabalho foi a Rede Neural Probabilística devido às suas excelentes características para a classificação de eventos e pelo fato de ter sido utilizada nesse trabalho.

O algoritmo padrão para as redes PNN (Probabilistic Neural Network) 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 (Masters, 1995).

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 de conjunto de treinamento (MEOLA, 2005).

Na Fig. 2.31 são apresentadas duas classes ( $\spadesuit$ ,  $\heartsuit$ ), onde a coordenada do eixo das abcissas 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 ( $\spadesuit$ ), enquanto que esta amostra pertence verdadeiramente à classe dos ( $\heartsuit$ ). A Fig. 2.31 é uma exemplificação de uma classificação de dados, para o caso específico dois tipos de imagens.

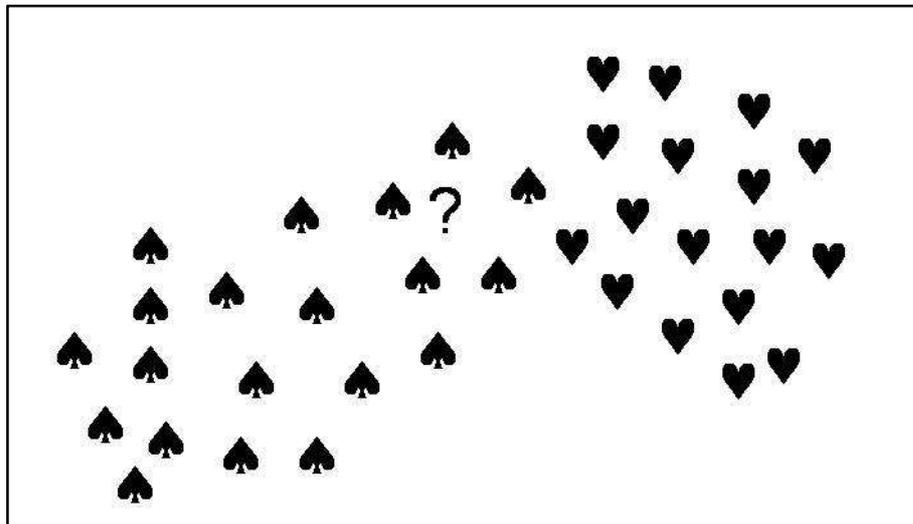


Figura 2.31 – Exemplo de um problema de classificação: tendências centrais.

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 da ilustrada na Fig. 2.32. Nesta, verifica-se que a amostra desconhecida (?) pertence à classe dos ( $\spadesuit$ ), a despeito de estar mais próxima de um membro da classe dos ( $\heartsuit$ ).

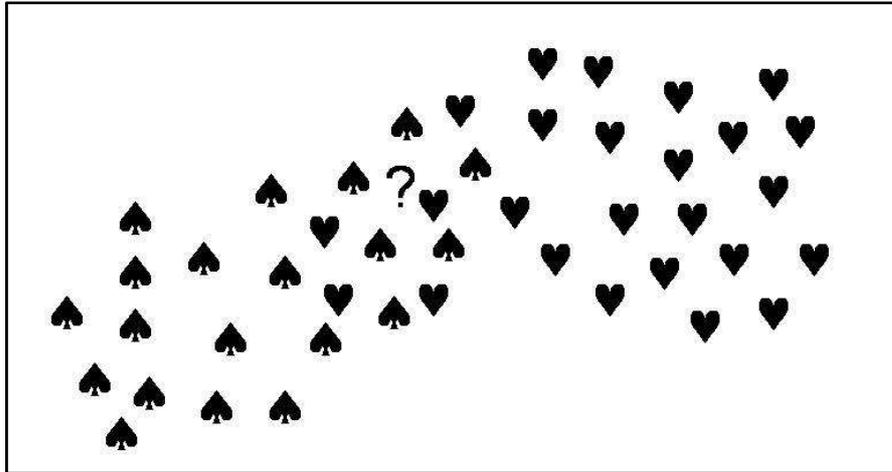


Figura 2.32 – Exemplo de um problema de classificação: vizinho mais próximo.

Maiores informações a respeito das redes neurais probabilísticas podem ser encontradas em Meola (2005). O intuito dessa dissertação foi utilizar as PNN como uma ferramenta, assim como, programas comumente utilizados em pesquisas e engenharia, tais como: Matlab, Excel, Power Point, Word, AutoCad, SolidWorks, Ansis, etc.

#### 2.4.4. Procedimento de Aplicação de uma Rede Neural

O primeiro passo para a aplicação de uma RNA é a escolha do tipo de rede que será utilizada, considerando a necessidade e o tipo de aplicação, como as redes *Perceptron*, *Adaline*, *Perceptron* multicamadas (MLP), *Self-Organizing*, *Probabilística*, etc. Após a escolha, os dados devem ser arranjados para que possam ser introduzidos na rede, caso se esteja utilizando aprendizado supervisionado, além dos dados de entrada deve-se observar os valores de saída que serão utilizados durante o aprendizado, ou seja, os objetivos (*targets*) (FAUSETT, 1993).

A partir de então, a RNA pode ser criada e nela serão escolhidos as funções de treinamento, de aprendizagem, número de camadas escondidas, número de neurônios na camada de entrada, saída e camadas escondidas. Além das funções de ativação dos neurônios.

A próxima etapa de aplicação de uma rede é o aprendizado, que pode ser supervisionado ou não.

No aprendizado supervisionado as entradas e saída da rede são fornecidas por um supervisor externo. Com isto, é possível ajustar os parâmetros da rede de maneira a encontrar uma relação entre os pares de entrada e saída que foram fornecidos, nela o

supervisor direciona o processo de treinamento fornecendo explicitamente o que é comportamento adequado ou não para a rede. Então, a rede tem sua saída corrente comparada com a saída desejada e recebendo do supervisor, informação sobre o erro desta reposta. Com o processo de comparação de padrões de entrada e 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 dos erros quadráticos de todas as saídas é normalmente utilizada como medida de desempenho da rede.

Já no aprendizado não supervisionado 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 possuir redundância, pois do contrário não haveria possibilidade de encontrar padrões ou características dos dados de entrada. Existem alguns métodos para implantação do aprendizado não supervisionado, dentre eles: Aprendizado Hebbiano, Modelo de Linsker, Regra de Oja, Regra de Yille, além do aprendizado por competição.

Assim que rede estiver treinada, deve-se proceder com a validação da rede, que nada mais é que um teste. Para tanto, parte dos dados que se tem devem ser guardados para essa fase, na prática entre 20 e 30%. Nessa etapa serão introduzidos valores conhecidos na rede e depois é verificado se a resposta está de acordo com que era esperada, ao final a rede está validada e teoricamente pode ser utilizada para quaisquer dados de entrada extraídos das condições em que a rede foi treinada.

#### 2.4.5. Redes Neurais em Usinagem

Vários autores vêm utilizando as redes neurais em processos de usinagem para detectar falhas, acompanhar a evolução do desgaste de ferramentas, avaliar o posicionamento da ferramenta, tamanho de furos, modelar processos de usinagem por abrasão, etc.

Li, Li e Ni (2003) empregaram uma rede neural probabilística no diagnóstico do estado da ferramenta no processo de rosqueamento, além de outros aspectos típicos deste processo. O sinal empregado foi a corrente extraída 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 rede que apresentou excelentes resultados, prevendo satisfatoriamente o que era desejado.

Axinte (2005) desenvolveu uma metodologia de detecção e classificação do funcionamento inadequado 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 as características mais relevantes. Em seguida, uma rede neural probabilística foi empregada para a classificação da ferramenta em duas situações diferentes de desgaste, dente bom e dente gasto. Sendo que os resultados se mostraram satisfatoriamente de acordo com o desejado.

# CAPÍTULO III

## Metodologia

Nesta sessão será apresentada a metodologia adotada para a realização deste trabalho. Os testes realizados no trabalho tem como principal objetivo o monitoramento do desgaste de flanco máximo ( $VB_{Bmáx}$ ) de ferramentas de metal duro durante o processo de fresamento de topo através de técnicas de monitoramento e aplicação de uma RNA.

A parte experimental do trabalho consistiu na usinagem de um total de 40 arestas, em que, cada ferramenta apresentou uma vida média de 27 minutos. A usinagem produzia canais na peça e cada canal correspondia a cerca de 3 minutos de usinagem. A cada canal usinado foram realizadas medições de EA, potência e desgaste. A partir dos sinais coletados foram extraídos parâmetros estatísticos e aqueles com melhores correlações foram utilizados para “alimentar” uma rede neural probabilística, que foi treinada e validada para essa condição.

### 3.1. Material do Corpo de Prova

A barra de aço utilizada neste trabalho foi produzida especialmente para pesquisas realizadas no LEPU e fornecida pela Villares *Metals* S/A. O material da barra é um aço inoxidável martensítico utilizado para a fabricação de moldes para injeção de plásticos, com especificação VP80 na condição solubilizada que pertence ao grupo dos inoxidáveis martensíticos endurecíveis por precipitação (PH). Esses tipos de aços foram desenvolvidos especialmente para a fabricação de moldes para conformação de polímeros termoplásticos e elaborados através de degaseificação a vácuo. O aço VP80 possui alta resistência à corrosão, cerca de 60% superior à dos aços inoxidáveis martensíticos normalmente aplicados em moldes de plásticos (MESQUITA; BARBOSA, 2005).

Tabela 3.1 – Composição química do aço VP80 (dados fornecidos pelo fabricante).

Material	Teor (% em peso)									Dureza
	Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Al	
VP80	Balanço	0,04	0,25	0,25	12,5	7,50	1,50	-	1,2	35 HRc

A Fig. 3.1 apresenta um esquema com as dimensões iniciais do corpo de prova. Tal corpo de prova foi utilizado durante todos os testes de vida realizados no laboratório. Além disso, são mostradas na figura as regiões em que foi posicionado o sensor de emissão acústica e a região da usinagem onde foram feitas as aquisições dos sinais de potência e emissão acústica. Essas regiões foram escolhidas de tal forma que a distância entre o sensor e o ponto de coleta do sinal era praticamente constante em todas as regiões de aquisição. O intuito era reduzir ao máximo possível a interferência no sinal da distância entre o sensor e o ponto de aquisição.

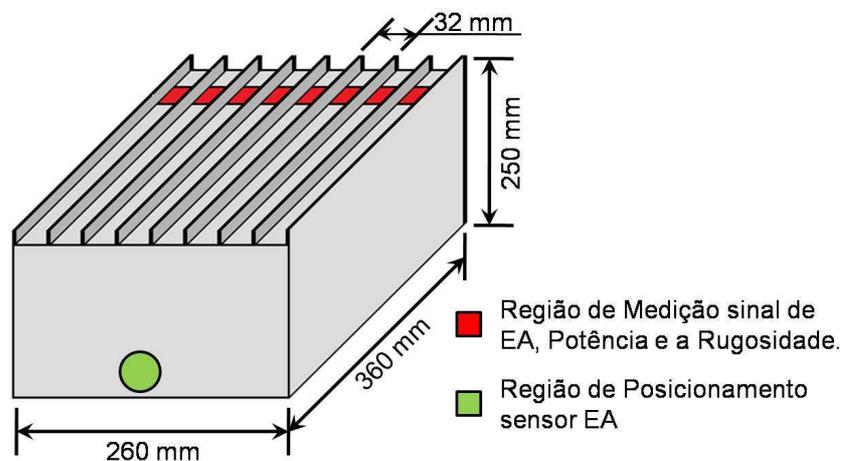


Figura 3.1 – Esquema do corpo de prova utilizado nos testes com suas dimensões iniciais, regiões de posicionamento do sensor e de medição dos sinais.

### 3.2. Condições de Corte e Especificações da Ferramenta

Durante os testes, as condições de corte foram mantidas constantes, uma vez que o objetivo era ao final, realizar o treinamento de uma rede neural artificial. Para tanto, foi necessário reunir muitos dados para que o resultado fosse satisfatório. Dessa forma, preferiu-se abrir mão da utilização de diferentes condições de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) devido a limitação de material disponível, para que a rede correspondesse ao objetivo do trabalho de, prever o fim de vida de uma ferramenta. A Tab. 3.2 apresenta as condições de corte utilizadas nos testes.

Tabela 3.2 – Condições de corte utilizada nos experimentos.

$v_c$	$a_p$	$f_z$	$a_e$
[m/min]	[mm]	[mm/dente]	[mm]
151	1,0	0,08	32

As condições de corte foram determinadas a partir da recomendação do fabricante da ferramenta, sendo que essas condições equivalem a uma condição intermediária de corte, entre desbaste e acabamento.

Fato importante a ser ressaltado é que o avanço por dente ( $f_z$ ) é igual ao avanço ( $f$ ), pois durante os testes apenas um inserto foi montado no suporte. Essa medida teve de ser tomada devido às dificuldades já mencionadas a respeito do tratamento do sinal de emissão acústica. O suporte, cuja especificação é R390-032A32-11M (SANDVIK COROMANT, 2009), possuía capacidade para três insertos (Fig. 3.2) e tomou-se o cuidado de montar os insertos sempre na mesma posição após as trocas, a fim de reduzir erros aleatórios no sistema. Além disso, a penetração de trabalho ( $a_e$ ) correspondeu ao próprio diâmetro da ferramenta, ou seja, 32 mm.

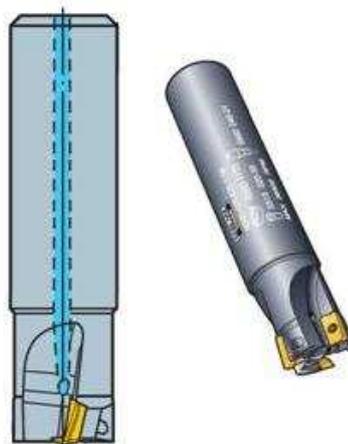


Figura 3.2 – Desenho do suporte cilíndrico utilizado durante os testes de vida das ferramentas (SANDVIK COROMANT, 2009).

Já os insertos utilizados no trabalho, de especificação R390-11 T3 10M-PH 1025, foram produzidos em metal duro e revestidos com nitreto de titânio (TiN), classe P25. Tais ferramentas são indicadas para o fresamento de aços inoxidáveis e a Fig. 3.3 apresenta um esquema das pastilhas.

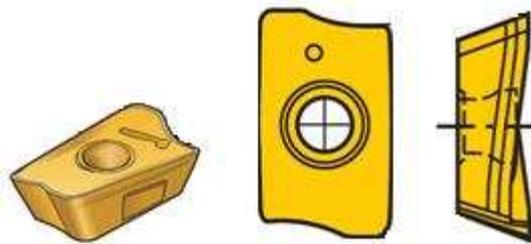


Figura 3.3 – Desenho do inserto utilizado nos testes (SANDVIK COROMANT COROMANT, 2009).

### 3.3. Máquina-Ferramenta e Metodologia dos Testes

Todos os testes foram realizados em um Centro de Usinagem Vertical CNC da linha Discovery (ROMI) com comando numérico Siemens 810 (Fig. 3.4), cujas características estão descritas na Tab. 3.5. O programa para a confecção dos canais foi desenvolvido no laboratório, especificamente para esse trabalho.



Figura 3.4 – Centro de usinagem vertical, modelo Discovery 760 (ROMI).

Tabela 3.3 – Características do centro de usinagem Discovery 760.

<b>Especificações Técnicas</b>	<b>Valores</b>	<b>Especificações Técnicas</b>	<b>Valores</b>
Faixa de velocidades	10 a 10.000 rpm	Potência total instalada	15 KVA
Avanço rápido (eixos x/y)	25.000 mm/min	Curso long. da mesa (x)	762 mm
Avanço rápido (eixo z)	20.000 mm/min	Curso trans. da mesa (y)	406 mm
Avanço de corte	1 a 5.000 mm/min	Curso vert. do cabeçote	508 mm
Pot. Do motor principal CA	9 kW/12,5 cv	Comando	Siemens 810

O procedimento experimental consistiu em efetuar o fresamento de topo de um aço inoxidável VP80, a princípio em bruto (Fig. 3.5a), no centro de usinagem ROMI Discovery 760. Foram realizados um total de 40 testes de vida, divididos em 9 passadas (sub-testes), em média, com duração de 3 minutos aproximadamente cada. Considerando o diâmetro da fresa e a dimensão longitudinal do corpo de prova, esse possuía capacidade para confecção de 8 canais em sua superfície, como mostra a Fig. 3.5b.

Nesse ponto é importante que fique claro que durante a usinagem, não necessariamente dava-se início ao teste de vida de uma ferramenta no primeiro canal e sim no canal subsequente ao último produzido pela ferramenta anterior, ou seja, aquele em que a aresta chegou ao seu fim de vida. Por exemplo, o teste de vida de uma ferramenta foi iniciado no primeiro canal e ao final ela teve capacidade para produzir nove canais (nove passadas), então o que ocorreu é que o próximo teste de vida foi realizado a partir do segundo canal do corpo de prova.

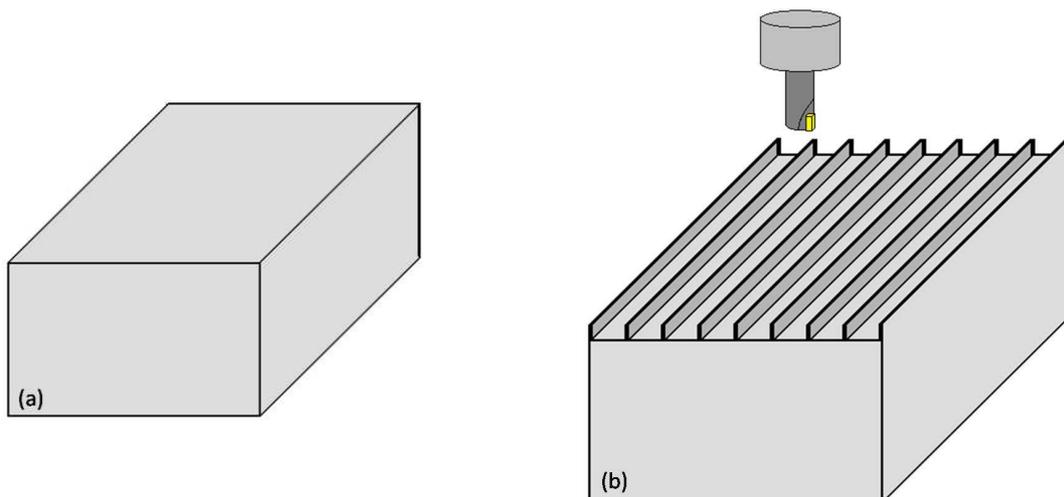


Figura 3.5 – Esquemas do corpo de prova em bruto (a) e após usinagem (b).

Dois cuidados foram tomados antes da realização dos testes. O primeiro foi o faceamento da superfície em que o sensor de EA seria acoplado (Fig. 3.6b), essa medida foi tomada para melhorar a transmissão do sinal entre a peça e o sensor, devido à péssima qualidade superficial da peça antes do faceamento (Fig. 3.6a). Além disso, utilizou-se vaselina como fluido acoplante entre o sensor e a peça, pois isso melhora a transmissão de sinal entre duas interfaces e assim.

O segundo cuidado foi o de realizar o faceamento da superfície em que os canais estavam sendo produzidos ao atingirem 4,0 mm de altura durante os testes, o intuito era

reduzir a interferência dos canais no processo de corte, já que foram evidenciados problemas, tais como rebarbas, durante pré-testes realizados no material a partir da altura escolhida como máxima para as paredes dos canais. Para tanto, foi utilizada uma fresa frontal com diâmetro de 125 mm e especificação R245 125Q40-12M, do fabricante *Sandvik Coromant*. Essa fresa foi montada com oito insertos de metal duro (R245-12 T3 M-PM 4030), classe P30, com arestas alisadoras e revestidas com nitreto de titânio (TiN).

