

**UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CAMILA ALVES DA ROCHA**

**MONITORAMENTO DA CONDIÇÃO DA FERRAMENTA DE DRESSAGEM  
USANDO SINAIS DE VIBRAÇÃO E MODELOS NEURAI**

**Bauru**

**2015**

**CAMILA ALVES DA ROCHA**

**MONITORAMENTO DA CONDIÇÃO DA FERRAMENTA DE DRESSAGEM  
USANDO SINAIS DE VIBRAÇÃO E MODELOS NEURAI**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Bauru, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar**

**Bauru**

**2015**

Rocha, Camila Alves da

Monitoramento da condição da ferramenta de dressagem usando sinais de vibração e modelos neurais/ Camila Alves da Rocha, 2015

81 f.

Orientador: Paulo Roberto de Aguiar

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2015

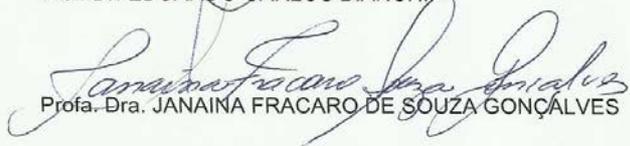
1. Operação de dressagem. 2. Vibração. 3. Redes neurais artificiais. 4. Perceptron de múltiplas camadas. 5. Desgaste de dressadores. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de CAMILA ALVES DA ROCHA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.**

Aos 25 dias do mês de novembro do ano de 2014, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia de Bauru, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Profa. Dra. JANAINA FRACARO DE SOUZA GONÇALVES do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de CAMILA ALVES DA ROCHA, intitulada "MONITORAMENTO DA CONDIÇÃO DA FERRAMENTA DE DRESSAGEM USANDO SINAIS DE VIBRAÇÃO E MODELOS NEURAIIS". Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: Aprovada. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

  
Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR

  
Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI

  
Profa. Dra. JANAINA FRACARO DE SOUZA GONÇALVES

**Dedico à minha família.**

## **AGRADECIMENTOS**

**Ao que é Eterno, pois, sem sua direção e proteção, eu nem mesmo viveria.**

**Aos meus pais, Romilda Alves da Silva e Gilson Tristão da Rocha Filho.**

**Ao meu marido Edson Roberto Fernandes Diogo e a todos os familiares que me apoiaram nesta caminhada.**

**Ao Professor Titular Paulo Roberto de Aguiar pela oportunidade e privilégio de ter trabalhado com ele.**

**Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica, da Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, pelo conhecimento transmitido.**

**Aos meus companheiros de trabalho Rafael Sodário, Rubens V. C. P. Souza e Marcelo Marchi pela ajuda e companheirismo.**

**A todos os meus amigos que me acompanharam nesta jornada.**

"A ciência humana de maneira nenhuma nega a existência de Deus. Quando considero quantas e quão maravilhosas coisas o homem compreende, pesquisa e consegue realizar, então reconheço claramente que o espírito humano é obra de Deus, e a mais notável".

Galileu Galilei

## RESUMO

O monitoramento em tempo real do processo de dressagem vem se tornando cada vez mais necessário, pois tem um papel muito importante no acabamento de peças produzidas pelo processo de retificação. Por outro lado, o desgaste dos dressadores é muito custoso e pouco eficiente para ser monitorado visualmente, como normalmente é feito nas indústrias. O sensor de vibração é uma grande ferramenta na automação desse processo, porém ainda é pouco utilizado, como se constata na literatura. Este trabalho apresenta um método de classificação do desgaste da ferramenta de dressagem de ponta única em três condições distintas (novo, meia-vida e desgastado), por meio de sinais de vibração e redes neurais. Ensaios de dressagens foram realizados em uma retificadora plana tangencial, rebolo de óxido de alumínio, com a aquisição dos sinais de vibração por meio de um sensor fixo no suporte do dressador. Um estudo foi desenvolvido do espectro do sinal para as três condições de desgaste, no qual sete bandas de frequências foram selecionadas. Vários modelos neurais foram testados, os quais possuíam como entradas duas estatísticas obtidas a partir do sinal original filtrado para uma dada banda de frequência selecionada. Após centenas de combinações de entradas, número de camadas ocultas e número de neurônios, dois melhores modelos foram escolhidos e analisados, os quais apresentaram resultados com até 98,3 % de taxa de acertos.

**Palavras-chave:** operação de dressagem, vibração, redes neurais artificiais, perceptron de múltiplas camadas, desgaste de dressadores.

## ABSTRACT

Real time monitoring of the dressing process is becoming more and more necessary because it plays a very important role in the finish of the part manufactured by the grinding process. On the other hand, dresser wear is very expensive and not much effective to be monitored visually, but it is usually so developed in industry. The vibration sensor can be a useful tool in the process automation; however, it is rarely used as can be verified in research works. This work presents a classification method for three wear conditions (new, semi- new, and worn) of single- point dresser by using vibration signal and neural networks. Experimental runs were carried out in a surface grinding machine equipped with aluminium oxide grinding wheel, where the vibration signal was acquired by a fixed sensor attached to the dresser holder. The signal spectra analysis was performed with regard to the aforementioned wear conditions, and seven frequency bands were selected. Several neural network models were tested, which had two input statistics from the digital processing of the raw signal filtered for a given frequency band selected. Following hundreds of input combinations, number of hidden layers and neurons, two best models were chosen and analyzed, which showed results with up to 98.3%, success rate.

**Key words:** dressing operation, vibration, neural network, multilayer perceptron, dresser wear.

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	ii
RESUMO .....	i
ABSTRACT .....	ii
LISTA DE TABELAS .....	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	viii
CAPÍTULO 1- Introdução, Objetivos e Publicações .....	1
1.1 Introdução .....	1
1.2 Objetivo .....	2
1.3 Publicações Relacionadas .....	2
CAPITULO 2-REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1 O Processo de Retificação .....	3
2.1.1 Parâmetros na retificação Tangencial plana .....	4
2.1.2 Forças de corte no processo de retificação .....	7
2.1.3 Potência na retificação .....	8
2.1.4 rugosidade das peças retificadas .....	8
2.2 Rebolo .....	9
2.2.1 Grãos abrasivos .....	9
2.2.2 Ligantes .....	10
2.2.3 Dureza .....	11
2.2.4 Estrutura .....	12
2.2.5 Lubrificação .....	12
2.3 A Operação de Dressagem .....	13
2.3.1 Dressagem e Topografia .....	14
2.3.2 Dressador de ponta única .....	14
2.4 Diamantes para Dressadores .....	17
2.5 Monitoramento do desgaste do dressador .....	18
2.6 Vibração .....	21
2.7 Processamento de Sinais .....	25
2.7.1 Valor Eficaz de um Sinal (RMS) .....	26
2.7.2 Taxa de potência de um Sinal (ROP) .....	27
2.7.3 Transformada e transformada Discreta de Fourier (DFT) .....	27
2.7.4 Média e Desvio Padrão .....	29
2.8 Redes Neurais Artificiais (RNA) .....	30
2.8.1 Rede Neural <i>Perceptron</i> de Múltiplas Camadas .....	33
Capitulo 3- Materiais e Métodos .....	36
3.1 Montagem do Banco de Ensaios .....	36
3.1.1 Configuração dos Parâmetros de Dressagem .....	37

3.1.2 Sistema de Aquisição de Imagens .....	37
3.1.3 Sistema de Aquisição de Dados.....	38
3.2 Procedimentos dos Ensaios .....	38
3.3 processamento do Sinal de Vibração.....	39
3.4 Modelo Neural.....	40
3.4.1 Treinamento dos Modelos Neurais.....	40
Capítulo 4 - Resultados e Discussões .....	43
4.1 Desgaste do Diamante .....	43
4.1.1 Diamante CVD .....	43
4.2 Processamento do Sinal de Vibração.....	48
4.2.1 Análise do Valor Médio RMS .....	48
4.2.2 Estudo do Espectro de Frequência do Sinal de VIBRAÇÃO.....	49
4.3 Modelos Neurais.....	51
4.3.1 Resultados dos modelos neurais e discussão .....	51
4.3.2 comparação dos resultados com os de martins (2013).....	58
CAPÍTULO 5 .....	62
Referências Bibliográficas.....	63

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Operações básicas na retificação .....	4
Figura 2 - Esquema dos parâmetros: velocidade do rebolo $V_s$ ; velocidade da peça $V_w$ ; profundidade de corte $a$ ; comprimento de contato $l_c$ .....	5
Figura 3 - Componentes de força para retificação tangencial plana, adaptado .....	7
Figura 4 – Especificação de rebolo convencional .....	11
Figura 5 - Configuração do dressador de ponta única .....	15
Figura 6 - Representação esquemática do processo de dressagem.....	16
Figura 7 - Diagrama do sistema de monitoramento .....	18
Figura 8 - Definição de ponta ativa .....	19
Figura 9 - Banco de ensaio .....	20
Figura 10 - <i>Wavelet packet decomposition no Matlab</i> .....	20
Figura 11 –Relação entre o deslocamento, velocidade e aceleração .....	22
Figura 12 – Esquema de transdutor piezométrico .....	24
Figura 13 - Elementos básicos de processamento de sinal digital.....	26
Figura 14 - Modelo de neurônio biológico .....	31
Figura 15 - Modelo do neurônio artificial .....	32
Figura 16 - Exemplo de uma rede MLP .....	34
Figura 17 - Esquema da montagem do banco de ensaios .....	37
Figura 18 – Fluxograma do algoritmo de teste dos modelos neurais .....	42
Figura 19 - Área lateral desgasta por quantidade de passadas para o diamante CVD, para vista lateral.....	46
Figura 20 - Área desgasta por quantidade de passadas para o diamante CVD, para vista frontal.....	48
Figura 21 – (a) sinal puro, (b) sinal RMS.....	49
Figura 22- Espectro de frequência dos três níveis de desgaste do dressador CVD.....	50
Figura 23- Estrutura de modelo neural .....	51
Figura 24 - Matriz de confusão Modelo 1 .....	53
Figura 25- Região de fronteira Modelo 1 .....	54
Figura 26 - Matriz de confusão modelo 2 .....	56
Figura 27 - Região de fronteiras Modelo 2 .....	57
Figura 28 - Resultados Modelo 7. (a) Matriz de confusão; (b) Regiões de classificação .....	58

Figura 29 - Resultados Modelo10. (a) Matriz de confusão; (b) Regiões de classificação

.....59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de dressagem usados no ensaio .....	37
Tabela 2 – Parâmetros de treinamento .....	41
Tabela 3 - Área desgastada média do diamante CVD, para vista lateral.....	43
Tabela 4 - Imagens de referência para o cálculo da área lateral desgastada do diamante CVD, para vista lateral .....	44
Tabela 5 - Área frontal desgastada média do diamante CVD, para vista frontal .....	46
Tabela 6 - Imagens de referência para o cálculo da área frontal desgastada do diamante CVD, para vista frontal.....	47
Tabela 7 - Bandas de frequência consideradas para estudo.....	50
Tabela 8 - Rede MLP com estatística RMS, Modelo 1 .....	52
Tabela 9 - Rede MLP com estatística ROP, Modelo 2.....	52
Tabela 10 - Parâmetros dos modelos neurais Grupo 2 –RMS.....	58
Tabela 11 - Parâmetros dos modelos neurais Grupo 2 –ROP .....	59
Tabela 12 - Resumo dos modelos 1 e 7 com estatística RMS.....	60
Tabela 13- Resumo dos modelos 2 e 10 com estatística ROP .....	60

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>a</i> : profundidade de corte	$\mu\text{m}$
<i>V<sub>S</sub></i> : velocidade de corte	$\text{m/s}$
<i>V<sub>W</sub></i> : velocidade da peça	$\text{mm/s}$
<i>l<sub>C</sub></i> : comprimento de contato	$\text{mm}$
<i>Q'<sub>W</sub></i> : taxa específica de remoção de material	$\text{mm}^3/\text{mm}^*s$
<i>h<sub>eq</sub></i> : espessura equivalente de corte	$\mu\text{m}$
<i>F<sub>t</sub></i> : força tangencial de corte	$\text{N}$
<i>P</i> : potência	$\text{W}$
<i>s<sub>d</sub></i> : avanço de dressagem	$\text{mm/Volta}$
<i>v<sub>d</sub></i> : velocidade de dressagem	$\text{mm/s}$
<i>b<sub>d</sub></i> : largura útil do dressador	$\mu\text{m}$
<i>U<sub>d</sub></i> : grau de recobrimento	
$\sigma$ : desvio padrão	
$\bar{x}$ : média aritmética	
<i>RMS</i> : root mean square	
<i>ROP</i> : ratio of power	
<i>DFT</i> : transformada discreta de Fourier	
<i>FFT</i> : transformada rápida de Fourier	
<i>RNA</i> : rede neural artificial	
<i>MLP</i> : perceptron de múltiplas camadas	
<i>BF</i> : banda de frequência	
<i>N</i> : dressador novo	
<i>MV</i> : dressador com meia-vida	
<i>D</i> : dressador desgastado	

# CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO, OBJETIVOS E PUBLICAÇÕES

## 1.1 INTRODUÇÃO

A retificação é um processo de usinagem que utiliza um rebolo como ferramenta, a qual consiste em grãos abrasivos unidos por um material ligante. As arestas dos grãos da superfície do rebolo agem como ferramentas de microcorte que, de forma mais ou menos aleatória, entram em contato com o material a ser cortado (MALKIN 1989).

De acordo com Wegener (2011), o *slogan* usado pela comunidade do processo de retificação é “retificação é dressagem”, o que nos mostra a interdependência entre os dois processos, porém o número de pesquisas relacionadas ao estudo da identificação do desgaste do dressador ainda é pequeno.

Como o desgaste da ferramenta dressador influencia de forma negativa na qualidade do trabalho e a troca desse instrumento corresponde a cerca de 20% do tempo de máquina parada, tem crescido a atenção dada a esse problema. Nesse contexto, realizar o monitoramento do desgaste da ferramenta é importante para se obter um processo mais confiável e menos oneroso (LIANG et al. 2004).

A maior parte das técnicas existentes para monitorar o desgaste do dressador é baseada em métodos ópticos. Habrat (2005) propôs um sistema de monitoramento óptico para a obtenção de um modelo do desgaste de dressadores. Contudo, esses métodos são muito sensíveis ao ambiente, principalmente ao fluido de corte, de modo que não são viáveis para um sistema de monitoramento em tempo real (ENGAÑA et al. 2006).

O trabalho de Martins (2013) apresentou um método de estimação do nível de desgaste de dressadores de ponta única, baseado nos valores RMS (*Root Mean Square*) e ROP (*Ratio of Power*) do sinal de emissão acústica, os quais foram extraídos de bandas de frequência pré-selecionadas. Esses valores foram empregados como entrada de modelos neurais.

O presente trabalho é uma extensão do trabalho de Martins (2013b), propondo modelos neurais baseados também nos valores RMS e ROP para estimação do nível de desgaste do dressador.

## **1.2 OBJETIVO**

O presente trabalho tem como objetivo ser uma extensão do trabalho de Martins (2013b), propondo modelos neurais baseados também nos valores RMS e ROP para estimação do nível de desgaste do dressador. Entretanto, as bandas selecionadas são de sinais provenientes de sensores de vibração que, por serem mais baratos e de mais fácil implementação em hardware, oferecem uma alternativa muito boa aos sensores de emissão acústica.

## **1.3 PUBLICAÇÕES RELACIONADAS**

- SOUZA, V.C.P. RUBENS, ROCHA, A. CAMILA, MARCHI, M., AGUIAR, P. R., MARTINS, C. H. R., BIANCHI, E. C, Monitoramento da condição de dressagem usando sinais de vibração e modelos neurais. XX CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, BELO HORIZONTE, MG, 2014, v.1, p. 1026-1033.
- MIRANDA, H.I., ROCHA, A. CAMILA, OLIVEIRA Jr, P., AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C, Monitoring single-point dressers using fuzzy models. 9th CIRP CONFERENCE ON INTELLIGENT COMPUTATION IN MANUFACTURING ENGINEERING – CIRP ICME14, 2014. v.1., p 1-6.

## CAPITULO 2-REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 O PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Dentre os processos de usinagem, nome genérico dado ao processo de remoção de material, está o processo de retificação (SALMON 1992). Este consiste na utilização de um rebolo, formado por grãos abrasivos fixados por ligantes e contendo poros, com o rebolo rotacionando a uma alta velocidade de corte para a remoção de material (MARINESCU 2007).

Diferente de outros processos, tais como torneamento e fresamento, a retificação se utiliza de uma ferramenta de corte não definido; isso se deve ao fato dos grãos abrasivos não apresentarem arestas de corte regulares. Dessa forma, vários fatores podem afetar o resultado do processo (KWAK & HA 2004) (REN et al. 2009).

Processos de retificação são utilizados comumente para produzir peças de alta qualidade, alta precisão e tolerâncias apertadas. Por exemplo, medidas em peças longas, peças deslizantes, agulhas, componentes eletrônicos, *wafes* de silicone e rolamentos (MARINESCU 2007).

Segundo Diniz (2003), as principais características relacionadas à retificação são: peças com tolerâncias apertadas, baixa rugosidade e baixa remoção de cavacos. Ele ainda nos diz que o processo de retificação requer bastante atenção, pois se a peça for danificada nessa operação, todo o custo acumulado nas operações anteriores, como torneamento e fresamento, não poderá ser recuperado.

A figura 1 apresenta as quatro operações básicas da retificação: a retificação tangencial plana, a retificação tangencial cilíndrica, a retificação lateral plana e a retificação lateral cilíndrica. As operações de retificação são classificadas de acordo com a superfície do rebolo em contato com a peça e com o avanço do rebolo. De acordo com a forma geométrica das superfícies obtidas, são divididas em cilíndrica externa, cilíndrica interna, plana e plana rotativa. Conforme o movimento de avanço, elas são divididas em tangencial de mergulho, tangencial de passagem, lateral (ou de face) de mergulho e lateral de passagem. Na prática, a gama de possibilidades de processos de retificação é grande e inclui uma variedade de operações de geração de perfil, cópia de perfil, corte e ranhuras (MARINESCU 2007) (SCHUHLLI 2007).

Neste trabalho, será dada ênfase ao processo de retificação tangencial plana.