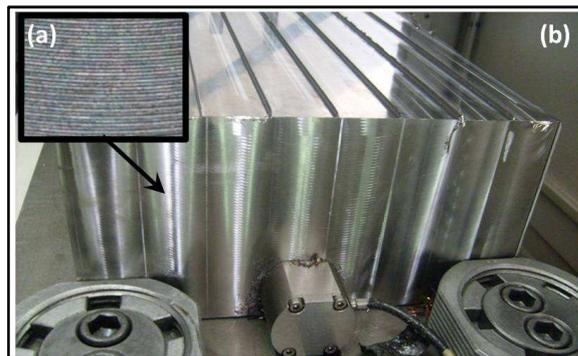


Figura 3.6 – Detalhe da superfície de acoplamento do sensor de EA antes da usinagem (a). Imagem da superfície usinada para o posicionamento do sensor e os canais formados (b).

Resumidamente, os testes foram divididos em sub-testes com tempo de 3 minutos aproximadamente e cada um desses sub-testes dava origem a um canal na superfície do corpo de prova. A cada canal formado eram adquiridos o sinal de potência e EA em local predeterminado, como apresentado na Fig. 3.1. Além disso, o desgaste de flanco máximo era medido ao final da usinagem de cada canal, quando a máquina ficava em modo de espera para a medição, procedimento previsto pelo programa inserido na máquina para os testes.

#### 3.4. Aquisição do Sinal de EA

Durante os testes foi adquirido o sinal bruto de emissão acústica. A aquisição foi realizada a partir de um sensor piezoelétrico conectado à peça e um condicionador de sinais DM 42 (com quatro canais de entrada; um canal de saída que fornece sinal RMS e outro canal de saída que fornece o sinal bruto). Estes equipamentos foram fabricados pela Sensis. O sinal adquirido era enviado para uma placa de aquisições NI USB-6251 (*National Instruments*) que possui número de amostras por segundo, em 16 bits, de 1,25 MHz e 2,86 MHz para a entrada e saída, respectivamente.

O sensor de emissão acústica possui um núcleo composto por dois cristais piezoelétricos. A frequência de ressonância de cada cristal individualmente é de 1,0 MHz. Os sinais dos cristais são adquiridos de forma diferencial, a fim de eliminar ruídos. Dessa forma, este sensor fornece um sinal de baixa impedância e grande sensibilidade para o monitoramento. Para o presente trabalho foi utilizada uma faixa de frequências entre 50 kHz e 500 kHz, em que o mínimo corresponde ao filtro passa-alta utilizado. Considerando que a taxa de aquisição deve ser pelo menos o dobro da taxa de aquisição que representará o sinal de forma correta, a frequência de aquisição foi de 1,0 MHz.

A alta taxa de aquisição do sinal de EA implicou na necessidade de se reduzir o tempo de aquisição, pois tempos maiores implicam em demasiado esforço computacional muito grande, além de um tempo muito maior para o tratamento dos dados. Assim, o tempo de aquisição foi limitado à apenas dois segundos, por si só responsável pela geração de dois milhões de pontos.

O sinal adquirido então era enviado a um computador e através do *software LabVIEW Express 3.0* (Fig. 3.7) os dados eram armazenados para o tratamento dos dados em etapa futura.

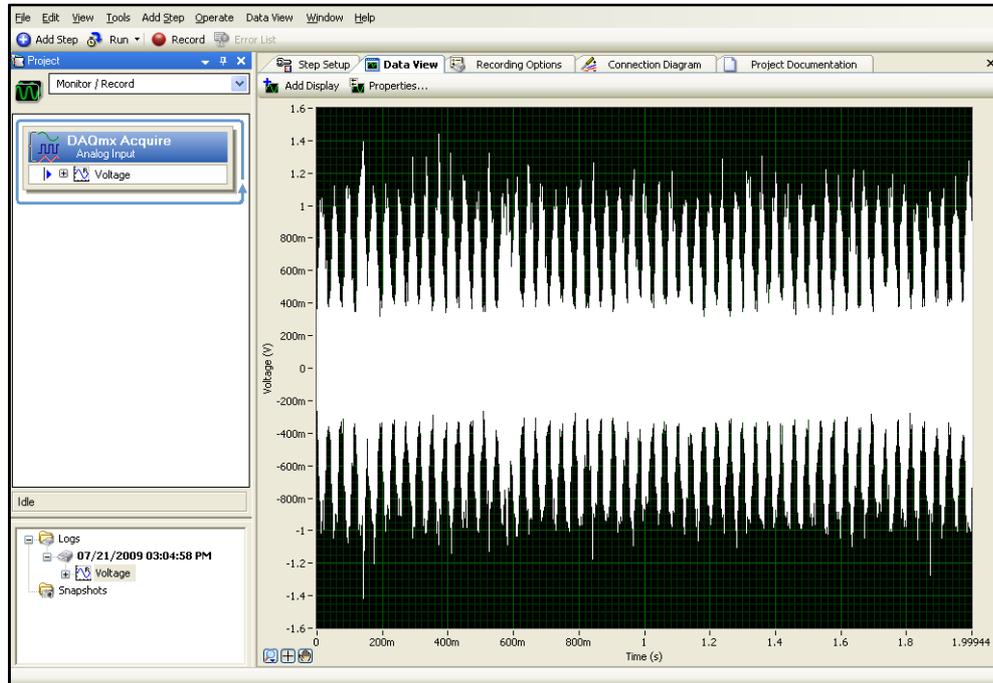


Figura 3.7 – Tela do *software LabVIEW Express 3.0* utilizado para aquisição dos dados, mostrando o sinal de EA durante 2 segundos de aquisição.

A Fig. 3.8 apresenta um esquema de montagem dos equipamentos para aquisição do sinal de EA, além de imagens do sensor de EA acoplado à peça, condicionador de sinais, placa de aquisição USB, computador.

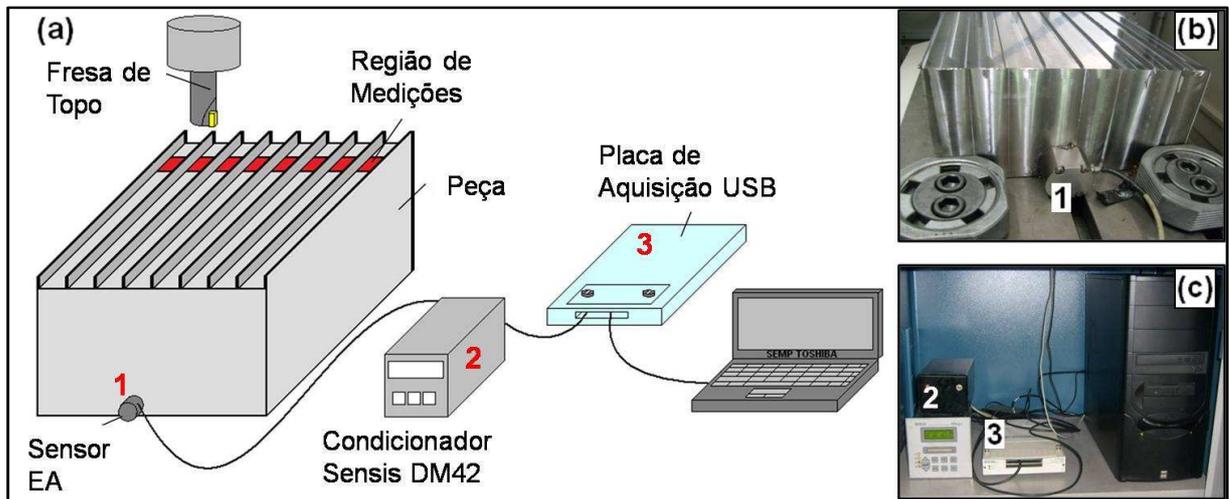


Figura 3.8 – Esquema do sistema de aquisição de EA utilizado no trabalho (a). Detalhe da peça com o sensor [1] acoplado (b). Imagem do condicionador de sinais [2], placa de aquisição [3] e computador (c).

Os dados coletados foram inseridos no *software* MatLab® e por meio de programas desenvolvidos especialmente para o trabalho extraíram parâmetros do sinal como: curtose, *skewness* (coeficiente de simetria), média, desvio padrão, variância, pico, RMS e crista.

O primeiro passo após a coleta de dados foi determinar qual ou quais desses parâmetros possuíam relação com o desgaste de flanco máximo ( $VB_{Bmáx}$ ) da ferramenta, através da análise dos sinais. Além disso, foi feita a análise dos espectros de potência gerados do sinal, para ferramentas novas e usadas (desgastadas). Foi feita a tentativa também de fixar uma banda de frequência em que há uma diferença significativa entre o espectro de uma ferramenta nova e uma “gasta” e então extraídos os mesmos parâmetros nessa banda de frequência avaliando-se a relação com o desgaste. Finalmente, após a identificação dos parâmetros que apresentaram correlação melhor com o desgaste, eles foram utilizados como valores de entrada em uma RNA, juntamente com aqueles extraídos do sinal de potência.

### 3.5. Aquisição do Sinal de Potência Efetiva de Corte

O sinal de potência efetiva de corte adquirido durante os testes de vida está relacionado à corrente elétrica consumida pelo motor principal da máquina, já mencionado anteriormente como uma das formas de se medir a potência consumida durante o corte.

A aquisição do sinal foi realizada durante a usinagem de todos os canais (simultaneamente à aquisição do sinal de EA), do início ao fim de vida das ferramentas por meio de um sensor de corrente e outro de tensão. O sensor de corrente tem seu princípio de funcionamento baseado no efeito Hall realimentado, que pode ser usado para medir corrente contínua e alternada com isolamento galvânica e sinal de saída em corrente (alta imunidade ao ruído modelo SECOHR 50 BCI S2). Já o sensor de tensão foi desenvolvido no próprio LEPU, cuja faixa de tensão é de -500 a +500 V, e sinal de saída de -12 a +12V. O sinal adquirido pelo sensor é enviado a uma placa de aquisição e conversão de sinais modelo NI-DAQ PCI-6035E da *National Instruments*, que determina o valor da potência efetiva de corte através da relação feita entre a potência tomada com o eixo de rotação da máquina em vazio e a potência medida durante o corte (Fig. 3.9). A interface entre o usuário e a aquisição do sinal foi estabelecida por meio do *software* LabVIEW 8.5 e, a partir dele, os dados foram então coletados e armazenados. Durante os testes foi utilizada uma taxa de aquisição de 2000 Hz e um tempo de aquisição de 15 segundos, tais valores foram escolhidos para se evitar problemas com o computador que fazia a aquisição, devido a sua baixa capacidade de processamento de dados.

O tratamento dos dados pode ser feito no próprio Excel, sendo escolhido, ao final, o parâmetro que apresentou melhor correlação com o desgaste da ferramenta para serem introduzido em uma RNA.

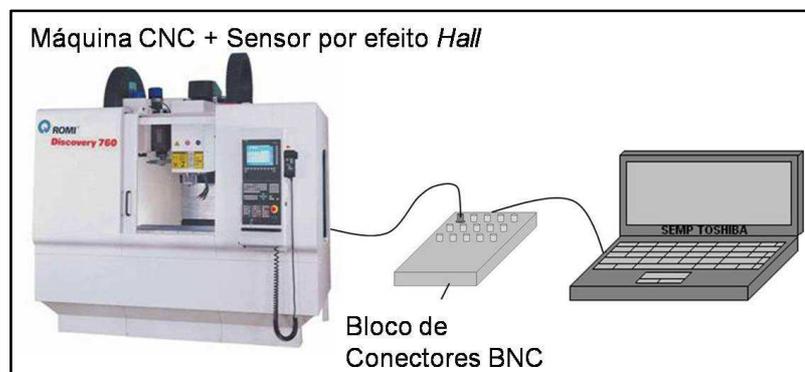


Figura 3.9 – Esquema da montagem experimental para aquisição do sinal de potência no fresamento de topo.

### 3.6. Medição do Desgaste das Ferramentas

O fim de vida das ferramentas baseou-se em critérios estabelecidos pela norma ISO 8688-2 (1993), que refere-se ao desgaste de ferramentas de corte utilizadas no fresamento de topo. De acordo com essa norma, o valor do desgaste de flanco máximo ( $VB_{Bmáx}$ ) não deve ultrapassar 0,4 mm, ou seja, atingindo esse valor poderá ser decretado o fim de vida da ferramenta.

As medições de desgaste foram realizadas em um estéreo microscópio com câmera digital integrada da marca Olympus, modelo SZ61 (Fig. 3.10). Esse microscópio possui uma faixa de aumento entre 6,7x e 45x (aumento utilizado), valores suficientes quando o objetivo é a medição do desgaste das ferramentas. Além disso, ele possui ângulo de convergência de 10° e possibilidade de inclinação de 45° ou 60°.

A câmera digital integrada é ligada a um computador com o *software* analisador de imagens Image-Pro® Express 5.1.0.12, responsável pela captação, medição do desgaste e armazenamento da imagem selecionada. Ao se utilizar esse conjunto de equipamentos, deve-se tomar cuidado com a calibração das medidas, assim o ideal é, como nesse caso em específico, efetuar a calibração do aparelho.

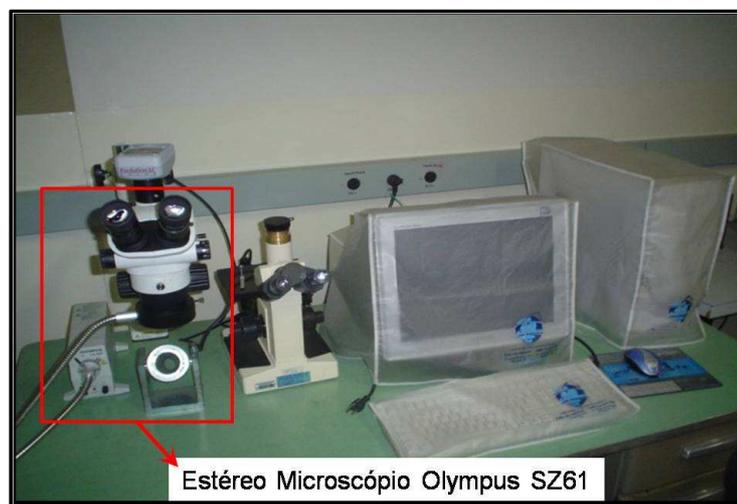


Figura 3.10 – Equipamento para aquisição e medição de desgaste utilizado no trabalho, em destaque o estéreo microscópio Olympus SZ61.

Por fim, foram selecionadas três etapas de desgaste para as ferramentas tornando o estudo do sinal de EA menos complexo. O critério utilizado foi o tempo, por exemplo, uma ferramenta que alcançou uma vida de 36 minutos de usinagem será considerada nova nos

primeiros minutos de usinagem (3 minutos), média quando estiver na metade de sua vida (18 minutos) e gasta no fim de vida (36 minutos).

### 3.7. Aplicação da Rede Neural Artificial

Após a análise de todos os dados e selecionados aqueles que apresentaram melhor correlação com o desgaste de ferramentas, a etapa seguinte foi a aplicação desses dados em uma rede neural artificial probabilística (PNN).

Nesse caso a rede neural foi utilizada como uma ferramenta em usinagem, assim como, outros programas, por exemplo, Matlab e Excel. Para tanto, foi aplicada a PNN utilizada por Meola (2005) em sua dissertação de mestrado. O algoritmo da rede neural foi criado através do programa C++ e está disponível na literatura (MASTERS, 1995).

Os dados de entrada inseridos na RNA foram divididos em duas classes, os dados bons e os dados ruins. Os dados bons foram aqueles em que a ferramenta foi considerada “boa”, ou seja, não havia atingido o seu fim de vida. Já os dados ruins, são aqueles correspondentes às ferramentas desgastadas (“ruim”). Sendo assim, tinha-se em mãos um número maior de dados bons, do que ruins, como mostra o exemplo da Tab. 3.4.

Tab. 3.4 – Classe boa e ruim para o teste 27.

<b>Tempo de Usinagem [min]</b>	<b><math>VB_{Bmáx}</math> [mm]</b>	<b>Classe</b>
3	0,05	Boa
6	0,09	Boa
9	0,13	Boa
12	0,15	Boa
15	0,17	Boa
18	0,19	Boa
21	0,20	Boa
24	0,25	Boa
27 (fim de vida)	0,50	Ruim

A Tab. 3.4 mostra que todas as medições de desgaste realizadas e que estão dentro da faixa aceitável, 0 – 0,40 mm de desgaste de flanco máximo (de acordo com a norma ISO 8688-2 (1993)), são classificadas como boas. Já a medição que está fora dessa faixa é classificada como ruim.

O processo de classificação foi repetido para as 40 arestas testadas. Ao final, para o treinamento da rede neural os sub-testes classificados como “boa” receberam a numeração 1,0 e os “ruins” o valor 0,0 como seu correspondente. Tal nomeação foi utilizada posteriormente durante o treinamento da rede neural.

Após a classificação e a nomeação dos dados para a introdução na rede, os valores foram divididos aleatoriamente, em que 80% foram utilizados para o treinamento e os outros 20 % para a validação da PNN, tanto para a classificação “boa”, quanto para a “ruim”.

A PNN foi treinada com três dados de entrada normalizados. A normalização foi realizada considerando a ferramenta nova como sendo a “ferramenta padrão” e todos os outros estados de desgaste foram normalizados a partir dessa ferramenta.

Após os dados normalizados, eles foram introduzidos na rede de diversas formas, a fim de avaliar o comportamento dos resultados apresentados pela RNA. Maiores detalhes serão dados no capítulo de resultados e discussões.

A Fig. 3.11 apresenta um fluxograma resumindo a metodologia proposta para a realização do trabalho, desde os testes de vida até a aplicação da RNA.

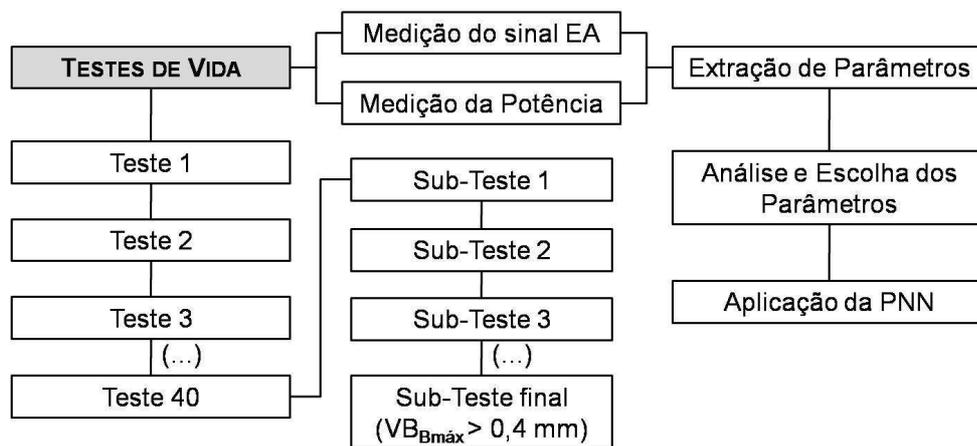


Figura 3.11 – Fluxograma com todas as etapas realizadas no trabalho.

# CAPÍTULO IV

## Resultados e Discussões

Nesse capítulo serão apresentados os resultados referentes ao trabalho realizado. Nesse caso, optou-se dividi-los em quatro tópicos: resultados de desgaste, potência efetiva de corte, sinal de emissão acústica, e por fim, a aplicação da rede neural artificial (RNA).

### 4.1. Resultados de Desgaste de Flanco Máximo ( $VB_{Bmáx}$ )

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam o comportamento típico do desgaste das ferramentas de corte utilizadas no trabalho em função do tempo de usinagem para duas arestas diferentes. Deve ser ressaltado que o desgaste foi monitorado e avaliado nas quarenta arestas que passaram por testes de vida, seguindo a norma ISO 8688-2 (1993) e que o critério de fim de vida foi 0,4 mm de desgaste de flanco máximo.