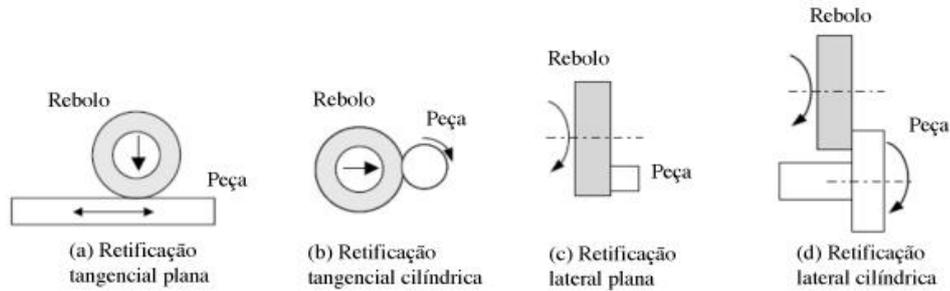


Figura 1 - Operações básicas na retificação Adaptado (MARINESCU, et al., 2007)

### 2.1.1 PARÂMETROS NA RETIFICAÇÃO TANGENCIAL PLANA

A interação rebolo-peça no processo de retificação, tipicamente possui os seguintes parâmetros de entrada: taxa de remoção, velocidade de corte do rebolo e da peça, agressividade e tempo de centelhamento (*spark-out*) (KING & HAHN 1992).

Os principais parâmetros a serem considerados na retificação plana tangencial são:

- **profundidade de corte ( $a$ ):** pode ser definida como a penetração do rebolo na peça que está sendo retificada. É medida como sendo a espessura equivalente de material removido por passagem do rebolo na peça (MARINESCU 2007). Corresponde a grandeza -  $a$  [ $\mu\text{m}$ ] - que é tomada perpendicularmente à direção de avanço da peça ou do rebolo (DINIZ et al. 2003);
- **velocidade de corte ( $v_s$ ):** quando a velocidade de corte é elevada, um mesmo grão abrasivo passa a remover um menor volume de cavacos pelo aumento da sua frequência de contato com a peça. Portanto, a espessura do cavaco removido é menor, diminuindo as forças de corte, rugosidade da peça e desgaste do rebolo pela menor solicitação de cada grão. Em contrapartida, devido ao aumento da intensidade de contato dos grãos com a peça, ocorre uma elevação da temperatura que pode ocasionar um dano térmico na peça (BIANCHI et al. 1997). O deslocamento de um ponto sobre a superfície de corte do rebolo, por exemplo, um grão, por uma variação de tempo determina a sua velocidade de corte ou velocidade periférica do rebolo. A partir dessa velocidade, pode-se determinar a vida do rebolo, já que ela implica diretamente

na alteração da capacidade de remoção dos grãos abrasivos e no acabamento das peças (MALKIN 1989).

A velocidade de corte pode ser expressa pela equação 1 (GRAF 2004)

$$v_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad [m/s] \quad (1)$$

onde:

$d_s$  [mm] é o diâmetro externo do rebolo;

$n_s$  [rpm] a rotação do rebolo.

- **Velocidade da peça ( $v_w$ ):** na retificação plana, a velocidade da peça é coincidente com a velocidade da mesa, sendo normalmente expressa em mm por minuto (MARINESCU 2007). Essa velocidade está relacionada aos impactos que os grãos abrasivos provocam na peça (BIANCHI et al. 1997).
- **Comprimento de contato ( $l_c$ ):** pode ser definido como a extensão de contato entre a peça e o rebolo (MALKIN 1989) (MARINESCU, et al., 2004), conforme ilustrado na figura 2.

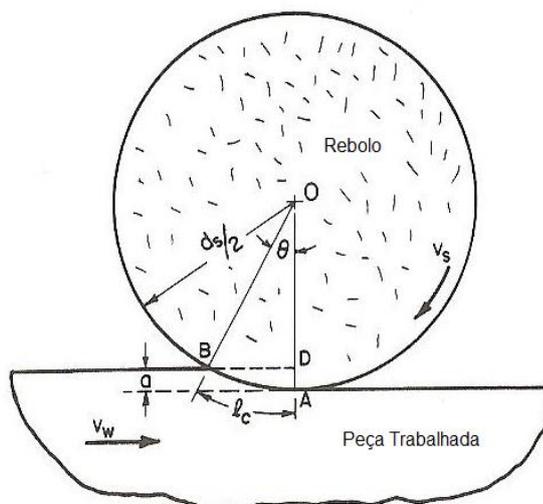


Figura 2 - Esquema dos parâmetros: velocidade do rebolo  $V_s$ ; velocidade da peça  $V_w$ ; profundidade de corte  $a$ ; comprimento de contato  $l_c$ . Adaptado (MALKIN, 1989)

De acordo com (MALKIN 1989), o comprimento de contato pode ser definido pela equação 2. Porém, esta equação não considera os movimentos e possíveis deformações decorrentes do contato rebolo-peça. Dessa forma, ela descreve apenas uma suposta área de contato.

$$l_c = (a \cdot d_s)^{\frac{1}{2}} [\mu m] \quad (2)$$

Onde:

$a$  [ $\mu m$ ] é a profundidade de corte;

$d_s$  [mm] é o diâmetro externo do rebolo.

- **Taxa de remoção de material ( $Q_w$ ):** relaciona profundidade de corte ( $a$ ) a velocidade relativa entre a peça, o rebolo ( $v_w$ ) e a largura de retificação ( $b$ ), conforme equação 3 (MALKIN 1989):

$$Q_w = a \cdot v_w \cdot b \quad (3)$$

Ainda segundo (MALKIN 1989), existe a taxa específica de remoção ( $Q'_w$ ) que corresponde à taxa de remoção de material dividida pela largura de retificação dada pela equação 4:

$$Q'_w = a \cdot v_w [mm/s]; \quad (4)$$

- **Espessura equivalente ( $h_{eq}$ ):** a espessura equivalente de corte é a espessura de material removido pelo rebolo com a velocidade de corte deste, a qual é demonstrada na equação 5. Corresponde à razão entre a taxa específica de remoção de material ( $Q'_w$ ) e a velocidade de corte ( $v_s$ ):

$$h_{eq} = \frac{Q'W}{v_s} = \frac{a \cdot v_w}{v_s} \quad (5)$$

### 2.1.2 FORÇAS DE CORTE NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Os esforços de corte no processo de retificação são gerados entre a interação do abrasivo e a peça, em forma de deformação plástica e elástica, pela formação do cavaco e pelo atrito entre abrasivo, ligante e peça (REN et al. 2009).

Geralmente essa força é decomposta em três componentes: normal ( $F_n$ ) [N]; tangencial ( $F_t$ ) [N] e uma componente ao longo da direção de avanço longitudinal (axial -  $F_a$ ) [N], que não possui muita significância. A força tangencial afeta principalmente o consumo de energia e o tempo de vida de serviço do rebolo. Assim, afeta também a temperatura e a rugosidade da peça usinada (LI 2002, *apud* MARTINS 2013). A figura 3 apresenta um esquema dessas forças na retificação plana.

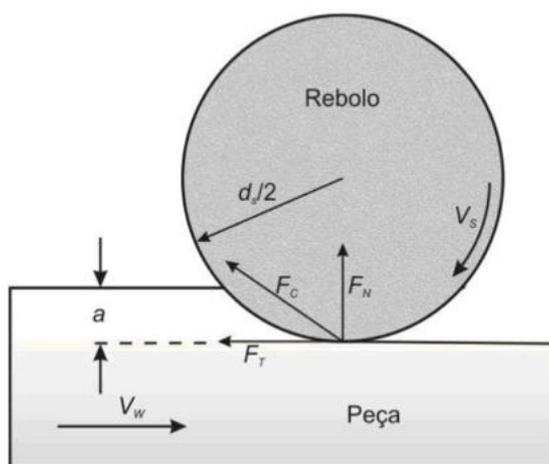


Figura 3 - Componentes de força para retificação tangencial plana, Adaptado (MALKIN, 1989)

A força normal atua perpendicularmente à superfície do rebolo e depende da dureza do grão abrasivo e do material a ser usinado. Esta é maior que a tangencial e age diretamente na redução da profundidade de corte, sendo também responsável por deflexões da peça, rebolo e estrutura da máquina. A componente axial só ganhará importância quando houver certo deslocamento lateral do rebolo (MARINESCU 2004).

A força tangencial de corte em um grão abrasivo é expressa pela equação (6):

$$F_t = b \cdot h_{max} \cdot K_S + \mu \cdot b^2 \cdot \pi \cdot \frac{K_n}{4} [N] \quad (6)$$

Onde:

$b$  [mm] largura média no topo dos grãos abrasivos;

$K_S$  [N/mm<sup>2</sup>] pressão específica de corte;

$\mu$  coeficiente de atrito entre grão e peça;

$K_n$  [N/mm<sup>2</sup>] tensão de escoamento do material.

### 2.1.3 POTÊNCIA NA RETIFICAÇÃO

A potência de retificação é associada à velocidade de corte ( $v_S$ ) e à velocidade da peça ( $v_W$ ), segundo a equação (6) (MALKIN 1989). A força tangencial ( $F_t$ ) é a componente da força de retificação, responsável pela dissipação de potência em situações de alta velocidade do rebolo (MARINESCU 2004), conforme a equação (7).

$$P = F_t \cdot (v_S \pm v_W) [W] \quad (7)$$

O sinal positivo indica que  $v_S$  e  $v_W$  têm direções opostas e o sinal negativo indica direções iguais.

### 2.1.4 RUGOSIDADE DAS PEÇAS RETIFICADAS

O acabamento superficial sofre influência de vários parâmetros de usinagem, incluindo: a geometria da ferramenta de corte, geometria da peça, rigidez da máquina-ferramenta, material da peça, condições de corte, material da ferramenta, dentre outros (FUSSE et al. 2004).

Um método eficiente de se mensurar a qualidade da superfície produzida é por meio da rugosidade. Esta pode ser definida como micro-irregularidades geométricas decorrentes do processo de fabricação. A medição é feita em função da distância entre picos e vales existentes na superfície produzida. Assim, podemos destacar os principais parâmetros utilizados atualmente para obter a rugosidade: pela média dos valores dessa distância

(parâmetro  $Ra$ ), pelo valor quadrático médio dessa distância (parâmetro  $Rq$ ) ou ainda pelo valor máximo da mesma (parâmetro  $Rt$ ) (LIANG et al. 2004).

## **2.2 REBOLO**

O rebolo é a ferramenta de revolução utilizada nos processos de retificação. O corpo abrasivo do rebolo é composto por grãos abrasivos unidos por um ligante. Esses grãos são responsáveis pela remoção de material por meio de suas arestas de corte de geometria indefinida. Pode-se considerar o rebolo como um sistema trifásico, sendo constituído por grãos abrasivos, aglomerante e poros. Desse modo, seu desempenho está relacionado com o tipo e tamanho do grão abrasivo, com as propriedades abrasivas do material e com a porosidade do conjunto (MALKIN 1989).

As características do rebolo variam de acordo com o tipo de material a ser usinado e a sensibilidade da integridade da superfície. A qualidade geométrica também deve ser levada em consideração na escolha de um sensor adequado (TONSHOFF et al. 2002).

### **2.2.1 GRÃOS ABRASIVOS**

Os grãos abrasivos usados nas operações de retificação são partículas refratárias duras e frágeis que podem ser classificadas de acordo com sua dureza ou composição química (LIAO et al. 2007).

A característica mais importante de um abrasivo é que este seja mais duro que o material a ser retificado. Casualmente, define-se essa dureza em termos resistência e indentação estática, obtidos por meio de um teste de dureza Knoop (MALKIN, 2008).

Segundo Diniz (2003), os grãos abrasivos podem ser naturais (quartzo, diamante, etc.) ou artificiais (óxido de alumínio, nitreto de boro cúbico, diamante policristalino, etc.), sendo estes utilizados para ferramentas de precisão. Os grãos podem ser grossos (não se exige boa qualidade superficial para remoção de grande volume de material, utilizado para materiais moles) ou finos (quando se deseja um bom acabamento superficial, para materiais duros ou quebradiços, manutenção de bordas e perfis de pequena dimensão).

Para rebolos convencionais, o tamanho do grão abrasivo é classificado por meio do método de peneiramento, sendo designado pelo número que corresponde à divisão linear da

área de uma polegada quadrada. Assim, quanto mais fino o grão, maior será o seu número na escala da granulometria (MALKIN, 2008).

As dimensões dos grãos e sua uniformidade são características importantes nos processos de usinagem com abrasivos. Grãos mais grossos são utilizados em rebolos para operações de corte e limpeza, enquanto os mais finos são utilizados para polimento e lapidação (TONSHOFF et al. 2002).

### **2.2.2 LIGANTES**

Os ligantes são responsáveis por unir os grãos abrasivos a uma ferramenta abrasiva (SALMON 1992), tendo como principais funções: reter o grão durante o processo de usinagem; desgastar-se numa taxa controlada; resistir à força centrífuga em altas velocidades e a de rapidamente expor o grão ao trabalho (WEBSTER, 2007).

Grãos abrasivos se mantêm unidos com vários tipos de materiais ligantes. Em geral, o ligante tem que ser forte o suficiente para suportar as forças de retificação, temperaturas e forças centrífugas, sem se desintegrar, enquanto resiste aos ataques químicos dos fluidos de corte. Outras exigências das ligas podem incluir rigidez do rebolo e a habilidade de reter o grão abrasivo durante o corte (MALKIN 1989).

De acordo com os sistemas de marcação, existem seis tipos gerais de material ligante para rebolos abrasivos convencionais: resinoide (incluindo reforçado); verniz; oxiclureto, borracha (incluindo reforçado), silicato e vitrificado. Os rebolos mais convencionais estão entre os ligantes vitrificados e o resinoide. Rebolos superabrasivos são produzidos com três tipos de ligantes: resinoide, vitrificado e metal (MALKIN 1989). O uso correto do ligante durante a fabricação dos rebolos tem como objetivo tornar a distribuição dos grãos sobre o rebolo o mais uniforme possível, beneficiando da melhor forma possível o processo de retificação (HEINZEL, *et al.*, 2009).

A especificação dos rebolos se dá com a utilização de códigos compostos por letras e números, conforme demonstrado na figura 4. O código é composto por sete itens. O primeiro deles é de uso opcional, representado por um número que indica o tipo de abrasivo. O segundo item é indicado por uma letra que mostra o tipo de abrasivo utilizado, podendo ser A (óxido de alumínio) ou C (carboneto de silício). No terceiro item, temos a granulometria representada por números que podem demonstrar de granulometria grossa até muito fina. O



já que a ancoragem dos grãos se mantém estável durante toda a vida do rebolo (KING, *et al.*, 1992).

#### **2.2.4 ESTRUTURA**

Uma propriedade adicional aos rebolos é sua estrutura: densidade de grãos e porosidade. Caso seja feita uma mistura de grãos muito finos com uma quantidade grande de ligante sob elevada pressão, resulta em baixa porosidade. Entretanto, se for utilizado grãos grossos, o resultado será uma estrutura mais aberta e, conseqüentemente, mais porosa. Para induzir a porosidade no rebolo, podem ser usados elementos voláteis durante o estágio verde, antes do forno (SALMON 1992).

Uma estrutura mais aberta de grãos, em geral, dá um acabamento mais grosseiro que uma estrutura mais fechada. Por outro lado, conforme os grãos abrasivos cortam a peça, deve-se procurar um meio de retirar os cavacos da zona de retificação. Os vazios da estrutura do rebolo fornecem o meio para rápida remoção do cavaco (DINIZ et al. 2003).

#### **2.2.5 LUBRIFICAÇÃO**

Durante o corte, desenvolve-se uma grande quantidade de calor, devido à energia necessária para deformação do cavaco e à energia devido ao atrito ferramenta-peça e cavaco-ferramenta. Esse calor gerado precisa ser reduzido e/ou extraído da ferramenta, principalmente a fim de minimizar o desgaste da ferramenta, a dilatação térmica da peça e o dano térmico à estrutura. Esse calor deve ser extraído da região de corte da peça e da ferramenta (refrigeração) para evitar seus efeitos danosos (DINIZ et al. 2003).

Os óleos possuem melhor poder lubrificante que a água, podendo, assim, reduzir a geração de calor devido ao atrito entre cavaco-ferramenta e ferramenta-peça, assegurando melhor acabamento final ao trabalho (DINIZ et al. 2003).

A maior parte dos fluidos para rebolos podem ser categorizados tanto como óleos de corte quanto como óleos solúveis. Óleos de corte para retificação são óleos minerais fluidos com adição de materiais gordurosos para lubrificação e umectação, além do acréscimo usual de enxofre e/ou cloro para aumentar a redução do desgaste. Óleos solúveis são fluidos a base

de água, contendo emulsões e numerosos outros ingredientes, os quais inclui-se: materiais gordurosos, sabão, enxofre e cloro para lubrificação, surfactantes para umedecimento e detergência, para prevenir formação de espuma, ferrugem, inibidores, condicionadores de água e germicidas (MALKIN 1989).

Para um fluido de rebolo ser efetivo como um lubrificante e refrigerante, ele precisa ser servido na quantidade suficiente na zona de retificação. Existem dois métodos de servir o óleo à retificação: baixa pressão (inundação) e alta pressão (jato) por meio de bocais (MORGAN et al. 2008).

Para retificação, menos vazão é necessária se o fluido é fornecido por meio de um bocal para garantir que a velocidade do jato seja mantida por meio da largura. Para um bocal usado geralmente em testes de fluidos, a distância é de aproximadamente 1,5 cm. A distância entre o bocal e o contato com o rebolo maior que 1,5 cm reduz o fluxo útil (MORGAN et al. 2008).

### **2.3 A OPERAÇÃO DE DRESSAGEM**

Quando o grão sofre atrito inerente ao processo, ele pode se fraturar e depois se desprender do rebolo, causando o desgaste ou simplesmente ter suas arestas arredondadas, causando a perda da afiação (DINIZ et al. 2003).

O rebolo nunca perde diâmetro numa forma homogênea, o que gera desvios na peça. Neste caso, mesmo que o rebolo ainda esteja bastante agressivo, ele precisa ser dressado para ser restituída sua forma original (DINIZ et al. 2003).

Dressagem consiste em uma operação de afiamento, concebida para gerar uma topografia particular na superfície de corte do rebolo (JACKSON et al. 2007).

A dressagem é realizada para se atingir um ou mais dos seguintes objetivos: devolver ao rebolo sua forma original e conferir agressividade (capacidade de corte) ao rebolo (DINIZ et al. 2003).

O mecanismo cinemático da operação de dressagem consiste em deslocar o dressador transversalmente ao rebolo em movimento de rotação. A penetração do dressador a uma determinada profundidade de dressagem ( $a_d$ ) implica uma largura de atuação de dressagem

( $b_d$ ) e esse valor pode ser determinado medindo-se a ponta do dressador (OLIVEIRA et al. 1992).

O ponto de dressagem da ferramenta abrasiva define o fim da vida de face de trabalho do rebolo. Se a dressagem for feita após o ponto de reafiação, poderão ser produzidas peças com queima superficial, trincas e rugosidade fora da especificada (OLIVEIRA et al. 1992).

### **2.3.1 DRESSAGEM E TOPOGRAFIA**

Segundo (LIN et al. 2008), a topografia do rebolo é caracterizada pelo número de arestas de corte, de modo que essa topografia tem influência sobre a geometria do cavaco produzido e no processo de retificação como um todo (SALEH et al. 2009).