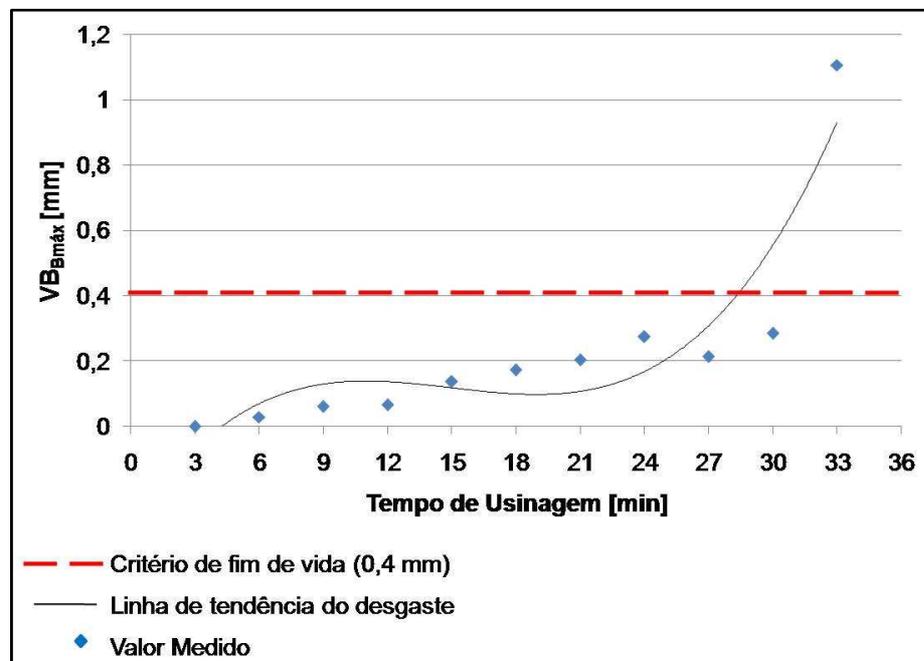


Figura 4.1 – Desgaste de flanco máximo ( $VB_{Bmáx}$ ) em função do tempo de usinagem para o teste 23.

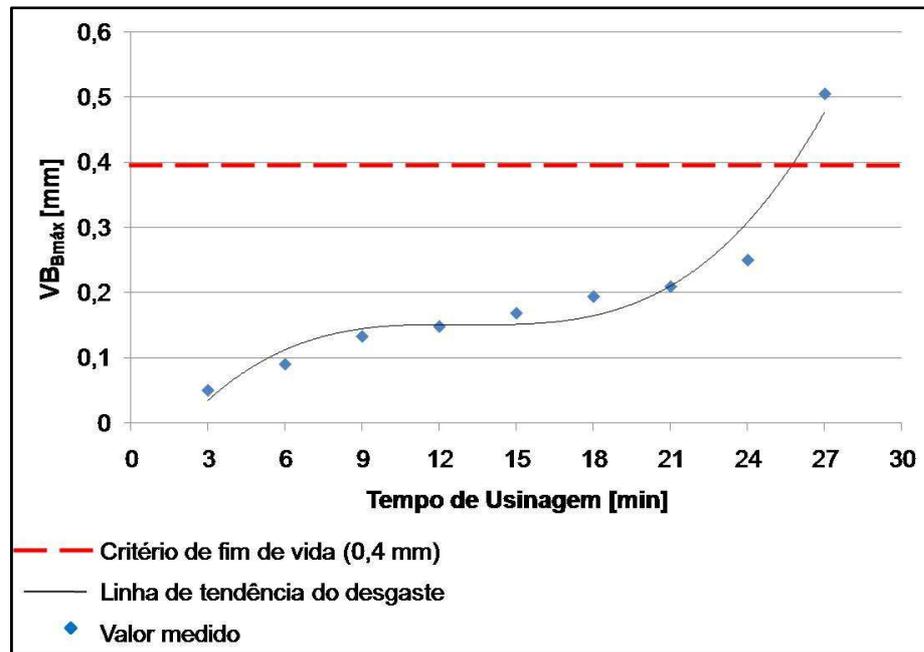


Figura 4.2 – Desgaste de flanco máximo ( $VB_{Bmáx}$ ) em função do tempo de usinagem para o teste 27.

As Figuras 4.1 e 4.2 mostram claramente, através da análise das curvas de tendência e dos valores medidos, que o comportamento do desgaste dos insertos utilizados no trabalho estão de acordo com a literatura sobre o assunto, tema abordado no capítulo de Revisão Bibliográfica. No início do corte, aparentemente, há uma alta taxa de desgaste, logo depois uma taxa aproximadamente constante e que por fim, volta a aumentar. Em todas as ferramentas avaliadas há uma diferença muito grande entre o desgaste medido na penúltima passada, estando esta dentro da faixa de desgaste aceitável pela norma (ISO 8688-2), e a medição em que foi afirmado o fim de vida da ferramenta, como mostra a Fig. 4.3. Além disso, é importante ressaltar que a diferença entre os níveis de desgaste, medidos a cada 3 minutos de usinagem, são muito pequenas até que o fim de vida da ferramenta seja atingido. Dessa forma, é esperado que não haja grandes variações no comportamento do sinal de emissão acústica de um teste para outro, a não ser no fim de vida da ferramenta, como será discutido posteriormente.

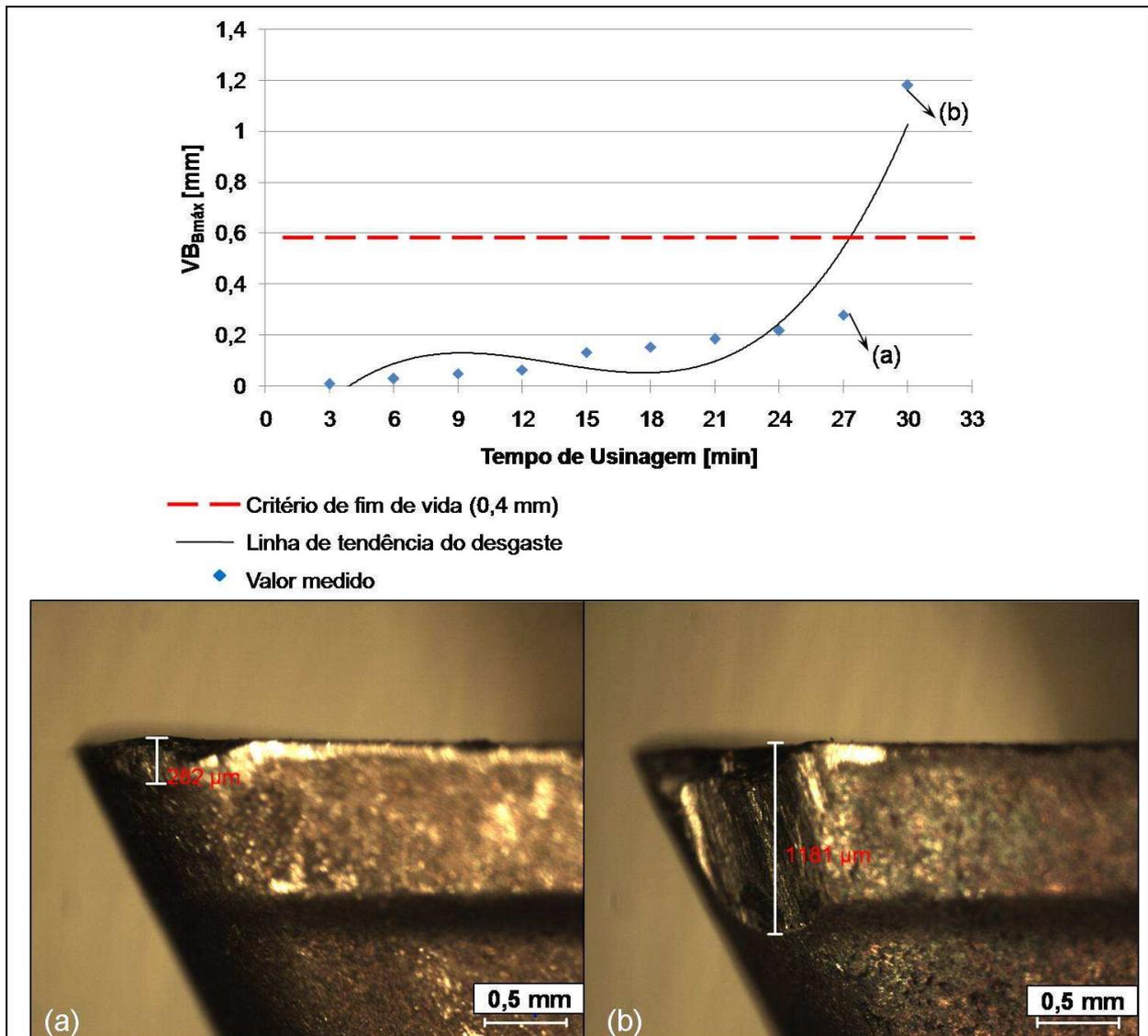


Figura 4.3 – Desgaste de flanco máximo ( $VB_{Bmáx}$ ) em função do tempo de usinagem para o teste 35, destacando os pontos (a) e (b) de desgaste da ferramenta através de imagens das medições.

Para o caso específico mostrado na Fig. 4.3 o desgaste aumenta de 0,28 mm (Fig. 4.3a) para aproximadamente 1,2 mm (Fig. 4.3b), ou seja, um aumento no valor de desgaste de cerca de quatro vezes. Normalmente esse aumento de desgaste estava acompanhado de um aumento significativo de trepidações da máquina ferramenta, além de aumento de temperatura na ferramenta evidenciado por cavacos rubros que eram formados e muitas vezes a formação de rebarba na peça. Além disso, foi observado um fenômeno interessante que só ocorria com a ferramenta gasta, a formação de cavaco secundário (Fig. 4.4). Assim,

mesmo sem efetuar a medição do desgaste, pela experiência adquirida durante estes testes seria possível estimar que a ferramenta já se encontrava em seu fim de vida.

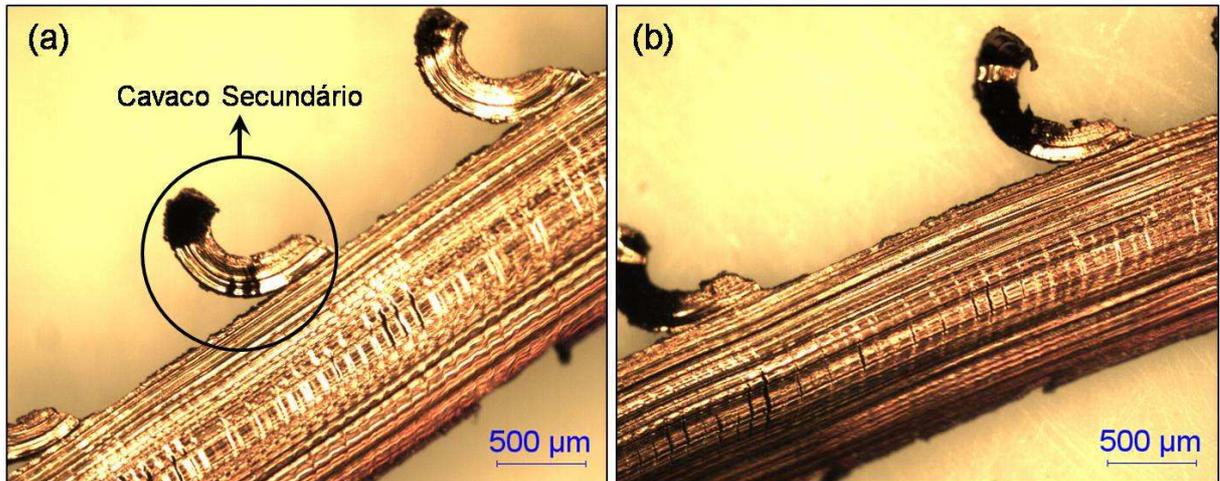


Figura 4.4 – Imagens de cavacos com formação de cavaco secundário no fim de vida de ferramentas, em específico para o teste 16 (a) e 38 (b).

O cavaco secundário formado no fim de vida da ferramenta (Fig. 4.4), muito provavelmente, tem a ver com a redução da capacidade de corte da aresta principal. Dessa forma, ao invés de ser cisalhado, o material acaba sendo esmagado gerando, muitas vezes, rebarbas na peça e também o cavaco secundário após o corte. Contudo, afirmar com certeza se essa era a razão verdadeira para a ocorrência desse fenômeno depende de estudos detalhados sobre o assunto, fica então a evidência do fim de vida da ferramenta e a formação de cavaco secundário para o caso estudado.

#### 4.2. Resultados Extraídos da Potência Efetiva de Corte

A Fig. 4.5 apresenta uma das curvas de potência efetiva de corte média em função do tempo de usinagem obtida durante os testes realizados em laboratório, no caso específico para o teste de vida 3. Os dados apresentados na Fig. 4.5 e também na Fig. 4.6 foram extraídos do sinal de potência coletado durante os testes, passaram por uma análise estatística e mostram que há correlação entre o aumento do desgaste (nesse caso, apresentado em função do tempo de usinagem) e a elevação no consumo de potência pela máquina ferramenta.

Existem dois efeitos possíveis sobre a potência de corte durante a usinagem. O primeiro efeito diz respeito à diminuição da resistência do material, isso pode ter ocorrido,

pois durante a usinagem há um aumento da temperatura da peça e, conseqüentemente, uma tendência de amolecimento do material. Na prática esse fenômeno facilitaria o corte e reduziria a potência consumida pela máquina ferramenta.

O outro fenômeno que pode ter ocorrido é o aumento da área de contato entre as superfícies devido ao desgaste, isso faz com que o atrito se eleve e, por conseguinte, as forças e a potência necessária para que haja o corte efetivo serão aumentadas. Sendo assim, o efeito do aumento de área, devido ao desgaste de flanco máximo, parece prevalecer sobre a redução da resistência do material usinado devido ao aumento de temperatura e, portanto, há um acréscimo nos valores da potência de corte consumida durante a usinagem.

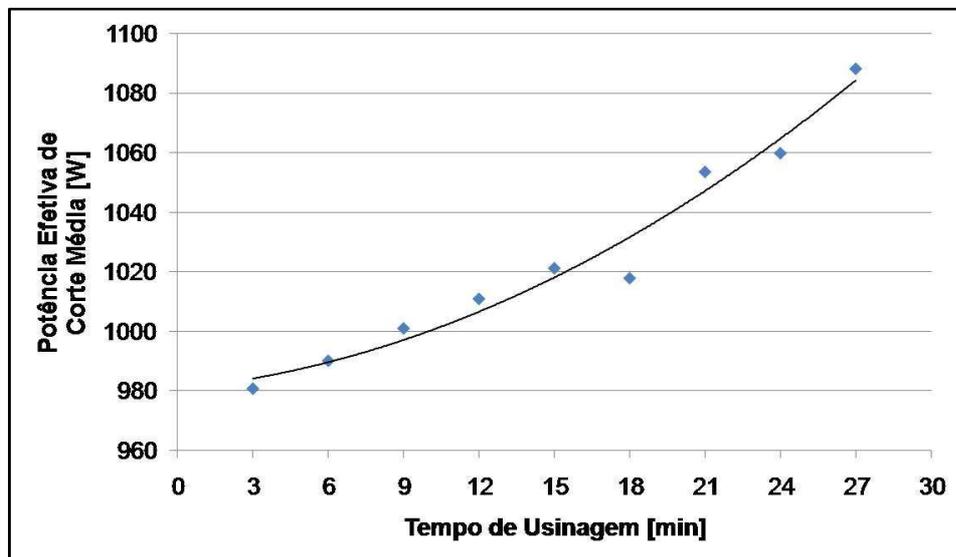


Figura 4.5 – Potência efetiva de corte média em função do tempo de usinagem para o teste 3.

A Fig. 4.6 apresenta outro exemplo do efeito do aumento do desgaste sobre a potência, entretanto, para outro teste de vida. Da mesma forma como aconteceu com o teste 3 o teste 33 apresentou um aumento considerável nos valores de potência efetiva de corte média a medida que o tempo de usinagem vai aumentando e, por conseqüência o desgaste. Para os dois casos citados, por meio da Fig. 4.5 e Fig. 4.6, há um diferença de consumo de potência de aproximadamente 11%, quando se compara a ferramenta gasta e ferramenta nova.

A curva de tendência fornece uma indicação do comportamento da potência ao longo da vida da ferramenta, apresentando uma tendência de acréscimo em seus valores à

medida que o tempo de usinagem vai aumentando, muito provavelmente devido a alguma das hipóteses já citadas nessa sessão ou ainda devido a ambas. Deve ser ressaltado que resultados semelhantes foram encontrados em 100% dos 40 testes realizados.

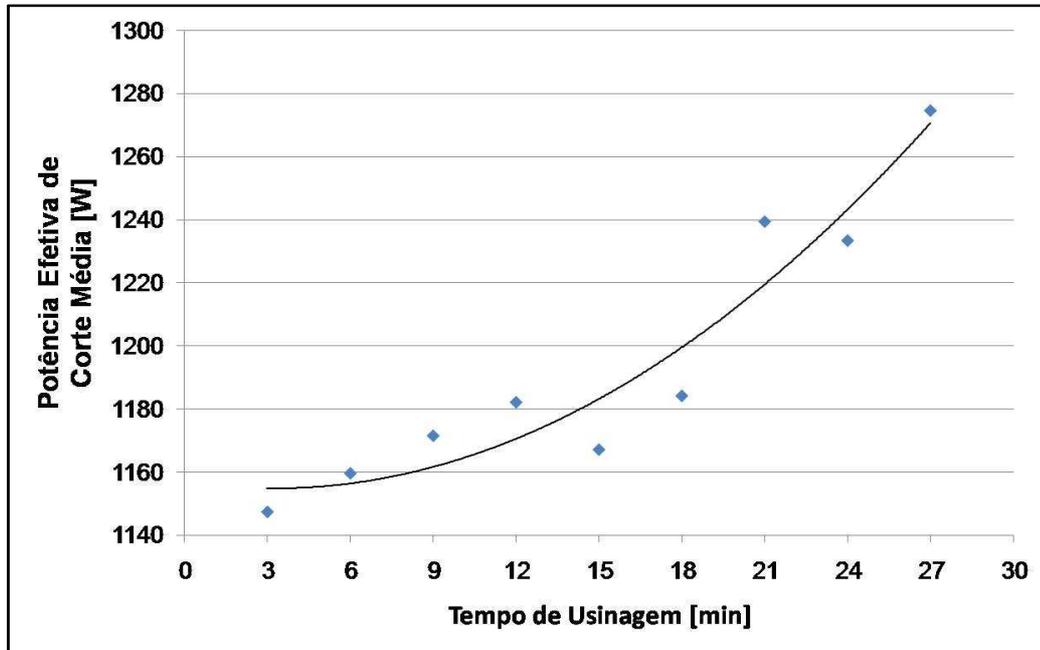


Figura 4.6 – Potência efetiva de corte média em função do tempo de usinagem para o teste 33.

A Fig. 4.7 utiliza o teste 7, como exemplo, para evidenciar o aumento significativo dos valores de potência, quando se compara os estados de desgaste de uma ferramenta, nesse caso nova e desgastada. Na maioria dos testes realizados houve uma diferença superior a 10% entre esses dois níveis de desgaste. As duas curvas da Fig. 4.7 são mais uma evidência que a diferença de consumo é considerável e que a correlação entre potência e desgaste é significativa.