A operação de dressagem provoca o corte e a fratura dos grãos abrasivos pelo dressador, além de gerar uma rosca na superfície do rebolo por onde passa o dressador (OLIVEIRA et al. 1992).

### **2.3.2 DRESSADOR DE PONTA ÚNICA**

O dressador de ponta única é a ferramenta de dressagem mais simples, sendo largamente utilizada nas operações de dressagem (SALMON 1992) (MARINESCU 2007). A operação de dressagem, realizada com um dressador de ponta única, também é conhecida por dressagem mecânica (HARINKAR et al. 2006).

O dressador de ponta única carrega um único diamante que deve formar um ângulo de ataque limpo em relação ao rebolo para que o processo de dressagem seja eficiente. Se o diamante estiver perpendicular ao rebolo durante a dressagem, ele será gasto rapidamente. Se o ângulo do diamante for igual ao da superfície do rebolo, a região de contato irá gerar muito calor, podendo danificar o diamante (SALMON 1992). O dressador de ponta única é usualmente instalado com um ângulo relativo entre a ferramenta e o rebolo de  $\alpha_d$  entre  $10^\circ$  e  $15^\circ$  (MALKIN 1989). A figura 5 ilustra o processo.

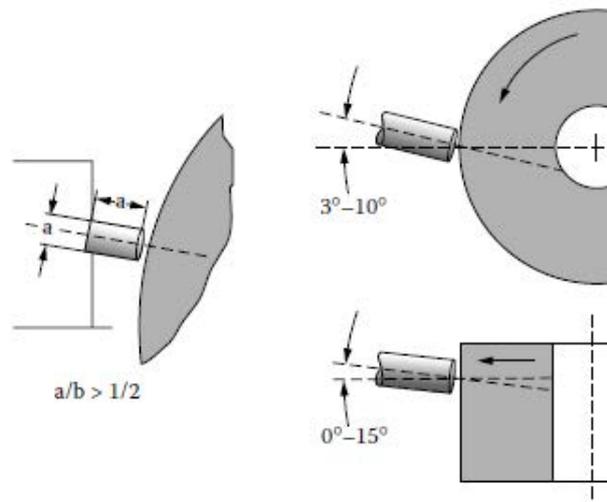


Figura 5 - Configuração do dressador de ponta única. Adaptado (MARINESCU 2007)

A operação de dressagem provoca o corte e a fratura dos grãos abrasivos pelo dressador, além de gerar uma rosca na superfície do rebolo por onde passa o dressador. (OLIVEIRA et al. 1992).

Segundo (MALKIN 1989), a operação de dressagem de ponta única produz dois efeitos na superfície do rebolo: o macroefeito e microefeito, definidos como:

- macroefeito: gerado a partir do formato do dressador, da profundidade de penetração deste e do passo de dressagem. Esse fenômeno determina a posição das novas arestas dos grãos abrasivos na superfície do rebolo.
- microefeito: gerado pelo arrancamento dos grãos gastos, isto é, com baixa ancoragem ao ligante e pela fratura dos grãos que não se desgastaram por completo, em que novas arestas de corte são geradas.

Na operação de dressagem de rebolos convencionais é usual que o dressador passe pelo rebolo rotacionado, como ilustrado na figura 6. Durante cada passada do dressador por meio do rebolo, é removida uma profundidade  $a_d$  do raio do rebolo. Esse tipo de movimento de dressagem é análogo ao de torneamento. O avanço axial do dressador por revolução é chamado de direção de dressagem,  $s_d$ , e é dado e pela equação (8).

$$s_d = \frac{\pi \cdot d_s \cdot v_d}{v_s} \quad (8)$$

Onde:

$v_d$  [mm/s] é a velocidade de dressagem;

$v_s$  [mm/s] é a velocidade de corte do rebolo;

$d_s$  [mm] é o diâmetro do rebolo;

$W_t$  ondulação teórica (macroefeito);

$a_d$  profundidade de dressagem.

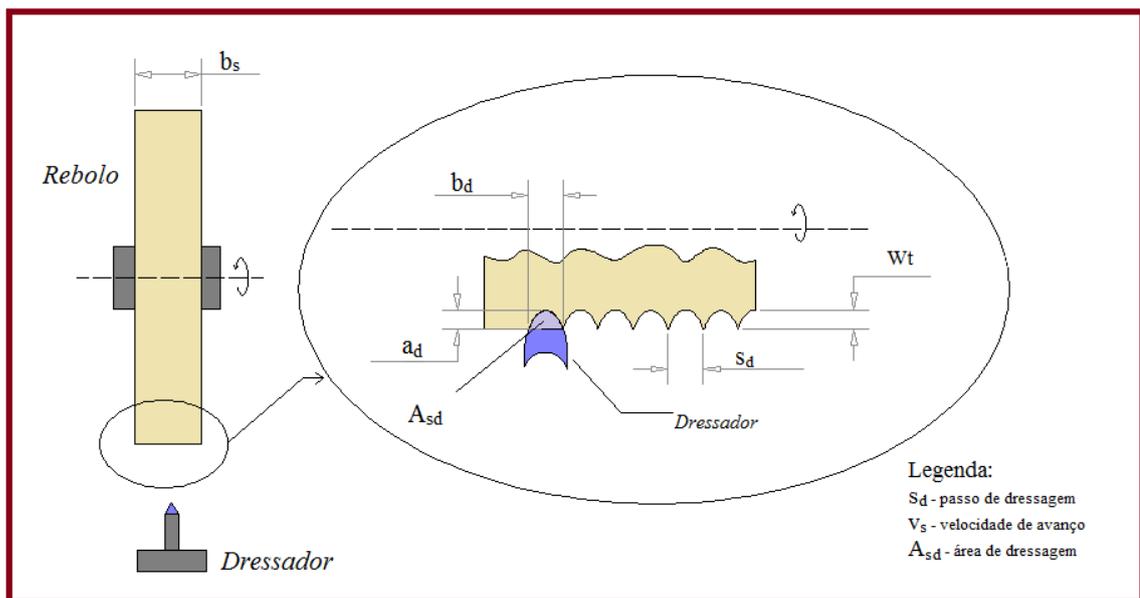


Figura 6 - Representação esquemática do processo de dressagem, adaptado (Adaptado de OLIVEIRA, et al., 1992)

O grau de recobrimento de dressagem ( $U_d$ ) é um parâmetro de dressagem importantíssimo que foi criado por (KÖNIG, et al., 1980, *apud* MARTINS 2013) com o objetivo de relacionar os parâmetros de dressagem e a topografia do rebolo gerada na operação. A definição do grau de recobrimento na dressagem com dressador de ponta única é a de determinar quantas vezes um ponto da superfície do rebolo é recoberto pela largura de atuação do dressador ( $b_d$  [mm]) pelo passo de dressagem ( $s_d$  [mm]) (MALKIN, 2008).

Quanto menor for o grau de recobrimento, não ultrapassando o valor mínimo de um, maior será a agressividade do rebolo. Uma alta agressividade no rebolo prejudica a qualidade superficial das peças retificadas, porém favorece a remoção de grandes quantidades de material. No contrário, quanto maior o grau de recobrimento, menor é a agressividade do rebolo (KÖNIG, et al., 1980, *apud* MARTINS 2013)

## 2.4 DIAMANTES PARA DRESSADORES

Além do aspecto estético do diamante em forma de pedras preciosas, ele é o material mais duro conhecido, de tal modo que está no topo da escala de Mohs. Devido a essa propriedade, os diamantes são usados em diversas aplicações tecnológicas, tais como: abrasão, corte e polimento. Dentre os materiais, o diamante é aquele que apresenta a maior condutividade térmica a temperatura ambiente, sendo quatro vezes superior a do cobre ou da prata, é um bom isolante elétrico, possui uma constante dielétrica pequena (KOIZUMI *et al.* 1997).

O grande interesse pela síntese de diamante é de replicar as propriedades físico-químicas do diamante natural de modo que o diamante sintético apresente elevada dureza, baixa densidade, baixo coeficiente de expansão térmica, alto índice de refração, alta condutividade térmica à temperatura ambiente, excelente isolante elétrica, inerte quimicamente, apresenta compatibilidade biológica e, quando dopado, torna-se um bom semicondutor. (ANGUS, 1995).

O diamante é o sólido de maior dureza, é ótimo condutor de calor, é um ótimo isolante elétrico, tem coeficiente de atrito muito baixo e tem alto índice de refração (BARANAUSKAS 2000).

Segundo (KOIZUMI *et al.* 1997), os diamantes possuem um coeficiente de desgaste e de expansão térmica pequeno, elevada resistência química e de corrosão para a maioria dos ácidos e substâncias oxidantes e é opticamente transparente.

Um dos mais importantes desenvolvimentos na obtenção de diamantes sintéticos foi a demonstração da viabilidade de sua fabricação por meio da deposição química a partir da fase vapor, técnica conhecida por sua sigla, em inglês, CVD (Chemical vapor deposition). Ela foi desenvolvida pioneiramente por pesquisadores da Ucrânia e depois confirmada por japoneses (BARANAUSKAS 2000).

Essa técnica envolve a deposição de átomos de carbono que originalmente vem da dissociação de um precursor de gás carbono sobre um substrato sólido. Esse substrato pode ser de diamante (natural ou sintético) ou um substrato de outro material (GRACIO *et al.* 2010).

Contudo, as propriedades mecânicas, elétricas e óticas das películas dos diamantes CVD se aproximam daquelas do diamante natural, mas ainda não de forma satisfatória (CALLISTER 2002).

## 2.5 MONITORAMENTO DO DESGASTE DO DRESSADOR

De acordo com (ISSAM 2003), a comunidade de manufatura sempre procura reduzir custos operacionais ao mesmo tempo que tenta melhorar a qualidade dos produtos, alcançando ou excedendo as expectativas dos clientes. Esses objetivos estão por trás da automação e de equipamentos de alta autonomia de produção. Nesse sentido, desenvolver sistemas de monitoração e controle em tempo real dos processos é essencial.

Existem poucos estudos sobre o monitoramento do desgaste da ferramenta dressador. Sendo assim, a literatura referente a essa temática se resume a poucos trabalhos, dentre eles assinalamos:

- Monitoring of the single-point diamond dresser wear (HABRAT *et al.* 2005)  
Habratt (2005) se utiliza de uma câmera analógica; um iluminador, utilizado no auxílio do contraste da imagem obtida pela câmera; uma placa de vídeo, cuja função era digitalizar a imagem e um computador, usado na leitura do processamento digital da imagem obtida. O esquemático do banco de ensaios pode ser visto na figura 7.

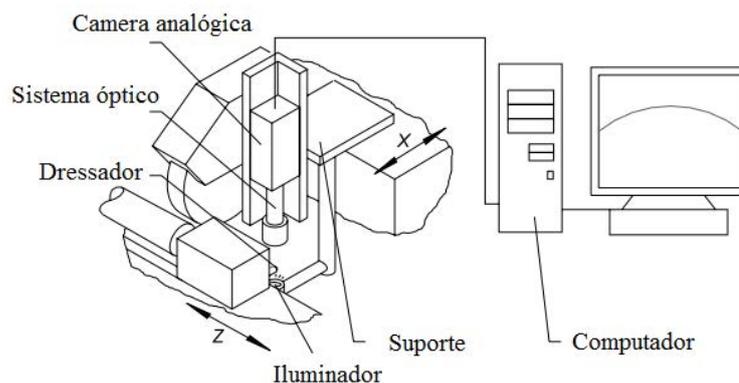


Figura 7 - Diagrama do sistema de monitoramento, adaptado (Adaptado de Habratt *et al.*, 2005)

Desenvolveu-se um programa de computador que analisava as imagens obtidas. Para isso, este se utilizava de pontos de referência para classificação de ponta ativa. Na figura 8, pode-se ver o esquemático de ponta ativa utilizado pelo programa.

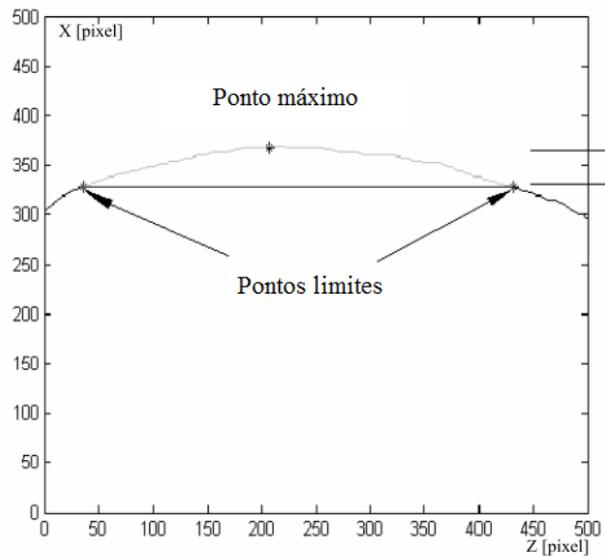


Figura 8 - Definição de ponta ativa, adaptado (Adaptado de Habrat et al 2005)

- ENGAÑA, I.; MENDICUTE, A.; URIONAGUENA, X.; RAÚL, A. **Towards Intelligent Dressing**, 2006

Nesse trabalho, o autor se utiliza de um sensor de emissão acústica para adquirir os sinais de monitoramento de desgaste da ferramenta dressador e associa o sinal do sensor de EA ao estado da ferramenta. Ele se utiliza de processamento digital para filtrar e fazer análises pela técnica de *wavelet packet decomposition*. Sugere a utilização de métodos inteligentes para a realização do monitoramento em tempo real. A figura 9 mostra o banco de ensaio utilizado e a figura 10, a plotagem dos resultados.



Figura 9 - Banco de ensaio, adaptado (Adaptado de Engaña *et al*, 2006)

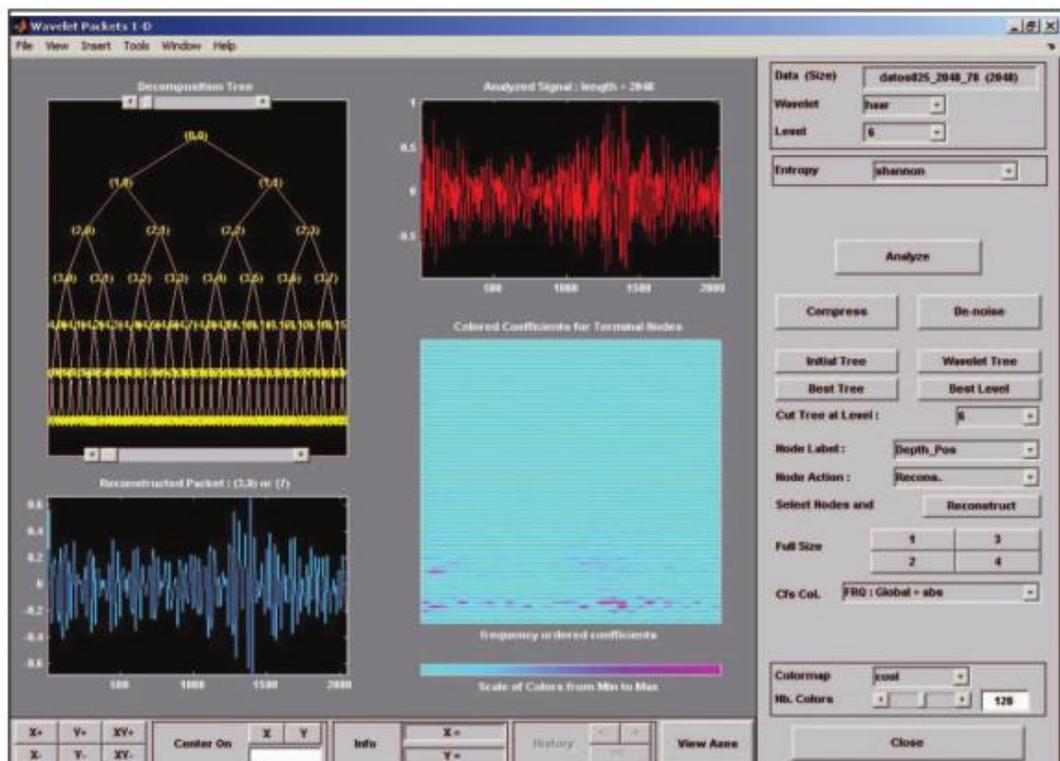


Figura 10 - *Wavelet packet decomposition no Matlab* (Engaña *et al* 2006)

- MARTINS, C.; AGUIAR, P. R.; ARMINIO JR, F.; BIANCHI, C. E. **Tool Condition Monitoring of Single-point Dresser Using Acoustic Emission and Neural Networks Models**, IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control, 2013, São Petersburgo, Russia. Preprints, 2013. v. 1., p. 1540-1545.

Utiliza-se, nesse trabalho, um sensor de EA para aquisição dos sinais. O processamento é feito de forma digital com a aplicação de filtros e análise do espectro da frequência. Os dados são preparados para servirem de entradas a dois tipos de redes neurais: MLP e Kohonem.

É importante frisar que algumas das técnicas usadas para monitorar o desgaste dos dressadores de diamante são visuais, como o sistema proposto por (Habrat *et al.* 2005). De acordo com (ENGAÑA *et al.* 2006), esses métodos constituem uma opção cara em comparação com as baseadas em técnicas inteligentes e uso de sinais característicos do processo de dressagem.

O monitoramento do processo de retificação utilizando sinais de emissão acústica é objeto de estudo desde 1984. Entretanto, os sinais de vibração, ou aceleração, raramente são usados para tal monitoramento, possivelmente devido ao pequeno número de pesquisadores interessados e à falsa credibilidade de que tais sinais sempre são influenciados por frequências derivadas de ruídos do ambiente ou de outras fontes. O sensor de vibração captura as vibrações emitidas pelas variações cíclicas dos componentes dinâmicos das forças de corte. Existe uma dificuldade em medir a vibração diretamente por esta ser dependente da frequência. As medidas são, portanto, feitas por meio de parâmetros relacionados à vibração, como a taxa pela qual as forças mudam (aceleração), e as características da vibração são extraídas pelos padrões encontrados (DIMLA 2002).

## 2.6 VIBRAÇÃO

Na mecânica clássica, o movimento pode ser descrito pelo deslocamento, velocidade ou aceleração. Essas variáveis são ligadas por relações matemáticas. Partindo dessa perspectiva, não importa qual variável é escolhida para descrever o comportamento de vibração, isso é apenas uma questão de escala ou mudança no tempo (fase) (BILOSOVÁ & BILOS 2012).

A unidade de medida mais comum para vibração, quando se trata de medida de deslocamento, é o micrometro [ $\mu\text{m}$ ]. Outra medida para a vibração é a velocidade, que é a primeira derivada do deslocamento em relação ao tempo, cuja unidade é dada em milímetro

por segundo (mm/s). Finalmente, têm-se também a aceleração como unidade de medida para a vibração, a qual é a segunda derivada do deslocamento em relação ao tempo, cuja unidade usual de medida é metros por segundo ao quadrado ( $m/s^2$ ).

Na figura 11 (onde  $x=1$  mm,  $\omega=2$  rad/s), observa-se a forma de onda dessas quantidades durante um período (BILOSOVÁ & BILOS 2012).

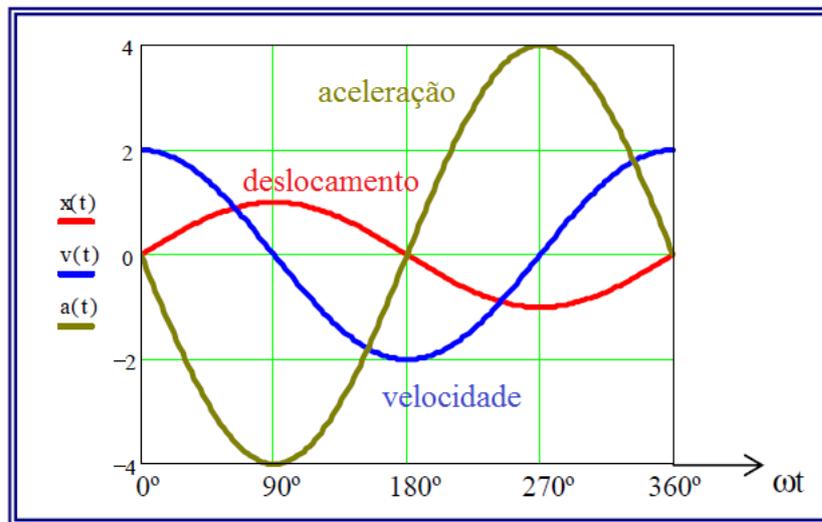


Figura 11 –Relação entre o deslocamento, velocidade e aceleração, adaptado de Bilosová & Bilos (2012)

Pode ser visto que, teoricamente, é suficiente conhecer uma das variáveis e que as duas remanescentes podem ser facilmente computadas. A velocidade sempre está atrasada de 90 graus em relação ao deslocamento, e a aceleração num atraso de 90 graus em relação à velocidade (BILOSOVÁ & BILOS 2012).

O sensor de vibração incorpora filmes piezelétricos para converter energia mecânica em sinais elétricos. O componente geralmente incorpora um peso suspenso entre dois filmes piezelétricos. O peso se move em resposta à vibração e comprime o filme piezelétrico, o qual envia um sinal elétrico a cada vez que o peso o comprime (MOBLEY 1999).

Transdutor é um dispositivo que transforma valores de variáveis físicas em sinais elétricos equivalentes. Há vários tipos de transdutores disponíveis. Alguns deles são menos

úteis que outros em razão da sua não linearidade ou resposta lenta. Alguns transdutores costumam ser usados para medição de vibração (RAO 2009).

Segundo Rao (2009), os principais tipos de transdutores são:

- **Transdutores de resistência variável:** nesses, um movimento mecânico produz uma mudança na resistência elétrica (de um reostato, extensômetro ou semiconductor), a qual, por sua vez, provoca uma mudança na tensão ou corrente de saída (RAO 2009);
- **Transdutores eletrodinâmicos:** nesses, quando um condutor elétrico na forma de solenoide movimenta-se em um campo magnético, então uma tensão é gerada no condutor. O transdutor transformador diferencial linear variável consiste em uma bobina primária no centro, duas bobinas secundárias na extremidade e um núcleo magnético que pode movimentar-se livremente dentro das bobinas no sentido axial (quando uma tensão de entrada *a.c.* - *alternating current* - é aplicada à bobina primária, a tensão de saída será igual à diferença entre as tensões induzidas nas bobinas secundárias) (RAO 2009);
- **Transdutores piezelétricos:** certos materiais geram carga elétrica quando sujeitos a deformação ou tensão mecânica. A carga elétrica desaparece quando a carga mecânica é eliminada. A carga gerada por um cristal resultante de uma força  $F_x$  é dada pela equação 9:

$$Q_x = kF_x = kAp_x \quad (9)$$

Onde:

$F_x$  - força aplicada;

$k$ - constante piezelétrica;

$A$  - área de aplicação da força;

$p_x$  - pressão resultante da força aplicada.

A tensão de saída do cristal é dada pela equação 10:

$$E = vtp_x \quad (10)$$

Onde:

$v$ -sensibilidade à tensão;

$t$ -espessura do cristal.

O esquema de funcionamento de um transdutor piezelétrico pode ser visto na figura 12, onde se tem a representação do transdutor que, se submetido a uma força, transformando a deformação mecânica em tensão elétrica.

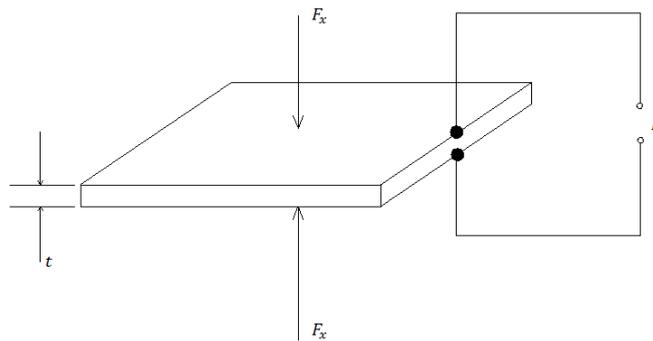


Figura 12 – Esquema de transdutor piezelétrico, Adaptada (RAO 2009)

Em contraste com os cálculos, no entanto, mensurações deveriam também levar em consideração fatores adversos que influenciam a exatidão das medições. Portanto, é aconselhável a escolha de um valor de medição que produza uma boa relação sinal-ruído (BILOSOVÁ & BILOS 2012).

O ruído está sempre presente nos dados de medição e, para sinais fracos, isso significa maiores imprecisões (erros de medições). A aceleração é preferida para frequências mais altas e o deslocamento é preferido para baixas frequências (BILOSOVÁ & BILOS 2012).

A faixa da frequência de interesse é um dos fatores que determina o tipo do valor de mensuração. Se a faixa de frequência medida inclui altas frequências (como conjunto de

engrenagens), a melhor alternativa seria medir a aceleração (BILOSOVÁ & BILOS 2012). Em contrapartida, se a medição da frequência é limitada à velocidade de funcionamento, a melhor escolha seria medir o deslocamento ou a velocidade (dependendo da aplicação). Quando se mede a velocidade de vibração, não há necessidade de se preocupar com as frequências (velocidade) com que cada valor foi medido; quando se mede as outras duas variáveis, é necessário indicar qual velocidade de rotação (frequência) o valor foi medido. De outra forma, não é possível estimar a condição da máquina (BILOSOVÁ & BILOS 2012).

A característica da vibração no domínio da frequência é geralmente usada para análises porque consiste em picos discretos, cada um representando uma fonte específica de vibração (MOBLEY 1999).

## **2.7 PROCESSAMENTO DE SINAIS**

O processamento digital de sinais se preocupa com a análise matemática e prática do tratamento da informação como compreendida pelos processadores. De forma geral, são estudados quais os efeitos da operação de amostragem de um sinal analógico e todas as operações possíveis com a representação numérica e computacional de um dado sinal (NALON 2009).

Um sinal amostrado pode ser gerado pela amostragem de um sinal analógico em instantes discretos de tempo. Isso é uma modulação por amplitude de pulso. Um sinal digital é um sinal discreto com amplitude quantizada. Tais sinais podem ser representados por uma sequência de número, por exemplo, em forma binária (OGATA 1995).

A maior parte dos sinais gerados são analógicos por natureza. Daí esses sinais são convertidos para forma digital por meio do conversor analógico digital (A/D). Este gera uma variedade de amostras e envia isso para o processador de sinais digitais. Essa variedade de amostras (ou sequências de amostras) é o digital equivalente da entrada do sinal analógico. Isso é também chamado de sinal digital. O processador de sinais digitais processa operações como filtragem, multiplicação, transformação, amplificação, etc. Operações sobre esse sinal digital (sequência de amostras) geram um outro sinal digital na saída. Esse processador de sinal digital pode ser um computador de alta velocidade ou um microprocessador de sinais digitais (CHITODE 2011).

A figura 13 mostra os elementos básicos do processamento de sinais digitais, onde se tem a filtragem do sinal puro, a obtenção da estatística RMS e sua média, a formação de matrizes com os resultados e a representação gráfica dos resultados.

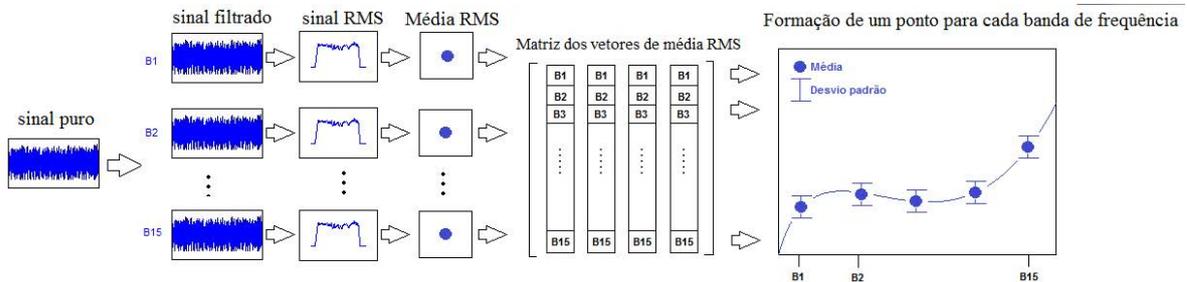


Figura 13 - Elementos básicos de processamento de sinal digital. Adaptado (Marchi, 2012)

Fundamental para o tratamento de sinais, tanto discretos quanto contínuos, é a análise em frequência, feita por meio da transformada de Fourier. Um sinal qualquer pode ser decomposto em "ondas" de várias frequências diferentes representadas por funções senoidais. Pela análise das frequências e das amplitudes dessas funções, é possível obter uma gama enorme de informações a respeito dos sinais analisados e também projetar, de maneira adequada, o processamento a ser realizado (NALON 2009).

### 2.7.1 VALOR EFICAZ DE UM SINAL (RMS)

O valor eficaz se refere à potência efetiva dissipada pela carga. O valor médio quadrático (do inglês, *Root Mean Square*), ou valor eficaz de um sinal puro  $s$ , pode ser expresso pelas equações (11) e (12) para um sinal contínuo e para um sinal discreto, respectivamente (NILSON & RIEDEL 2009).

$$S_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} s^2(t) \cdot dt} \quad (11)$$

$$S_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s^2(i)} \quad (12)$$

Onde:

$T$  é o intervalo de tempo para o cálculo do valor RMS;

$t_0$  é o ponto de início da análise no tempo;

$N$  é o número discreto de dados do sinal  $S$  no intervalo de tempo  $T$ ;

$s$  é o sinal puro;

$S_{RMS}$  é o valor RMS.

### 2.7.2 TAXA DE POTÊNCIA DE UM SINAL (ROP)

A taxa de potência de um sinal (do inglês, *Ratio of Power*) examina o comportamento da frequência que se modifica durante o processo de retificação, observando o sinal quanto ao seu espectro de frequência (WANG *et al.* 2000). Para cada bloco de sinal, o valor ROP é dado pela equação (13).

$$ROP = \frac{\sum_{k=n_1}^{n_2} |X_k|^2}{\sum_{k=0}^{N-1} |X_k|^2} \quad (13)$$

Onde:

$N$  é o tamanho do bloco de sinal;

$n_1$  e  $n_2$  definem uma faixa de frequência para análise.

### 2.7.3 TRANSFORMADA E TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER (DFT)

A transformada de Fourier é uma ferramenta de análise de sinais e sistemas por meio de suas representações no domínio da frequência (NALON 2009).

Se uma função periódica puder ser expressa como a soma de um número finito ou infinito de funções senoidais, a resposta de estruturas lineares a excitações não senoidais poderá ser determinada por aplicação do teorema de superposição. O método de Fourier fornece o meio de se resolver esse tipo de problema (EDMINISTER 1991).

O nome Série de Fourier refere-se a uma série de termos desenvolvida em 1826 pelo Barão Jean Fourier que pode ser usada para representar uma função periódica não senoidal (BOYLESTAD 2004).

A equação 14 mostra a série de Fourier:

$$f(t) = A_0 + A_1 \operatorname{sen}\omega t + A_2 \operatorname{sen}2\omega t + \dots + A_n \operatorname{sen} n\omega t + B_1 \operatorname{cos}\omega t + B_2 \operatorname{cos}2\omega t + \dots + B_n \operatorname{cos} n\omega t \quad (14)$$

A série de Fourier pode ser dividida em três partes: a primeira referente à parte contínua ( $A_0$ ), que é o valor médio da forma de onda para um ciclo completo. A segunda é uma série de termos em seno, não existem restrições quanto aos valores das amplitudes dos termos em seno, porém cada um deles tem uma frequência, que é um múltiplo inteiro da frequência do primeiro termo da série. A terceira parte é uma série de termos em cosseno. Nesse caso, também não existem restrições quanto aos valores das amplitudes dos termos em cosseno. O primeiro termo da série em seno e cosseno é denominado componente fundamental que representa o termo de menor frequência necessário para representar uma função e também tem a mesma frequência que a forma de onda original (BOYLESTAD 2004).

O principal problema de uma representação computacional da transformada de Fourier é o domínio da definição da sequência analisada. A transformada de Fourier, segundo sua definição, presume que a sequência exista para todos os instantes de tempo, de  $-\infty$  a  $+\infty$ . Sinais no mundo real que são amostrados para processamento, no entanto, não têm essa característica. Sinais no mundo real são naturalmente finitos, limitados de alguma forma a um domínio que varia tipicamente de 0 a  $N-1$ . A transformada discreta de Fourier (DFT- do inglês *Discrete Fourier Transform*) é uma solução desse tipo (NALON 2009).

Uma das ferramentas mais importantes encontrada na área de processamento digital de sinais é a transformada de discreta de Fourier. É um procedimento matemático usado para determinar o conteúdo harmônico ou de frequência de um sinal discreto no tempo. A DFT é calculada de acordo com a equação (15).

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi nm/N} \quad (15)$$

Onde:

$X$  é o valor da DFT;

$m$  é o índice da componente de saída da DFT no domínio da frequência;

$x$  é a sequência de amostras do sinal discreto;

$n$  é o índice no domínio do tempo das amostras,  $n = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1$ ;

$j = \sqrt{-1}$ ;

$N$  é o número de amostras.

Embora a DFT seja um dos procedimentos matemáticos mais diretos para determinar o conteúdo de frequência de um sinal discreto, ela é ineficaz devido à lentidão do processo. Uma forma eficiente de se calcular o conteúdo harmônico do sinal é utilizar a transformada rápida de Fourier (FFT) (YANG, *et al.*, 2002).

A um nível mais simples, os algoritmos FFT (do inglês *Fast Fourier Transform*) são baseados numa combinação de pequenos números de entradas de operandos complexos via soma, subtração, e multiplicações complexas, para produzir um igual número de operandos complexos na saída (PEDRAM *et al.* 2014).

A FFT é, talvez, a mais importante ferramenta individual em processamento e análise de sinais. Representa um papel fundamental indireto em tecnologia de imagens, como no radar de abertura sintética e tomografia computadorizada. O desempenho do algoritmo de FFT varia dramaticamente dependendo do desempenho da plataforma de *hardware* e implementação de *software* (PEDRAM *et al.* 2014).

## 2.7.4 MÉDIA E DESVIO PADRÃO

A média e o desvio padrão são comumente empregados para a determinação do valor médio e da dispersão de um sinal, respectivamente. Estas estatísticas descrevem a amplitude da distribuição, a simetria e a sua forma. Calculada a partir da Equação (16).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (16)$$

Onde:

$x_i$  é o valor  $i$  da amostra;  
 $\bar{x}$  é a média dos valores no intervalo  $n$ ;  
 $n$  é o tamanho das amostras.

O desvio padrão normalmente é usado para indicar a variação em um conjunto de amostras. O desvio padrão de uma população de valores é definido pela equação (17) (MORETTIN 1999).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (17)$$

Onde:

$\bar{x}$  é o valor médio da amostra;  
 $x_i$  é o valor  $i$  da amostra;  
 $n$  é o tamanho da amostra;  
 $\sigma$  é o desvio padrão.

## 2.8 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS (RNA)

A estrutura das redes neurais artificiais foi desenvolvida a partir de modelos conhecidos de sistemas nervosos biológicos e do próprio cérebro humano. Os elementos computacionais ou unidades processadoras, denominadas neurônios artificiais, são modelos bem simplificados dos neurônios biológicos (SILVA *et al.* 2010).

Segundo Silva (2010), as potenciais áreas de aplicação das redes neurais artificiais são: aproximador universal de funções, controle de processos, classificação de padrões, agrupamento de dados, sistemas de previsão, memórias associativas. Sendo as principais características das RNAs: adaptação por experiência, habilidade de generalização, organização de dados, tolerância a falhas, armazenamento distribuído, facilidade de prototipagem.

As redes neurais artificiais (RNAs) são uma maneira de criar modelos matemáticos com capacidade de processar informações, inspirados em uma estrutura natural: o cérebro humano. Esses modelos foram inspirados em algumas operações conhecidas do cérebro humano, ou

seja, apresentam capacidade de aprender, de tomar decisões e de adaptar-se, mesmo em presença de sinais ruidosos (HARTMANN 2002).

Os componentes básicos da RNA são os neurônios e seus pesos. Esses pesos são ajustáveis e correspondem a sinapses biológicas. Um peso positivo representa uma excitação e o peso negativo, uma inibição. As entradas do neurônio são, então, pesadas por uma função de ativação que determina o valor de saída (HUANG 1994).

Na figura 14, é apresentado um neurônio biológico que recebe os estímulos (sinapse) nas suas conexões de entrada (dendritos). Se as condições necessárias são satisfeitas, um sinal é emitido na saída (axônio) (NEGNEVITSKY 2005). Na representação matemática do neurônio, o neurônio artificial, as entradas recebidas são multiplicadas por pesos sinápticos que correspondem à força de determinada entrada para a emissão da saída e uma soma ponderada é calculada. O resultado dessa soma é comparado a um limite de ativação do neurônio (HAYKIN 1999). A figura 15 mostra o modelo do neurônio artificial.