A elaboração das curvas consistiu em, a partir dos valores de potência adquiridos durante a usinagem em um tempo de 15 segundos, elaborar uma curva de tendência para cada um dos níveis de desgaste. Nesse caso, tentando avaliar o comportamento da potência nos estados extremos de consumo da ferramenta.

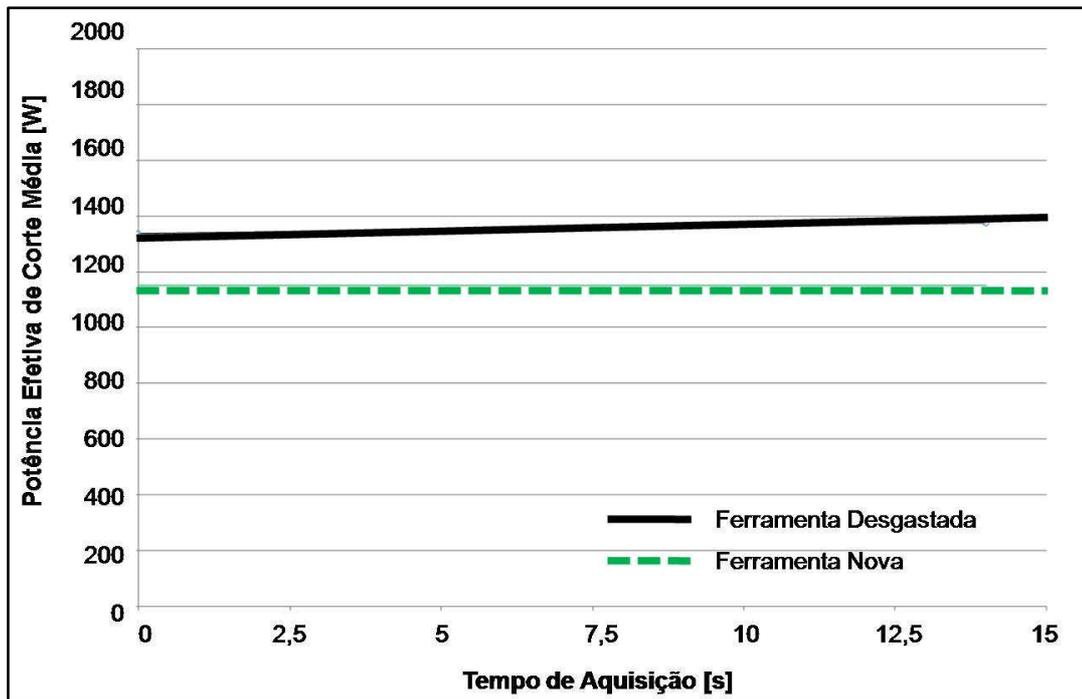


Figura 4.7 – Potência efetiva de corte média em função do tempo de aquisição durante o teste 7.

Na Fig. 4.8 é apresentada a potência efetiva média normalizada de todos os testes em função do tempo de usinagem. O gráfico da Fig. 4.8 foi produzido a partir dos valores médios de potência a cada sub-teste (passada) em todos os testes de vida realizados, desde o primeiro até o de número 40. A normalização seguiu o princípio de que a ferramenta nova seria a ferramenta padrão ou a ferramenta ideal, considerando o fato que não possui desgaste algum, então todos os outros valores foram calculados dividindo o respectivo valor de potência pelo valor de potência da ferramenta nova. Devido a esse fato, o desvio padrão para a ferramenta com três minutos de usinagem vale zero, pois todos os seus valores são iguais a um.

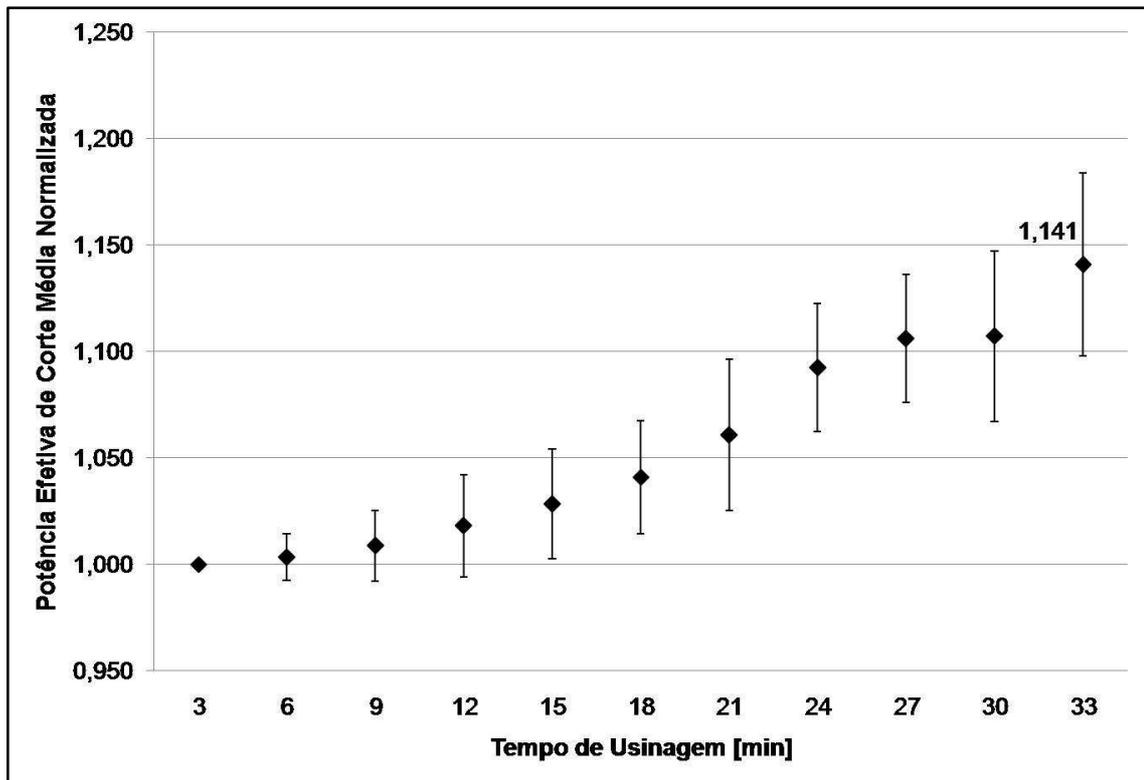


Figura 4.8 – Potência efetiva de corte média normalizada de todos os testes em função do tempo de usinagem.

O comportamento dos pontos evidencia, mais uma vez e de forma diferente, que mesmo considerando as barras de desvio padrão presentes na Fig. 4.8 é possível perceber que há um aumento significativo dos valores de potência efetiva de corte e que em média chega a cerca de 15%. Assim, um pode-se acreditar que um sistema de monitoramento pode captar essa alteração de forma simples e com poucas dificuldades em relação à sensibilidade.

#### 4.3. Resultados Extraídos do Sinal de Emissão Acústica (EA)

A Fig. 4.9 mostra parte do sinal de emissão acústica coletado durante o teste 32, com a ferramenta no estado de desgaste nova. A figura é utilizada para indicar a diferença do sinal de EA nas fases ativa e inativa de corte. A fase ativa é caracterizada por uma maior energia do sinal e, por conseguinte, maior amplitude. Já durante a fase inativa o sinal gerado tem menor energia, devido ao fato de a ferramenta apenas tocar a superfície através de sua aresta alisadora.

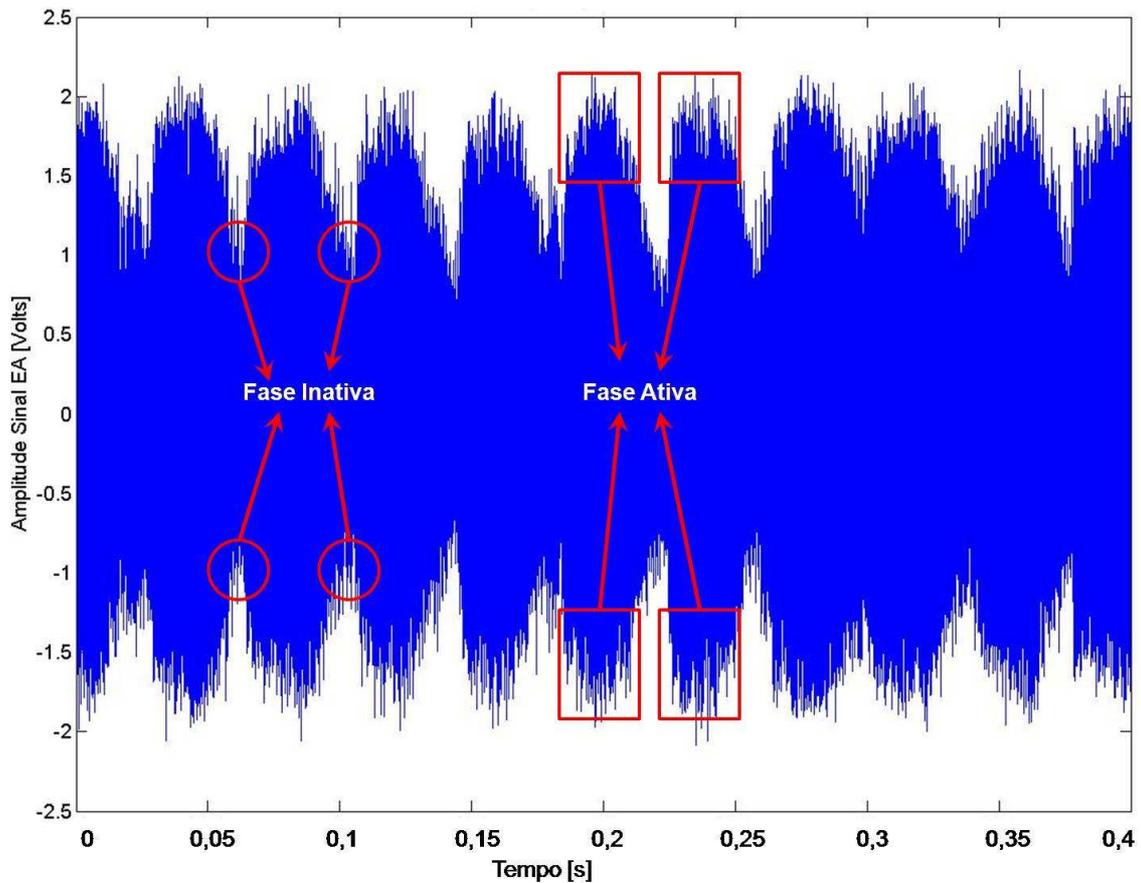


Figura 4.9 – Sinal de EA coletado no teste 32 (ferramenta nova), durante um período de 0,4 segundos, evidenciando o comportamento do sinal na fase ativa e inativa.

As Fig. 4.10 e 4.11 mostram o sinal de EA coletado de uma mesma ferramenta em seu estado nova e gasta, respectivamente. Nas figuras é possível perceber que a amplitude máxima do sinal, na fase ativa, é praticamente a mesma tanto para a ferramenta nova, quanto para ela em um estado de desgaste já elevado. Além disso, nota-se que em ferramentas novas, comportamento repetido para todos os testes, o sinal é bem homogêneo na fase inativa durante todo período de aquisição, ou seja, a amplitude do sinal é praticamente constante ao longo de toda aquisição. Em contrapartida, isso não ocorre para ferramentas desgastadas, muito provavelmente devido aos fenômenos tribológicos que envolvidos durante a usinagem, em que o sinal muda de comportamento e a amplitude do sinal na fase inativa não é constante ao longo da aquisição. Dessa forma, o próprio mapa de emissão acústica, gerado durante o processo, poderia ser utilizado como uma ferramenta para se avaliar o desgaste. Para tanto, poderia se buscar padrões de imagens para os tipos de desgaste.

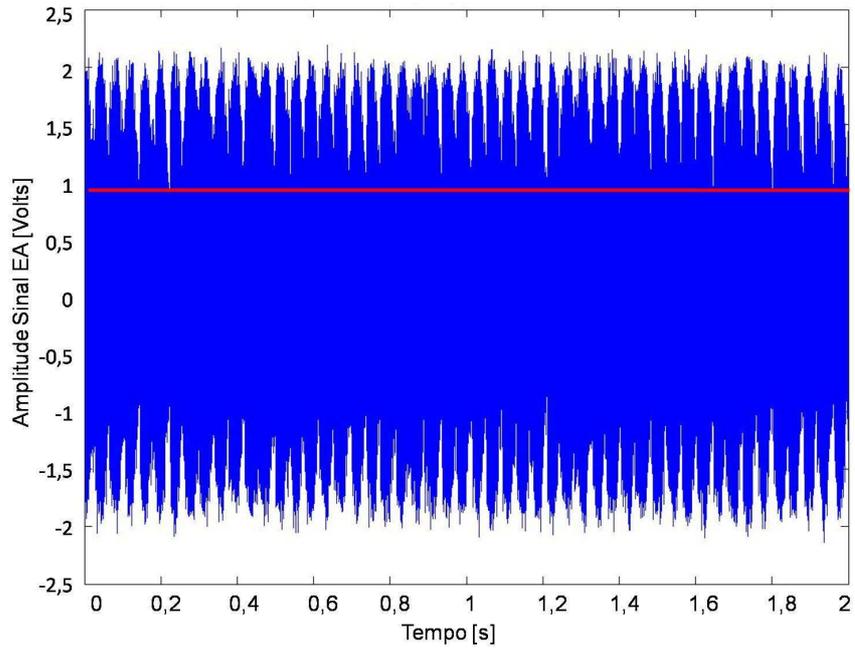


Figura 4.10 – Sinal de EA coletado a partir de uma ferramenta nova durante dois segundos, com a linha mostrando a amplitude do sinal na fase inativa de corte (Teste 32).

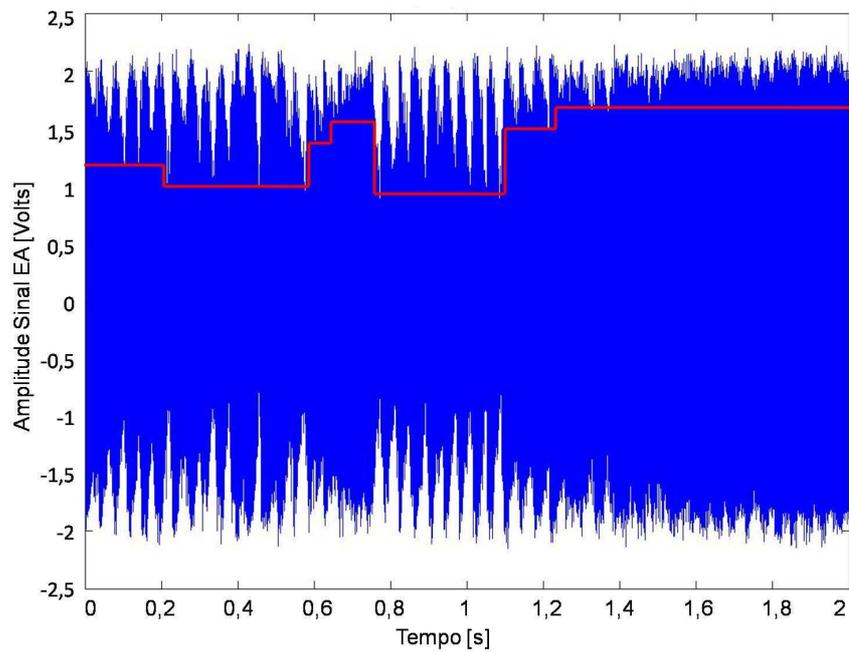


Figura 4.11 – Sinal de EA coletado a partir de uma ferramenta gasta durante dois segundos, com a linha mostrando a amplitude do sinal na fase inativa de corte (Teste 32).

Os sinais de EA coletados durante os testes passaram por duas etapas de análise. Na primeira etapa procurou-se estudar o comportamento do sinal na banda de frequência entre 50 kHz e 500 kHz, respeitando o limite mínimo aceitável para uma taxa de aquisição do sinal de 1,0 MHz. Desse sinal foram extraídos oito parâmetros (curtose, *skewness*, média, desvio padrão, variância, pico do sinal, RMS e fator de crista), todos foram analisados para as 40 ferramentas testadas e chegou-se a conclusão de que apenas o *skewness* (coeficiente de simetria) tem correlação significativa com o desgaste (Fig. 4.12), respeitando algumas condições que serão detalhadas em breve. Foi verificado que em mais de 90% das arestas esse parâmetro teve foi sensível ao aumento do desgaste. A segunda parte da análise consistiu na escolha de uma banda de frequência em que a energia do sinal fosse mais alta e que os espectros de potência do sinal apresentassem diferenças para diversos níveis de desgaste, assim eliminando as frequências que muito provavelmente não teriam grande influência nos resultados e aí foi introduzido um novo parâmetro, que também será detalhado posteriormente.

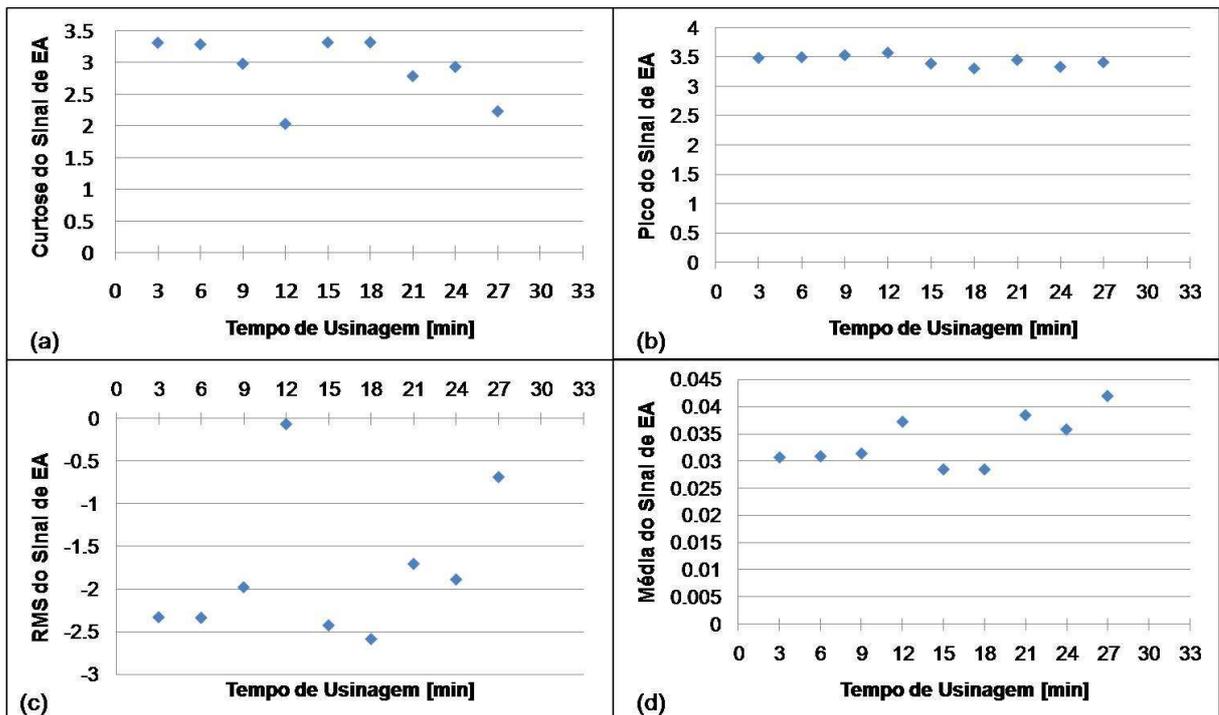


Figura 4.12 – Exemplos de parâmetros utilizados durante o estudo e que não se mostraram significativos ao serem relacionados ao desgaste, no caso específico o teste 36. (a) Curtose; (b) Pico do sinal de EA; (c) RMS do sinal de EA; (d) Média do sinal de EA.