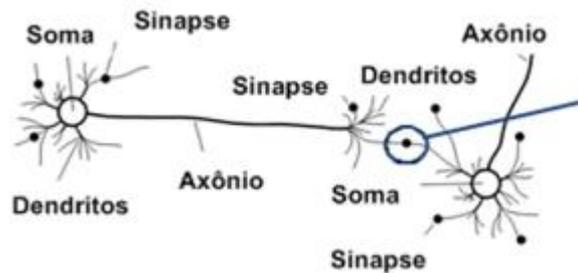


Figura 14 - Modelo de neurônio biológico, adaptado (NEGNEVITSKY, 2005)

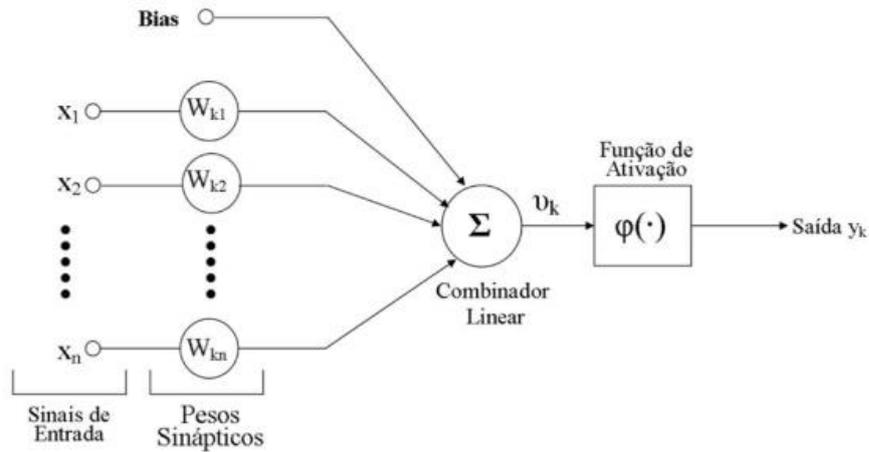


Figura 15 - Modelo do neurônio artificial (HAYKIN, 1999)

Um neurônio artificial  $k$  pode ser descrito pelas equações (18) e (19) (HAYKIN, 1999).

$$V_k = \sum_{i=1}^n w_{ki} \cdot x_i \quad (18)$$

$$y_k = \varphi(V_k + b_k) \quad (19)$$

Onde:

$n$  é o número de entradas;

$x_1, x_2, \dots, x_n$  são os sinais de entrada;

$w_1, w_2, \dots, w_n$  são os pesos sinápticos;

$V_k$  é a saída do combinador linear;

$b_k$  é o limiar de ativação e tem o efeito de aumentar ou diminuir a entrada líquida da função de ativação;

$\varphi$  é a função de ativação, responsável por buscar um ajuste ótimo;

$y_k$  é a saída do neurônio.

### 2.8.1 REDE NEURAL *PERCEPTRON* DE MÚLTIPLAS CAMADAS

As redes *perceptron* de múltiplas camadas (PCM) são caracterizadas pela presença de pelo menos uma camada intermediária (escondida) de neurônios, situada entre a camada de entrada e a respectiva camada neural de saída. São caracterizadas pelas elevadas possibilidades de aplicações em diversos tipos de problemas relacionados com as mais diferentes áreas do conhecimento, sendo também consideradas uma das arquiteturas mais versáteis quanto à aplicabilidade (SILVA *et al.* 2010).

Essa camada oculta adiciona um poder maior à rede em relação às redes *perceptron* de camada única que classifica apenas padrões linearmente separáveis, sendo os neurônios ocultos os responsáveis por capturar a não linearidade dos dados. Na rede MLP, os neurônios são conectados aos neurônios da camada subsequente, não havendo ligação entre os neurônios da mesma camada e também não ocorre realimentação (HAYKIN, 1999).

O processo de aprendizagem da rede neural MLP é iterativo, conhecido como aprendizagem por experiência, cujos padrões de treinamento são apresentados à rede e, com base nos erros obtidos, ajustes são realizados nos pesos sinápticos com o intuito de diminuir os erros para as próximas iterações. O algoritmo de treinamento comumente empregado é o de retropropagação de erro (*error backpropagation*). Baseado na regra de aprendizagem por correção de erro e constituído por dois passos. O primeiro passo, para frente, é chamado de propagação. Os valores provindos dos neurônios de entrada são aplicados aos neurônios ocultos e, posteriormente, suas saídas são aplicadas como entradas aos neurônios da camada de saída, obtendo a resposta da rede. No segundo passo, para trás, ocorre o ajuste dos pesos sinápticos por meio do cálculo do erro obtido na camada de saída. O ajuste dos pesos é realizado de acordo com uma regra de correção (HAYKIN 1999), (DYMINSKI 2000). A figura 16 apresenta um modelo genérico de uma rede MLP.

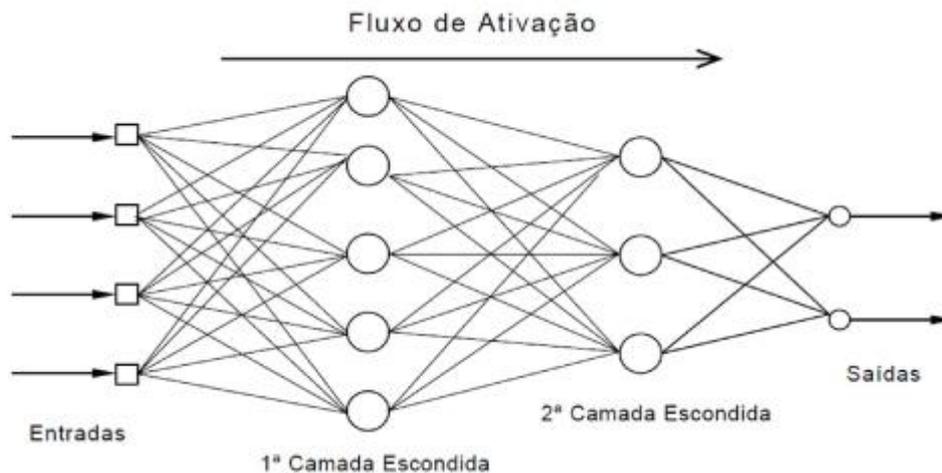


Figura 16 - Exemplo de uma rede MLP (DYMINSKI, 2000)

Uma das dificuldades do uso de RNAs refere-se à identificação do melhor ponto de parada do treinamento, pois o erro de treinamento inicia com um valor alto, decresce rapidamente e continua diminuindo mais lentamente, tendendo a atingir um mínimo local na superfície de erro. Assim, para se identificar o momento ideal de parar o processo de aprendizado, buscando obter a melhor generalização possível, recomenda-se utilizar a técnica da regra de parada antecipada, com base na validação cruzada. Essa técnica consiste em se validar o modelo obtido durante o treinamento, utilizando-se de um conjunto de dados diferentes dos usados no processo de aprendizado da rede (HAYKIN, 1999).

O algoritmo de Levenberg-Marquardt foi criado como um método de otimização que se baseia em uma técnica iterativa de busca ao mínimo de uma função multivariada expressa como a soma de quadrados de funções não lineares (LEVENBERG 1944).

Segundo (SILVA *et al.* 2010), o algoritmo de Levenberg-Marquardt é um método gradiente de segunda ordem, baseado no método dos mínimos quadrados para modelos não lineares, podendo ser incorporado ao algoritmo *backpropagation* a fim de potencializar a eficiência do processo de treinamento.

Esse algoritmo foi desenvolvido com o objetivo de se acelerar o treinamento da rede neural utilizando métodos de segunda ordem, sem o cálculo da matriz Hessiana. Para esse caso, a matriz Hessiana pode ser aproximada pela equação 20, e o gradiente, pela equação 21, sendo que  $J$  é a matriz Jacobiana, contendo as derivadas dos erros da rede em relação ao peso e o vetor  $e$  corresponde aos erros da rede neural. A aproximação da matriz Hessiana é

utilizada pelo algoritmo de Levenberg-Marquardt para atualização dos pesos,  $w$ , conforme a equação 22 (MUÑOZ 2009).

$$H = J^T \cdot J \quad (20)$$

$$g = J^T e \quad (21)$$

$$w^{i+1} = w^i - (J^T J + \mu I)^{-1} J^T e \quad (22)$$

O escalar  $\mu$  é variável, sendo ajustado de modo a localizar o menor erro da forma mais eficiente possível. De modo que  $\mu$  cresce com a diminuição da função custo, resultando em passos menores na atualização dos pesos e analogamente decresce com o aumento da função custo, resultando em passos mais largos. Assim, quanto mais distante se estiver do ponto mínimo, maior será o passo na direção do gradiente, já quando se aproximar dele irá predominar o método de Newton (MUÑOZ 2009) (MUKHERJEE & ROUTROY 2012).

## **CAPITULO 3- MATERIAIS E MÉTODOS**

Este capítulo abordará os equipamentos e a metodologia utilizados na realização dos ensaios de dressagem, bem como a forma de configurar e implementar os modelos neurais.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB) da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP).

### **3.1 MONTAGEM DO BANCO DE ENSAIOS**

Para a realização dos ensaios, utilizou-se uma máquina retificadora plana tangencial da Sulmecânica, modelo 1055E. A retificadora foi equipada com um rebolo de abrasivo convencional de óxido de alumínio, tipo 38A220KVS, com dimensões 233,6x12, 7x127 mm da NORTON.

Foram utilizados dressadores de ponta única do tipo CVD (*Chermical Vapor Deposition*).

A fixação dos dressadores à mesa retificadora foi realizada utilizando-se um suporte metálico que serviu, também, para a fixação do sensor de vibração.

A aquisição do sinal de vibração foi realizada por um sensor do tipo piezelétrico, modelo 353B03, que tem como principais características: tensão de saída 8,8 VDC, sensibilidade transversal 0,8%, frequência de ressonância 55,4 KHz e um módulo condicionador de sinal modelo 482b11 do fabricante PCB Piezotronics.

Na figura 17, são apresentados, de forma esquemática, a montagem dos equipamentos e o processo de aquisição de dados.

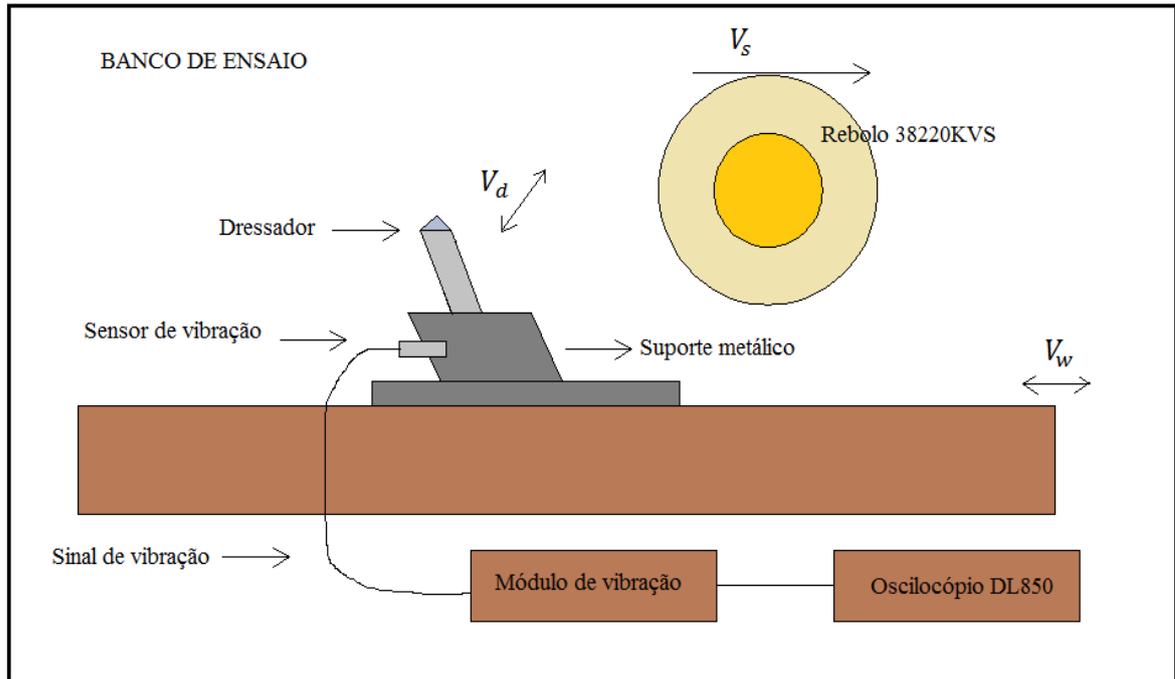


Figura 17 - Esquema da montagem do banco de ensaios

### 3.1.1 CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DRESSAGEM

Os parâmetros da operação foram cuidadosamente controlados para que se pudessem repetir as condições em todos os ensaios. Eles estão contidos na tabela 1:

Tabela 1 - Parâmetros de dressagem usados no ensaio

Parâmetro	Especificação
Refrigeração	Sem fluido de corte
Velocidade periférica do rebolo	33,3 m/s
Profundidade da dressagem	40 $\mu$ m
Velocidade transversal do dressador	3,45 mm/s
$U_d$ no início do ensaio	1

### 3.1.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS

Para realizar as medições do desgaste da ponta dos dressadores, foi utilizado um microscópio estereoscópio, modelo CITOVAL 2, com ampliações de 10x a 100x, da marca

Carl Zeiss Predstavništvo Beograd (Montenegro). A ampliação adotada para a tomada das imagens foi de 16x. Acoplada a esse microscópio, estava uma câmera EC 3 da LEICA.

As imagens da ponta do dressador foram analisadas utilizando o *software Leica Application Suite*. As áreas de desgaste da ponta de diamante foram determinadas utilizando o *software* estilo CAD. As imagens da ponta dos dressadores foram obtidas para duas posições, uma lateral e outra frontal.

### **3.1.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS**

O sinal de vibração foi coletado, na forma pura, por um osciloscópio, modelo DL850, da Yokogawa, a uma taxa de dois milhões de amostras por segundo.

## **3.2 PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS**

Após a montagem do banco de ensaios e configurações dos equipamentos, foram realizadas a coleta dos sinais e as medições de desgaste dos dressadores. O dressador foi utilizado até o final da sua vida útil, definida como o momento em que o corpo metálico do dressador entrava em contato com o rebolo, caracterizado por um faiscamento durante a operação.

Para cada passada (uma ida e retorno) do rebolo sobre o dressador, foi gerado um arquivo binário do sinal puro de vibração. Após uma passada, o rebolo era avançado em 40 µm em direção ao dressador, ou seja, a penetração do dressador foi de 40 µm por passada. O desgaste do dressador foi medido a cada vinte passadas (800 µm de penetração).

O ensaio foi repetido três vezes, seguindo o procedimento anteriormente descrito.

As imagens obtidas da ponta dos dressadores foram analisadas por meio da utilização do programa *LEICA Application Suite LAS EZ*, versão 1.6.0 (*build* 2601). Nessa etapa, foram tomadas as medidas das arestas do diamante. Utilizando um *software* estilo CAD, foi possível calcular aproximadamente a área desgastada do diamante. Com base nesses dados, foi possível determinar a tendência de desgaste dos diamantes.

### 3.3 PROCESSAMENTO DO SINAL DE VIBRAÇÃO

Para determinar a possível existência da correlação entre o sinal de vibração e o desgaste da ferramenta, inicialmente foi feita uma análise nas frequências em diferentes estágios de desgaste. O espectro de frequência foi determinado usando a Transformada Rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform* ) com 8192 amostras do sinal de vibração, janela de Hanning ao longo de uma passada da dressagem.

Inicialmente, foi relacionado o desgaste da ferramenta ao valor médio do sinal RMS e ROP de vibração.

O primeiro processamento realizado foi a identificação de passadas em que não ocorreu a operação de dressagem, denominados de passadas não válidas, pois mesmo com um avanço de 40  $\mu\text{m}$ , o contato dressador/rebolo não foi uniforme durante toda a passada, apresentando apenas uma pequena área de contato. Essas passadas foram desconsideradas na análise estatística dos dados.

Após a seleção das passadas válidas para análise, foram realizados estudos do espectro de frequência do sinal puro de vibração para diferentes momentos do ensaio. Nesse estudo, sete regiões foram observadas (sete bandas de frequências) que apresentavam características interessantes para a identificação do nível de desgaste do dressador.

Dessa forma, cada passada do ensaio pode ser representada por um vetor de sete pontos, correspondentes aos valores médios do sinal RMS e do valor ROP, obtido para cada banda de frequência.

Os sinais coletados foram processados a fim de se obter características em que o sinal de vibração pudesse se correlacionar com o nível de desgaste do dressador.

Inicialmente, os valores médios RMS foram calculados para todas as passadas. Logo após essa análise preliminar, foi realizado um estudo do espectro de frequência do sinal puro de vibração, a fim de analisar as melhores bandas de frequência, em que foram encontradas sete bandas relevantes para estudo. Foi, então, aplicado ao sinal puro um filtro passa-banda, para cada banda de frequência. Após essa operação, foi calculado o valor médio das estatísticas RMS e ROP para cada banda de frequência. Esses valores foram utilizados como entradas para os modelos neurais.

### **3.4 MODELO NEURAL**

Utilizou-se, neste trabalho, a Rede Neural Perceptron de Múltiplas Camadas para a classificação do desgaste da ferramenta de dressagem. Foram testados vários modelos com o objetivo de atingir o menor erro de classificação.

Os modelos neurais testados tiveram como entradas o valor médio RMS e ROP do sinal puro filtrado com filtro passa-banda *butterwoth*, em sete bandas de frequência.

Os modelos utilizados apresentavam três saídas, indicando qual nível de desgaste (N - novo; MV – meia- vida; D - desgastado) pertencia os valores apresentados à entrada da rede.

Para cada estatística, foi processada uma sequência de testes para obtenção da melhor configuração.

A princípio, as estatísticas RMS e ROP foram utilizadas independentemente, isto é, para cada uma delas foi processada uma sequência de testes para obtenção da melhor configuração. Nesses testes, foram obtidos os melhores modelos para que as sete bandas de frequência fossem usadas como entradas dos modelos, bem como a combinação de duas melhores dessas bandas. Obtendo-se as melhores bandas para cada uma das estatísticas, estas foram combinadas, alcançando, assim, modelos com as entradas compostas pelas estatísticas RMS e ROP.

#### **3.4.1 TREINAMENTO DOS MODELOS NEURAIIS**

Durante o treinamento da rede, foram usados 500 valores de médias de pequenas partes das passadas (825 amostras) para cada uma das condições de desgaste, totalizando 1500 amostras para cada estatística (500 N, 500 MV, 500 D). O total de dados mencionado foi dividido aleatoriamente, sendo 60 % usado para treinamento, 20% para validação e 20% para teste.

Para a construção das matrizes de confusão e gráficos de regiões de fronteiras, foram utilizados os valores médios das estatísticas de cada passada. Para que fossem testadas a reprodutibilidade e estabilidade dos resultados para cada um dos parâmetros, o treinamento foi repetido cinco vezes, sendo todos os resultados avaliados. Os treinamentos foram realizados usando o programa MATLAB.