A Fig. 4.12 mostra quatro exemplos de parâmetros calculados a partir do sinal de EA e que não se mostraram adequados na relação com o desgaste da ferramenta, deve ser ressaltado que os valores de RMS negativos são devidos apenas à forma de cálculo, que ao final utilizou o logaritmo para melhor diferenciar os valores. Ao contrário do *skewness*, que apresentou bons resultados. Esse parâmetro é definido como sendo o terceiro momento central da função densidade probabilidade (GADELAMAWLA et al., 2002) e mede a simetria do perfil em torno da linha média. Isso quer dizer que valores positivos representam a predominância de picos e negativos a de vales. A Fig. 4.13 resume os resultados da correlação entre esse parâmetro e o desgaste da ferramenta, cada caso será explicado em detalhes posteriormente.

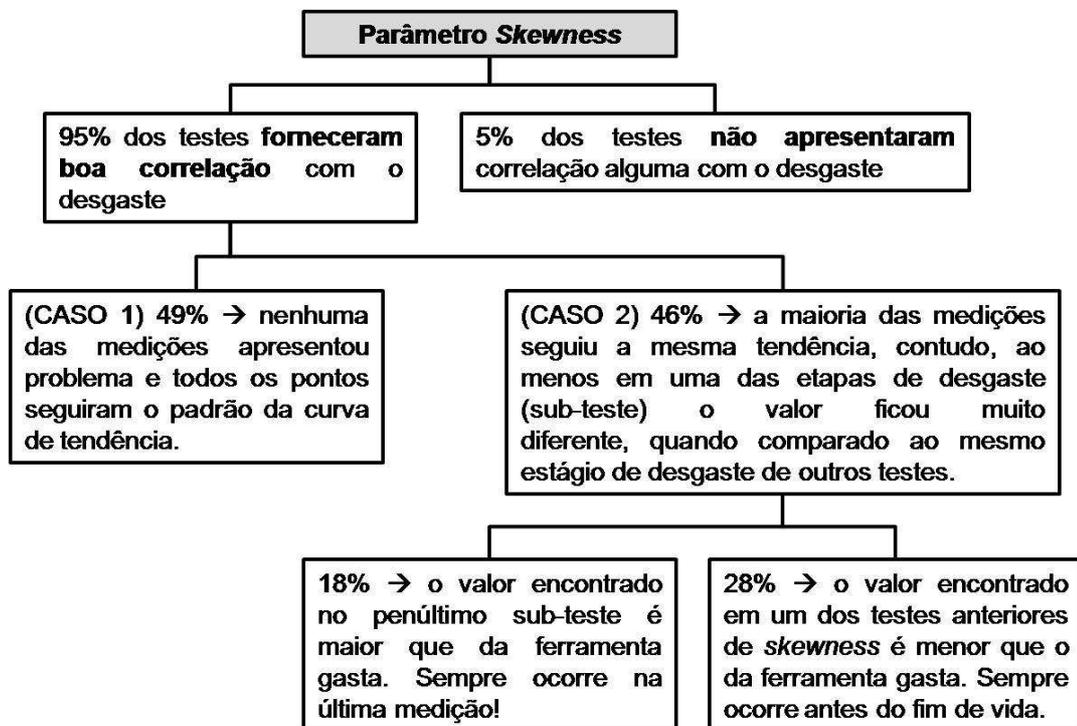


Figura 4.13 – Fluxograma resumindo os resultados encontrados durante os testes de vida das 40 arestas.

O critério utilizado para fazer a afirmação de que o parâmetro apresentou boa correlação com o desgaste foi feito através da análise das curvas de *skewness* produzidas durante os testes de vida, em que o principal fator considerado foi a diferença de valores entre o início e o fim de vida da ferramenta, em que, na maioria dos casos, houve a tendência de queda nos valores de *skewness* à medida que o tempo de usinagem aumentava e, conseqüentemente, o desgaste.

Os resultados referentes ao parâmetro skewness, e mostrados na Fig. 4.13, podem ser divididos em dois principais, os casos em que houve correlação com o desgaste e os que não apresentaram.

Sobre os bons resultados encontrados (Fig. 4.13), é possível dizer que houve dois casos, no primeiro todos os dados adquiridos durante os sub-testes seguiram uma tendência de redução nos valores de skewness ao longo da vida da ferramenta, assim como o segundo caso. Contudo, no segundo caso ao menos em um dos sub-testes o valor de skewness mudou drasticamente de comportamento, não seguindo a tendência comum aos outros valores encontrados e, por isso, esses resultados tiveram de ser separados. A hipótese é que tais resultados poderiam trazer algum prejuízo à RNA quando treinada, afinal, em muitos casos, os valores chegavam a ser menores do que a da ferramenta desgastada.

Tendo o problema dos 5% (Fig. 4.14) que não apresentaram correlação em mãos, buscou-se analisar as condições dos testes, ou seja, o que ocorreu no ambiente de manufatura para aqueles que não apresentaram resultados significativos (tais dados foram arquivados através de memórias dos testes, escritas diariamente). Foi observado que nos casos em que não houve correlação alguma, ao menos um fator adverso ocorreu durante o período de testes, tais como variações na rede elétrica ou quebra da ferramenta. Entretanto, não há como afirmar que de fato essas são causas da diferença de resultados, tal afirmação seria muito subjetiva e para ser mais concreta seriam necessários estudos mais profundos sobre o assunto, fugindo do objetivo principal do trabalho. Além disso, tais problemas estão sujeitos de ocorrerem no ambiente fabril, assim foi considerado que tais dados devam ser introduzidos à rede neural.

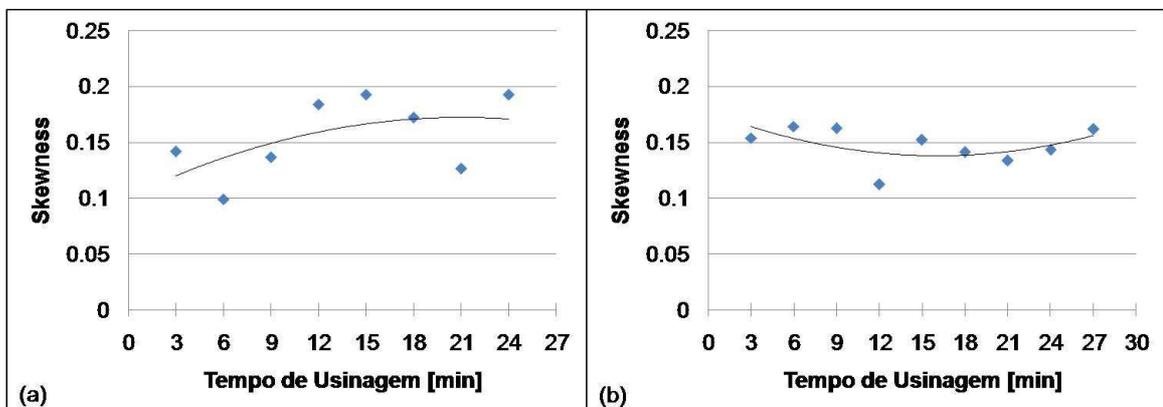


Figura 4.14 – Skewness versus tempo de usinagem. Testes cujos valores de *skewness* não apresentaram correlação com o desgaste. (a) Teste 26; (b) Teste 28.

Além de não apresentarem correlação com o desgaste (Fig. 4.14), o comportamento do parâmetro skewness para os dois testes é, na verdade, o contrário do que foi visto para todas as outras. Enquanto o valor apresenta tendência de redução ao longo da vida da ferramenta para os outros testes de vida, nesse caso há ligeira tendência de aumento nos valores calculados. A explicação para o que ocorreu é difícil, contudo, uma constatação foi realizada a partir da análise dos espectros de potência das duas arestas, extraído a partir da transformada de Fourier (FFT) do sinal (Fig. 4.15), criada com 512 pontos e resolução de 1024. O que foi percebido é que não há diferença significativa, em nenhuma das frequências estudadas, entre os espectros enquanto a ferramenta está nova, na metade de sua vida (ferramenta média) e quando ela está gasta. Dessa forma, acredita-se que realmente não haveria como os resultados serem diferentes, pois o espectro é a indicação da quantidade de energia presente em cada frequência que constitui o sinal e, assim, do comportamento do sinal e, se os sinais comportam-se da mesma forma, não serão detectadas diferenças entre eles. Desse modo, é esperado que os valores de skewness nos diferentes níveis de desgaste sejam semelhantes.

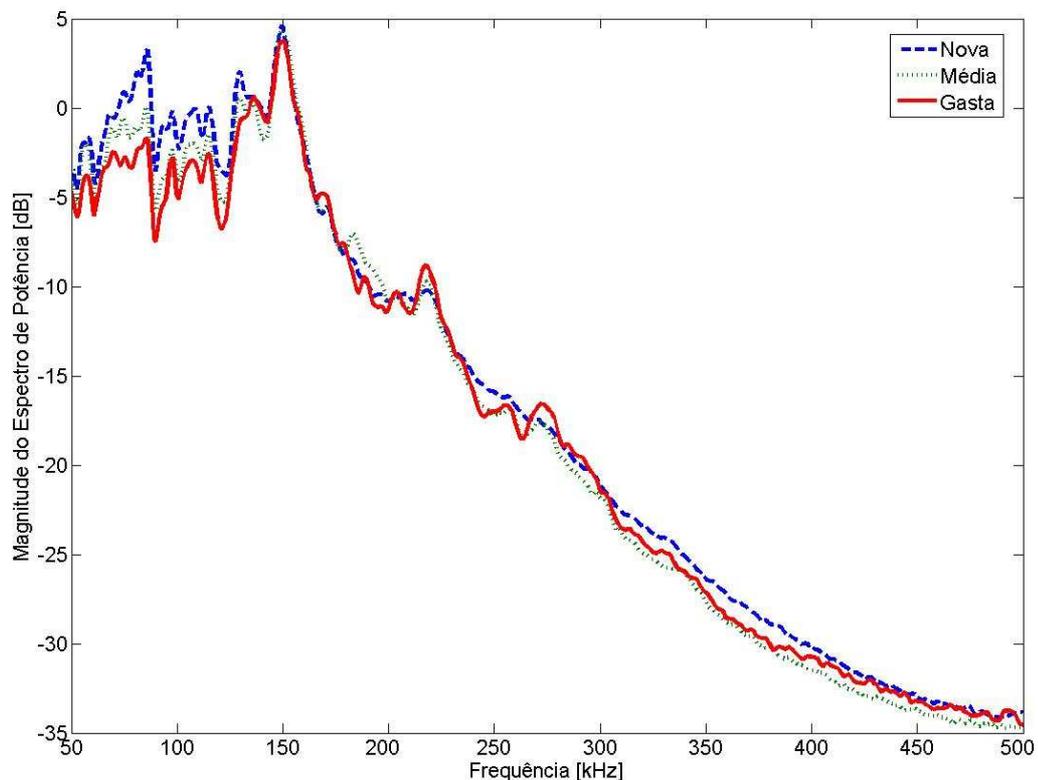


Figura 4.15 – Espectros de potência para o teste 28 em três estados de desgaste. Ferramenta nova, média e gasta.

No restante dos testes, os outros 95%, o parâmetro *skewness* apresentou correlação significativa com o aumento do desgaste. Contudo, ainda ocorreram dois resultados, em um, existiu uma tendência de redução de seus valores à medida que o desgaste da ferramenta ia aumentando (Fig. 4.16), sem maiores problemas em nenhum dos estágios de vida.

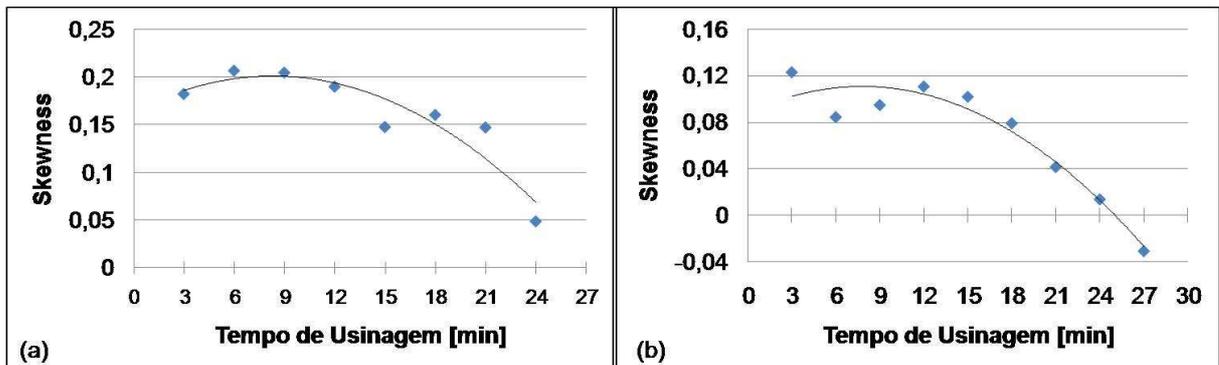


Figura 4.16 – Exemplos do comportamento dos valores de *skewness* ao longo da vida de uma ferramenta para o caso 1. (a) Teste 18; (b) Teste 33.

De acordo com a Fig. 4.16 é possível perceber que, primeiro, há uma diferença significativa entre o maior valor de *skewness* (ferramenta nova) e o menor valor (ferramenta gasta). Além disso, a relação entre as curvas de tendência e os pontos é muito alta, esse fato se repetiu em cerca de 49% das arestas que passaram por testes de vida. Esses dois fatos são de extrema importância, pois em tese a diferença entre o valor de *skewness* da ferramenta nova deve ser bem diferente do da ferramenta gasta ou ainda que siga um padrão de resultados para que a RNA não corra o risco de interpretar de maneira errada o resultado, ou seja, afirmando que uma ferramenta gasta é nova ou vice-versa.

Foi feita a análise dos espectros de potência dessas ferramentas. Na Fig. 4.17 é exemplificado o comportamento das ferramentas que tiveram esse tipo de resultado. De acordo com os espectros foi possível notar que há uma diferença considerável entre os espectros de uma ferramenta nova e outra gasta. No caso específico do teste 33, mostrada na Fig. 4.17, a diferença nos espectros obtidos para uma ferramenta gasta e uma nova são mais evidentes para frequências superiores a 120 kHz, sendo que, nos outros testes tem-se um padrão semelhante.

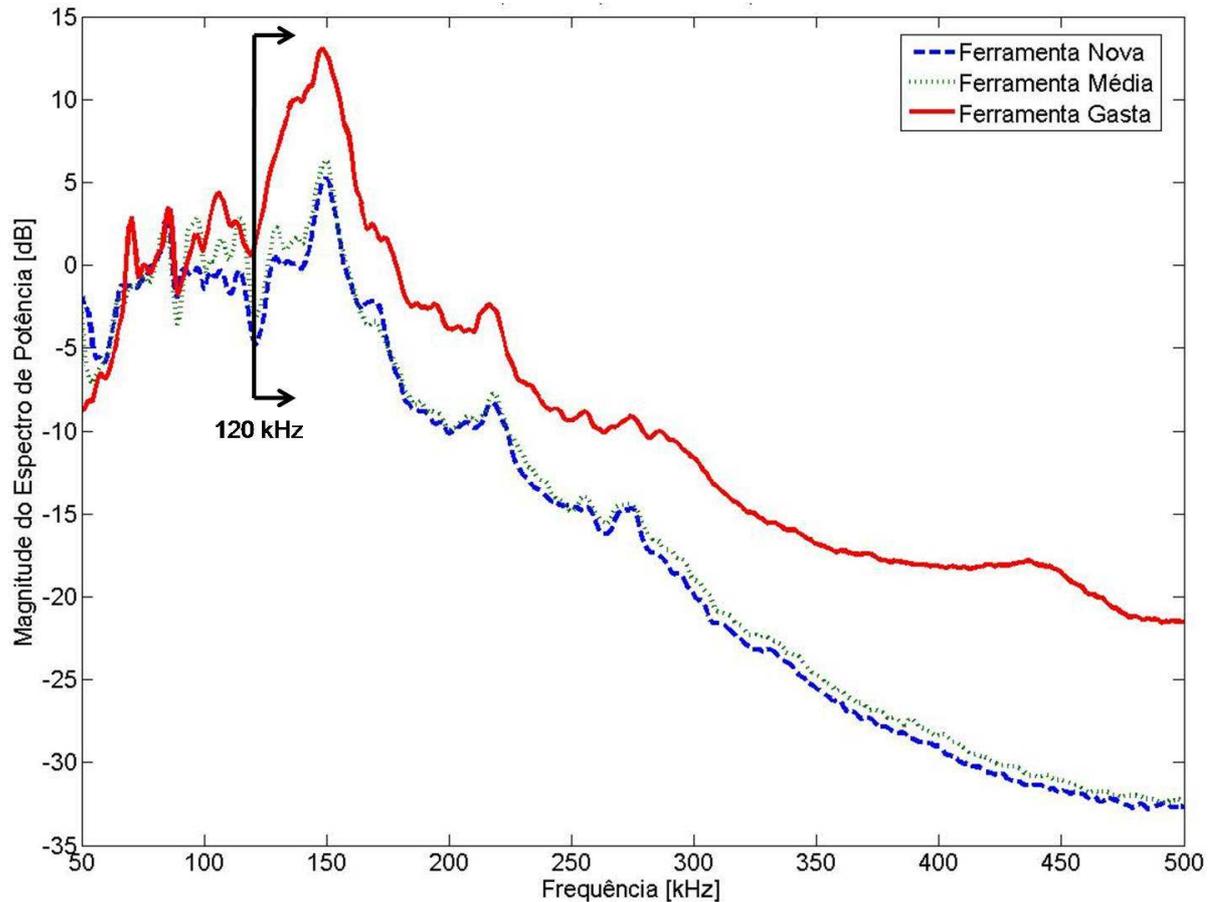


Figura 4.17 – Espectros de potência do teste 33, representando aquelas cujo espectro da ferramenta gasta possui energia bem diferente das outras condições de desgaste.

No segundo caso (46% dos testes realizados) também foi observada a propensão de redução nos valores do parâmetro *skewness*, como mostra a curva de tendência dos valores, à medida que o desgaste aumentava. Contudo, alguns pontos fugiram à regra, em um ou mais níveis de desgaste da ferramenta. Isso ocorrendo, e durante a utilização de uma rede neural artificial, poderia acarretar prejuízos para identificação do nível de desgaste de uma ferramenta (Fig. 4.18).

Tais prejuízos que poderiam ocorrer durante o treinamento e classificação dos valores por meio de uma rede neural estão relacionados à confusão que tais dados, mostrados na Fig. 4.18, ao serem introduzidos na RNA acarretariam. O principal problema poderia ser a identificação inadequada do nível de desgaste em que a ferramenta se encontra, ou então, fornecer a resposta que a ferramenta ainda está em condições de utilização quando não está ou vice-versa.

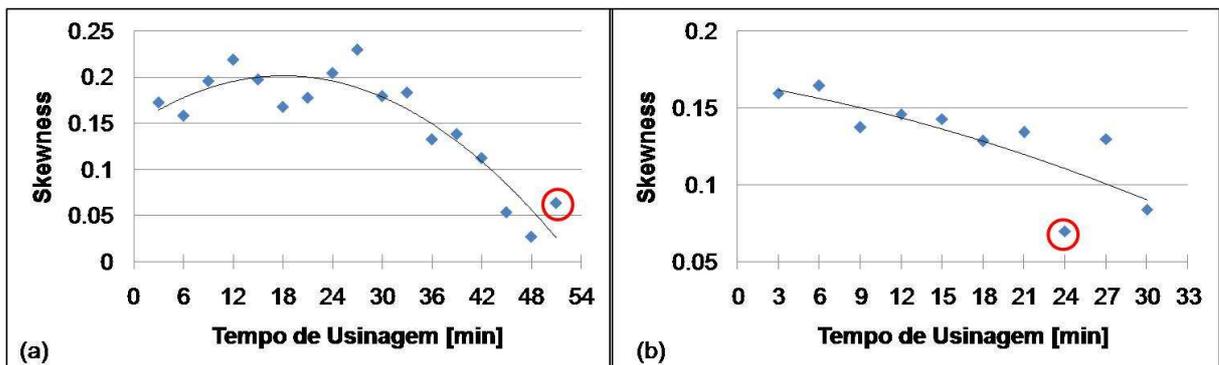


Figura 4.18 – Exemplos do comportamento dos valores de *skewness* ao longo da vida de uma ferramenta para o caso 2 (46% dos testes realizados). (a) Teste 10; (b) Teste 29.

O comportamento que ocorre nos testes apresentados na Fig. 4.18 é comum a cerca de 46% das ferramentas testadas, em que apesar da boa correlação existente e da diferença entre o valor de *skewness* de um ferramenta nova e outra gasta, existe um ponto ou pontos que saem da curva. Dessa maneira, é possível afirmar que apesar da correlação existente entre este parâmetro e o desgaste, no caso de um procedimento de classificação baseado em uma RNA esses valores que diferem do restante poderiam causar problemas, como já mencionado.

Como pode ser provado na Fig. 4.19 foi verificado que os espectros de potência das ferramentas apresentaram este comportamento são semelhantes àqueles apresentados na Fig. 4.15, ou seja, não há diferença significativa entre os espectros em estágios de desgaste diferentes e que isso pode ser uma mostra da causa do problema. Outro fato importante a ser observado, é que nesse caso o espectro para a ferramenta com desgaste médio tem energia maior que os outros estágios de desgaste. O resultado dessa diferença no espectro é apresentado na Fig. 4.20, em que o valor de *skewness* para o tempo de usinagem de 12 minutos não seguiu o comportamento do restante, sendo que, esse ponto corresponde justamente à ferramenta em sua vida média.

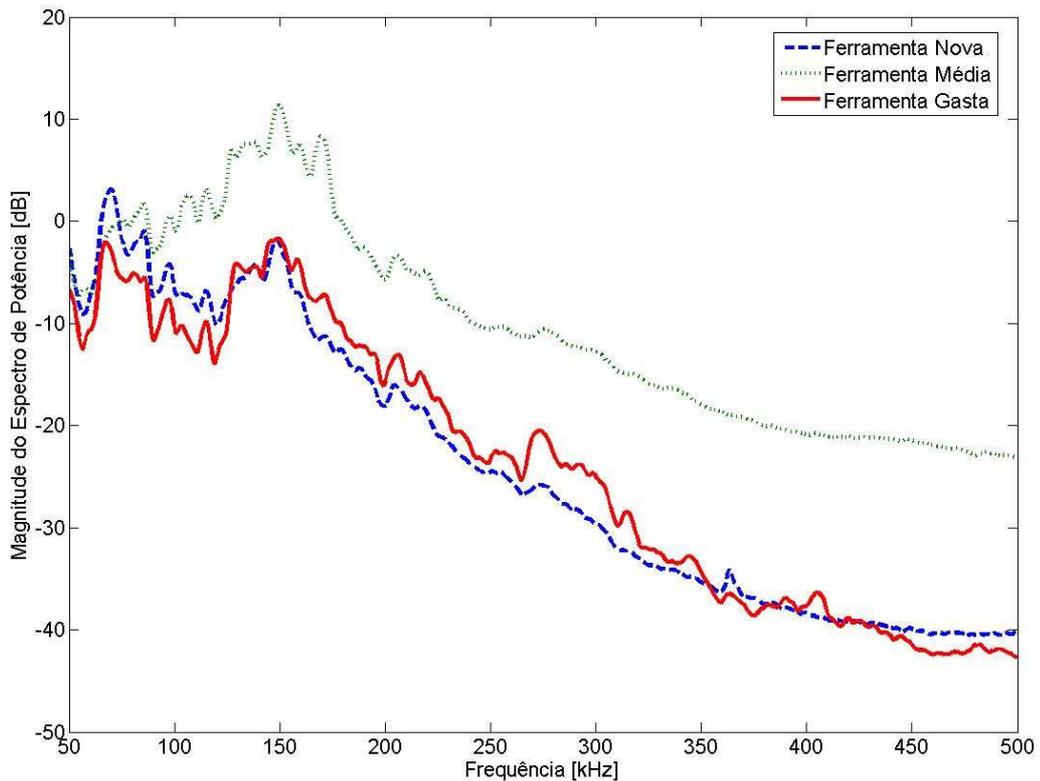


Figura 4.19 – Espectro de potência para o teste 27 em três níveis de desgaste diferentes.

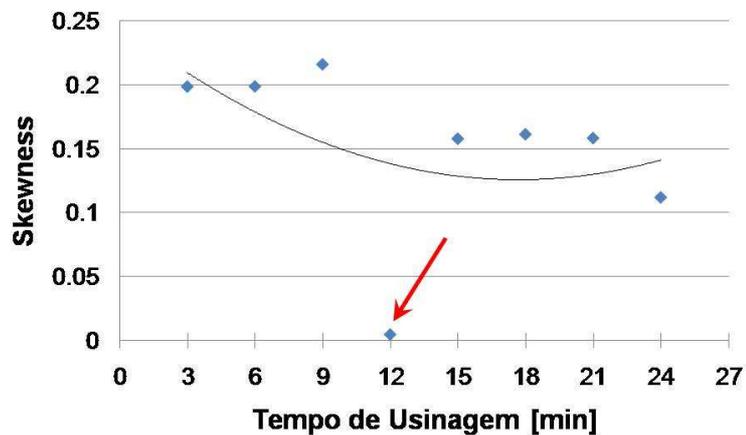


Figura 4.20 – Resultado do espectro com maior energia ser o da ferramenta média.

A mudança no comportamento do sinal, comprovada pela observação dos espectros de potência da Fig. 4.19 mostra que problemas, como mostrado na Fig. 4.20 correspondente ao tempo de 12 minutos, podem ser evidenciados pela análise dos espectros das ferramentas. Várias podem ser as causas desse tipo de fenômeno e muito provavelmente não tem haver com o desgaste em si, considerando que foram apenas 2,0 segundos de

aquisição devido à alta taxa de aquisição e à limitação computacional, fenômenos estruturais podem ter ocorrido no material no momento da aquisição que mudaram o comportamento do sinal, ou ainda, poderia ser a presença de algum ruído naquele momento que provocou o problema. O ambiente laboratorial pode estar sujeito a ruídos externos, que podem ser oriundos de diversas fontes, como a trepidação do chão por um caminhão passando nas proximidades ou ainda variações no sistema de eletricidade. Enfim, essas variações no ambiente podem causar problemas no sinal captado. As Figuras. 4.21 e 4.22 dão outra demonstração de que algo errado havia acontecido através do próprio sinal bruto de EA coletado durante o teste.

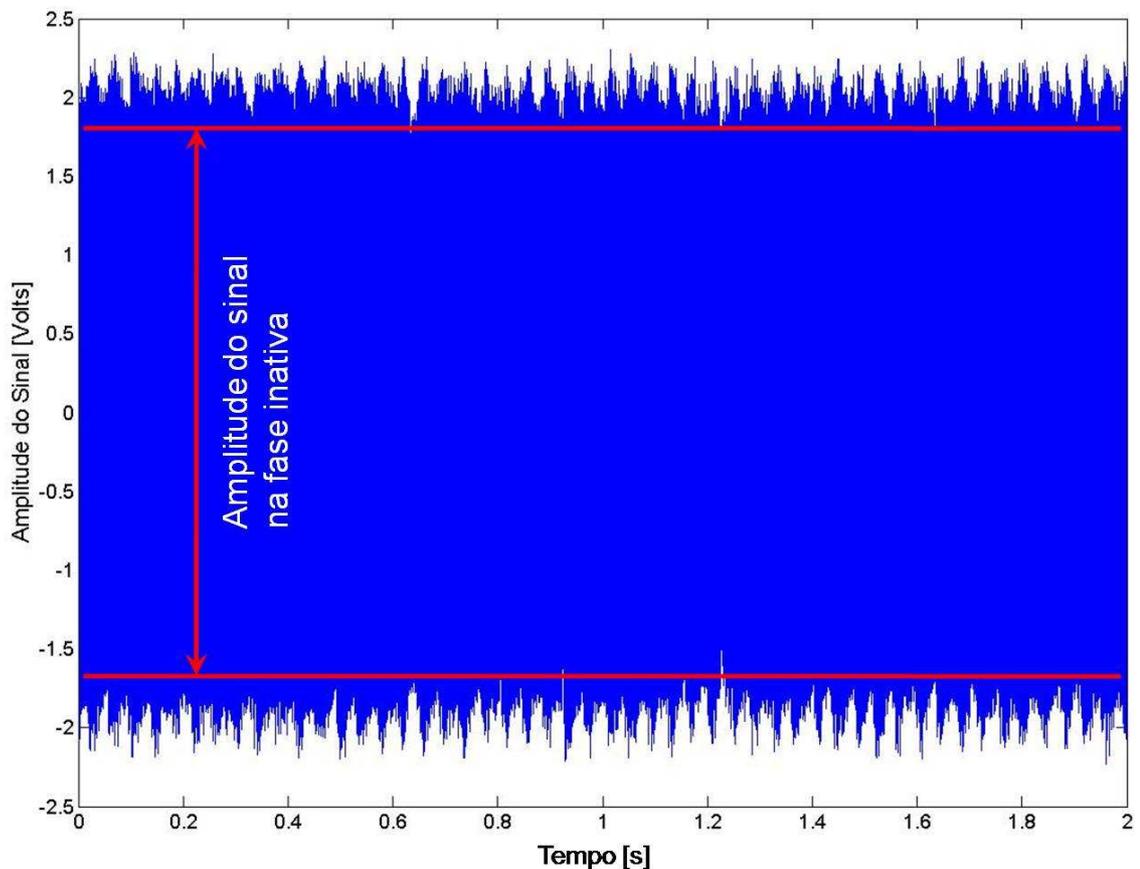


Figura 4.21 – Sinal bruto de EA em função do tempo para o teste 27 (ferramenta com 12 minutos de tempo de usinagem vida).

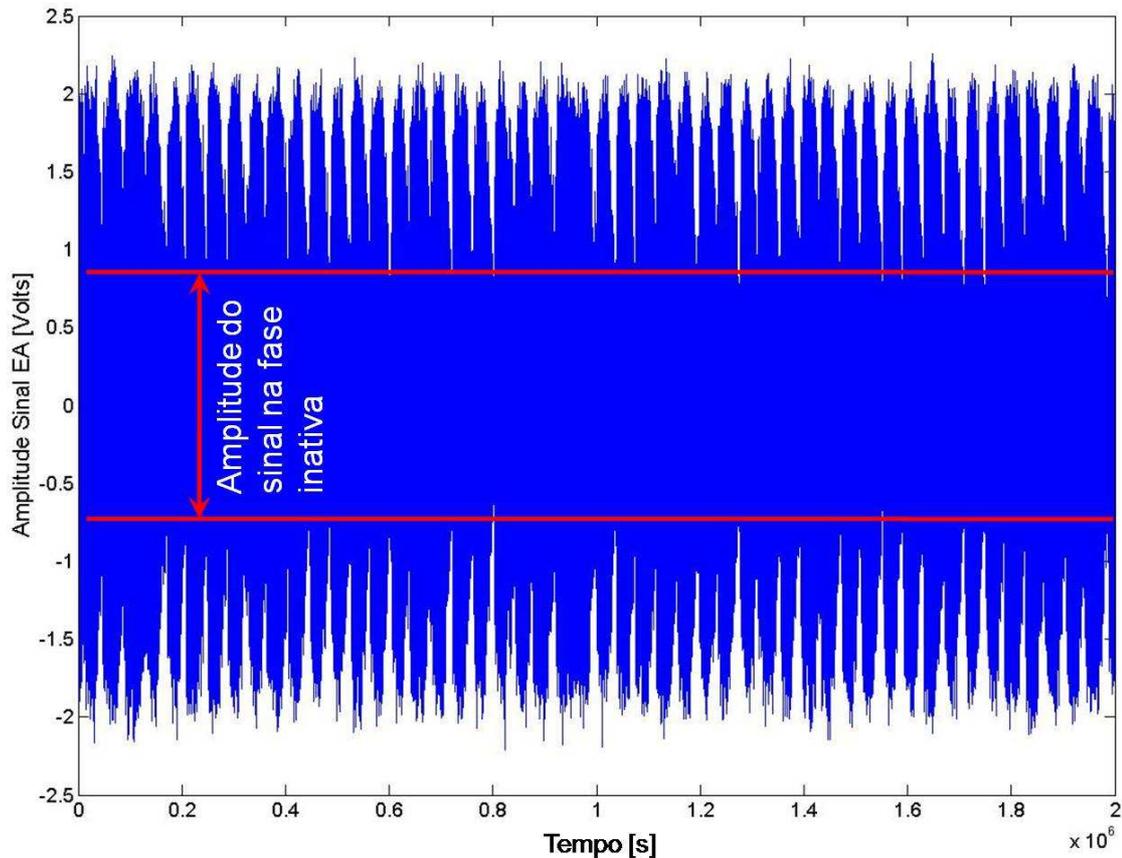


Figura 4.22 - Sinal bruto de EA em função do tempo para o teste 32 (ferramenta também com 12 minutos de tempo de usinagem vida).

A amplitude de sinal de EA na fase inativa de corte é claramente maior para o sinal coletado que apresentou problema, teste 27 (Fig. 4.21), do que outro, por exemplo, que não apresentou problema algum, teste 32 (Fig. 4.22). Em teoria, era esperado que a amplitude do sinal de emissão acústica na fase inativa de corte aumentasse dessa maneira somente em estágios de desgaste avançado, pois nessa situação a área de contato entre a ferramenta e a peça na superfície de folga seria maior durante o tempo em que a ferramenta não estava cortando. Contudo, para o caso específico do teste 27 isso não ocorreu, no tempo de 12 minutos de usinagem. Entretanto, o que foi observado é que no teste seguinte (15 minutos de usinagem) o sinal já apresentava comportamento similar aos demais testes, para um mesmo tempo de usinagem, voltando a mudar somente em seu fim de vida. Fica evidente que algum fator interferiu no processo, contudo não foi possível afirmar nada, já que isso não era esperado, necessitando então de estudos mais aprofundados sobre o tema.

#### 4.3.1. Estudo do Sinal de EA em uma Banda Determinada

Como visto no sub-item anterior, existe uma banda de frequência mais sensível às mudanças de desgaste que ocorrem na ferramenta. Foi pensando nisso que se estipulou o limite máximo e mínimo dessa banda através de análise visual. Foram dois os critérios adotados para isso, primeiro avaliou-se as frequências em que o sinal possui maior energia, deixando de lado frequências cuja energia é baixa, pois se acreditava que nelas o resultado de *skewness* já coletado e que se mostrou positivo seria melhor. Além disso, deveria ser clara a diferença entre o espectro de uma ferramenta nova e uma ferramenta gasta, ao menos para a maioria dos testes considerados.

O tipo de espectro utilizado foi o mesmo para todas as arestas, inclusive da mesma maneira que foi feita para a faixa de 50 kHz a 500 kHz. Entretanto, observou-se que quando o espectro não está em escala logarítmica é mais fácil de determinar qual a banda com maior energia. A Fig. 4.23 apresenta um desses espectros para o teste 24.

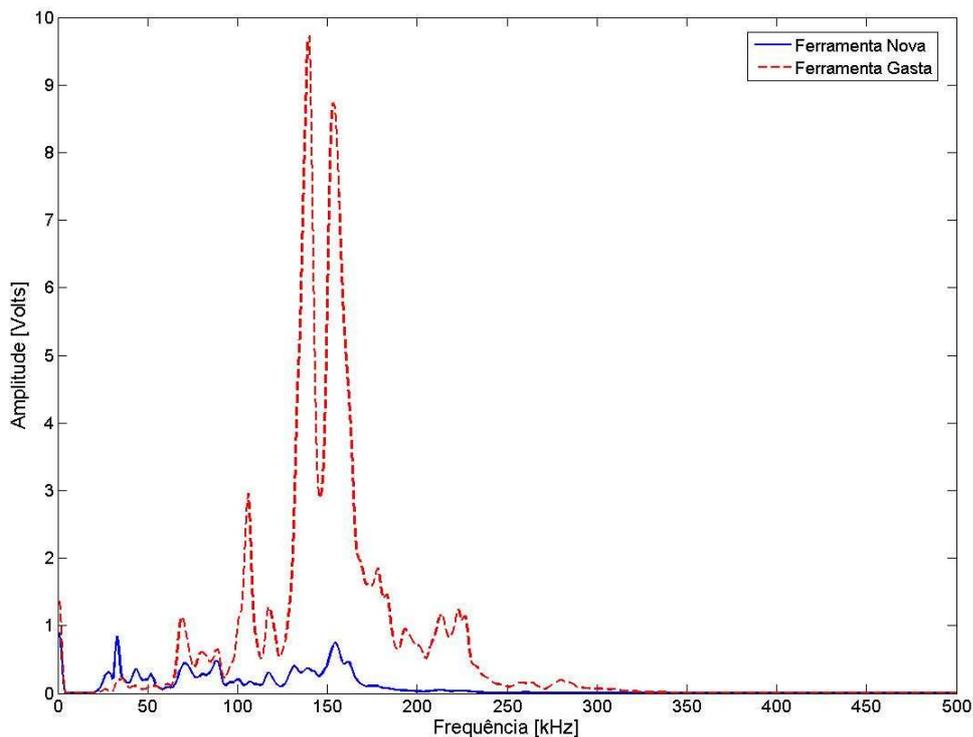


Figura 4.23 – Espectros de potência do teste 24 (ferramenta nova e gasta).

Após a análise de todos os ensaios de vida de ferramenta realizados, 40 arestas, chegou-se a conclusão que a banda de frequência que melhor representaria essa diferença entre o sinal de uma ferramenta nova e outra gasta estaria localizada entre 100 e 230 kHz,

conforme pode ser visto em um detalhe dos espectros obtidos para o teste da vigésima quarta aresta (Fig. 4.24), para o caso específico desse trabalho. O que também foi determinado por Souto (2007), cujo encontrou resultados semelhantes. Nessa banda é evidente, para a maioria das arestas testadas, a diferença entre a ferramenta gasta e a nova, além da maior energia contida no sinal.