Para as saídas, como dito anteriormente, os resultados são zero ou um, para demonstração de ativo ou não. Faixas de valores foram usadas para representar os bits um ou zero, ou seja, valores entre -0,50 e 0,50 representam a saída zero, enquanto valores no intervalo de 0,51 e 1,50 representam a saída um. No entanto, na transição de uma condição de desgaste para outra, o critério adotado foi ativar um dos três bits da saída que possuía o maior valor produzido pela rede e os outros dois bits se atribuía o valor zero.

Os modelos foram obtidos ao se fazer todas as combinações possíveis entre as sete bandas, duas a duas, variando-se de um a três o número de camadas ocultas e de 5, 10, 15, 20 e 40 o número de neurônios. Na tabela 2, temos os parâmetros utilizados no treinamento das redes e a figura 18 demonstra o fluxograma do algoritmo utilizado no teste dos modelos neurais.

Tabela 2 – Parâmetros de treinamento

<b>Parâmetro</b>	<b>Especificação</b>
Função de treinamento	Levenberg-Marquardt-Backpropagation
Número máximo de falhas de validação	15
Número máximo de épocas	2000
Quantidade de camadas ocultas	Variável: 1, 2, 3
Quantidades de neurônios por camada oculta	Variável: 5, 10, 15, 20, 40

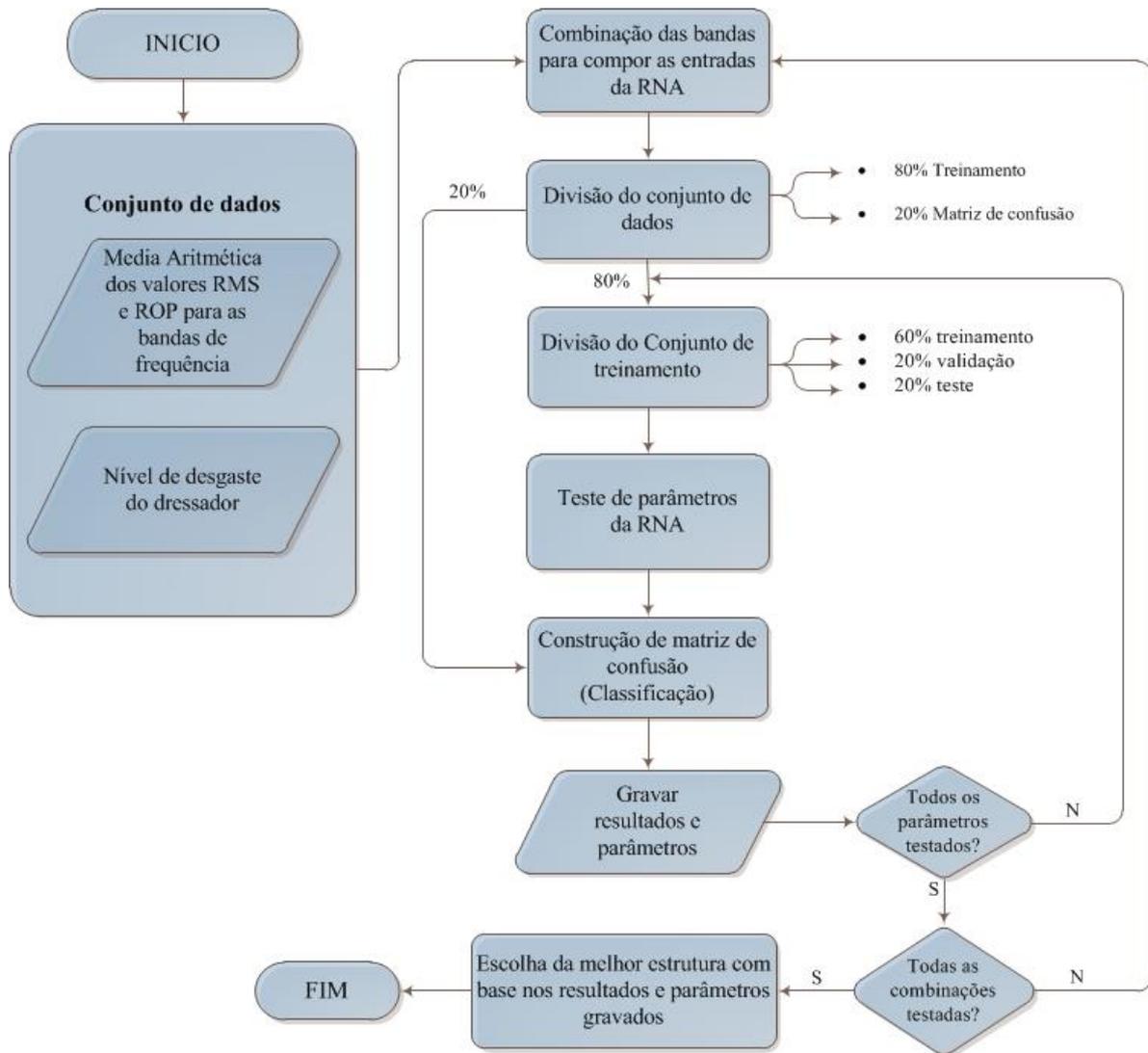


Figura 18 – Fluxograma do algoritmo de teste dos modelos neurais (MARTINS, 2013)

## CAPITULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 DESGASTE DO DIAMANTE

Nesta seção, serão apresentados os dados obtidos por meio da análise das fotos dos dressadores e as suas áreas desgastadas.

#### 4.1.1 DIAMANTE CVD

A partir de observações realizadas nas imagens da vista lateral do dressador CVD, foi possível determinar a sua área desgastada. Devido à presença de impurezas nos diamantes, inerentes ao processo de fabricação, os ensaios não apresentaram a mesma quantidade de passadas. Dessa forma, para se realizar a análise do desgaste, tendo repetição dos dados para o cálculo da média e do desvio padrão para cada medição, foi adotado o total de passadas do menor ensaio como quantidade máxima de passadas, a análise de desgaste foi feita a cada 20 passadas. Assim, as passadas até o limite de 140 foram consideradas para análise das áreas do diamante, sendo que o critério para decisão do fim do ensaio foi o fim da ferramenta dressador, caracterizado pelo faiscamento do material da base da ferramenta.

A tabela 3 apresenta os valores médios das áreas desgastadas e seus desvios padrão para cada vinte passadas.

Tabela 3 - Área desgastada média do diamante CVD, para vista lateral.

Número da passada	Área desgastada média x 10 <sup>-3</sup> (mm <sup>2</sup> )	Desvio padrão x 10 <sup>-3</sup> (mm <sup>2</sup> )
20	13,55	5,54
40	28,66	11,85
60	36,14	15,55
80	42,14	12,05
100	54,69	20,38
120	62,72	18,85
140	68,93	18,61

A tabela 4 nos mostra as imagens referentes à vista lateral do desgaste dos três ensaios até a passada limite de 140.

Tabela 4 - Imagens de referência para o cálculo da área lateral desgastada do diamante CVD, para vista lateral

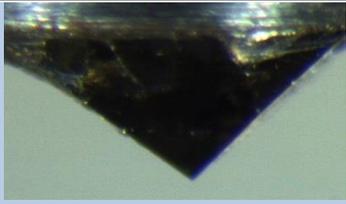
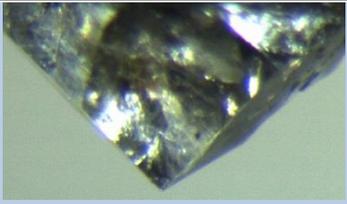
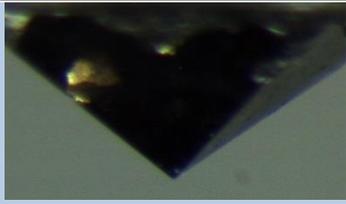
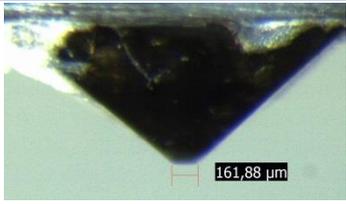
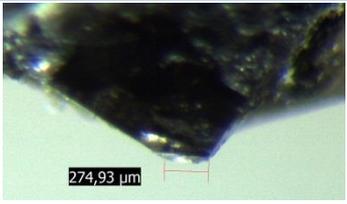
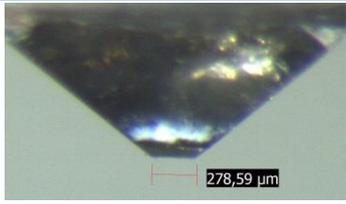
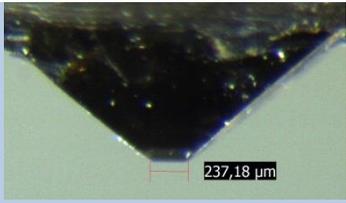
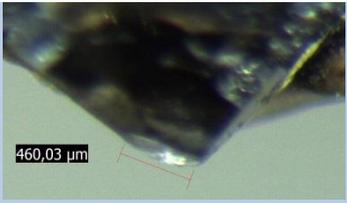
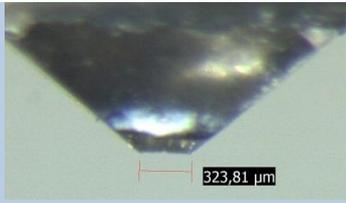
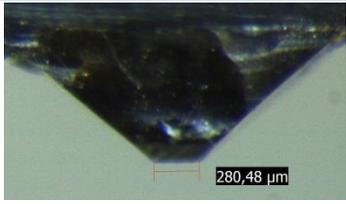
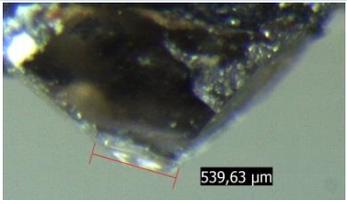
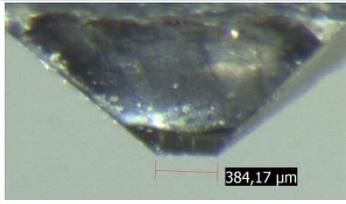
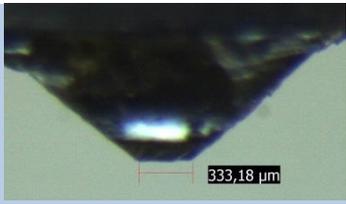
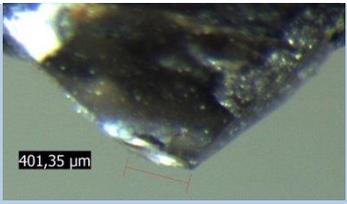
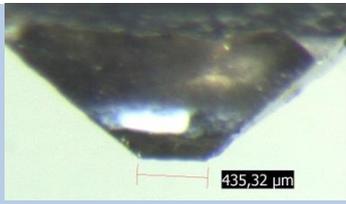
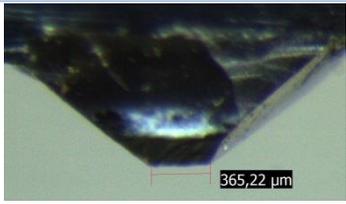
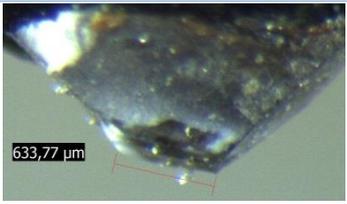
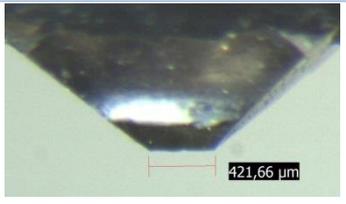
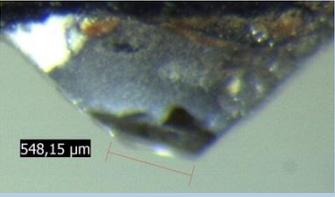
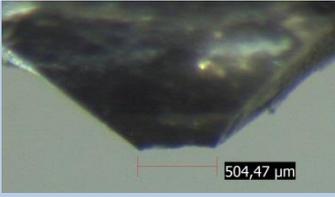
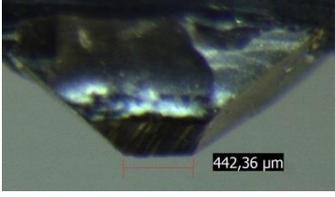
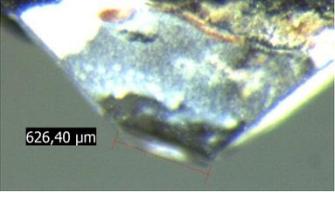
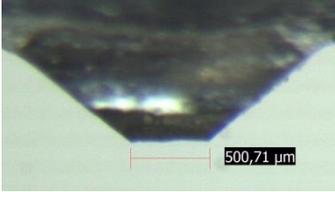
Número da passada	Ensaio 01	Ensaio 02	Ensaio 03
0			
20			
40			
60			
80			
100			

Tabela 4 (continuação) - Imagens de referência para o cálculo da área lateral desgastada do diamante CVD, para vista lateral

Número da passada	Ensaio 01	Ensaio 02	Ensaio 03
120			
140			

A figura 19 foi obtida a partir da tabela 3 e observa-se que existe certa linearidade entre os dados, com o desvio padrão indicando a dispersão dos dados. O coeficiente angular da reta, que se aproxima das áreas medidas, foi de 0,53, significando que a cada passada, em média,  $0,53 \text{ mm}^2$  de área será desgastada do diamante.

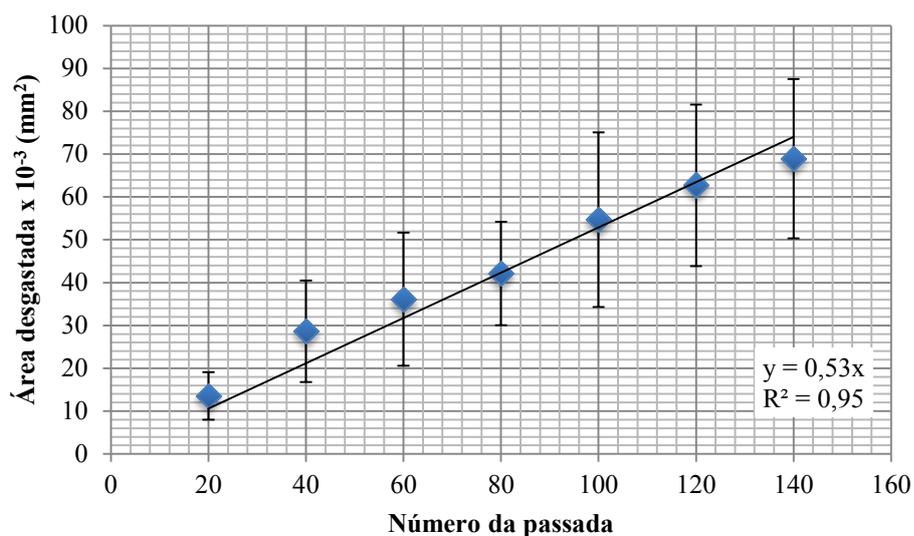


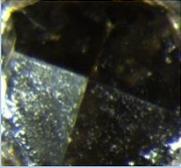
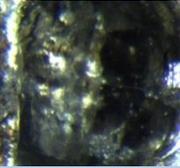
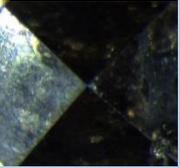
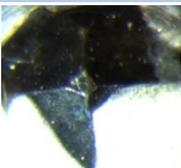
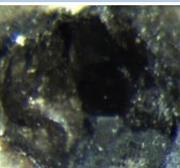
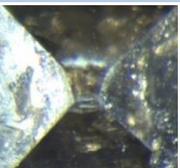
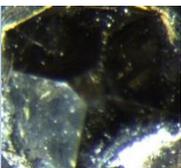
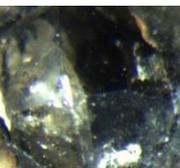
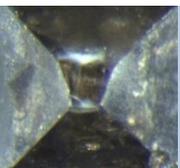
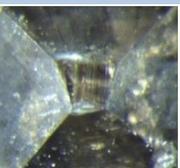
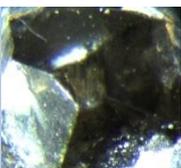
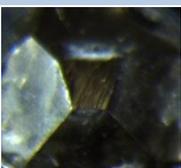
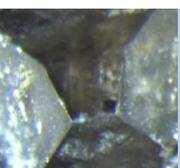
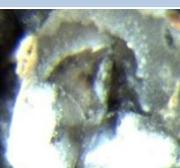
Figura 19 - Área lateral desgasta por quantidade de passadas para o diamante CVD, para vista lateral

Esse mesmo procedimento foi realizado na análise da vista frontal do diamante CVD. Os ensaios foram limitados a 140 passadas, compondo a média da área desgastada e o desvio padrão para cada medição do desgaste, conforme mostra a tabela 5.

Tabela 5 - Área frontal desgastada média do diamante CVD, para vista frontal

Número da passada	Área desgastada média x 10 <sup>-3</sup> (mm <sup>2</sup> )	Desvio padrão x 10 <sup>-3</sup> (mm <sup>2</sup> )
20	71,85	37,37
40	150,02	44,54
60	209,93	39,77
80	276,43	35,87
100	325,57	19,06
120	429,76	78,88
140	456,75	79,08

Tabela 6 - Imagens de referência para o cálculo da área frontal desgastada do diamante CVD, para vista frontal.

Número da passada	Ensaio 01	Ensaio 02	Ensaio 03
0			
20			
40			
60			
80			
100			
120			
140			

A figura 20 é composta pelos valores apresentados na tabela 5 e é baseada nas imagens expostas na tabela 6. Observa-se uma grande linearidade entre os dados, com um desvio padrão indicando uma dispersão relativamente baixa até a passada número 100 e uma grande dispersão para as passadas seguintes. O coeficiente angular da reta de aproximação encontrada é de 3,40, ou seja, 3,40 mm<sup>2</sup> de área gasta no diamante por passada.

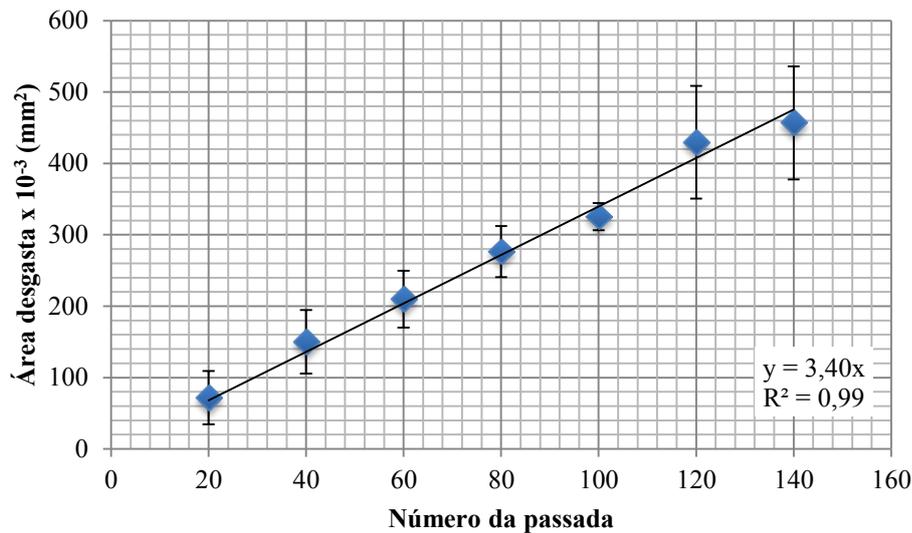


Figura 20 - Área desgasta por quantidade de passadas para o diamante CVD, para vista frontal.