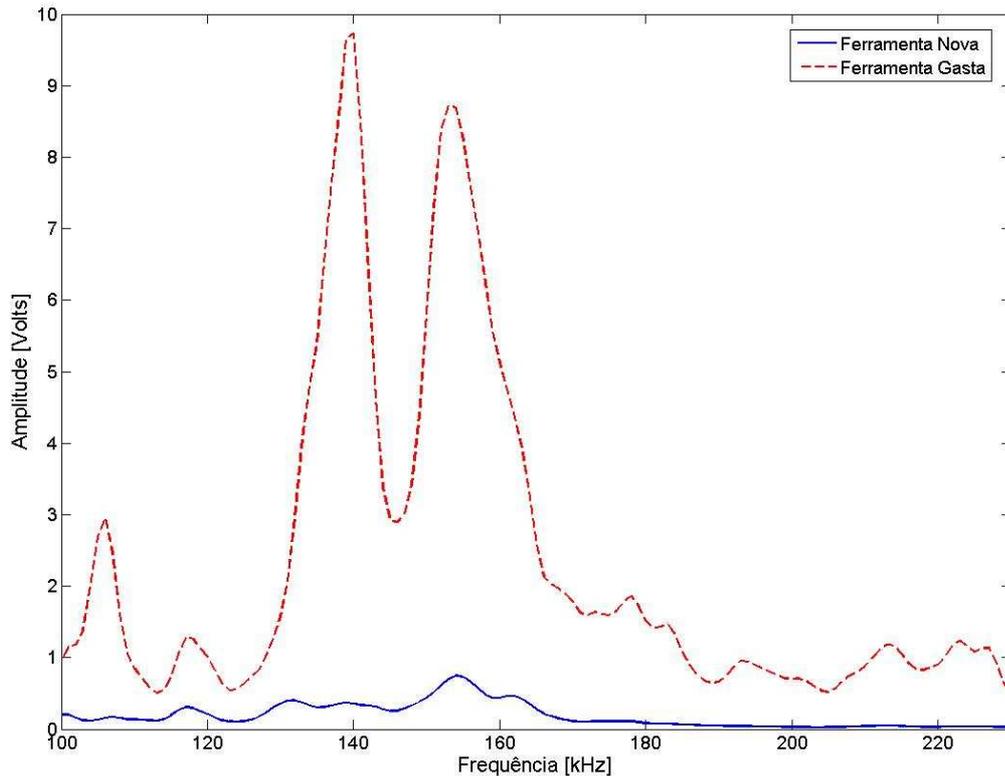


Figura 4.24 – Espectros de potência na banda de 100-230 kHz (Aresta 24 - Nova e gasta).

Com o intuito de se obter um parâmetro para quantificar a diferença entre o sinal de uma ferramenta nova e outra gasta na banda escolhida, que não só o *skewness*, aumentando a robustez e confiabilidade do sistema de monitoramento, foi feita a divisão dos valores do espectro da ferramenta gasta pelos da ferramenta nova em cada frequência da banda (100-230 kHz), sendo posteriormente avaliado o comportamento da média e do nível RMS desses valores em conjunto (Fig. 4.25 e 4.26).

O critério utilizado foi que a ferramenta nova seria o padrão e então todos os valores seriam calculados sobre ela, assim ter-se-ia valores de média e RMS diferentes para uma mesma aresta. Por exemplo, uma aresta que passou por nove medições de desgaste ao longo de sua vida (27 minutos de vida), teria oito valores de média e RMS, calculados da seguinte forma: todos os pontos do espectro da segunda medição foram divididos pelos da

ferramenta nova e calculados os parâmetros; os pontos do espectro da terceira medição foram divididos pelo da ferramenta nova e calculados os parâmetros; os pontos do espectro da quarta medição foram divididos pelo da ferramenta nova e calculados os parâmetros; e o processo se repetiu até a nona medição em que foi decretado o fim de vida da ferramenta.

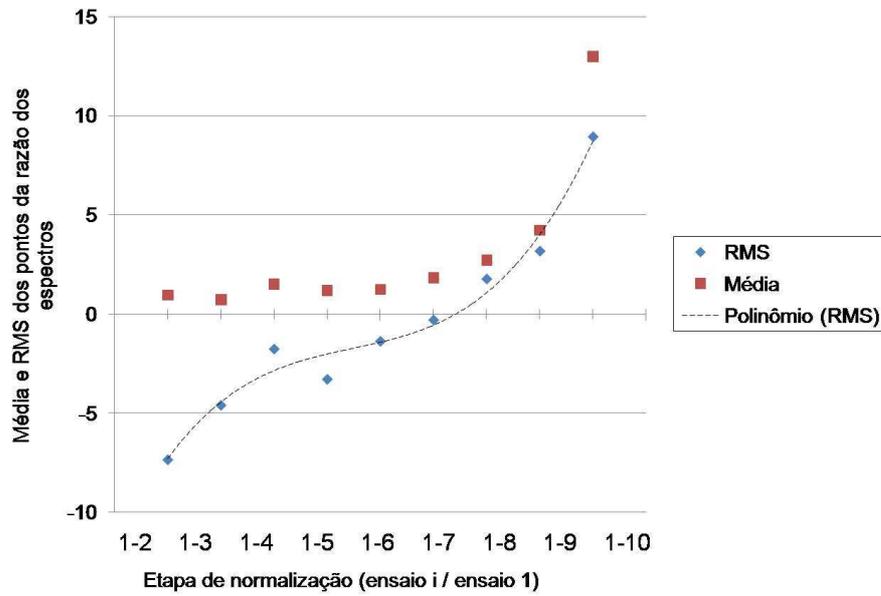


Figura 4.25 – Média e RMS dos pontos dos espectros normalizado em função da ferramenta nova (100-230 kHz) versus etapa de normalização (teste 23).

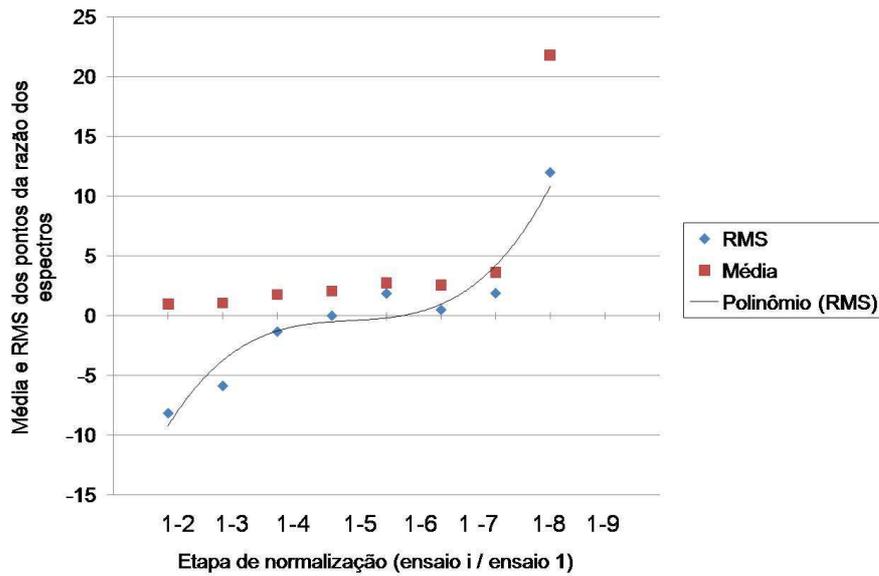


Figura 4.26 – Média e RMS dos pontos dos espectros normalizado em função da ferramenta nova (100-230 kHz) versus etapa de normalização (teste 24).

As duas figuras mostradas, 4.25 e 4.26, após a análise de todos os dados, não servem para representar todos os testes, pois se descobriu que para os casos já citados em que não há alteração significativa no espectro de potência entre as ferramentas, esses dois parâmetros não conseguem dar resposta adequada. Mesmo assim, foi observado que o nível RMS, aqui representado em logaritmo, extraído dos espectros é um bom indicativo da diferença entre os níveis de desgaste, já que quanto maior for o valor do nível RMS maior será a diferença entre os espectros, como mostra as Figuras 4.24 e 4.27.

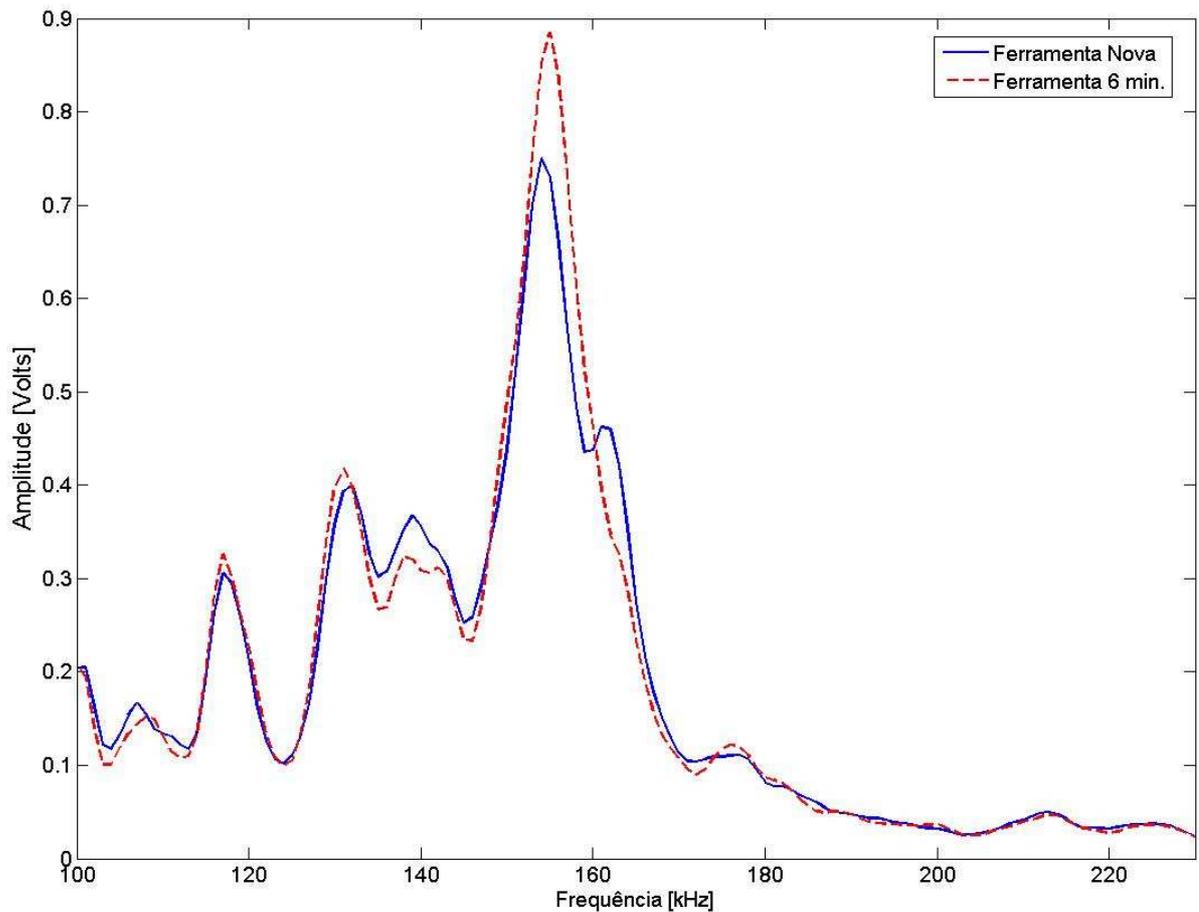


Figura 4.27 – Espectros de potência na banda de 100-230 kHz (Teste 24 – Nova e 6 min. de vida).

O intuito inicial era melhorar os resultados de *skewness*, apesar disso, o que foi verificado após o estudo na banda de frequências escolhida é que não foi atingido esse objetivo. Os valores do coeficiente de simetria tenderam a se aproximar mais ainda do zero. Muito provavelmente o que ocorre é que frequências de maior energia, para o caso do sinal de EA, representem a parte contínua do sinal, assim ao se eliminar as outras frequências o

coeficiente de simetria ficou ainda mais próximo de zero, ou seja, o sinal apresenta um comportamento mais próximo de uma distribuição normal. Dessa forma o skewness calculado na banda de frequências de 100-230 kHz não foi utilizado posteriormente na RNA, pois esse parâmetro não apresentou correlação com o desgaste.

#### 4.4. Aplicação da RNA

Nessa sessão será tratada a aplicação da rede neural probabilística (*Probabilistic Neural Network* – PNN), sendo importante ressaltar a importância dos dados de entrada na rede para se obter a resposta adequada. Para tanto, foi necessária a normalização de todos os dados utilizados em relação à ferramenta nova, sendo assim, esse estágio de desgaste foi considerado o estágio padrão e todos os outros foram normalizados em relação a ele.

A normalização foi feita devido ao fato de que em muitos casos, como a potência efetiva de corte média, há uma diferença muito grande entre os valores apresentados pelas ferramentas. Por exemplo, quando comparado dois testes de vida, às vezes uma ferramenta consome uma potência muito maior no início de vida do que outra, já no fim de vida. Assim, percebeu-se a necessidade de normalização dos dados antes do treinamento e validação da rede.

Depois da análise de todos os dados utilizados no trabalho, chegou-se a conclusão que o skewness do sinal de EA (banda de frequências 100-230 kHz), o nível RMS extraído dos espectros de potência de emissão acústica (banda de frequências 100-230 kHz) e a potência efetiva de corte média foram os melhores parâmetros para serem introduzidos na PNN.

O primeiro treinamento e posterior classificação dos dados por meio da RNA consistiu na utilização de todos os dados coletados durante os testes, independente de terem ocorrido algum problema durante os testes. Isso foi feito devido ao fato de que tais problemas poderem ocorrer no ambiente de manufatura e ser praticamente impossível prevê-los ou eliminá-los. A Tab. 4.1 apresenta a classificação de todos os dados após o treinamento. Nesse caso, ao contrário do que ocorre no treinamento onde é fornecida a resposta à rede, não são fornecidos os resultados e a PNN deve efetuar a classificação dos valores em “bom” ou “ruim”.

Tabela 4.1 – Classificação dos dados pela PNN, considerando todos os 40 testes de vida (Resposta: 1 – “boa”; 0 – “ruim”).

1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,1369	<b><u>0,8631</u></b>	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0124	<b><u>0,9876</u></b>
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
0,9999	0,0001	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	<b><u>0,9962</u></b>	0,0038
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	1,0000
1,0000	0,0000	0,0000	<b><u>1,0000</u></b>	1,0000	0,0000	0,0000	1,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	<b><u>1,0000</u></b>	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	1,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	<b><u>1,0000</u></b>	0,0000	1,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000		

Na Tab. 4.1 foram agrupadas as classificações das ferramentas em “boa” ou “ruim” para melhor visualização dos resultados e em negrito, itálico e sublinhado estão as respostas erradas da rede. A maior parte dos dados utilizados para o treinamento corresponde à classificação “boa”, o motivo foi explicado no capítulo de Metodologia.

A Tab. 4.2 faz um resumo dos resultados mostrados na Tab. 4.1, em que, de forma geral, houve um nível de acerto de aproximadamente 91% ao se considerar todos os dados introduzidos na PNN para a sua validação.

Tabela 4.2 – Resumo dos resultados apresentados pela PNN após a classificação dos dados utilizados para a validação dos 40 testes de vida.

Porcentagem de acertos			Total	%
Ferramenta Boa	Acertos	61	65	93,8
	Erros	4		6,2
Ferramenta Ruim	Acertos	4	6	66,7
	Erros	2		33,3

Para a melhor análise dos resultados através da Tab. 4.2, eles foram divididos em ferramenta boa e ruim, afinal o número de dados para a classificação “boa” é muito maior que a de “ruim” e em um universo estatístico quanto maior a população melhor tende ser a

resposta que se procura, fato que foi repetido em todas as classificações usando rede neural. A classificação para as ferramentas consideradas “boas” mostrou um nível de acerto, para esse caso, de quase 94%, enquanto para as ferramentas “ruins” de aproximadamente 67%. De forma geral a resposta é muito satisfatória e acredita-se que se houvesse uma população maior para a classificação “ruim” o resultado seria melhor.

Para a segunda classificação utilizando a rede neural optou-se por excluir os testes que apresentaram algum tipo de problema, a escolha foi feita através das memórias escritas durante os testes e citadas anteriormente. Os resultados são mostrados na Tab. 4.3 e o resumo das respostas na Tab. 4.4.

Tabela 4.3 – Classificação dos dados pela PNN, desconsiderando os testes que apresentaram algum tipo de problema (Resposta: 1 – “boa”; 0 – “ruim”).

1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
0,9999	0,0001	1,0000	0,0000	0,0000	<b>1,0000</b>	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	0,3621	<b>0,6379</b>	1,0000	0,0000	0,1411	0,8589
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	1,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0050	0,9950
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	1,0000
1,0000	0,0000	0,0000	<b>1,0000</b>	0,0000	<b>1,0000</b>	<b>0,6489</b>	0,3511
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	1,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000		
0,9973	0,0027	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000		

Tabela 4.4 – Resumo dos resultados apresentados pela PNN após a classificação dos dados utilizados para a validação, excluindo os testes que apresentaram algum tipo de problema.

Porcentagem de acertos			Total	%
Ferramenta Boa	Acertos	56	60	93,3
	Erros	4		6,7
Ferramenta Ruim	Acertos	5	6	83,3
	Erros	1		16,7

A exclusão dos testes que apresentaram algum tipo de problema manteve o nível de acerto para a classificação “boa”, como mostra as Tab. 4.3 e 4.4. Em contrapartida, o número de acertos para a classificação “ruim” aumentou cerca de 16%, o que demonstra que realmente esses testes prejudicaram a resposta da rede para o caso anterior e que o melhor caminho seria a exclusão deles, ao menos, durante o treinamento da rede com o intuito de reduzir os erros da PNN.

Os dados a serem introduzidos na rede para o treinamento e validação da PNN foram tratados de outras formas, a fim de melhorar os resultados. Contudo, esses tratamentos não surtiram os efeitos esperados e as tabelas 4.5 a 4.8 mostram os resultados dessas classificações.

No primeiro caso, com o intuito de aumentar a diferença entre dos valores entre os níveis de desgaste aplicou-se logaritmo na base 10 em todos os dados de entrada da rede e para todos os testes de vida. As Tab. 4.5 e 4.6 trazem os resultados encontrados.

Tabela 4.5 – Classificação dos dados pela PNN, considerando todos os 40 testes de vida e aplicando logaritmo aos dados de entrada (Resposta: 1 – “boa”; 0 – “ruim”).

1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,2245	<b>0,7755</b>	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	<b>1,0000</b>	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	<b>1,0000</b>	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,2245	0,7755
1,0000	0,0000	0,2245	<b>0,7755</b>	1,0000	0,0000	0,2245	0,7755
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	<b>1,0000</b>	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,2245	0,7755
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0444	<b>0,9556</b>	<b>1,0000</b>	0,0000
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000		

Tabela 4.6 – Resumo dos resultados apresentados pela PNN após a classificação dos dados, aplicando logaritmo, utilizados para a validação dos 40 testes de vida.

Porcentagem de acertos			Total	%
Ferramenta Boa	Acertos	61	65	93,8
	Erros	4		6,2
Ferramenta Ruim	Acertos	3	6	50
	Erros	3		50

Mais uma vez a quantidade de acertos para a classificação “boa” foi mantida (Tab. 4.5). Contudo, para a classificação “ruim”, além de serem reduzidos o número de acertos, para 50% apenas, a resposta certa não foi muito boa, afinal os valores encontrados estão distantes de 1,0, cujo seria a classificação sem erro algum (Tab. 4.6).

A outra tentativa feita foi a de elevar os dados de entrada à potência de 10, o intuito era o mesmo, evidenciar a diferença entre os valores e melhorar as classificações. As Tab. 4.7 e 4.8 apresentam os resultados encontrados.

Tabela 4.7 – Classificação dos dados pela PNN, considerando todos os 40 testes de vida e aplicando potência de dez aos dados de entrada (Resposta: 1 – “boa”; 0 – “ruim”).

0,9987	0,0013	0,9695	0,0305	0,9976	0,0024	0,9915	0,0085
0,9242	0,0758	0,9903	0,0097	0,9417	0,0583	0,9983	0,0017
0,9985	0,0015	0,9982	0,0018	0,9991	0,0009	0,9797	0,0203
0,8611	0,1389	0,9916	0,0084	0,9892	0,0108	0,9630	0,0370
0,9927	0,0073	0,9907	0,0093	0,9261	0,0739	0,9832	0,0168
0,9989	0,0011	0,9860	0,0140	0,9987	0,0013	0,9840	0,0160
0,9442	0,0558	0,9979	0,0021	0,9951	0,0049	0,9829	0,0171
0,9478	0,0522	0,9790	0,0210	0,9907	0,0093	0,7897	0,2103
0,9907	0,0093	0,9990	0,0010	0,9939	0,0061	0,9941	0,0059
0,9365	0,0635	0,9944	0,0056	0,9955	0,0045	0,9971	0,0029
0,5298	0,4702	0,9748	0,0252	0,9990	0,0010	0,9417	0,0583
0,9714	0,0286	0,9549	0,0451	0,9927	0,0073	<b>0,5065</b>	0,4935
0,4792	<b>0,5208</b>	0,9960	0,0040	0,9956	0,0044	0,1030	0,8970
0,9896	0,0104	0,2503	<b>0,7497</b>	0,9910	0,0090	<b>0,9993</b>	0,0007
0,9921	0,0079	0,9906	0,0094	0,9907	0,0093	0,3353	0,6647
0,9907	0,0093	0,9934	0,0066	0,9434	0,0566	<b>1,0000</b>	0,0000
0,9639	0,0361	0,9979	0,0021	0,9985	0,0015	0,0000	1,0000

Tabela 4.8 – Resumo dos resultados apresentados pela PNN após a classificação dos dados, aplicando potência de dez, utilizados para a validação dos 40 testes de vida.

Porcentagem de acertos			Total	%
Ferramenta Boa	Acertos	59	62	95,2
	Erros	3		4,8
Ferramenta Ruim	Acertos	3	6	50
	Erros	3		50

As Tab. 4.7 e 4.8 mostram que o resultado da aplicação de potência de dez aos dados de entrada não foi bom e que apesar de o nível de acertos para a classificação “boa” ter aumentado (aproximadamente 95%), todos os valores de resposta estão abaixo de 1,0, ou seja, houve erro em todas as classificações, pois o ideal seria resposta igual a 1,0. Além disso, como na tentativa utilizando logaritmo, houve um nível de acerto de apenas 50% para a classificação ruim.

# CAPÍTULO V

## Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas neste trabalho.

- 1) Outros fatores, além da medição, evidenciaram o aumento do desgaste da ferramenta, do início ao seu fim de vida. Fatores como: cavacos rubros, formação de rebarbas na peça, cavaco secundário e vibração excessiva. Tais fatos poderiam ser utilizados para estimar o fim de vida da ferramenta na prática;
- 2) Há a tendência de aumento nos valores de potência efetiva de corte média à medida que o tempo de usinagem aumenta e conseqüentemente o desgaste;
- 3) Em média a diferença entre o valor de potência efetiva média de uma ferramenta nova e a mesma desgastada é de aproximadamente 15%;
- 4) O gráfico de amplitude de sinal de EA em função do tempo de aquisição sofre variações na amplitude do sinal na fase inativa de corte à medida que o desgaste aumenta. Sendo assim, pode dar uma indicação do aumento do desgaste;
- 5) Dentre todos os parâmetros estudados para o sinal de EA, apenas o *skewness* (banda de frequências 50-500 kHz) teve correlação com o aumento do desgaste. Sendo que, à medida que o desgaste aumenta, esse parâmetro tende a ter seus valores reduzidos;
- 6) Há muita dificuldade quando se trabalha com a EA, pois muitas vezes o sinal apresenta um comportamento inesperado e que só é possível de ser descoberto após a extração dos parâmetros estatísticos, na maioria das vezes, ou com a análise espectral do sinal;
- 7) A análise dos espectros do sinal de EA fornece informações valiosas a respeito do comportamento do sinal ao longo da vida da ferramenta;
- 8) A banda de frequências mais sensível à mudança da condição de corte da ferramenta está entre 100-230 kHz para o caso específico analisado neste trabalho;
- 9) O nível RMS calculado por meio de espectros de frequência (banda de frequências 100-230 kHz), tendo como padrão a ferramenta nova, apresentou correlação com o desgaste;

10) Técnicas de monitoramento utilizando emissão acústica e potência efetiva de corte média parecem ser uma boa alternativa para sistemas de monitoramento do desgaste de ferramentas;

11) A RNA teve boa resposta ao tentar prever o desgaste, tanto para os dados de entrada das 40 arestas, quanto para quando se utilizou apenas as arestas cujos dados de entrada não apresentaram problemas. Além disso, quanto mais confiáveis os dados de entrada na rede, melhor será a resposta;

12) A população de dados de entrada na PNN, para a classificação como ferramenta “ruim”, deveria ser maior. Assim, muito provavelmente os resultados correspondentes ao fim de vida das ferramentas seriam melhores.

### **5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros**

- Realizar um número maior de testes para melhorar a aplicação da RNA, de preferência em uma linha de produção devido ao alto volume de produção em curto espaço de tempo;
- Utilizar outro material para os corpos de prova, como também para a ferramenta;
- Utilizar mais de uma aresta durante o corte;
- Avaliar a viabilidade de se utilizar um programa analisador de imagens para extrair respostas a respeito do desgaste a partir do próprio mapa do sinal bruto de emissão acústica;
- Realizar uma investigação mais detalhada sobre o comportamento espectral do sinal de EA;
- Solidificar ainda mais as bases para o estudo do desgaste de ferramentas através do sinal de EA e potência, dando condições para efetuar o monitoramento em tempo real no ambiente industrial.

# CAPÍTULO VI

## Referências Bibliográficas

AL-GHAMD, A.M.; MBA, D. A comparative experimental study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size.

**Mechanical Systems and Signal Processing.** Vol. 20, 7 ed., p. 1537-1571, 2006.

AL-SULAIMAN, F.A.; BASEER, M.A.; SHEIKH, A.K. Use of electrical power for online monitoring of tool condition. **Journal of Materials Processing Technology.** Vol. 166, 3 ed.,

p. 364-371, 2005.

ALONSO, F.J.; SALGADO, D.R. Analysis of the structure of vibration signals for tool wear detection. **Mechanical Systems and Signal Processing.** Vol. 22, 3 ed., p. 735-748, 2008.

ANON. **Vídeo Drop of Water.** Disponível em:  
<[http://www.youtube.com/watch?v=n5bsQ\\_YDYCI](http://www.youtube.com/watch?v=n5bsQ_YDYCI)>. Acesso em: 16 dez. 2009.

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.** Vol. 46, p. 1445-1448, 2005.

BARRETO, J.M. Introdução às Redes Neurais Artificiais. **Departamento de Informática e Estatística/UFSC**, Brasil, 2002. Seção prof. Jorge Muniz Barreto. Disponível em:  
<<http://www.inf.ufsc.br/~barreto/tutoriais/survey.pdf>>. Acesso em: 26 jan. 2009.

BRAGA, A.P.; CARVALHO, A.P.L.F. DE; LUDEMIR, T.B. **Redes Neurais Artificiais – Teoria e Aplicações.** Rio de Janeiro: LTC editora, 2007. 238 p. ISBN-10: 8521615647. ISBN-13: 9788521615644.

BOOTHROYD, G; KNIGHT, W.A. **Fundamentals of Machining and Machine Tools.** Nova Iorque: CRC Press, 2006. ISBN 1-57444-659-2.

BYRNE G.; DORNFELD D.; INASAKI I.; KETTELER G.; KONING W.; TETI R. Tool Condition Monitoring (TCM) – The status of research and industrial application. In: CIRP – Manufacturing Technology, vol. 44, 2 ed., 1995. **Anais...** CIRP, p. 541-567, 1995.

CARVALHO, S.R. **Determinação do campo de temperatura em ferramentas de corte durante o processo de usinagem por torneamento.** 2005. 123 f. Tese de doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

CISNEROS, C.A.F.; MURANAKA, C.S.; BATALHA, G.F. Contribuição ao desenvolvimento da monitoração de processos de fresamento via emissão acústica. **Anais...** II CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Belém, p. 1-10, 2004.

COSTA, C.E. **Monitoramento do processo de torneamento de desbaste via corrente elétrica do motor principal da máquina e via vibração da ferramenta.** 1995. 108 f. Dissertação de mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

DAN, L.; MATHEW, J. Tool wear and failure monitoring techniques for turning – a review. **International Journal of Machine Tools & Manufacture.** Vol. 30, 4 ed., p. 579-598, 1990.

DIMLA, E.D. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations – a review of methods. **International Journal of Machine Tools & Manufacture.** Vol. 40, 8 ed., p. 1073-1098, junho 2000.

DIMLA, D.E. The impact of cutting conditions on cutting forces and vibration signals in turning with plane face geometry inserts. **Journal of Materials Processing Technology.** Vol. 155-156, p. 1708-1715, 2004.

DIMLA, D.E.; LISTER, P.M. On-line metal cutting tool condition monitoring I: Force and vibration analyses. **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** Vol. 40, 5 ed., p. 739-768, 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.** Vol. 152, 2 ed., p. 395-407, 1992.

DOLINSEK, S.; KOPAC, J. Acoustic emission signals for tool wear identification. **Wear**. Vol. 225-229, p. 295-303, 1999.

DUARTE, M.A.V. **Manutenção Preditiva Via Análise de Vibrações – Apostila Didática**. Uberlândia: Laboratório de Vibração e Acústica, FEMEC – Universidade Federal de Uberlândia, 2005.

EDWARDS, R. **Cutting Tools**. Londres: The Institute of Materials, 1993. 130-152p. ISBN 0-901716-48-0.

FARRELLY, F.A.; PETRI, A.; PITOLLI, L. Statistical properties of acoustic emission signals from metal cutting processes. **Journal of the Acoustical Society of America**. Vol. 116, 2 ed., p. 981-986, 2004.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 751p. ISBN 85-212-0257-1.

FAUSETT, L. **Fundamentals of Neural Networks: Architectures, Algorithms and Applications**. EUA: Prentice Hall, 1993. 461 p. ISBN-10: 0133341860. ISBN-13: 978-0133341867.

GADELMAWLA, E.S.; KOURA, M.M.; MAKSOUD, T.M.A.; ELEVA, I.M.; SOLIMAN, H.H. Roughness Parameters. **Journal of Materials Processing Technology**. Vol. 123, p. 133-145, 2002.

GHANI, A.K.; CHOUDHURY, I.A.; HUSNI. Study of tool life, surface roughness and vibration in machining nodular cast iron with ceramic tool. **Journal of Materials Processing Technology**. Vol. 37, 1 ed., p. 11-22, 2002.

HANCHI, J.; KLAMECKI, B.E. Acoustic emission monitoring of the wear process. **Wear**. Vol. 145, 1 ed., p. 1-27, 1991.

INASAKI, I. Application of acoustic emission sensor for monitoring machining processes. **Ultrasonics**. Vol. 36, 1-5 ed., p. 273-281, 1998.

ISO 3685. **Tool-life Testing with single-point turning tools.** 1993-11-15.

ISO 8688-1. **Tool Life Testing in Milling – Part 1: Face Milling.** 1993-05-01.

ISO 8688-2. **Tool Life Testing in Milling – Part 2: End Milling.** 1993-05-01.

JEMIELNIAK, K.; ARRAZOLA, P.J. Application of AE and cutting force signals in tool condition monitoring in micro-milling. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology.** Vol. 1, 2 ed., p. 97-102, 2008.

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 and Manufacture.** Vol. 46, 2 ed., p. 176-188, 2006.

LENZ, D.E.; MAYER, J.E.; LEE, D.G. Investigation in drilling. **Anais... CIRP.** Vol. 27, 1 ed., p.49-53, 1978.

LI, X. A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** Vol. 42, 2 ed., p. 157-165, 2002.

LI, W.; LI, D.; NI, J. Diagnosis of tapping process using spindle motor current. **International Journal of Machine Tools & Manufacture.** Vol. 43, p. 73-79, 2003.

LIN, S.C.; LIN, R.J. Tool wear monitoring in face milling using force signals. **Wear.** Vol. 198, 1-2 ed., p. 136-142, 1996.

MACHADO, A.R. Condições da interface cavaco-ferramenta Parte I: Generalidades. **Anais... XI COBEM,** São Paulo, p. 381-384, 1991.

MACHADO, A.R.; DA SILVA, M.B. **Usinagem dos Metais - Apostila Didática.** Uberlândia: Edufu (Editora UFU), 2004. 257p.

MAJUMDAR, P.; JAYARAMACHANDRAN, R.; GANESAN, S. Finite element analysis of temperature rise in metal cutting process. **Applied Thermal Engineering**. Vol. 25, 14-15 ed., p. 2152-2168, 2005.

MARINESCU, I.; AXINTE, D.A. A critical analysis of effectiveness of acoustic emission signals to detect tool and workpiece malfunctions in milling operations. **Journal of Machine Tools & Manufacture**. Vol. 48, 10 ed., p. 1148-1160, 2008.

MARINESCU, I.; AXINTE, D.A. A time-frequency acoustic emission-based monitoring technique to identify workpiece surface malfunctions in milling with multiple teeth cutting simultaneously. **Journal of Machine Tools & Manufacture**. Vol. 49, 1 ed., p. 53-65, 2009.

MATHEW, M.T.; PAI, P.S.; ROCHA, L.A. An effective sensor for tool wear monitoring in face milling: Acoustic emission. **Sādhanā**. Vol. 33, 3 ed., p. 227-233, 2008.

MASTERS, T. **Advanced Algorithms for Neural networks: A C++ Sourcebook**. John Willey and Sons, 1995. ISBN: 0-471-10588-0.

McGIBBON, P.; BORDEN, P. Manufacturing technology consumption down in 2009. **AMTonline**, Estados Unidos, out. 2009. Seção AMT Press Room. Disponível em: <[http://www.amtonline.org/article\\_display.cfm?article\\_id=156667&section\\_id=100](http://www.amtonline.org/article_display.cfm?article_id=156667&section_id=100)>. Acesso em: 13 out. 2009.

MEOLA, T. **Monitoramento em tempo real da qualidade de sinais de vibrações utilizando inteligência artificial**. 2005. 118 f. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MESQUITA, R. A.; BARBOSA, C. A. Aços para ferramentas, moldes e matrizes. **Siderurgia Brasil**. 23 ed., 2005.

METALS HANDBOOK. **Machining**. Estados Unidos: ASM International, 1989. Volume 16. 944p. ISBN 10: 0-87170-022-0. ISBN 13: 978-0-87170-022-3.

MOTA, P.R. **Investigação do comportamento de ferramentas de aço-rápido no processo de rosqueamento interno em alta velocidade de corte.** 2006. 142 f. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

NAVES, V.T.G. **Estudo da Usinabilidade dos Ferros Fundidos Cinzentos Ligados (CrCuSn e CrCuSnMo) e Vemircular Classe 350 no Fresamento Frontal em Alta Velocidade de Corte.** 2009. 145 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

PALMAI, Z. Cutting temperature in intermittent cutting. **International Journal of Machine Tools & Manufacture.** Vol. 27, 2 ed., p.261-274, 1987.

PEKELHARING, A.J. Cutting tool damage in interrupted cutting. **Wear.** Vol. 62, 1 ed., p.37-48, 1980.

PEKELHARING, A.J. The exit failure of cemented carbide face milling cutters Part I – fundamentals and phenomenae. **Anais... CIRP – Manufacturing Technology.** Vol. 33, 1 ed., p.47-50, 1984.

PIGARI, A.C. **Monitoramento do Desgaste de Ferramenta no Processo de Torneamento Usando Emissão Acústica.** 1995. 130 f. Dissertação de Mestrado – Universidade de Campinas/UNICAMP, Campinas.

PRICKETT, P.W.; JOHNS, C. An overview of approaches to end milling tool monitoring. **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** Vol. 39, 1 ed., p. 105-122, 1999.

RAMOS, C.A.D. **Usinabilidade de aços inoxidáveis para matrizes ABNT420 e VP80 no fresamento de topo usando superfícies de resposta.** 2004. 233 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RANGWALA, S.; DORNFELD, D. A study of acoustic emission generated during orthogonal metal cutting – 1: Energy analysis. **International Journal of Mechanical Sciences.** Vol. 33, 6 ed., p. 471-487, 1991.

RAVINDRA, H.V.; SRINIVASA Y.G.; KRISHNAMURTHY, R. Acoustic emission for tool condition monitoring in metal cutting. **Wear**. Vol. 212, 1 ed., p. 78-84, nov. 1997.

ROSSI, G.C. **Estudo das forças de corte no processo de fresamento de bordas de chapas utilizadas para a fabricação de tubos de aço com costura**. 2007. 129 f. Dissertação de mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

SAID, M.B.; SAÏ, K.; SAÏ, W.B. An investigation of cutting forces in machining with worn ball-end mill. **Journal of Materials Processing Technology**. Vol. 29, 7 ed., p. 3198-3217, 2009.

SANDVIK COROMANT. **Manual de fresamento**. Sandvik, sem data.

SANDVIK COROMANT. **Catálogo Principal – Fresamento**. Sandvik, 2009.

SHAW, M.C. **Metal Cutting Principles**. Nova Iorque: Oxford University Press, 1984. 594p. ISBN 0-19-859002-4.

SHAO, H.; WANG, H.L.; ZHAO, X.M. A cutting power model for tool wear monitoring in milling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. Vol. 44, 14 ed., p. 1503-1509, 2004.

SHIH, A.J. Finite element analysis of orthogonal metal cutting mechanics. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. Vol. 36, 2 ed., p. 255-273, 1996.

SOUSA, M.M. **Utilizando a vibração mecânica para monitorar o desgaste das ferramentas de corte e o acabamento superficial no processo de fresamento**. 1998. 101 f. Tese de doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SOUTO, U.B. **Monitoramento do Desgaste de Ferramenta no Processo de Fresamento Via Emissão Acústica**. 2007. 182 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SUAREZ, M.P. **Fresamento de Canais da Liga de Alumínio Aeronáutico 7075-T7**. 2008. 111 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

TAY, A.A.O. A review of methods of calculating machining temperature. **Journal of Materials Processing Technology**. Vol. 36, 3 ed., p. 225-257, 1993.

TODD, R.H.; ALLEN, K.; ALTING, L. **Manufacturing processes reference guide**. Nova lorque: Industrial Press Inc., 1994. p.49-53. ISBN: 0-8311-3049-0.

TÖNSHOFF, H.K.; WULFSBERG, J.P.; KALS, H.J.J., KÖNIG, W.; VAN LUTTERVELT, C.A. Developments and trends in monitoring and control of machining processes. **Anais... CIRP**. Vol. 37, 2 ed., p. 611-622, 1988.

TRENT, E.M.; WRIGHT, P.K. **Metal Cutting**. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000. 446p. ISBN-13: 978-0-7506-7069-2. ISBN-10: 0-7506-7069-X.

TREZONA, R.I.; ALLSOPP, D.N.; HUTCHINGS, I.M. Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test. **Wear**. Vol. 225-229, parte 1, p. 205-214, 1999.

UEDA, T.; HOSOKAWA, A.; ODA, K.; YAMADA, K. Temperature on flank face of cutting tool in high speed milling. **Anais... CIRP – Manufacturing Technology**. Vol. 50, 1 ed., p. 37-40, 2001.

VAN LUTTERVELT, C.A.; WILLEMSE, H.R.; PEKELHARING, A.J. The exit failure of cemented carbide face milling cutters Part II – testing of comercial cutters. **Anais... CIRP – Manufacturing Technology**. Vol. 33, 1 ed., p.51-54, 1984.

WALSH, R.A.; CORMIER, D.; **Machining and Metalworking Handbook**. Nova lorque: McGraw-Hill, 2006. ISBN 0-07-145787-9.

WANIGARATHNE, P.C.; KARDEKAR, A.D.; DILLON, O.W.; POULACHON, G.; JAWAHIR, I.S. Progressive tool-wear in machining with coated gooved tools and its correlation with cutting temperature. **Wear**. Vol. 259, 7-12 ed., p. 1215-1224, 2005.

ZUM GAHR, K.H. **Microstructure and wear of materials**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1987. p. 93-99. ISBN 0-444-41677-3.

# 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](#)