## 4.2 PROCESSAMENTO DO SINAL DE VIBRAÇÃO

### 4.2.1 ANÁLISE DO VALOR MÉDIO RMS

A partir do sinal puro de vibração, foi calculado o seu correspondente RMS, do qual foram extraídos os dados correspondentes ao momento em que o dressador esteve em contato com o rebolo, ou seja, a parte válida da passada. O valor médio desses dados equivale à energia média do sinal vibração para aquela passada. A figura 21 ilustra o sinal puro e o seu sinal RMS, destacando-se a passada.

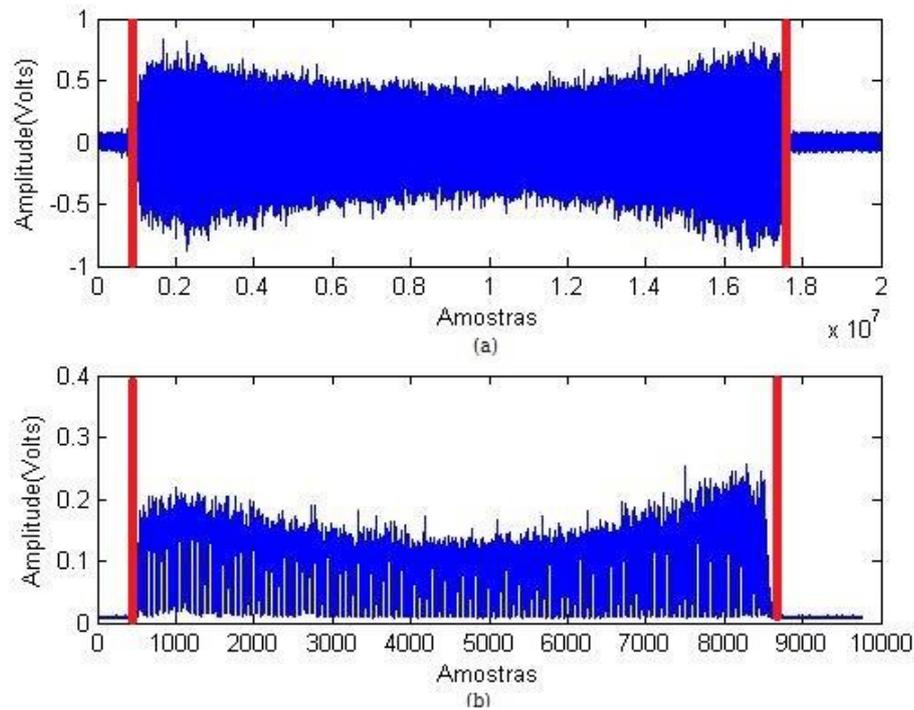


Figura 21 – (a) sinal puro, (b) sinal RMS

## 4.2.2 ESTUDO DO ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DO SINAL DE VIBRAÇÃO

### 4.2.2.1 Análise em frequência do sinal puro de vibração

O estudo do espectro de frequência dos sinais de vibração teve como objetivo determinar uma correlação entre características desses sinais com o nível de desgaste do dressador e o sinal do sensor. O espectro de frequência foi obtido por meio da transformada rápida de Fourier (FFT) com janela de Hanning, considerando-se para o cálculo 8192 amostras do sinal pertencentes ao meio da passada.

O espectro de frequência do dressador CVD é apresentado na figura 22, onde se nota que o sinal de vibração apresenta características diferentes no domínio da frequência, de acordo com a condição da ferramenta.

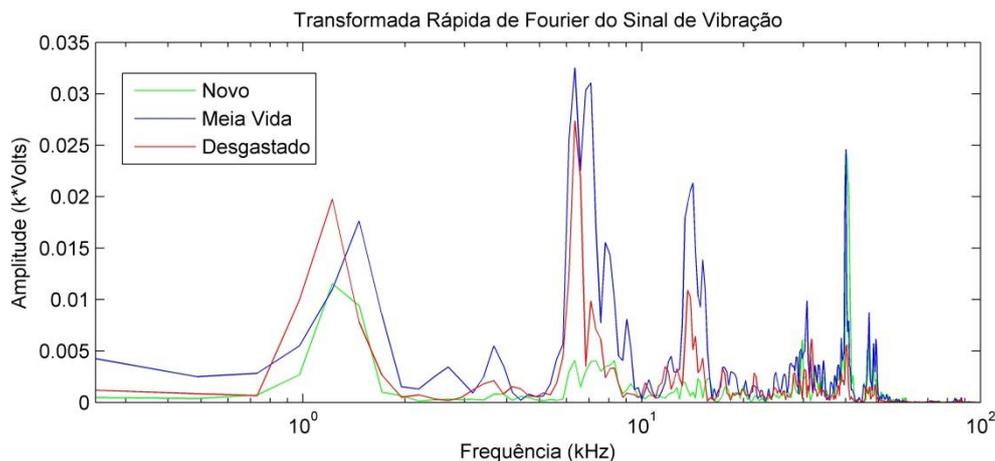


Figura 22- Espectro de frequência dos três níveis de desgaste do dressador CVD

Com base nessas observações no espectro de frequência, pode-se observar o comportamento da ferramenta em várias faixas de frequência e, por meio da análise, associar comportamentos da frequência a estados da ferramenta. Como se pode notar no espectro de frequência da figura 22, nas frequências mais baixas o espectro de Desgastado alcança amplitudes mais elevadas do que os outros sinais, enquanto o sinal Novo a menor amplitude, pela análise dessas características, pode-se filtrar os sinais e fazê-los entradas das redes neurais. As bandas de frequência que continham os picos e regiões onde era visível a diferença entre os níveis de desgaste da ferramenta foram consideradas para estudo.

Sete bandas de frequência foram selecionadas (denominadas a partir de agora de BF1 a BF7), presentes na tabela 7.

Tabela 7 - Bandas de frequência consideradas para estudo

Identificação	Banda de frequência
BF1	1 – 2 kHz
BF2	2 - 5 kHz
BF3	5 - 7 kHz
BF4	7 - 10 kHz
BF5	12 - 16 kHz
BF6	16 - 18 kHz
BF7	18 - 22 kHz

Assim, filtrou-se o sinal puro de vibração para essas bandas e foi calculado o valor médio para as estatísticas RMS e ROP. O filtro digital utilizado foi um passa-banda do tipo *Butterworth*, ordem seis, de 0 a 30 kHz, implementado no MATLAB. Esses sinais foram utilizados para entrada das redes neurais.

### 4.3 MODELOS NEURAIIS

Para se obter os melhores modelos neurais, foram testadas diferentes combinações de estruturas para a rede. Após organizar os resultados desses testes, foram selecionados aqueles modelos que apresentaram o menor erro médio e desvio padrão para as cinco repetições do modelo.

#### 4.3.1 RESULTADOS DOS MODELOS NEURAIIS E DISCUSSÃO

Foram usados modelos neurais com duas entradas e três saídas. Para as entradas, foram utilizadas diferentes bandas e as saídas representam as diferentes condições do desgaste. A condição de desgaste do dressador é identificada por meio da ativação de uma das saídas.

Essa análise foi realizada de forma independente para os valores médios RMS e ROP. Após serem selecionadas as duas melhores bandas para cada uma das estatísticas, estas foram utilizadas para obtenção de modelos neurais compostos por entradas RMS e ROP.

O algoritmo foi desenvolvido de forma a se variar o número de camadas ocultas de neurônios dos modelos neurais. A figura 23 ilustra o modelo neural.

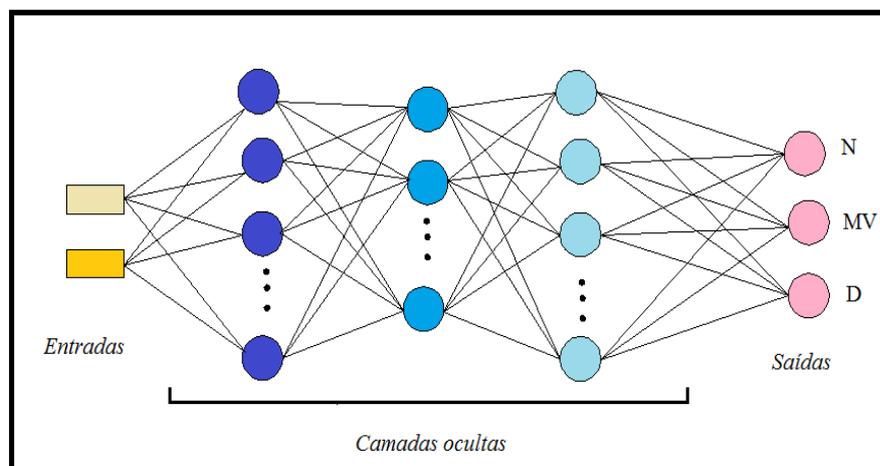


Figura 23- Estrutura de modelo neural

As melhores redes estão assinaladas na Tabela 8 e Tabela 9

Tabela 8 - Rede MLP com estatística RMS, Modelo 1

<b>Parâmetros</b>	<b>Especificações</b>
Entradas	RMS Banda 2 (2-5 kHz) , RMS Banda 4 (7-10 kHz)
Estrutura	5
Função de treinamento	Método de Levenberg-Marquardt
N.º máximo de épocas	2000

Tabela 9 - Rede MLP com estatística ROP, Modelo 2

<b>Parâmetros</b>	<b>Especificações</b>
Entradas	ROP Banda 3 (5-7 kHz) , ROP Banda 4 (7-10kHz)
Estrutura	5-10-20
Função de treinamento	Método de Levenberg-Marquardt
N.º máximo de épocas	2000

### **Modelo 1**

O primeiro modelo consiste em uma rede neural com duas entradas em que se usou a média RMS do sinal filtrado nas bandas dois e quatro e três saídas, uma para cada condição de desgaste.

Todas as sete bandas foram utilizadas para o teste. Realizaram-se testes com 21 combinações de entradas, cada uma sendo testada com centenas de estruturas diferentes. Entre todas as possíveis estruturas de até três camadas, a rede que obteve o melhor resultado foi a de apenas uma camada com cinco neurônios, a qual denominamos de Modelo 1.

Esse modelo apresentou um erro médio de 4,36%, com desvio padrão do erro de 0,27%. Como um erro menor do que 5% indica que a rede tem uma alta capacidade de classificação, podemos dizer que a rede tem, associado a seu alto grau de classificação, um baixo desvio padrão, o que demonstra sua estabilidade.

Uma matriz de confusão para o modelo foi gerada a partir do valor médio de todas as passadas. Como pôde ser observado na figura 24, 100% das passadas com dressador novo foram corretamente classificadas. Porém, 5,3% das passadas de meia-vida foram classificadas como dressador novo e 3,1% das passadas, com o dressador desgastado, foram classificadas como meia-vida. Isso resulta em sete erros de classificação, num total de 165 passadas, com apenas um falso negativo para desgastado. Esse último erro, no entanto, é grave na classificação, pois classificou uma passada desgastada como meia-vida, ou seja, o dressador já ultrapassou sua vida útil e deveria ser trocado nessa condição.

**Matriz de Confusão**

<b>Classificação Realizada</b>	N	20 12.1%	6 3.6%	0 0.0%	76.9% 23.1%
	MV	0 0.0%	107 64.8%	1 0.6%	99.1% 0.9%
	D	0 0.0%	0 0.0%	31 18.8%	100% 0.0%
		100% 0.0%	94.7% 5.3%	96.9% 3.1%	95.8% 4.2%
	N	MV	D	<b>Objetivo da Classificação</b>	

Figura 24 - Matriz de confusão Modelo 1

A média de erros de 4,2%, mostrada na matriz de confusão, apesar de ser baixa, pode significar uma falha muito grave da rede na classificação do estado de desgaste de ferramenta, pois a rede pode estar classificando um estado muito desgastado como meia-vida ou um estado em óbvia meia-vida como novo. No entanto, caso seja um valor muito próximo do limite entre condições de desgaste, o erro não seria uma grande falha da rede. Isso ocorre porque o desgaste não se relaciona com o sinal de vibração de maneira linear. Para melhor analisar os erros de classificação do modelo 1, foi construído um gráfico de região de fronteiras com os valores de entrada da rede neural. Essas regiões foram obtidas por meio do

método de autoria de Franc e Hlavác (2004), implementado na Toolbox do Matlab, conforme mostra a figura 25.

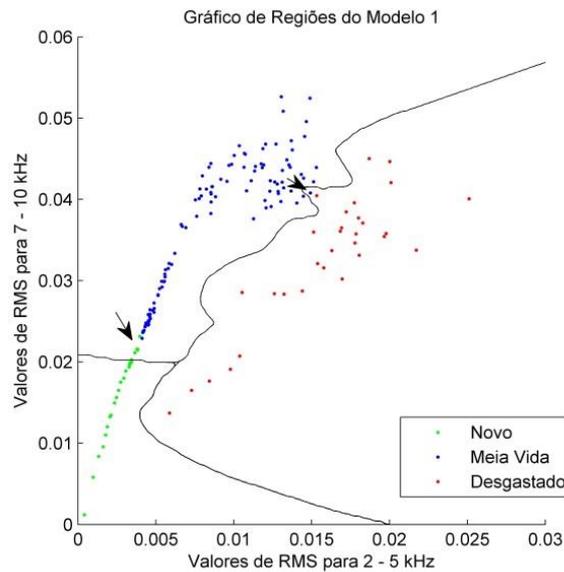


Figura 25- Região de fronteira Modelo 1

Podem ser observadas as regiões de fronteiras de cada nível de desgaste onde os dados estão localizados. Os pontos correspondem à localização espacial do valor usado na entrada do modelo. Os valores RMS estão em  $K \cdot \text{Volts}$ , em que  $K$  é uma constante de escala. É possível notar seis pontos verdes (condição de novo) em uma área com todos os outros pontos azuis (condição de meia-vida), o que indica as seis passadas em estado da ferramenta de meia-vida que foram classificadas como ferramenta nova, bem como uma passada classificada como ferramenta com meia-vida quando deveria ser classificada como desgastada. As setas dão enfoque a esses erros de classificação. Observa-se, na figura 25, que os sete erros de classificação ocorreram em áreas próximas às fronteiras, ou seja, próximos dos momentos em que há troca de estado. Isso demonstra que, ainda que haja erros, eles não são graves.

## Modelo 2

O modelo 2 consistiu, também, em duas entradas e três saídas. As entradas consideradas neste modelo foram os valores médios da estatística ROP para cada banda de

frequência selecionada para estudo. As bandas foram novamente combinadas duas a duas para que os resultados mostrassem as melhores bandas a serem utilizadas.

Existem sete bandas selecionadas para estudo e duas entradas para o modelo, resultando em 21 combinações de entradas, sendo novamente testadas centenas de estruturas diferentes para cada uma das bandas. Para esse modelo, a estrutura que produziu o melhor resultado foi a rede neural de três camadas ocultas de cinco, dez e vinte neurônios, respectivamente, e as bandas de frequência três e quatro. Obteve-se uma média de erros de 1,70%, com desvio padrão de 0,79%, ambos muito baixos, demonstrando alta capacidade de classificação e alta estabilidade da rede.

O modelo 2 é testado com os valores médios das estatísticas de cada passada para a construção da matriz de confusão. Observa-se, na figura 26, que 100% das passadas referentes à ferramenta nova e à ferramenta de meia-vida foram corretamente classificadas. Porém, ao classificar as passadas referentes à ferramenta desgastada, 6,3% de erro é verificado na classificação, o que corresponde a dois falsos negativos para a condição de ferramenta desgastada. Esse tipo de erro de classificação é considerado o pior possível, pois a ferramenta já se encontra em estado inutilizável e foi classificada como ainda em vida útil. Assim, de 165 passadas, apenas duas foram classificadas incorretamente, o que prova a alta capacidade de classificação da rede. Observa-se, também, na figura 26, que o erro geral de classificação do modelo 2 foi de apenas 1,2%. Novamente, mesmo com uma porcentagem de erros baixíssima, a rede pode apresentar graves problemas, dependendo de como aconteceram esses erros. Dessa forma, caso um erro tenha ocorrido em uma passada próxima do limiar entre duas classes adjacentes, ele pode ser aceitável.

**Matriz de Confusão**

<b>Classificação Realizada</b>	N	20 12.1%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	MV	0 0.0%	113 68.5%	2 1.2%	98.3% 1.7%
	D	0 0.0%	0 0.0%	30 18.2%	100% 0.0%
		100% 0.0%	100% 0.0%	93.8% 6.3%	98.8% 1.2%
	N	MV	D	<b>Objetivo da Classificação</b>	

Figura 26 - Matriz de confusão modelo 2

Porém, se a rede errou em passadas ocorridas longe de qualquer mudança de estado, o erro se mostra como uma grande falha da rede. A figura 27 mostra as regiões de fronteiras do modelo 2. São observados dois pontos (na cor azul) pertencentes à classe de ferramenta desgastada em região da classe de meia-vida, conforme ilustram as setas na figura. No entanto, esses dois pontos estão localizados próximos aos limites das regiões de ferramenta desgastada e ferramenta com meia-vida, mostrando que não são erros graves.

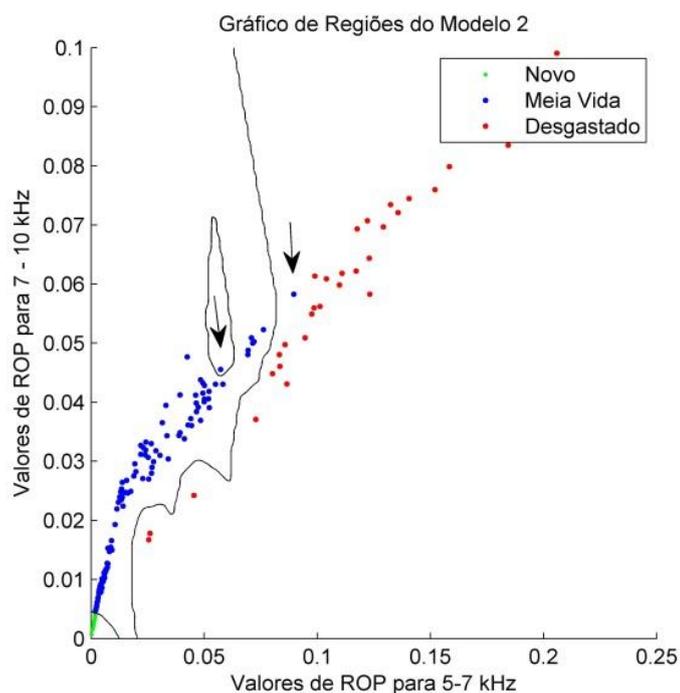


Figura 27 - Região de fronteiras Modelo 2

Apesar dos ótimos resultados obtidos em ambas as redes, a rede denominada modelo 2 obteve o erro geral de 1,2%, menor que a taxa de erro geral obtida na rede denominada modelo 1, de 4,2%. No entanto, o modelo 2 apresenta maior erro de classificação da classe “desgastado” com 6,3%, enquanto que o modelo 1 apresentou 3,1%.

Apesar da diferença entre as redes, isso não implica que um modelo seja significativamente superior a outro, pois ambos apresentam bons resultados.

### 4.3.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM OS DE MARTINS (2013)

Na dissertação de Martins (2013b), foi utilizado um sensor de emissão acústica para obtenção das estatísticas para o treinamento das redes. Na tabela 10, é apresentada a melhor rede do trabalho de (MARTINS, 2013b), com duas entradas da estatística RMS. A figura 28 mostra a matriz de confusão que apresenta um acerto de 97,6% e regiões de classificação para esse modelo, onde nota-se que os erros ocorrem próximos à região de fronteira.

Tabela 10 - Parâmetros dos modelos neurais Grupo 2 –RMS, adaptada (MARTINS, 2013b)

Parâmetro	Especificação
Nome	Modelo 7
Estrutura	2-5-15-5-3
Função de treinamento	Levenberg-Maquardt Backpropagation
Número Máximo de Épocas	2000
Bandas de Frequência	28-33 KHz 42-50KHz

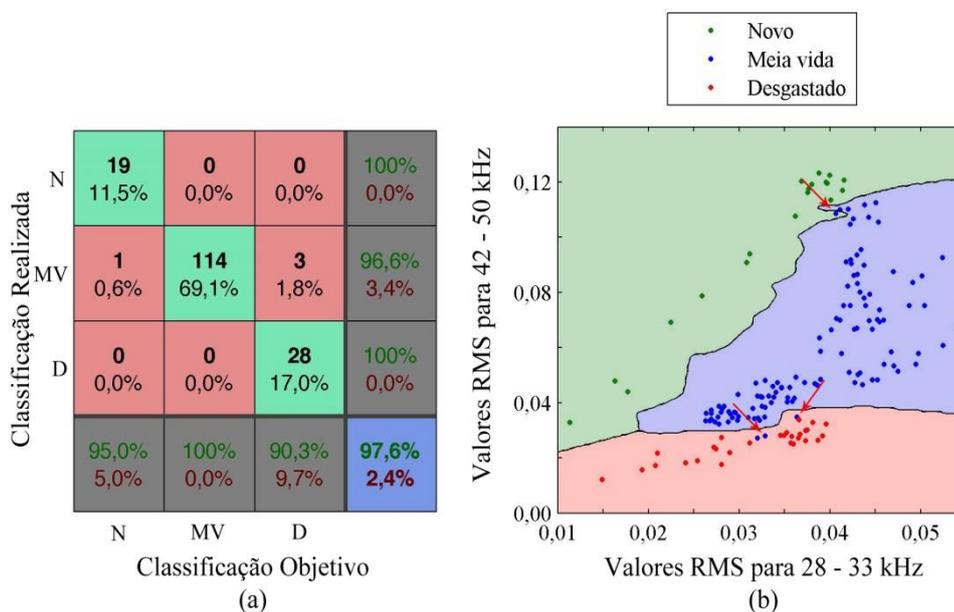


Figura 28 - Resultados Modelo 7. (a) Matriz de confusão; (b) Regiões de classificação (Martins, 2013)

Na tabela 11, pode-se observar a melhor rede do trabalho de (MARTINS, 2013b), com duas entradas da estatística ROP. Na figura 29, é apresentada a matriz de confusão com acerto de 97% e regiões de classificação para esse modelo, demonstrando, também, o erro próximo à região de fronteira.

Tabela 11 - Parâmetros dos modelos neurais Grupo 2 –ROP, adaptada (MARTINS, 2013)

Parâmetro	Especificação	
Nome	Modelo 10	
Estrutura	2-15-20-3	
Função de treinamento	Levenberg–Maquardt Backpropagation	
Número Máximo de Épocas	2000	
Bandas de Frequência	28-33 KHz	42-50 KHz

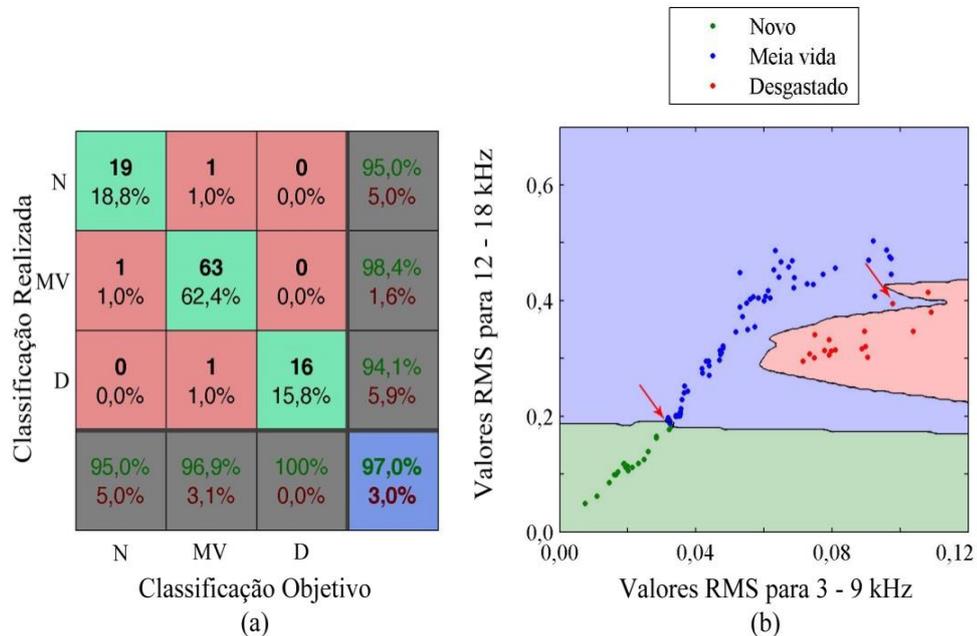


Figura 29 - Resultados Modelo10. (a) Matriz de confusão; (b) Regiões de classificação (Martins, 2013)

As tabelas 12 e 13 mostram um resumo das redes para ambas as estatísticas usadas neste trabalho e no trabalho de (MARTINS, 2013).

Tabela 12 - Resumo dos modelos 1 e 7 com estatística RMS

<b>Erro de Classificação (%)</b>	<b>Modelo 1(Vibração)</b>	<b>Modelo 7 (Emissão Acustica)</b>
Erro geral	4,2	2,4
Meia-vida como Desgastado	0	0
Meia-vida como novo	3,6	0
Desgastado como meia-vida	0,6	1,8

Tabela 13- Resumo dos modelos 2 e 10 com estatística ROP

<b>Erro de Classificação (%)</b>	<b>Modelo 2 (Vibração)</b>	<b>Modelo 10 (Emissão Acústica)</b>
Erro geral	1,2	3
Meia-vida como desgastado	0	1
Meia-vida como novo	0	1
Desgastado como meia-vida	1,2	0

Segundo as tabelas 12 e 13, todas as redes apresentam erros menores que 5%, indicando que todas são ótimas para serem implementadas. A rede que apresentou menor erro geral foi a rede denominada modelo 2, com 1,2%, cujos dados foram aquiritados com sensores de vibração e a estatística ROP. Apesar dela apresentar um erro de classificação de “Desgastado” como “Meia-vida”, isso ocorre próximo à região de fronteira de classificação, o que não implica um erro grave de classificação.

Para os modelos com a estatística RMS, o que apresentou menor erro geral de classificação (2,4 %) foi o modelo 7, do trabalho de (MARTINS, 2013), cujo sinal foi aquiritado com um sensor de emissão acústica. Por outro lado, o modelo deste trabalho, cujo

sinal foi o de vibração, teve um erro geral maior (4,2%), porém seu erro de classificação de “Desgastado” como “Meia-vida” foi de 0,6% contra 1,8 % do trabalho de (MARTINS, 2013).

A análise das tabelas 12 e 13 mostra que, independente dos sinais adquiridos por sensores de vibração ou emissão acústica, os modelos apresentaram bons resultados, tendo pequenas vantagens e desvantagens entre eles. Por outro lado, quando se analisa as frequências envolvidas dos sinais e facilidade de implementação desses modelos por *hardware*, observa-se que o sinal de vibração é mais atraente, pois sua maior frequência é de 10 kHz, enquanto os modelos com EA possuem menor frequência: 28 kHz.

## CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO

O desgaste dos diamantes foi acompanhado realizando-se três repetições do ensaio. Os sinais foram adquiridos por meio de sinais provenientes de sensores de vibração.

Foram gerados espectros de frequência que possibilitaram correlacionar as características de desgaste ao sinal de vibração. Bandas de frequência que apresentavam características interessantes ao estudo foram selecionadas e, em seguida, foram calculadas as estatísticas RMS e ROP obtidas para o sinal nessas bandas. As curvas resultantes geraram entradas para as redes neurais.

Ambos os modelos apresentaram resultados satisfatórios, sendo que o modelo 2 apresentou melhor resultado comparativamente, pois, apesar de possuir um número maior de falsos negativos, eles estão mais próximos da região de fronteira.

Pelos resultados obtidos, concluímos que os sensores de vibração tem um ótimo potencial para monitorar o desgaste da ferramenta dressador.

Quando os modelos deste trabalho são comparados com os resultados do trabalho de (MARTINS et al. 2013), o qual usou o sinal de emissão acústica, um dos resultados se mostrou melhor, porém o outro se mostrou pior. Isto é, enquanto o modelo 1 mostrou-se capaz de classificar corretamente 95,8% das passadas quando o sinal de vibração foi usado, no trabalho de Martins et al., o resultado foi de 97,6% de passadas corretamente classificadas. Por outro lado, o modelo 2 apresentou um resultado de 98,3% de acertos, valor melhor do que os 97,6% obtidos por (MARTINS, 2013) por um modelo equivalente. Esses valores mostram o potencial de utilização dos sensores de vibração para monitorar o desgaste do dressador.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGUS, J.C. & HAYMAN, C.C., 1995. Low-pressure, metastable growth of diamond and “diamondlike” phases. *Science (New York, N.Y.)*, 241(4868), pp.913–21.
- BARANAUSKAS, V., 2000. O futuro brilhante dos diamantes sintéticos. *Ciência Hoje*, pp.40–46.
- BIANCHI, C.E. et al., 1997. Análise do comportamento de rebolos convencionais na retificação de aços frágeis e ducteis. *Journal of the Brazilian society of Mechanical Sciences*, XIX(September).
- BILOSOVÁ, A. & BILOS, J., 2012. Vibration Diagnostics. *European Social Fund*.
- BOYLESTAD, R.L., 2004. Introdução à análise de circuitos.
- CALLISTER, W.D.J., 2002. *Fundamentals of Materials Science and Engineering An Interactive*, John Wiley & Sons Inc.
- CHITODE, J.S., 2011. *Digital Signal Processing*, Tecnical Publications Pune.
- DIMLA, D.E., 2002. The Correlation of Vibration Signal Features to Cutting Tool Wear in a Metal Turning Operation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19(10), pp.705–713.
- DINIZ, A., MARCONDES, F.C. & COPPINI, N.L., 2003. *Tecnologia de usinagem dos materiais* 4 ed., Campinas: Artiliber Editora Ltda.
- DYMINSKI, A.S., 2000. *Análise de problemas geotécnico através de redes neurais*. PUC Rio de Janeiro.
- EDMINISTER, J., 1991. *Circuitos elétricos*, Makron.
- ENGAÑA, I. et al., 2006. Towards intelligent Dressing. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, (June), pp.38–43.
- FUSSE, R.Y. et al., 2004. Erros geométricos na retificação do aço SAE HVN-3. *Revista Máquinas & Metais*, pp.150–163.
- GRACIO, J.J., FAN, Q.H. & MADALENO, J.C., 2010. Diamond growth by chemical vapour deposition. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43(37), p.374017.
- GRAF, W., 2004. Cylindrical Grinding. *WST Winterthur Schleiftechnik*, p.84.
- HABRAT, W., BATSCH, A. & PORZYCKI, J., 2005. Monitoring of the single-point diamond dresser wear. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, V(1).

- HARINKAR, S.P. et al., 2006. Prediction of solidification microstructures during laser dressing of alumina-based grinding wheel material. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(8), pp.1642–1649.
- HARTMANN, F.R., 2002. *Redes Neurais, Conceitos Básicos e Análise*, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS - RS.
- HAYKIN, S., 1999. *Neural networks: a comprehensive foundation* Bookman, ed., Pearson Prentice Hall.
- HEINZEL, C. & RICKENS, K., 2009. Engineered wheels for grinding of optical glass. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(1), pp.315–318.
- HUANG, S.H., 1994. Artificial neural networks in manufacturing: concepts, applications, and perspectives. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A*, 17(2), pp.212–228.
- ISSAM, A.M., 2003. Drilling wear detection and classification using vibration signals and artificial neural network. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(7), pp.707–720.
- JACKSON, M.J., ROBINSON, G.M. & CHEN, X., 2007. Laser Surface Preparation of Vitrified Grinding Wheels. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 15(April), pp.247–250.
- KING, R. & HAHN, R., 1992. Handbook of Modern Grinding Technology (Chapman and Hall Advanced Industrial Technology Series). *New York: Chapman And Hall*.
- KOIZUMI, S. et al., 1997. Growth and characterization of phosphorous doped homoepitaxial diamond thin films. *Applied Physics Letters*, 71(8), p.1065.
- KWAK, J.S. & HA, M.K., 2004. Neural network approach for diagnosis of grinding operation by acoustic emission and power signals. *Journal of Material Processing Technology*, p.v. 147, n. 1, p. 65–71.
- LEVENBERG, K., 1944. A Method for the Solution of Certain Non-linear Problems in Least Squares. *Quarterly of Applied Mathematics*, pp.164–168.
- LIANG, S.Y., HECKER, R.L. & LANDERS, R.G., 2004. Machining Process Monitoring and Control: The State-of-the-Art. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126(2), p.297.
- LIAO, W.T. et al., 2007. A wavelet-based methodology for grinding wheel condition monitoring. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(3-4), pp.580–592.
- LIN, S.Y., LIU, Y.C. & HUANG, C.W., 2008. An investigation of surface grinding characteristics for titanium alloy with CBN wheel. *Key Engineering Materials* *Key Engineering Materials*, 364-366, pp.237–242.

- MALKIN, S., 1989. *Grinding Technology teory and applications of machining with abrasives*, Industrial Press.
- MARINESCU, I.D., 2007. *Handbook of machining with grinding wheels*, CRP Press.
- MARINESCU, I.D., 2004. *Tribology of Abrasive Machining Processes*, Elsevier.
- MARTINS, C. et al., 2013. Tool Condition Monitoring of Single-Point Dresser Using Acoustic Emission and Neural Networks Models. *IEEE Trans Instrum Meas*, pp.1–13.
- MARTINS, C.b 2013. Classificação de níveis de desgaste de dressadores de ponta única utilizando sinais de emissão acústica e redes neurais artificiais. Dissertação de mestrado, UNESP Bauru, 2013
- MOBLEY, K.R., 1999. *Introduction to Vibration*, Hardback.
- MORETTIN, L.G., 1999. *Estatística Básica - Probabilidade e Inferencia*, Makron.
- MORGAN, M.N. et al., 2008. Optimisation of fluid application in grinding. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*.
- MUKHERJEE, I. & ROUTROY, S., 2012. Comparing the performance of neural networks developed by using Levenberg–Marquardt and Quasi-Newton with the gradient descent algorithm for modelling a multiple response grinding process. *Expert Systems with Applications*, 39(3), pp.2397–2407.
- MUÑOZ, L.A.B., 2009. Learning in Feed-Forward Artificial Neural Networks II. *Encyclopedia of Artificial Intelligence*, pp.1004–1011.
- NALON, J.A., 2009. *Processamento Digital de Sinais*, LTC.
- NEGNEVITSKY, M., 2005. *Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems*, Harlow: Addison-Wesley.
- NILSON, J.W. & RIEDEL, S.A., 2009. *Circuitos Eletricos*.
- OGATA, K., 1995. *Discrete Time Control Systems*.
- OLIVEIRA, J., BIANCHI, E.C. & SOUZA, G., 1992. O desempenho de rebolos pode ser controlado pela dressagem.
- PEDRAM, A., McCALPIN, J.D. & GERSTLAUER, A., 2014. A Highly Efficient Multicore Floating-Point FFT Architecture Based on Hybrid Linear Algebra/FFT Cores. *Journal of Signal Processing Systems*, 77(1-2), pp.169–190. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s11265-014-0896-x> [Accessed September 11, 2014].
- RAO, S.S., 2009. *Vibrações Mecânicas* 4 Ed., Pearson Education do Brasil.

- REN, Y.H., ZHANG, B. & ZHOU, Z.X., 2009. Specific energy in grinding of tungsten carbides of various grain sizes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(1), pp.299–302.
- SALEH, T., BISHWAS, I. & RAHMAN, M., 2009. Efficient dressing of the wheel in ELID grinding by controllable voltage with force feed back. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46(1-4), pp.123–130.
- SALMON, S.C., 1992. *Modern Grinding Process Technology*, Hardcover.
- SCHUHLLI, L.A., 2007. *Monitoramento de operações de retificação usando fusão de sensores*. USP-São Carlos.
- SILVA, I.N., SPATTI, D.H. & FLAUZINO, R.A., 2010. Redes neurais artificiais, para engenharia e ciências aplicadas.
- TONSHOFF, H.K., FRIEMUTH, T. & BECKER, J.C., 2002. Process Monitoring in Grinding. In *Institute of Production Engineering and Machine Tools*.
- WANG, Z. et al., 2000. Neural network detection of grinding burn from acoustic emission. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, pp.283–308.
- WEBSTER, J.A., 2008. Directing coolant into the right place, at the right speed, in the right quantity. *Cool-Grind Technologies*, 60(2).
- YANG, J.-F. & CHEN, F.-K., 2002. Recursive discrete Fourier transform with unified IIR filter structures. , 82, pp.31–41.